



Universidad
LOYOLA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Grado en Ingeniería de las tecnologías industriales

Trabajo Fin de Grado

Fatiga por efecto aeroelástico de
desprendimiento de vórtices en
postes tubulares de gran altura

Begoña Luna García

Tutor: Fernando Medina Reguera

Sevilla, junio de 2025

*“Sé firme en tus actitudes y perseverante en tu ideal,
pero sé paciente, no pretendiendo que todo
llegue de inmediato”*

M. Gandhi

*A mi madre, por haber creído siempre en mí. Sin su
confianza, guía y cariño, no sería la persona
que soy hoy.*

*A mi padre, por transmitirme su pasión por la
ingeniería estructural; eres y serás mi ejemplo
a seguir.*

*A mis hermanas, por hacer este camino mucho más
llevadero y divertido.*

*A Carlos, por su apoyo incondicional y por estar en
todo momento a mi lado.*

*A mi tutor, por motivarme a desarrollar un proyecto
que ni yo creía capaz de afrontar.*

Resumen

La ingeniería estructural ha avanzado de manera constante, permitiendo el desarrollo de soluciones cada vez más innovadoras y eficaces. Esta evolución ha facilitado el diseño de estructuras más esbeltas, ligeras y optimizadas, capaces de responder a las crecientes exigencias funcionales y arquitectónicas. Sin embargo, estos progresos también han introducido nuevos desafíos, entre los cuales destaca la fatiga estructural provocada por cargas cíclicas, un fenómeno de carácter acumulativo cuya detección temprana resulta especialmente compleja.

En estructuras expuestas a cargas variables (como el viento, el tráfico o las vibraciones ambientales), la fatiga representa un mecanismo de degradación que puede desarrollarse incluso cuando las tensiones permanecen por debajo del límite elástico del material. La repetición de estas solicitudes a lo largo del tiempo puede originar microfisuras que, al propagarse, comprometen gravemente la capacidad resistente del sistema. Al tratarse de un proceso lento y sin señales evidentes en sus primeras etapas, constituye una amenaza difícil de detectar y a menudo subestimada.

La interacción entre el flujo de aire y elementos estructurales de geometría simple, como postes cilíndricos verticales, puede desencadenar fenómenos aeroelásticos de relevancia. Entre ellos, el desprendimiento de vórtices (vortex shedding) destaca por su capacidad para inducir vibraciones transversales cíclicas. Aunque estas oscilaciones puedan parecer inofensivas desde el punto de vista estático, su naturaleza repetitiva puede generar efectos acumulativos significativos.

El desarrollo de herramientas de simulación estructural como RFEM, junto con el avance en normativas como el Eurocódigo 1, Parte 1-4, permite actualmente evaluar con mayor precisión los efectos dinámicos del viento sobre estructuras esbeltas. Estas herramientas posibilitan el análisis del comportamiento frente a cargas aerodinámicas, la estimación del daño por fatiga y la predicción de la vida útil, incorporando variables como el tipo de viento, la frecuencia de vibración y las propiedades del material.

Este Trabajo Fin de Grado analiza el fenómeno de fatiga estructural inducida por desprendimiento de vórtices en postes de iluminación, aplicando criterios normativos y herramientas de modelado numérico. Se simulará la respuesta dinámica de la estructura y se estimará el daño acumulado a lo largo del tiempo. El objetivo es no solo profundizar en la comprensión de este fenómeno, sino también contribuir a un diseño estructural más seguro, eficiente y duradero, acorde con las exigencias actuales de sostenibilidad y fiabilidad.

Palabras claves: Fatiga estructural, Desprendimiento de vórtices, Vibraciones inducidas por viento, Estructuras esbeltas, Simulación estructural, Eurocódigo 1.



Abstract

Structural engineering has progressed steadily, enabling the development of increasingly innovative and efficient solutions. This evolution has facilitated the design of more slender, lightweight, and optimized structures capable of meeting growing functional and architectural demands. However, these advancements have also introduced new challenges, among which structural fatigue caused by cyclic loading stands out, a cumulative phenomenon whose early detection is particularly complex.

In structures exposed to variable loads (such as wind, traffic, or ambient vibrations) fatigue represents a degradation mechanism that may develop even when stress levels remain below the material's elastic limit. The repeated application of such loads can initiate microcracks, which propagate over time and significantly reduce the structural capacity. As a slow and initially silent process, fatigue is difficult to detect in early stages and is often underestimated.

The interaction between airflow and structural elements with simple geometries, such as vertical circular cylinders, can trigger aeroelastic phenomena of notable importance. Among them, vortex shedding stands out due to its ability to induce cyclic transverse vibrations. Although these oscillations may seem negligible from a static perspective, their repetitive nature can lead to significant cumulative effects.

The development of structural simulation tools such as RFEM, together with the evolution of design standards like Eurocode 1, Part 1-4, now enables a more accurate assessment of the dynamic effects of wind on slender structures. These tools allow for detailed analysis of structural behavior under aerodynamic loads, estimation of fatigue damage, and prediction of service life, incorporating variables such as wind characteristics, vibration frequencies, and material properties.

This bachelor's Thesis focuses on the study of structural fatigue induced by vortex shedding in lighting poles, using normative criteria and numerical modeling tools. The dynamic response of the structure will be simulated, and the accumulated fatigue damage over time will be estimated. The aim is not only to deepen the understanding of this phenomenon, but also to contribute to a safer, more efficient, and durable structural design, aligned with current demands for sustainability and reliability.

Keywords: Structural fatigue, Vortex shedding, Wind-induced vibrations, slender structures, Structural simulation, Eurocode 1.

índice

.....	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE.....	5
1. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	7
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN	9
2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2.3 OBJETIVOS.....	11
3. NORMATIVA Y DESARROLLO	13
3.1 EFECTOS DEL VIENTO EN ESTRUCTURAS.....	13
3.1.1 TÉRMINOS NORMATIVA	14
3.1.1.1 Velocidad y presión del viento	14
3.1.1.2 Variación con la altura.....	16
3.1.1.3 Rugosidad del terreno	17
3.1.1.4 Orografía	18
3.1.1.5 Dirección del viento	18
3.1.1.6 Turbulencias.....	19
3.1.1.6.1 Coeficiente de exposición	21
3.1.1.7 Velocidad pico y presión correspondientes	22
3.1.2 ACCIONES Y EFECTOS DINÁMICOS DEL VIENTO.....	23
3.1.2.1 Coeficiente de fuerza	26
3.1.3 DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	30
3.1.3.1 Velocidad crítica del viento	31
3.1.3.2 Número de Strouhal.....	32
3.1.3.3 Número de Scruton	33
3.1.3.4 Número de Reynolds.....	34
3.1.3.5 Acción debida al desprendimiento de vórtices	35
3.1.3.6 Cálculo de la amplitud del viento transversal	35
3.1.3.7 Número de ciclos de carga	41
3.2 CÁLCULO DINÁMICO	42
3.2.1 VIBRACIÓN LIBRE	43
3.2.1.1 Vibración libre no amortiguada.....	43
3.2.1.2 Vibración libre viscosamente amortiguada	46
3.2.2 VIBRACIÓN FORZADA.....	50
3.2.2.1 Vibración armónica de sistemas no amortiguados	50
3.2.2.2 Vibración armónica con amortiguamiento viscoso	52



3.3	FATIGA	58
3.3.1	TRATAMIENTO DE LA FATIGA EN LA NORMATIVA	61
3.3.1.1	Términos y condiciones	61
3.3.1.2	Requisitos y métodos básicos	63
3.3.1.3	Método de análisis	63
3.3.1.4	Tensiones producidas por acciones de fatiga	66
3.3.1.5	Cálculo de tensiones	66
3.3.1.6	Resistencia a Fatiga	69
3.3.2	FATIGA DESDE EL ENFOQUE DE LA MECÁNICA DE FRACTURA	73
3.3.2.1	Fatiga de bajo y alto número de ciclos	74
3.3.2.2	Modelos alternativos a Miner: Corten-Dolan y Haibach	74
3.3.2.3	Materiales avanzados y tratamientos contra fatiga	75
3.3.2.4	Evaluación experimental y monitoreo estructural	76
3.3.3	COMPROBACIÓN A FATIGA SEGÚN NORMATIVA	76
4	SIMULACIÓN EN PROGRAMA RFEM	78
4.1	RFEM	78
4.2	POSTE DE ILUMINACIÓN	80
4.2.1	CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO MÁXIMO POR DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	84
4.2.2	ANÁLISIS DINÁMICO	92
4.2.3	CÁLCULO DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA	106
5	CONCLUSIONES	114
5.1	RESUMEN DE HALLAZGOS	114
5.2	CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	115
5.3	RELEVANCIA Y APORTACIONES	117
5.4	LIMITACIONES DEL ESTUDIO	118
5.5	SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	118
6	BIBLIOGRAFÍA	120



1. Glosario de términos

A continuación, se presenta un glosario con los términos más relevantes utilizados en el presente Trabajo Fin de Grado, con el fin de facilitar su comprensión.

- **Amortiguamiento estructural (δ):** Capacidad de una estructura para disipar la energía de las vibraciones, normalmente cuantificada como el decremento logarítmico.
- **Carga cuasiestática:** Carga que varía lentamente con el tiempo y que puede ser tratada como si fuera estática en muchos casos prácticos.
- **Carga dinámica:** Fuerza que varía con el tiempo y provoca movimientos oscilatorios en una estructura; en este trabajo se enfoca en las inducidas por el viento.
- **Coeficiente de exposición:** Factor que considera el efecto combinado de la rugosidad y las características del relieve en la acción del viento sobre estructuras.
- **Coeficiente de fuerza (c_f):** Valor que permite transformar presiones de viento en fuerzas estructurales sobre un objeto, en función de la geometría y textura superficial.
- **Coeficiente de presión (c_p):** Indica la presión del viento ejercida sobre una superficie estructural, ya sea interna o externa.
- **Coeficiente topográfico (C_0):** Factor corrector que ajusta la velocidad del viento en función de la topografía del terreno (pendientes, colinas, etc.).
- **Curva S-N:** Relación entre el número de ciclos de carga (N) y el nivel de tensión (S) a partir del cual se espera que ocurra la rotura por fatiga.
- **Esbeltez (λ):** Proporción entre la altura y el diámetro de un poste o elemento estructural. A mayor esbeltez, mayor sensibilidad a la acción dinámica del viento.
- **Estado de servicio:** Condiciones normales bajo las que una estructura debe funcionar a lo largo de su vida útil, sin presentar fallo estructural.
- **Excitación armónica:** Tipo de carga periódica (como vibraciones inducidas por el viento) que se aplica con una frecuencia específica.
- **Fatiga estructural:** Proceso de degradación de un material sometido a esfuerzos repetitivos, que puede originar fisuras y eventualmente llevar al fallo estructural.
- **Flameo aerodinámico:** Fenómeno de inestabilidad aeroelástica donde el viento transfiere energía a la estructura, incrementando las vibraciones de forma continua.
- **Lock-in (bloqueo de frecuencia):** Condición en la que la frecuencia del flujo de viento coincide con la frecuencia natural de la estructura, manteniendo la resonancia en un amplio rango de velocidades.
- **Longitud de correlación:** Distancia a lo largo de la cual las fuerzas inducidas por el viento están correlacionadas, usada para calcular efectos aeroelásticos.
- **Método armónico:** Enfoque determinista y conservador para estimar vibraciones estructurales provocadas por el desprendimiento de vórtices.
- **Método espectral:** Método estadístico para analizar vibraciones estructurales por viento turbulento, considerando la variabilidad del flujo.
- **Método de Miner:** Modelo clásico de acumulación de daño por fatiga que supone que cada ciclo de carga consume una fracción de la vida útil total.
- **Miner, Corten-Dolan, Haibach:** Modelos de acumulación de daño por fatiga, cada uno con sus propios supuestos y aplicaciones.



- **Número de Reynolds (Re):** Parámetro adimensional que indica el régimen de flujo alrededor de un cuerpo (laminar, crítico o turbulento), influye en el comportamiento del desprendimiento de vórtices.
- **Número de Scruton:** Parámetro que combina amortiguamiento estructural, masa y características del flujo para evaluar la susceptibilidad de una estructura a vibraciones inducidas por el viento.
- **Número de Strouhal (St):** Número adimensional que relaciona la frecuencia de desprendimiento de vórtices con la velocidad del viento y la dimensión característica del cuerpo.
- **Poste de iluminación:** Estructura esbelta y alta, generalmente tubular, sometida a la acción del viento, especialmente en recintos deportivos.
- **Presión del viento:** Fuerza ejercida por el viento sobre una superficie, determinada por su velocidad, la altura y las condiciones del terreno.
- **Relación de solidez (ϕ):** Proporción entre el área proyectada total de los elementos estructurales y el área envolvente global; influye en el efecto del viento.
- **Resonancia:** Condición en la que la frecuencia de una fuerza externa coincide con una de las frecuencias naturales de la estructura, amplificando sus oscilaciones.
- **Rugosidad del terreno:** Característica del suelo que afecta la forma en que el viento se comporta en función de la altura. Se clasifica en categorías.
- **Tensión nominal:** Enfoque simplificado para calcular tensiones en elementos estructurales, usado en algunos métodos de análisis de fatiga.
- **Velocidad crítica del viento:** Velocidad del viento a la que la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia natural de la estructura.
- **Vida útil estructural:** Tiempo estimado durante el cual una estructura puede operar de manera segura antes de que se requiera su rehabilitación o sustitución.
- **Vibración forzada:** Oscilación que se produce cuando una estructura es sometida a una carga externa variable (como el viento).
- **Vibración libre:** Oscilación natural de una estructura sin influencia de fuerzas externas, determinada únicamente por sus propiedades físicas.
- **Vortex Shedding :** Fenómeno aeroelástico en el que se generan vórtices alternados a cada lado de un cuerpo cilíndrico expuesto al flujo de viento, provocando vibraciones transversales.
- **RFEM:** Software de análisis estructural utilizado para simular cargas, vibraciones y comportamiento dinámico de estructuras.



2. Introducción

2.1 Contexto y motivación

La fatiga estructural es uno de los principales factores que condicionan la vida útil de las estructuras metálicas, especialmente en aquellas sometidas a cargas cíclicas o repetitivas, como sucede en puentes, maquinaria industrial, aeronaves o, como en este caso, postes de iluminación de gran altura. A diferencia de los fallos producidos por sobrecargas estáticas, la fatiga se manifiesta como un proceso de deterioro progresivo, en el que las micro fisuras generadas por esfuerzos repetidos se propagan con el tiempo hasta provocar fallos estructurales significativos o incluso catastróficos.

En el ámbito de la ingeniería estructural moderna, este fenómeno ha cobrado gran relevancia, ya que muchas de las estructuras actuales presentan características que aumentan su vulnerabilidad frente a la fatiga: mayor esbeltez, uso de materiales más ligeros y exposición continua a acciones variables, como el viento. Estas condiciones exigen un enfoque de diseño y análisis que no solo garantice la resistencia inmediata, sino también la durabilidad y fiabilidad a largo plazo.

Los postes de iluminación instalados en estadios deportivos representan un caso claro de esta problemática. Estas estructuras, por su forma cilíndrica, considerable altura y su ubicación en espacios abiertos, están constantemente expuestas a la acción del viento. Esta interacción puede dar lugar a fenómenos aeroelásticos, como el desprendimiento de vórtices, que genera vibraciones transversales en la estructura. Aunque estas vibraciones no representen un peligro desde un punto de vista estático, sí generan tensiones cíclicas que aceleran el daño por fatiga. A largo plazo, esto puede comprometer su integridad estructural, afectando directamente a la seguridad y funcionalidad del recinto.

El tratamiento tradicional del viento como una carga estática o cuasiestática resulta insuficiente en estos casos. En estructuras esbeltas, el viento actúa como una excitación dinámica, capaz de inducir resonancias, incrementar las deformaciones y acelerar el deterioro por fatiga. Por ello, se hace necesario recurrir a herramientas de análisis avanzado, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, que permitan modelar adecuadamente la respuesta dinámica de la estructura frente a este tipo de solicitudes.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Grado se centra en el análisis del daño por fatiga inducido por viento en postes de iluminación, con especial atención a los efectos del desprendimiento de vórtices.

La motivación de este trabajo surge, por tanto, de la necesidad de comprender y cuantificar los efectos del viento sobre estructuras esbeltas de grandes dimensiones, considerando la influencia de fenómenos aeroelásticos en la generación de tensiones cíclicas. Este análisis no solo responde a una inquietud técnica creciente dentro de la ingeniería estructural, sino que adquiere especial relevancia por el riesgo potencial que supondría un fallo por fatiga en una

estructura de esta magnitud, especialmente en un entorno que alberga a miles de personas. Las consecuencias serían graves en términos de seguridad, económicas y podrían afectar de forma significativa a la confianza pública.

La capacidad de prever el comportamiento de estas estructuras bajo cargas dinámicas de viento, de cuantificar el daño acumulado y de estimar con precisión su vida útil residual, se convierte en un pilar esencial para una ingeniería estructural preventiva y segura. Este estudio se plantea, por tanto, como una contribución técnica relevante para la mejora de los estándares de diseño estructural, así como para garantizar la operatividad y durabilidad de elementos funcionales tan representativos como los postes de iluminación en los estadios modernos

2.2 Planteamiento del problema

La seguridad estructural no se limita únicamente a la capacidad de una estructura para resistir cargas máximas, sino que también depende de su comportamiento frente a acciones repetitivas que, a lo largo del tiempo, pueden generar un deterioro acumulativo e irreversible. Este aspecto cobra especial relevancia en estructuras esbeltas expuestas a la intemperie, como los postes de iluminación de gran altura, cuya geometría y condiciones de servicio las hacen vulnerables a fenómenos dinámicos que no siempre son considerados con suficiente detalle en el diseño convencional.

Uno de los mecanismos más críticos en este tipo de estructuras es el desprendimiento alterno de vórtices, un fenómeno aerodinámico que se produce cuando el viento incide sobre cuerpos cilíndricos y genera fuerzas oscilantes en dirección transversal al flujo principal. Si la frecuencia de estas fuerzas coincide con alguna de las frecuencias naturales de la estructura, puede producirse una condición de resonancia que amplifica significativamente las oscilaciones y, con ello, el número de ciclos de carga. Este efecto resulta especialmente preocupante desde el punto de vista de la fatiga estructural, ya que incrementa la acumulación de daño en el material, favoreciendo la aparición de fisuras, pérdida de rigidez y, en casos extremos, colapsos estructurales.



Ilustración 1. Modos de vibración de un poste de iluminación sometido a carga externa

El problema no radica únicamente en la existencia de estas vibraciones, sino en la dificultad para predecir con exactitud su magnitud, frecuencia y consecuencias acumulativas. Los métodos tradicionales de análisis estructural, basados principalmente en modelos estáticos o cuasiestáticos, no contemplan de forma adecuada el efecto combinado de la acción dinámica del viento y el daño por fatiga, especialmente en estructuras tan específicas como los postes tubulares de gran altura. A ello se suma la variabilidad del viento real, que depende de factores como la altura sobre el terreno, la rugosidad del entorno, la presencia de obstáculos o el régimen de turbulencia, lo que complica aún más el análisis y el diseño preventivo.

Ante esta situación, el presente trabajo plantea un enfoque integral para el estudio de la fatiga inducida por viento en postes de iluminación, combinando el uso de herramientas de simulación numérica avanzadas con los criterios normativos del Eurocódigo. Se pretende analizar la interacción fluido-estructura y evaluar con precisión los niveles de daño acumulado por fatiga, con el fin de establecer medidas de diseño, mantenimiento y prevención que permitan mejorar la seguridad y la durabilidad de estas estructuras.

El objetivo último es reducir la brecha existente entre el comportamiento teórico y la respuesta real de los postes de iluminación ante solicitudes dinámicas, proporcionando un modelo predictivo fiable y aplicable en condiciones reales, que permita optimizar tanto el diseño como la planificación de intervenciones a lo largo del ciclo de vida de la estructura.

2.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar el fenómeno de fatiga inducida por el desprendimiento de vórtices en postes de iluminación de gran altura y cuantificar su impacto en la vida útil de la estructura, mediante una metodología de simulación estructural avanzada y conforme a la normativa vigente.

Objetivos específicos:

- **Revisar y aplicar el marco normativo aplicable, en particular el Eurocódigo 1, Parte 1-4 (UNE-EN 1991-1-4), para la evaluación de cargas de viento sobre estructuras esbeltas.**
- **Estudiar el comportamiento dinámico de los postes de iluminación frente a acciones cíclicas inducidas por el viento,** identificando las condiciones de resonancia más críticas.
- **Simular mediante software estructural (RFEM)** la respuesta de la estructura ante cargas aerodinámicas, integrando modelos de vibración libre y forzada para determinar la amplitud y frecuencia de las oscilaciones.



- **Aplicar modelos de fatiga basados en curvas S-N** para calcular el daño acumulado a lo largo del tiempo y estimar la vida útil de la estructura bajo diferentes escenarios de carga.
- **Comparar los resultados obtenidos con casos reales** o ensayos experimentales disponibles en la literatura técnica, con el fin de validar el modelo y sus predicciones.



3. Normativa y desarrollo

3.1 Efectos del viento en estructuras

El viento es un fenómeno atmosférico altamente dinámico que ejerce cargas variables sobre las estructuras. A diferencia de otras cargas ambientales, como la gravedad, que es constante, la acción del viento presenta fluctuaciones en su velocidad, dirección e intensidad a lo largo del tiempo. Estas fluctuaciones generan cargas cíclicas sobre las estructuras, lo que induce oscilaciones que pueden comprometer su estabilidad y resistencia.

En el caso de estructuras esbeltas y de gran altura, como los postes de iluminación, las cargas cíclicas del viento pueden ser particularmente críticas. Debido a su forma y exposición, estas estructuras son susceptibles a fenómenos aeroelásticos que generan esfuerzos repetitivos en sus materiales.

Como cualquier fluido, cuando el viento libre es interrumpido por un objeto fijo, su flujo se desvía para rodearlo. Estas desviaciones de flujo generan presiones sobre el objeto, entre otras fuerzas, como se puede observar en la figura siguiente.

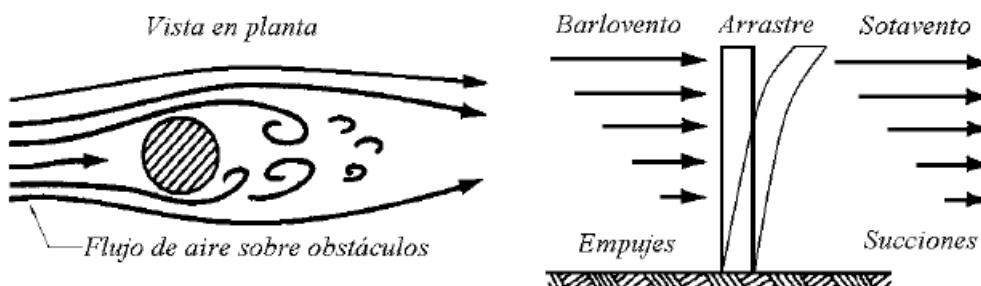


Ilustración 2. Flujo de aire sobre obstáculos fijos

(Scruton y Flint, 1964)

Las partículas de aire impactan directamente sobre la cara expuesta al flujo del viento, la cual se opone a su libre circulación, conocida como la cara de barlovento, ejerciendo una fuerza de empuje.

En la cara opuesta, denominada sotavento, las estelas del flujo se separan del objeto, generando una fuerza de succión. Estos dos efectos se combinan, produciendo una fuerza de arrastre sobre el objeto. En las caras laterales, se presenta una distribución de presión que varía entre empuje y succión, dependiendo de la geometría de las superficies expuestas.

El viento puede inducir deformaciones, vibraciones e incluso daños estructurales si no se considera adecuadamente en el diseño. Este fenómeno representa un desafío particular en la construcción de rascacielos o edificios de gran altura. En estos casos, el riesgo asociado a los efectos del viento aumenta exponencialmente, lo que convierte a este aspecto en un factor

crucial para evitar posibles desastres. Para mitigar este riesgo, el análisis dinámico estructural es fundamental.

El efecto del viento sobre la estructura, es decir, la respuesta de esta depende del tamaño, la forma y las propiedades dinámicas de la estructura. La normativa aborda la respuesta dinámica a las turbulencias generadas en la dirección del viento, así como la resonancia con las vibraciones en esta misma dirección, específicamente en un modo fundamental de flexión de signo constante. Asimismo, debe considerarse la respuesta aeroelástica de la estructura en el caso de elementos flexibles, tales como cables, mástiles, chimeneas y puentes.

A continuación, abordaremos algunas definiciones y aspectos relevantes según el Eurcódigo 1:

- **Velocidad básica fundamental del viento.** Es la velocidad media del viento durante 10 min con una probabilidad anual de ser excedida de 0'02, independientemente de su dirección, medida a una altura de 10 m sobre un terreno plano abierto y teniendo en cuenta los efectos de la altitud.
- **Velocidad básica del viento.** Es la velocidad básica fundamental del viento modificada para tener en cuenta la dirección del viento considerado y la estación.
- **Velocidad media del viento.** Es la velocidad básica del viento modificada para tener en cuenta el efecto de la rugosidad del terreno y su orografía.
- **Coeficiente de presión.** Los coeficientes de presión externa proporcionan el efecto del viento sobre las superficies externas de los edificios, los coeficientes de presión interna proporcionan el efecto del viento sobre las superficies internas de los edificios.
- **Coeficiente de fuerza.** Los coeficientes de fuerza proporcionan el efecto general del viento sobre una estructura, elemento estructural o componente, considerado en su totalidad, incluyendo la fricción, siempre y cuando no se excluya específicamente.

3.1.1 Términos normativa

3.1.1.1 Velocidad y presión del viento

La velocidad del viento es un parámetro fundamental en la ingeniería estructural, ya que determina la magnitud de las cargas aerodinámicas que actúan sobre edificaciones, infraestructuras y otros elementos expuestos a condiciones meteorológicas adversas. En el contexto del diseño estructural, se define la velocidad básica del viento como el valor de referencia utilizado en normativas para estimar la presión del viento y evaluar la seguridad de las estructuras frente a cargas dinámicas inducidas por el viento.

Se evaluarán considerando la normativa vigente, en particular el Eurocódigo 1, parte 1-4 (UNE-EN_1991_1_4_2018).

La velocidad media del viento, v_m , debería determinarse a partir de la velocidad básica del viento v_b , que depende del clima del lugar, y de la variación de la altura del viento determinada a partir de la rugosidad del terreno y la orografía, tal como indicaremos más adelante.

Según este apartado de la normativa, el valor de la velocidad básica del viento v_b se debe determinar con la siguiente expresión.

$$v_b = c_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \quad (3.1.1)$$

Donde,

v_b Velocidad básica del viento según dirección y época del año, medida a 10 m sobre terreno de categoría II

$v_{b,0}$ Es el valor fundamental de la velocidad básica del viento

C_{dir} Es el factor direccional, véase nota 2

C_{season} Es el factor estacional, véase la nota 3

El valor fundamental de la velocidad básica del viento, $v_{b,0}$, es la velocidad característica media del viento medida durante 10 min, independientemente de la dirección del viento y la época del año, a 10 m sobre el nivel del suelo, en campo abierto, con vegetación baja como la hierba, y con obstáculos aislados con una separación de al menos 20 veces la altura de los obstáculos.

Se destacan, en la siguiente tabla, notas de la normativa con gran relevancia.

NOTA 1 Cuando la influencia de la altitud sobre la velocidad básica del viento, v_b , no se incluya en el valor fundamental especificado, $v_{b,0}$, en el anexo nacional se puede aportar un procedimiento para tomarla en consideración.

NOTA 2 El valor del factor direccional, c_{dir} , para diferentes direcciones de viento, se podrá obtener en el anexo nacional. El valor recomendado es 1,0.

NOTA 3 El valor del factor estacional, C_{season} , se puede proporcionar en el anexo nacional. El valor recomendado es 1,0.

NOTA 4 La velocidad media del viento durante 10 min y que tiene una probabilidad p anual de ser superada, se determina multiplicando la velocidad básica del viento v_b dada en el punto (2)P del apartado 4.2 por el factor de probabilidad, c_{prob} , dado por la expresión (4.2). Véase la Norma Europea EN 1991-1-6.

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n \quad (4.2)$$

donde

K es el parámetro de forma que depende del coeficiente de variación de la distribución de los valores extremos considerada;

n es el exponente.

Ilustración 3. Notas recogidas del Eurocódigo 1, parte 1-4



Uno de los principales parámetros utilizados para evaluar la acción del viento es la velocidad media del viento, que representa la velocidad promedio del flujo de aire en un intervalo de tiempo determinado. Este valor se obtiene a partir de registros meteorológicos o mediciones in situ y es un dato esencial para la determinación de cargas de viento en normativas de diseño estructural. Sin embargo, la velocidad media por sí sola no es suficiente para describir el comportamiento del viento, ya que este se verá influenciado por la variación de la altura, la rugosidad del terreno, la orografía y las estructuras situadas a corta distancia entre ellas.

3.1.1.2 Variación con la altura

El viento varía con la altura debido al rozamiento con la superficie de la Tierra hasta una distancia límite donde la velocidad no se ve afectada. Como para cualquier otro fluido, esta es la definición de capa límite de velocidades. Esta variación con la altura dependerá de varios factores, como la rugosidad del terreno o los posibles obstáculos cercanos, la estación del año o incluso la hora del día, siguiendo una ley exponencial. En la ilustración 4 se muestran, a modo de ejemplo, cómo puede ser dicha ley exponencial en función de las características típicas de diferentes emplazamientos.

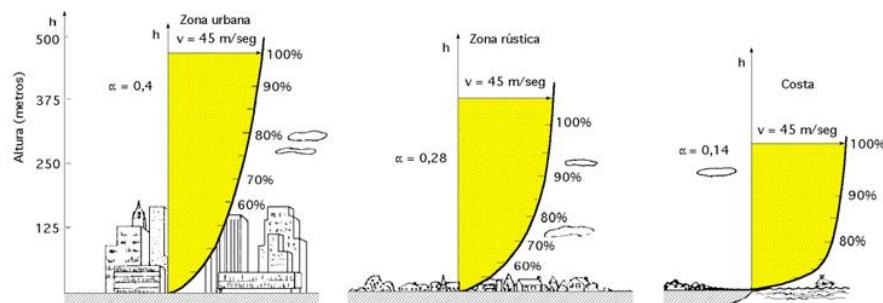


Ilustración 4. Diferentes perfiles de la velocidad del viento según el emplazamiento

La velocidad media del viento $v_m(z)$ a una altura z por encima del terreno, depende de la rugosidad y la orografía, y de la velocidad básica del viento, v_b , y se debería determinar mediante la siguiente expresión.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (3.1.2)$$

Donde,

- $c_r(z)$ Es el factor de rugosidad
 $c_0(z)$ Es el coeficiente topográfico, que se toma como 1,0 a no ser que se especifique lo contrario.

3.1.1.3 Rulosidad del terreno

La rugosidad del terreno determina como aumenta la velocidad del viento con la altura respecto al suelo. Hay una relación logarítmica entre la rugosidad y la velocidad del viento con perfiles de viento distintos para cada suelo. Por ello, en general, la velocidad del viento aumenta con la altura. Además, el perfil de velocidad de viento se pronuncia más con el aumento de la rugosidad del suelo y la velocidad disminuye.

La normativa clasifica la rugosidad del terreno en distintas categorías, desde la clase 0 (superficies lisas como el mar abierto) hasta la clase 3, correspondiente a zonas densamente edificadas o con vegetación espesa. Esta clasificación influye directamente en el perfil de velocidad del viento y, por tanto, en la carga dinámica que actúa sobre la estructura.

El factor de rugosidad del terreno, $C_r(z)$, tiene en cuenta la variabilidad de la velocidad media del viento en la localización concreta de la estructura debida a:

- La altura sobre el nivel del suelo.
- La rugosidad del terreno situado a barlovento de la estructura en la dirección del viento considerada.

Obtenemos de la normativa el siguiente procedimiento recomendado para la determinación del factor de rugosidad.

NOTA El procedimiento para determinar $c_r(z)$ se puede proporcionar en el [anexo nacional](#). El procedimiento recomendado para la determinación del factor de rugosidad a una altura z viene dado por la expresión (4.4), y se basa en un perfil logarítmico de velocidades.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.4)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para} \quad z \leq z_{\min}$$

donde

z_0 es la longitud de la rugosidad;

k_r factor del terreno, que depende de la longitud de la rugosidad z_0 y calculado utilizando:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (4.5)$$

donde

$z_{0,II}$ = 0,05 m (categoría de terreno II, tabla 4.1);

z_{\min} es la altura mínima, definida en la tabla 4.1;

z_{\max} se toma igual a 200 m;

z_0, z_{\min} dependen de la categoría del terreno. Los valores recomendados se muestran en la tabla 4.1 dependiendo de cinco categorías de terreno representativas.

Ilustración 5. Notas recogidas del Eurocódigo 1, parte 1-4



Tabla 4.1 – Categorías de terrenos y parámetros del terreno

Categoría de terreno		z_0 m	z_{min} m
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10

NOTA Las categorías de terrenos se ilustran en el capítulo A.1.

Ilustración 6. Notas recogidas del Eurocódigo 1, parte 1-4

La rugosidad del terreno a emplear para una dirección de viento dada depende de la rugosidad del terreno y de la distancia con rugosidad del terreno uniforme en un sector angular alrededor de la dirección del viento. Se pueden ignorar las áreas con rugosidad diferente siempre y cuando su tamaño sea pequeño (menos del 10% del área total en consideración).

3.1.1.4 Orografía

La orografía es un factor determinante en la circulación atmosférica, ya que la disposición del relieve terrestre influye en la velocidad, dirección y comportamiento del viento. Los sistemas montañosos, valles y mesetas modifican las corrientes de aire, generando efectos meteorológicos locales y regionales de gran relevancia.

Cuando la orografía aumente la velocidad del viento en más de un 5%, los efectos deberían tenerse en cuenta mediante el coeficiente topográfico C_0 .

Se pueden despreciar los efectos de la orografía cuando la pendiente media del terreno situado a barlovento sea inferior a 3º. Se puede considerar una longitud del terreno a barlovento de 10 veces la altura del accidente orográfico aislado.

3.1.1.5 Dirección del viento

La dirección del viento es un parámetro fundamental en el análisis de las cargas aerodinámicas que actúan sobre estructuras esbeltas, como es el caso de los postes de iluminación empleados en estadios. A diferencia de la velocidad del viento, que define la magnitud de las fuerzas aerodinámicas aplicadas, la dirección influye directamente en cómo se distribuyen dichas cargas sobre la superficie estructural, además de intervenir en la aparición de fenómenos aeroelásticos como el desprendimiento de vórtices, la excitación resonante y el flameo aerodinámico.



La dirección predominante del viento depende de una combinación de factores geográficos, meteorológicos y estacionales. En primer lugar, la topografía y el entorno geográfico juegan un papel importante, como mencionamos anteriormente. La presencia de montañas, valles o cuerpos de agua puede canalizar el flujo del viento y alterar su dirección dominante. En áreas urbanas o industriales, la proximidad de edificios y otras estructuras provoca desviaciones, aceleraciones o turbulencias que modifican significativamente su comportamiento. Además, los sistemas meteorológicos y los patrones climáticos característicos de una región influyen en la dirección del viento, la cual puede variar de manera sistemática con las estaciones del año. A su vez, fenómenos meteorológicos específicos como tormentas o ciclones pueden inducir cambios bruscos y temporales en la dirección del flujo.

También es relevante considerar la altura sobre el suelo, ya que el viento a niveles bajos se ve afectado por obstáculos locales, mientras que a mayores alturas su dirección suele estabilizarse y alinearse con los vientos dominantes a gran escala. La cizalladura del viento, provocada por diferencias de temperatura y presión entre capas de aire, puede generar variaciones direccionales a lo largo de la altura de la estructura.

Esta variabilidad en la dirección del viento tiene efectos importantes sobre el comportamiento estructural y funcional de postes y chimeneas altas. La distribución de las cargas de viento sobre la superficie depende de la orientación relativa del viento, lo que influye en la estabilidad global de la estructura. Cuando el viento incide de manera perpendicular, se generan vórtices alternos que inducen vibraciones transversales. Si estas oscilaciones coinciden con una de las frecuencias naturales del sistema, pueden amplificarse y representar un riesgo por fatiga o inestabilidad. Además, variaciones rápidas en la dirección del viento pueden alterar los patrones de vibración, incrementando el riesgo de resonancia o flameo aerodinámico.

Desde el punto de vista funcional, la dirección del viento también influye en la eficiencia de dispersión de gases en el caso de chimeneas. Dependiendo de cómo interactúa el viento con la emisión de gases, pueden producirse trayectorias de recirculación que afecten áreas sensibles o que disminuyan la efectividad del sistema.

Por todo ello, es esencial realizar un análisis detallado de la dirección del viento en el entorno donde se emplazará la estructura. Este análisis puede basarse en estudios climatológicos apoyados en datos históricos de estaciones meteorológicas, complementarse con simulaciones numéricas y ensayos en túneles de viento, y reforzarse mediante sistemas de monitoreo estructural en tiempo real que permitan registrar continuamente tanto la velocidad como la dirección del viento incidente.

3.1.1.6 Turbulencias

Desde el punto de vista hidrodinámico, el movimiento de un fluido, en este caso el aire, puede clasificarse como laminar o turbulento. En el régimen laminar, la velocidad de las partículas fluidas (principalmente moléculas de nitrógeno y oxígeno en la atmósfera) es lo suficientemente baja como para que su trayectoria se mantenga ordenada y predominantemente rectilínea.



No obstante, este comportamiento es idealizado, ya que en la práctica el aire presenta un grado de turbulencia inherente, incluso bajo condiciones de alta estabilidad atmosférica. El régimen turbulento se manifiesta cuando la velocidad del fluido alcanza ciertos umbrales críticos, lo que provoca un comportamiento caótico de las partículas, generando remolinos y desplazamientos de aire con velocidades variables y direcciones aparentemente aleatorias.

Los postes de iluminación, debido a su elevada esbeltez y a la considerable relación entre altura y diámetro, son particularmente sensibles a los efectos derivados de la turbulencia del viento. Uno de los fenómenos más relevantes es el desprendimiento alterno de vórtices en la parte posterior de la estructura cuando el flujo de aire incide sobre ella. Este desprendimiento genera fuerzas perpendiculares a la dirección del viento que inducen vibraciones transversales. Este comportamiento, conocido como desprendimiento de vórtices de Von Kármán, puede resultar especialmente peligroso si la frecuencia de desprendimiento coincide con una de las frecuencias naturales de la estructura, ya que en tal caso se produce una vibración resonante, como anteriormente detallamos.

Adicionalmente, las fluctuaciones de velocidad y presión causadas por la turbulencia atmosférica generan cargas dinámicas que pueden amplificar los desplazamientos laterales y aumentar los esfuerzos en la base de la estructura. En determinadas condiciones, este tipo de excitación puede dar lugar a inestabilidades aeroelásticas, como el flameo aerodinámico, en el cual la energía del viento se transfiere de forma continua a la estructura, incrementando progresivamente la amplitud de las vibraciones.

La exposición continua a cargas fluctuantes derivadas de la turbulencia también representa una amenaza para la durabilidad de los materiales estructurales. La variabilidad en las fuerzas ejercidas sobre la superficie de la chimenea conduce a la acumulación de ciclos de carga que, con el tiempo, pueden originar daños por fatiga. Este proceso de deterioro progresivo puede culminar en la formación de grietas, reducción de la rigidez estructural e incluso, en situaciones críticas, en el colapso de la estructura si no se adoptan medidas de prevención y monitoreo adecuadas.

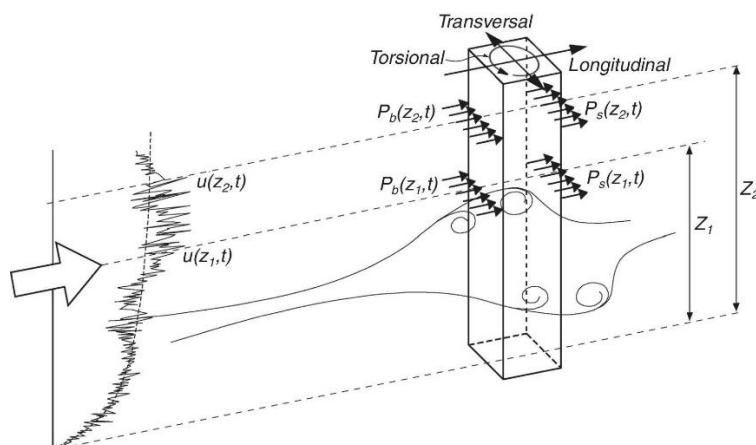


Ilustración 7. Cargas del viento y respuesta resultante

La intensidad de la turbulencia $I_v(z)$ a una altura z se define como la desviación típica de la turbulencia dividida por la velocidad media del viento.

Seguidamente, se muestra, según la norma UNE-EN 1991-1-4, el procedimiento para obtener la intensidad de la turbulencia.

NOTA 1 La componente turbulenta de la velocidad del viento tiene un valor medio de 0 y una desviación típica de σ_v la desviación típica de la turbulencia σ_v puede determinarse mediante la expresión (4.6).

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_t \quad (4.6)$$

Para el factor del terreno, k_r , véase la expresión (4.5), para la velocidad básica del viento, v_b , véase la expresión (4.1), y para el factor de turbulencia, k_t , véase la nota 2.

NOTA 2 Las reglas recomendadas para la determinación de $I_v(z)$ se proporcionan en la expresión (4.7)

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_t}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min}$$

donde

k_t es el factor de turbulencia. El valor de k_t se puede establecer en el [anexo nacional](#). El valor recomendado para k_t es 1,0;

c_o es el coeficiente topográfico, descrito en el apartado 4.3.3;

z_0 es la longitud de la rugosidad, dada en la tabla 4.1.

Ilustración 8. Notas recogidas del Eurocódigo 1, parte 1-4

3.1.1.6.1 Coeficiente de exposición

El coeficiente de exposición tiene en cuenta los efectos de las turbulencias originadas por el relieve y la topografía del terreno. Su correcta determinación permite estimar con precisión la distribución de presiones y esfuerzos a lo largo de la estructura, asegurando su estabilidad y prolongando su vida útil. Un análisis detallado de este coeficiente, combinado con herramientas de simulación numérica y monitoreo estructural, contribuye a optimizar el diseño y reducir los riesgos asociados a la acción del viento.

Su valor se puede tomar de la tabla expuesta, siendo la altura del punto considerado la media respecto a la rasante media de la fachada a barlovento. Para alturas superiores a 30 m los valores deben obtenerse de las expresiones generales que se recogen en el anexo de la normativa.

En el caso de edificios situados en las cercanías de acantilados o escarpas de pendiente mayor de 40º, la altura se medirá desde la base de dichos accidentes topográficos.

A efectos de grados de asperezza, el entorno del edificio se clasificará en el primero de los tipos de la tabla al que pertenezca, para la dirección del viento analizada.



Entorno (grado de aspereza)		Altura del punto considerado (m)							
		3	6	9	12	15	18	24	30
I	Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II	Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III	Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV	Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V	Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Ilustración 9. Coeficientes de exposición con respecto alturas

3.1.1.7 Velocidad pico y presión correspondientes

En un flujo de viento turbulento, la velocidad varía de manera aleatoria y presenta fluctuaciones significativas alrededor de un valor medio. Estas fluctuaciones pueden dar lugar a ráfagas o picos de velocidad que, en ciertos momentos, superan ampliamente la velocidad media.

En ingeniería estructural, estos picos son cruciales porque representan los extremos de carga que pueden actuar sobre una estructura. Por tanto, entender y medir la velocidad pico es fundamental para evaluar el impacto de las turbulencias en la generación de cargas dinámicas y, en consecuencia, en el diseño y la seguridad de la estructura.

Una ráfaga es un incremento súbito, intenso y transitorio en la velocidad del viento, que se distingue de la velocidad media al presentar valores significativamente mayores durante períodos muy breves. Se define formalmente como un golpe de viento fuerte y de corta duración, cuya intensidad puede variar considerablemente en cuestión de segundos (oscila entre 3 y 20 segundos). Este fenómeno se debe, en gran medida, a la turbulencia inherente al flujo atmosférico, generada por la interacción del viento con la topografía del terreno, la presencia de obstáculos y las inestabilidades en la atmósfera.

A continuación, se detalla el procedimiento establecido por el Eurocódigo 1 para determinar la presión asociada a la velocidad de pico del viento.

NOTA 1 El [anexo nacional](#) puede proporcionar reglas para la determinación de $q_p(z)$. El procedimiento recomendado se proporciona en la expresión (4.8).

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4.8)$$

donde

ρ es la densidad del aire, que depende de la altitud, de la temperatura y de la presión barométrica esperada en la región durante las tormentas de viento;

$c_e(z)$ es el factor de exposición dado en la expresión (4.9);

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.9)$$

q_b es la presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento, dada por la expresión (4.10);

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (4.10)$$

NOTA 2 Los valores de ρ pueden definirse en el [anexo nacional](#). El valor recomendado es 1,25 kg/m³.

NOTA 3 El valor 7 en la expresión (4.8) está basado en un factor de pico igual a 3,5 y es consistente con los valores de los coeficientes de fuerza y de presión definidos en el capítulo 7.

Ilustración 10. Notas recogidas del Eurocódigo 1, parte 1-4

3.1.2 Acciones y efectos dinámicos del viento

El comportamiento del viento y su interacción con las estructuras es un aspecto crítico en el diseño y análisis de infraestructuras, especialmente en aquellas de gran altura y esbeltez, como es nuestro caso. Las acciones del viento se manifiestan a través de un complejo conjunto de cargas que pueden clasificarse en dos grandes categorías: cargas estáticas y cargas dinámicas.

El viento se considera una carga estática cuando se utiliza su valor medio para calcular la presión ejercida sobre una estructura (por ejemplo, mediante $q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$, presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento). Sin embargo, el viento deja de comportarse como una carga estática cuando se empiezan a considerar las variaciones temporales y espaciales en su velocidad, es decir, cuando se incluyen los efectos de la turbulencia y las ráfagas. En esos momentos, el análisis debe incorporar un enfoque dinámico, ya que las fluctuaciones de velocidad (y, por ende, de presión) pueden generar fuerzas transitorias y efectos resonantes que influyen significativamente en la respuesta estructural.

La acción del viento en estructuras y elementos estructurales se debe determinar teniendo en cuenta tanto las presiones del viento externas como internas.

Acto seguido se procede a explicar la presión del viento en estructuras.



La presión del viento sobre las superficies exteriores, w_e , se debería obtener a partir de la expresión:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (3.1.3)$$

Donde,

- $q_p(z_e)$ Es la presión correspondiente a la velocidad de pico
 z_e Es la altura de referencia para la presión externa
 C_{Pe} Es el coeficiente de presión para la presión exterior

La presión del viento que actúa sobre las superficies interiores, w_b , se debería determinar mediante la expresión:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (3.1.4)$$

Donde,

- $q_p(z_i)$ Es la presión correspondiente a la velocidad de pico
 z_i Es la altura de referencia para la presión interna
 C_{Pi} Es el coeficiente de presión para la presión interna

La presión neta sobre una pared, tejado o elemento es la diferencia entre las presiones existentes en cada una de sus caras opuestas, teniendo en cuenta su signo. La presión, dirigida hacia la superficie se toma como positiva, mientras que la succión, dirigida hacia el exterior de la superficie se toma como negativa. Véase la ilustración 11:

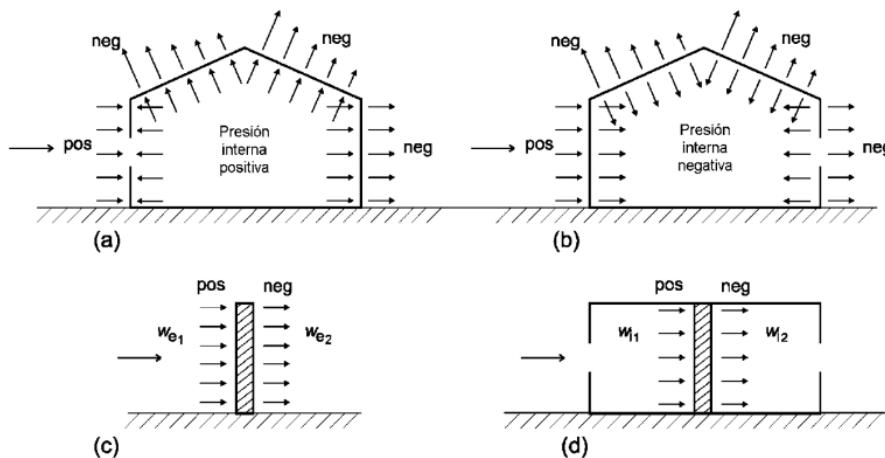


Ilustración 11. Presión del viento sobre superficies



Así mismo se puede conocer la fuerza del viento, F_w , que actúa sobre una estructura o un elemento estructural, se determina directamente de la expresión:

$$F_w = c_s c_d \cdot C_f q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (3.1.5)$$

Donde,

$C_s C_d$	Es el factor estructural
c_f	Es el coeficiente de fuerza para el elemento estructural definido
$q_p(z_e)$	Es la presión asociada a la velocidad de pico a la altura de referencia z
A_{ref}	Es el área de referencia para el elemento estructural definido

En este estudio se llevará a cabo el análisis de la resistencia de una estructura esbelta de sección circular frente a las acciones del viento, considerando el daño por fatiga como factor determinante. Por ello nos apoyaremos en la normativa UNE-EN 1991-1-4.

Uno de los parámetros clave que interviene en la determinación de los coeficientes de presión es el número de Reynolds, el cual permite caracterizar el régimen del flujo (laminar, de transición o turbulento) alrededor del cilindro. Este número adimensional se calcula mediante la expresión:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \quad (3.1.6)$$

Donde,

b	Es el diámetro
v	Es la velocidad cinemática del aire ($v = 15 \cdot 10^{-6} m^2 / s$)
$v(z_e)$	Es la velocidad de pico del viento definida a la altura de referencia z_e

El valor del número de Reynolds influye directamente en la forma en la que el flujo se separa del cuerpo cilíndrico y, por tanto, en la distribución de presiones alrededor de la estructura.

La presión externa del viento sobre una superficie cilíndrica se representa mediante el coeficiente de presión externa, C_{pe} , el cual se obtiene con la siguiente formulación general:

$$C_{pe} = q_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (3.1.7)$$

Donde,

$C_{p,0}$	Es el coeficiente de presión externa sin flujo libre de cola
$\psi_{\lambda\alpha}$	Es el factor del efecto cola

El coeficiente de presión externa $C_{p,0}$ viene dado en la figura para diferentes valores del número de Reynolds como función del ángulo α .

Re	α_{\min}	$C_{p0,\min}$	α_A	$C_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	- 0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	- 0,7
10^7	75	-1,5	105	- 0,8

donde

α_{\min} es la posición de la presión mínima, en [°]
 $C_{p0,\min}$ es el valor del coeficiente de presión mínimo
 α_A es la posición del punto en el que se separa el flujo, en [°]
 $C_{p0,h}$ es el coeficiente de presión base

Ilustración 12. Valores típicos de la distribución de presiones en cilindro circulares para diferentes rangos del número de Reynolds y sin efecto cola

3.1.2.1 Coeficiente de fuerza

Los coeficientes de fuerza permiten transformar la presión ejercida por el viento en fuerzas equivalentes que actúan sobre la estructura, facilitando su análisis y diseño.

El coeficiente de fuerza para un cilindro circular finito se debería determinar mediante la expresión:

$$c_f = q_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (3.1.8)$$

Donde,

- $C_{f,0}$ Es el coeficiente de fuerza para cilindros sin flujo libre de cola
 ψ_λ Es el factor del efecto cola

El factor de efecto cola es un coeficiente que se utiliza en el diseño estructural para considerar la reducción en la resistencia de una estructura debido al flujo de aire alrededor de su zona final, fenómeno conocido como "efecto cola". Este factor es esencial para evaluar con precisión las cargas de viento en estructuras, especialmente en aquellas con formas geométricas que facilitan la formación de estelas o regiones de flujo turbulento en su parte posterior.

Incorporar el factor de efecto cola en los cálculos de cargas de viento es crucial para garantizar la seguridad y estabilidad de las estructuras.

Se muestra a continuación una gráfica que compara el coeficiente de fuerza $C_{f,0}$ para cilindros circulares sin flujo libre de cola y para diferentes valores de la rugosidad k / b .

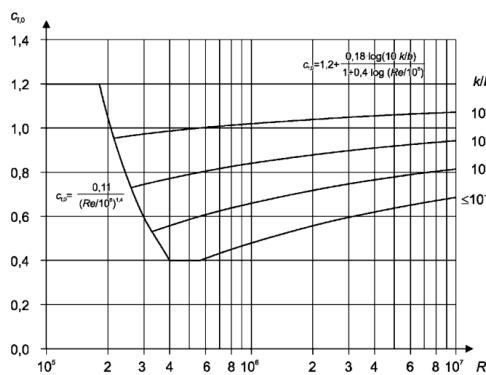


Ilustración 13. Coeficiente de fuerza para cilindros circulares sin flujo libre de cola y para diferentes valores de la rugosidad k / b

Los valores de la rugosidad equivalente, k , para superficies se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de superficie	Rugosidad equivalente k mm	Tipo de superficie	Rugosidad equivalente k mm
Vidrio	0,0015	Hormigón pulido	0,2
Metal pulido	0,002	Madera plana	0,5
Pintura fina	0,006	Hormigón rugoso	1,0
Pintura en spray	0,02	Madera áspera	2,0
Acero brillante	0,05	Óxido	2,0
Hierro fundido	0,2	Enladrillados	3,0
Acero galvanizado	0,2		

Ilustración 14. Rugosidad superficial equivalente K

En nuestro caso, tenemos una estructura esbelta con sección circular, por tanto, procederemos al estudio del factor del efecto cola, ψ_λ en función de la relación de esbeltez λ .

La esbeltez efectiva λ debería definirse dependiendo de las dimensiones de la estructura y de su posición.

El Eurocódigo 1: Acciones en estructuras – Parte 1-4: Acciones generales – Acciones del viento proporciona una tabla con valores recomendados de esbeltez efectiva (λ) para diversas formas estructurales. Estas incluyen cilindros, secciones poligonales, secciones rectangulares, secciones con bordes vivos y estructuras de celosía. Estos valores son esenciales para evaluar la susceptibilidad al pandeo de las estructuras bajo cargas de viento y asegurar su estabilidad y seguridad. Para este caso nos centraremos en el punto N.º 2 de la ilustración siguiente obtenida de la normativa.



No.	Posición de la estructura Dirección del viento normal al plano de la hoja	Esbeltz efectiva λ
1	<p>para $b \leq l$</p>	<p>En secciones poligonales, rectangulares, con bordes vivos y estructuras de celosía: si $\ell \geq 50$ m, el menor valor de $\lambda = 1,4 \ell/b$ o $\lambda = 70$</p>
2	<p>$b_0 \geq 2,5b$</p>	<p>si $\ell < 15$ m, el menor valor de $\lambda = 2 \ell/b$ o $\lambda = 70$</p> <p>En cilindros circulares: si $\ell \geq 50$, el menor valor de $\lambda = 0,7 \ell/b$ o $\lambda = 70$,</p> <p>si $\ell < 15$ m, el menor valor de $\lambda = \ell/b$ o $\lambda = 70$,</p>
3		<p>Para valores intermedios de ℓ, se debería utilizar la interpolación lineal</p>

Ilustración 15. Valores recomendados de para cilindros, secciones poligonales, secciones rectangulares, secciones estructurales con bordes vivos y estructuras de celosía

En el caso de estructuras esbeltas sometidas a viento, como postes de iluminación, es importante considerar la influencia del llamado efecto cola o efecto de apantallamiento. Este fenómeno ocurre cuando una estructura está parcialmente protegida de la acción directa del viento debido a la presencia de otra estructura ubicada en sentido viento arriba. En configuraciones donde existen múltiples postes alineados, por ejemplo, el flujo de viento se ve alterado, generando una estela turbulenta que reduce la presión dinámica sobre los elementos posteriores.

La ilustración 16 muestra el comportamiento del factor efecto cola, ψ_λ , en función de dos parámetros clave: la relación de solidez y la esbeltez λ . El parámetro ϕ representa la proporción del área proyectada que ofrece resistencia al viento respecto al área total del contorno, mientras que λ se define como la relación entre la altura del poste y su diámetro. Ambos influyen directamente en la manera en que el flujo de viento interactúa con la estructura.

Como se observa en la figura, para postes con alta solidez ($\phi \approx 1$) y baja esbeltez ($\lambda < 10$), el factor ψ_λ puede reducirse hasta valores de 0,6, lo que indica una disminución de hasta el 40 % en la carga de viento efectiva. Sin embargo, en postes más esbeltos ($\lambda > 70$) o con menor solidez ($\phi < 0,5$), el valor de ψ_λ se aproxima a 1, lo que significa que el efecto de apantallamiento es prácticamente despreciable.

En este trabajo, el valor de ψ_λ se tiene en cuenta como factor de corrección en el cálculo de las cargas dinámicas de viento, ya que estas influyen directamente en la amplitud de las tensiones cíclicas y, por tanto, en el daño por fatiga acumulado a lo largo de la vida útil del poste de iluminación.

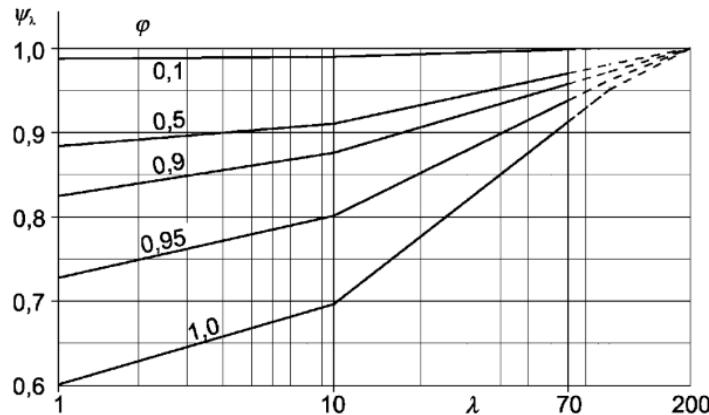


Ilustración 16. Valores indicativos del factor del efecto cola ψ_λ en función de la relación de solidez φ y la esbeltez λ .

La relación de solidez φ viene definida por la expresión:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (3.1.9)$$

Donde,

- | | |
|-------|---|
| A | Es la suma de las áreas proyectadas de los elementos de la estructura |
| A_c | Es el área envolvente global |

En el caso específico de un cilindro esbelto, la relación de solidez se refiere a la proporción entre el área de la sección transversal del cilindro y el área de la sección transversal del espacio circundante. Esta relación es crucial para determinar la capacidad del cilindro para resistir cargas de compresión sin sufrir padeo o deformaciones excesivas.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_c = 2\pi r(r + h)$$

3.1.3 Desprendimiento de vórtices

El fenómeno de desprendimiento de vórtices, o vortex shedding, ha sido objeto de estudio desde finales del siglo XIX y principios del XX, con contribuciones significativas de diversos investigadores como Vincenc Strouhal (1878) quién observó que los hilos expuestos al viento emitían un sonido característico. Analizando este fenómeno, descubrió que la frecuencia del sonido estaba relacionada con la velocidad del viento y el diámetro del hilo, lo que llevó a la formulación del número de Strouhal, un parámetro adimensional fundamental en la dinámica de fluidos. Más tarde, en 1911, Theodore von Kármán basándose en estudios previos, desarrolló una explicación teórica para la formación y estabilidad de la "calle de vórtices" que se desprenden alternadamente de objetos en un flujo, fenómeno que hoy lleva su nombre.

Estas investigaciones sentaron las bases para la comprensión moderna del fenómeno de desprendimiento de vórtices, esencial en campos como la ingeniería estructural y la aerodinámica

El fenómeno de desprendimiento de vórtices sucede cuando estos se desprenden de manera alternada en dos lados opuestos de la estructura. Este efecto produce una carga fluctuante perpendicular a la dirección del viento. Pueden producirse vibraciones estructurales si la frecuencia del desprendimiento es similar a la frecuencia natural de la estructura. Esta condición se alcanza cuando la velocidad del viento es igual a la velocidad crítica del viento.

Se debería investigar el efecto del desprendimiento de vórtices cuando la relación entre las dimensiones más grande y pequeña de la estructura en la dirección perpendicular al viento supere el valor de 6.

El análisis del desprendimiento de vórtices puede obviarse si la velocidad crítica del viento supera en un 25 % la velocidad media prevista para el emplazamiento, según los criterios de exclusión establecidos en el Eurocódigo.

$$v_{crit,i} > 1.25 \cdot v_m$$

Típicamente, la velocidad crítica del viento es una velocidad frecuente, indicando que los fenómenos de fatiga, y por tanto el número de ciclos de carga, pueden ser relevantes para la seguridad de la estructura.

Aunque el concepto de desprendimiento de vórtices puede parecer bastante técnico, este fenómeno ocurre con frecuencia en la vida cotidiana. El supuesto de partida en el que han coincidido los investigadores de este fenómeno es que el problema de resonancia en el estado de bloqueo provoca amplitudes que, aunque en la mayoría de los casos no son capaces de poner en peligro rápidamente la capacidad portante de la estructura a nivel global o local, sí constituyen un peligro debido al efecto de fatiga del material, que es una consecuencia directa de la naturaleza cíclica de la oscilación de las estructuras en el estado resonante.



En la ilustración 17 se muestra una representación gráfica habitual de los vórtices de von Karman para las oscilaciones mencionadas. Aunque existen muchos datos en la literatura sobre los límites de las velocidades críticas que causan problemas de resonancia, aún no se ha propuesto un modelo global que pueda estimar con un alto nivel de certeza los efectos de este fenómeno en las estructuras, en regímenes de flujo arbitrarios descritos por el número de Reynolds.

Esta afirmación adquiere especial importancia en la aplicación de un análisis simplificado que se basa en el uso del método de tensión nominal. Así, a menudo puede ocurrir que, aunque la estructura no se vea amenazada por la acción estática de fuerzas externas, se pueda llegar a una conclusión completamente contraria para el criterio de diseño relevante: fatiga del material debido al desprendimiento de vórtices. Es por ello por lo que aún hoy, décadas después de que se acordaran los principios y valores básicos que describen este fenómeno, la teoría todavía se sigue analizando y armonizando con las amplitudes y patrones de daños observados en situaciones prácticas.

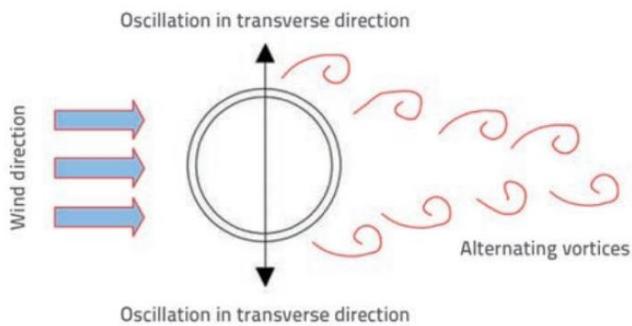


Ilustración 17. Vórtices de Von Karman

3.1.3.1 Velocidad crítica del viento

La velocidad crítica del viento representa el umbral a partir del cual el desprendimiento alterno de vórtices alcanza una frecuencia capaz de entrar en resonancia con algún modo natural de vibración de la estructura. Esta condición es especialmente importante en elementos esbeltos como postes tubulares, donde las vibraciones transversales inducidas pueden amplificarse significativamente.

Sin embargo, en estructuras esbeltas, incluso a velocidades más bajas, estas fuerzas pueden ser suficientes para inducir vibraciones que, debido a su naturaleza cíclica, pueden contribuir al daño por fatiga con el tiempo.

Por lo tanto, es esencial considerar no solo la velocidad crítica, sino también el rango completo de velocidades de flujo a las que la estructura estará expuesta, especialmente en el caso de estructuras esbeltas, para evaluar adecuadamente el riesgo de vibraciones inducidas por vórtices y el potencial daño por fatiga asociado.

La velocidad crítica del viento para el modo de flexión i es aquella en la que la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia natural de la estructura o del elemento, y se determina mediante la siguiente fórmula:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{st} \quad (3.1.10)$$

Donde,

b	Anchura de referencia en la sección donde ocurre el desprendimiento resonante de vórtices y se alcanza la máxima deformación modal; en cilindros circulares, corresponde al diámetro exterior.
$n_{i,y}$	Frecuencia natural del modo de flexión i en la dirección perpendicular al viento.
st	Número de Strouhal

Para modos de ovalización, donde la deformación afecta a la sección transversal de la lámina cilíndrica, la velocidad crítica se calcula considerando que la frecuencia estructural corresponde al doble de la frecuencia de los vórtices generados:

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,0}}{2st} \quad (3.1.11)$$

Donde,

b	Es el diámetro interior de la lámina
$n_{i,0}$	Es la frecuencia natural del modo de ovalización para la lámina
st	Número de Strouhal

3.1.3.2 Número de Strouhal

El número de Strouhal es un número adimensional que describe la relación entre la velocidad crítica del viento y la frecuencia natural de la estructura en el modo de oscilación $n_{i,y}$, con la siguiente expresión:

$$s = \frac{b \cdot n_{i,y}}{v_{crit,i}} \quad (3.1.12)$$

En la ilustración 13 se recoge una propuesta representativa del valor del número de Strouhal para distintas condiciones. Aunque convencionalmente se asume un valor aproximado de $St = 0,20$ para cilindros circulares, esta estimación no siempre resulta precisa.

La razón es que el comportamiento del desprendimiento de vórtices está fuertemente condicionado por el régimen de flujo, el cual se caracteriza mediante el número de Reynolds. Por tanto, utilizar un valor constante puede llevar a errores si no se considera adecuadamente la variabilidad del flujo en cada caso.

Así, el valor simplificado de 0,20 se adopta mayoritariamente para la zona subcrítica del régimen de flujo ($Re < 2 \times 10^5$), mientras que el valor St varía mayoritariamente de 0,20 a 0,30 en la zona supercrítica ($Re > 5 \times 10^6$).

Con la introducción de la norma EN 1991-1-4, se estableció un valor fijo de 0,18 para el número de Strouhal, independientemente del número de Reynolds. Sin embargo, mediciones individuales han mostrado que este valor puede ser tan bajo como 0,16 en números de Reynolds bajos. Por ello, el método de cálculo recomienda usar un valor de 0,18 para todos los casos, tal como señala la normativa. Para estructuras especialmente importantes, se sugiere llevar a cabo estudios experimentales y numéricos adicionales para obtener una estimación más precisa.

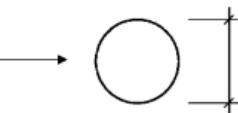
Sección transversal	St
	0,18
Para todos los valores del número de Reynolds (Re)	

Ilustración 13. Número de Strouhal St

3.1.3.3 Número de Scruton

El número de Scruton describe la susceptibilidad a las vibraciones que dependen del amortiguamiento estructural y de la relación de masas de la estructura y el fluido.

$$sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} \quad (3.1.13)$$

Donde,

- | | |
|------------|---|
| δ_s | Amortiguamiento estructural |
| ρ | Es la densidad del aire en condiciones de desprendimiento de vórtices |
| $m_{i,e}$ | Es la masa equivalente m_e por unidad de longitud para el modo |

Un número de Scruton bajo indica que la estructura tiene poca capacidad para disipar la energía de las vibraciones, siendo más susceptible a oscilaciones inducidas por el viento. Por el contrario, un número alto sugiere que la estructura puede amortiguar eficazmente estas vibraciones.

3.1.3.4 Número de Reynolds

La acción debida al desprendimiento de vórtices sobre un cilindro circular depende del número de Reynolds R_e a la velocidad crítica del viento $v_{crit,i}$. El número de Reynolds se define como:

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu} \quad (3.1.14)$$

Donde,

- b Es el diámetro exterior del cilindro circular
- ν Es la viscosidad cinemática del aire
- $v_{crit,i}$ Es la velocidad crítica del viento

Al conocer la velocidad del fluido y el diámetro del cilindro, es posible determinar la frecuencia de desprendimiento de vórtices, lo cual es crucial para evaluar las posibles vibraciones inducidas y el riesgo de resonancia en la estructura.

Este término permite clasificar el régimen de flujo alrededor del elemento estructural. Según el Eurocódigo EN 1991-1-4, el comportamiento del flujo se divide en tres rangos principales:

1. Régimen subcrítico ($Re < 2 \times 10^5$)
El flujo permanece laminar y el desprendimiento de vórtices es fuerte y bien definido. Es en este rango donde las estructuras son más susceptibles a vibraciones por vórtices.
2. Régimen crítico ($Re \approx 2 \times 10^5$)
Se producen transiciones inestables del flujo, con posibles cambios bruscos en la fuerza aerodinámica. El coeficiente de arrastre varía significativamente. Este régimen puede inducir vibraciones de mayor amplitud.
3. Régimen supercrítico ($Re > 4 \times 10^5$)
El flujo se vuelve turbulento antes del punto de separación, y el desprendimiento de vórtices es menos regular. En este rango, las fuerzas transversales suelen disminuir, y los efectos de vibración son menos severos.

El Eurocódigo recomienda evaluar cuidadosamente los efectos dinámicos cuando se trabaja en el régimen subcrítico o crítico, especialmente en estructuras ligeras y flexibles. En estos casos, es necesario verificar si la frecuencia del desprendimiento de vórtices (calculada con el número de Strouhal) coincide o se aproxima a la frecuencia natural de la estructura, lo que podría provocar fenómenos de resonancia por acoplamiento aeroelástico.

3.1.3.5 Acción debida al desprendimiento de vórtices

El efecto de las vibraciones inducidas son un fenómeno aeroelástico causado por el desprendimiento de vórtices, de forma alternada en dos caras opuestas de una estructura, que inducen cargas aerodinámicas periódicas. Para el caso de una estructura rígida, la frecuencia de desprendimiento de vórtices sigue la Ley de Strouhal y varía quasi-linealmente con la velocidad del flujo libre para un amplio rango de números de Reynolds. En cambio, cuando la estructura es flexible o elástica, y cuando la frecuencia de desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia natural de la estructura, se produce la resonancia y el sistema entra en el rango de sincronización (lock-in). En el estado de sincronización, la frecuencia de desprendimiento de vórtices deja de seguir la ley de Strouhal y se sincroniza con la frecuencia de vibración del sistema.

Se calcula a partir del efecto de la fuerza de inercia por unidad de longitud, actuando perpendicularmente a la dirección del viento en un punto de la estructura, y definida por la siguiente expresión.

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2\pi n_{i,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \quad (3.1.15)$$

Donde,

$m(s)$	Es la masa vibrante de la estructura por unidad de longitud (Kg/m)
$n_{i,y}$	Es la frecuencia natural de la estructura
$\phi_{i,y}(s)$	Es la forma modal de la estructura normalizada a 1 en el punto máximo
$y_{F,max}$	Valor máximo del desplazamiento a lo largo del tiempo

Estas fuerzas actúan en una longitud determinada que se define como «longitud de correlación» L. El propio término procede del campo de la estocástica, y su objetivo es tener en cuenta los efectos Aero elásticos. El coeficiente de correlación espacial R12 para fuerzas fluctuantes en dos puntos críticos a lo largo de la sección transversal se define como:

$$R_{12} = \frac{\overline{f_1^1(t)f_2^1(t)}}{\overline{f_2^1}} \quad (3.1.16)$$

3.1.3.6 Cálculo de la amplitud del viento transversal

El desprendimiento de vórtices, como se ha explicado anteriormente, es un fenómeno aeroelástico que puede inducir vibraciones transversales en estructuras esbeltas expuestas al viento. Si la frecuencia con la que se generan estos vórtices coincide con alguna de las

frecuencias naturales de la estructura, puede producirse un fenómeno de resonancia. En tal caso, las oscilaciones inducidas pueden alcanzar amplitudes significativas, comprometiendo la seguridad estructural o acelerando procesos de fatiga.

Con el fin de prever y limitar estos efectos, el Eurocódigo 1 (EN 1991-1-4) establece dos métodos para evaluar el riesgo asociado al desprendimiento de vórtices: el método armónico y el método espectral. Ambos enfoques ofrecen formas distintas de analizar el mismo fenómeno, y su elección depende del nivel de detalle requerido, de las características de la estructura y de las condiciones de viento del emplazamiento.

- El método armónico: un enfoque determinista y conservador

El método armónico representa una aproximación simplificada que asume condiciones ideales. Se basa en la hipótesis de que el viento sopla de forma constante y uniforme, y que el desprendimiento de vórtices genera una excitación perfectamente periódica, en completa resonancia con la estructura.

Ventajas del método armónico:

- Es conceptualmente sencillo y fácil de aplicar, incluso sin herramientas de cálculo avanzadas.
- Resulta adecuado para fases preliminares de diseño, donde se busca identificar riesgos potenciales de forma rápida.
- Ofrece un enfoque conservador, lo que garantiza un margen de seguridad adicional.
- Permite visualizar de manera clara e intuitiva la relación entre velocidad del viento y riesgo de resonancia.

Desventajas del método armónico:

- Suponiendo condiciones perfectamente resonantes, tiende a sobreestimar la respuesta estructural, lo que puede derivar en diseños innecesariamente robustos o costosos.
- Ignora la naturaleza turbulenta y aleatoria del viento real, simplificando el comportamiento del fenómeno.
- No considera la variación espacial de la excitación a lo largo de estructuras altas o complejas.
- No es adecuado para estructuras con varios modos de vibración relevantes o con comportamiento dinámico más complejo.

- El método espectral: un enfoque estocástico y realista

El método espectral parte de una visión más precisa y técnica del fenómeno. Considera tanto la variabilidad del viento como la respuesta dinámica de la estructura como procesos aleatorios. Analiza cómo se distribuye la energía del viento en distintas frecuencias y cómo la estructura amplifica o atenúa esas excitaciones.

Ventajas del método espectral:

- Refleja de manera más fiel el comportamiento real del viento, incluyendo su componente turbulenta y aleatoria.
- Es más preciso en la estimación de la respuesta vibratoria, especialmente en estructuras flexibles o con bajo amortiguamiento.
- Tiene en cuenta la correlación espacial de la excitación a lo largo de la altura de la estructura.
- Permite diseños más optimizados, reduciendo sobredimensionamientos innecesarios derivados de enfoques demasiado conservadores.

Desventajas del método espectral:

- Requiere un conocimiento más avanzado de dinámica estructural y análisis en el dominio de la frecuencia.
- Es menos intuitivo, ya que no establece una relación directa entre una única velocidad del viento y el riesgo de resonancia.
- Implica mayor complejidad matemática y computacional, siendo necesario en la mayoría de los casos el uso de software especializado.
- Demanda una mayor cantidad y calidad de datos de entrada, incluyendo parámetros detallados del viento y de la estructura.

La elección entre el método armónico y el método espectral debe fundamentarse en un equilibrio entre simplicidad, precisión y la disponibilidad de datos confiables para el análisis. No obstante, en el contexto del presente proyecto, la decisión final sobre qué metodología aplicar se vio influida de forma decisiva por los estudios comparativos realizados por Clobes, Willecke y Peil.

A través del uso del método espectral, estos autores detectaron que, para valores bajos del número de Scruton, el modelo tendía a ofrecer resultados anómalos y amplitudes de oscilación excesivamente elevadas. Tales desviaciones cuestionan su idoneidad para ser empleado en evaluaciones relacionadas con la fatiga de materiales, especialmente en estructuras cuya vida útil se estima en el orden de 50 años, y para las cuales se exige un elevado nivel de fiabilidad estructural.

Asimismo, se concluye que el método espectral no es adecuado para ser combinado con estimaciones de número de ciclos de carga, independientemente del ancho de banda considerado. Esta limitación compromete directamente su aplicación en contextos donde se requiere un enfoque realista de acumulación de daños por fatiga. De hecho, debido a estas deficiencias, el anexo nacional alemán del Eurocódigo ha excluido explícitamente el uso del método espectral para ciertos casos. Entre los motivos principales se encuentran la inconsistencia de los resultados obtenidos, la restricción del modelo al modo de vibración fundamental, y su validez únicamente para estructuras con una geometría longitudinal regular.

En esta línea, los mismos autores advierten que el modelo espectral, en su forma original y sin una reformulación más precisa del comportamiento del amortiguamiento aerodinámico en función de la intensidad de la turbulencia (como sí se aborda en el anexo nacional francés) puede resultar innecesariamente conservador y, por tanto, económicamente desfavorable.

Frente a esta problemática, el método armónico presenta una alternativa robusta y clara. Basado en los trabajos de Scruton, Rumman y Ruscheweyh, este enfoque asume que el desprendimiento de vórtices genera una fuerza transversal de carácter puramente armónico y constante, lo que simplifica considerablemente el análisis.

Por tanto, en el caso de este proyecto, se ha considerado más conveniente y coherente optar por el método armónico, que, si bien menos preciso en ciertos aspectos, proporciona resultados fiables y seguros dentro del marco de diseño planteado.

El presente apartado expone el desarrollo del método establecido en la normativa, cuya aplicación práctica se demostrará posteriormente mediante un ejemplo numérico.

Para estimar el desplazamiento transversal máximo, el código proporciona una fórmula empírica que relaciona distintos parámetros adimensionales y factores correctores que caracterizan tanto el comportamiento aerodinámico del flujo como la respuesta estructural. El valor resultante representa una amplitud de oscilación máxima debida a la resonancia con el viento.

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \frac{1}{Sc} k \cdot k_w \cdot C_{lat} \quad (3.1.17)$$

Donde,

St	Es el número de Strouhal
Sc	Es el número de Scruton
K_w	Es el factor de longitud efectiva de correlación
k	Es el factor de la forma modal
C_{lat}	Es el coeficiente de fuerza lateral

El coeficiente de fuerza lateral es un parámetro adimensional que cuantifica la intensidad de la fuerza transversal generada sobre una estructura como consecuencia del desprendimiento de vórtices. Esta fuerza actúa perpendicularmente a la dirección del viento y puede inducir desplazamientos oscilatorios importantes, especialmente si coincide con una de las frecuencias naturales de la estructura.

Este coeficiente permite incorporar de forma simplificada los efectos aerodinámicos complejos del flujo de viento, tales como la forma de la sección transversal, la rugosidad superficial o la intensidad de la turbulencia. Al utilizarse dentro del método armónico propuesto por el Eurocódigo, el valor de C_{lat} actúa directamente como un factor de amplificación de la respuesta estructural, influyendo en la estimación del desplazamiento transversal máximo. En otras palabras, cuanto mayor sea este coeficiente, mayor será la fuerza inducida por el viento, y, por tanto, más significativa será la vibración transversal estimada.

El uso de C_{lat} es fundamental para traducir fenómenos físicos complejos a un marco de cálculo práctico, permitiendo evaluar la vulnerabilidad de estructuras esbeltas como postes, mástiles o chimeneas sin necesidad de recurrir a análisis computacional avanzado. Además, su inclusión en el modelo garantiza una aproximación conservadora pero útil en las primeras fases del diseño estructural frente a la acción del viento.

Relación de velocidad crítica del viento	c_{lat}
$\frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \leq 0,83$	$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0,83 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} < 1,25$	$c_{lat} = \left(3 - 2,4 \cdot \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \right) \cdot c_{lat,0}$
$1,25 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}}$	$c_{lat} = 0$

donde

$c_{lat,0}$ es el valor básico de c_{lat} tal como se define en la tabla E.2 y, para cilindros circulares, en la figura E.2;

$v_{crit,i}$ es la velocidad crítica del viento (véase el capítulo E.1.3.1);

$v_{m,Lj}$ es la velocidad media del viento (véase el apartado 4.3.1) en el centro de la longitud efectiva de correlación, tal como se define en la figura E.3.

Ilustración 18. Coeficiente lateral, en función de la relación de velocidad crítica del viento

Por otro lado, la longitud de correlación se refiere a la distancia a lo largo de una estructura en la que las fuerzas aerodinámicas generadas por el viento (especialmente las debidas al desprendimiento de vórtices) se consideran suficientemente coherentes o correlacionadas entre sí.



Cuando el viento incide sobre una estructura esbelta, el desprendimiento de vórtices no ocurre de forma perfectamente sincronizada en toda su altura. De hecho, debido a la turbulencia atmosférica y a la flexibilidad estructural, los vórtices tienden a formarse de manera local e independiente en diferentes zonas de la estructura. Esta falta de sincronización significa que no toda la longitud de la estructura contribuye por igual a la vibración transversal inducida por el viento.

La longitud de correlación permite cuantificar qué porción de la estructura vibra de manera coordinada ante estas excitaciones transversales. Esta medida se utiliza en el cálculo de la longitud efectiva de correlación, y a través de ella se obtiene el factor K_w , que aparece en la fórmula del método armónico para estimar el desplazamiento transversal máximo.

En términos prácticos, la longitud de correlación ayuda a evitar una sobreestimación de los efectos del viento, reconociendo que las fuerzas aerodinámicas no están perfectamente alineadas a lo largo de toda la estructura. Es, por tanto, un factor corrector que ajusta el modelo para hacerlo más realista, teniendo en cuenta la variabilidad espacial del viento y la dinámica estructural.

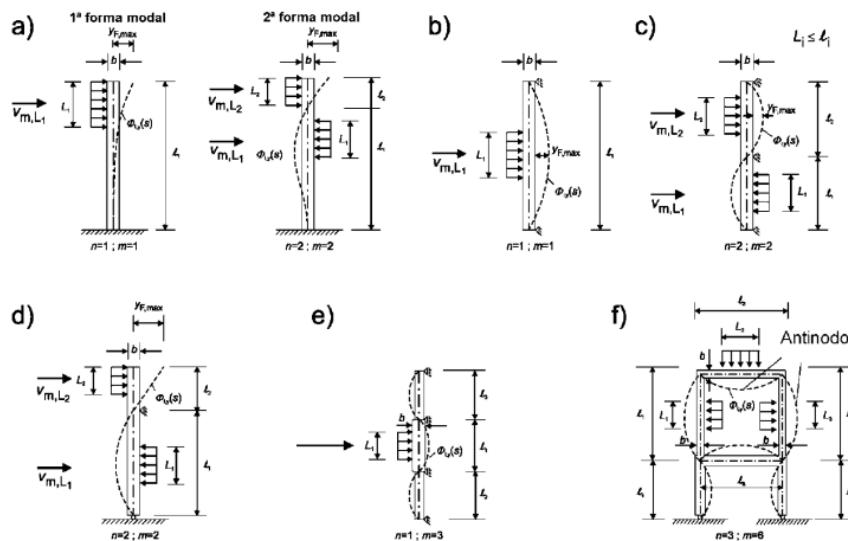


Ilustración 19. Ejemplos de aplicación de la longitud de correlación

Finalmente, para calcular la amplitud máxima de las oscilaciones inducidas por el desprendimiento de vórtices, encontramos el factor de forma modal. Un parámetro que permite tener en cuenta cómo se distribuye la deformada modal de una estructura frente al viento en la dirección transversal.



En términos simples, representa la eficacia con la que una determinada forma de vibración (modo propio) contribuye a la respuesta global de la estructura frente a la acción del viento. Se obtiene integrando la forma modal de vibración a lo largo de la altura de la estructura y normalizándola adecuadamente. Cuanto más uniforme y coherente sea la forma modal en relación con la excitación del viento, mayor será el valor de K. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{\sum \int |\phi_{i,y}(s)| ds}{4\pi \sum \int |\phi_{i,y}^2(s)| ds} \quad (3.1.18)$$

Donde,

$\phi_{i,y}(s)$ Es la forma modal i perpendicular a la acción del viento

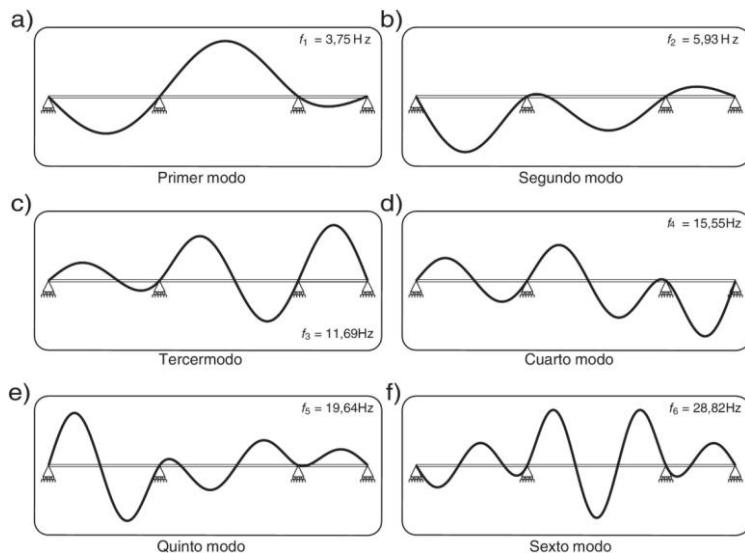


Ilustración 20. Estimación de las masas modales de una estructura

3.1.3.7 Número de ciclos de carga

La carga cíclica se define como la aplicación recurrente de tensiones sobre un material. Este tipo de solicitud puede inducir un fenómeno conocido como fatiga, que conduce al fallo estructural incluso con tensiones inferiores a la resistencia estática del material.

El estudio de este fenómeno se originó durante la Revolución Industrial, cuando los ingenieros comenzaron a observar fallos prematuros en componentes de maquinaria sometidos a cargas repetitivas, como ejes de trenes y hélices. Posteriormente, se comprendió que este concepto era aplicable a otros ámbitos, incluyendo el efecto de las cargas dinámicas del viento sobre las estructuras.

Por esta razón, a continuación, se detalla el procedimiento para determinar un parámetro clave relacionado con este efecto, el cual será fundamental para los cálculos posteriores de este trabajo.

$$n(T \cdot n_y \cdot v_{crit} \cdot v_0) = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right] \quad (2.1.19)$$

Donde,

n_y	Es la frecuencia natural del modo perpendicular a la acción del viento (Hz)
T	Vida útil en segundos
ε_0	Es el factor de ancho de banda

3.2 Cálculo dinámico

Dado el carácter cíclico y oscilante de la acción del viento sobre estructuras esbeltas, resulta fundamental abordar este problema desde una perspectiva dinámica. Tratar el sistema como estático implicaría considerar únicamente los valores medios o máximos de las cargas aplicadas, sin tener en cuenta su variación temporal, la frecuencia de excitación ni la posibilidad de fenómenos de resonancia. Esto podría conducir a una subestimación significativa de las tensiones alternantes que son, precisamente, las responsables del deterioro por fatiga.

Por esta razón, se ha optado por un enfoque basado en el análisis de vibraciones estructurales, en el cual se estudian tanto las vibraciones libres como las vibraciones forzadas (armónicas), en configuraciones amortiguadas y no amortiguadas. Este enfoque permite caracterizar de forma precisa el comportamiento dinámico del sistema, identificar su frecuencia natural, cuantificar el efecto del amortiguamiento, y estimar con mayor realismo el rango de tensiones al que estará sometida la estructura durante su vida útil.

La base teórica de este estudio se apoya en el enfoque clásico desarrollado por Anil K. Chopra, cuya obra es ampliamente reconocida por su rigor matemático y su aplicabilidad directa a problemas de dinámica estructural. Su formulación permite modelar de forma precisa la respuesta de sistemas lineales frente a excitaciones periódicas, incluyendo el efecto del amortiguamiento viscoso, crucial para predecir el nivel real de vibraciones inducidas por el viento.

Este tratamiento dinámico no solo proporciona una comprensión más completa del problema estructural, sino que es indispensable para evaluar adecuadamente el riesgo de fatiga, establecer criterios de diseño seguros y proponer medidas correctoras o de mejora en caso necesario.

3.2.1 Vibración libre

Una estructura se encuentra sometida a vibración libre cuando, tras ser desviada de su posición de equilibrio estático, se le permite oscilar sin la intervención de fuerzas dinámicas externas adicionales. En esta parte del proyecto se abordará el estudio de la vibración libre de la estructura, haciendo uso del modelo de un sistema de un solo grado de libertad (1GDL). Se verá que la razón de decaimiento del movimiento en vibración libre está controlada por la fracción de amortiguamiento. Así, los resultados analíticos que describen la vibración libre proporcionan una base para determinar la frecuencia natural y la fracción de amortiguamiento de una estructura.

Aunque el amortiguamiento en las estructuras reales se debe a varios mecanismos de disipación de la energía que actúan de manera simultánea, un enfoque matemáticamente práctico consiste en idealizarlos mediante el amortiguamiento viscoso equivalente. Por tanto, en esta sección se abordará principalmente el estudio de la vibración libre en sistemas con amortiguamiento de tipo viscoso.

3.2.1.1 Vibración libre no amortiguada

El movimiento de los sistemas lineales de 1GDL, visualizados como un marco idealizado de un nivel o un sistema masa-resorte-amortiguador, sometido a la fuerza externa $p(t)$ se rige por la siguiente ecuación, en la cual si se establece $p(t) = 0$, se obtiene la ecuación diferencial que rige la vibración libre del sistema, que para los sistemas sin amortiguamiento ($c = 0$) se especifica como:

$$m\ddot{u} + ku = p(t)$$

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (3.2.1)$$

La vibración libre se inicia al sacar al sistema de su posición de equilibrio estático, imprimiendo a la masa cierto desplazamiento $u(0)$ y velocidad $\dot{u}(0)$ en el tiempo cero, definido como el instante en que se inicia el movimiento:

$$u = u(0) \quad \dot{u} = \dot{u}(0)$$



La solución de la ecuación diferencial homogénea sujeta a estas condiciones iniciales se obtiene por métodos comunes:

$$u(t) = u(0) \cos w_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin w_n t \quad (3.2.2)$$

Donde,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.2.3)$$

Dicha ecuación se representa con la gráfica en la ilustración 21. Ésta muestra que el sistema experimenta un movimiento vibratorio (u oscilatorio) alrededor de su posición de equilibrio estático (o no deformada, $u = 0$); y que este movimiento se repite después de cada $2\pi/\omega_n$ segundos. En particular, los estados (desplazamiento y velocidad) de la masa en dos instantes de tiempo, t_1 y $t_1 + 2\pi/\omega_n$, son idénticos: $u(t_1) = u(t_1 + 2\pi/\omega_n)$ y $\dot{u}(t_1) = \dot{u}(t_1 + 2\pi/\omega_n)$.

El movimiento mostrado en la figura 21 se conoce como *movimiento armónico simple*.

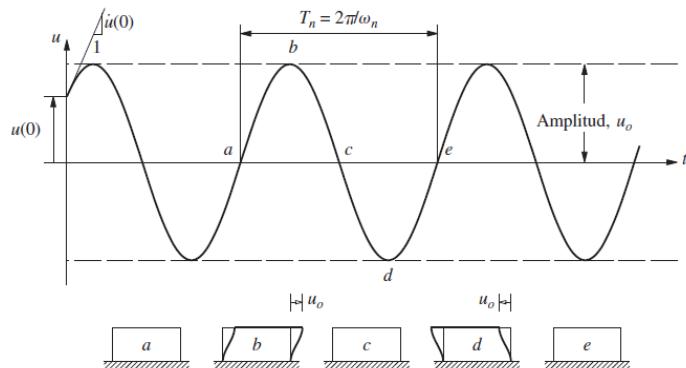


Ilustración 21. Vibración libre de un sistema sin amortiguamiento

La porción $a-b-c-d-e$ de la curva de tiempo-desplazamiento describe un ciclo de vibración libre del sistema. A partir de su posición de equilibrio estático (o no deformada) en a , la masa se mueve a la derecha, alcanzando su desplazamiento positivo máximo u_0 en b , momento en el cual la velocidad es cero y el desplazamiento comienza a decrecer; luego la masa vuelve de nuevo a su posición de equilibrio c , momento en el cual la velocidad es máxima y por lo tanto la masa continua moviéndose a la izquierda; después, la masa llega a su desplazamiento mínimo $-u_0$ en d , momento en el cual la velocidad es cero de nuevo y el desplazamiento comienza a disminuir otra vez hasta que la masa vuelve a su posición de equilibrio en e .

En el instante de tiempo e , $2\pi/w_n$ segundos después del instante de tiempo a , el estado (desplazamiento y velocidad) de la masa es el mismo que en el momento a , y la masa está lista para comenzar un nuevo ciclo de vibración.

El tiempo necesario para que un sistema no amortiguado complete un ciclo completo de vibración libre se denomina período natural de vibración del sistema, representado como T_n y expresado en segundos.

Este parámetro se encuentra relacionado con la frecuencia angular natural de vibración, w_n , medida en radianes por segundo, mediante la siguiente expresión:

$$T_n = \frac{2\pi}{w_n} \quad (3.2.4)$$

Un sistema ejecuta $1/T_n$ ciclos en 1 segundo. Esta frecuencia cíclica natural de vibración se define mediante:

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (3.2.5)$$

Las propiedades de vibración natural vistas anteriormente (w_n, T_n, f_n) dependen sólo de la masa y rigidez de la estructura. Por tanto, es importante saber que en un sistema de un grado de libertad (1GDL), si la masa se mantiene constante, aquel con mayor rigidez presentará una frecuencia natural más alta y un periodo natural más reducido. De forma similar, para dos sistemas con igual rigidez, el sistema de mayor masa tendrá una frecuencia natural más baja y un periodo natural más largo.

El calificativo "natural" que acompaña a las magnitudes (w_n, T_n, f_n) indica que son propiedades propias del sistema en condiciones de vibración libre, es decir, en ausencia de cualquier tipo de excitación externa. Además, en sistemas lineales, estas características son independientes del desplazamiento o la velocidad inicial.

El sistema no amortiguado oscila hacia adelante y hacia atrás entre el desplazamiento máximo u_0 , y el desplazamiento mínimo $-u_0$. La magnitud u_0 , de estos dos valores de desplazamiento es igual y se denomina la amplitud de movimiento, dada por:

$$u_0 = \sqrt{[u(0)]^2 + \left[\frac{\dot{u}(0)}{w_n}\right]^2} \quad (3.2.6)$$

La amplitud depende del desplazamiento y la velocidad inicial. Ciclo tras ciclo permanece igual; es decir, el movimiento no decae, ya que no existe amortiguamiento que disipe la energía.

3.2.1.2 Vibración libre viscosamente amortiguada

La vibración libre viscosamente amortiguada se refiere al movimiento oscilatorio de una estructura después de ser perturbada de su posición de equilibrio, en ausencia de fuerzas externas, considerando que existe un mecanismo de disipación de energía proporcional a la velocidad del movimiento. Este tipo de amortiguamiento, conocido como amortiguamiento viscoso, modela la pérdida gradual de energía en el sistema debido a fricciones internas o efectos del medio ambiente, haciendo que las amplitudes de vibración disminuyan progresivamente con el tiempo hasta que la estructura vuelve a un estado de reposo.

Si se establece $p(t)=0$ en la ecuación, se obtiene la ecuación diferencial que rige la vibración libre de los sistemas de 1GDL con amortiguamiento:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.2.7)$$

Al dividir entre m resulta,

$$\ddot{u} + 2\zeta w_n \dot{u} + w_n^2 u = 0 \quad (3.2.8)$$

donde $w_n = \sqrt{k/m}$ como se ha definido anteriormente y

$$\zeta = \frac{c}{2mw_n} = \left| \frac{c}{c_{cr}} \right| \quad (3.2.9)$$

Se hará referencia a

$$c_{cr} = 2mw_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{w_n} \quad (3.2.10)$$

Aparece pues la fracción de amortiguamiento crítico, ζ . El amortiguamiento crítico es el nivel mínimo de amortiguamiento necesario para evitar que un sistema vibratorio realice oscilaciones libres después de ser perturbado. Cuando un sistema alcanza este valor de amortiguamiento, retorna a su posición de equilibrio en el menor tiempo posible sin realizar vibraciones. Si el amortiguamiento es inferior al crítico, el sistema vibrará de forma amortiguada; si es superior, el sistema volverá al equilibrio sin oscilar, pero de manera más lenta. El amortiguamiento crítico depende de la masa y la rigidez del sistema.

La constante de amortiguamiento c es una medida de la energía disipada en un ciclo de vibración libre o en un ciclo de vibración forzada armónica.



3.2.1.2.1 Tipos de movimientos

En la vibración libre amortiguada de un sistema 1GDL, el tipo de movimiento que experimenta la estructura depende de la cantidad de amortiguamiento presente en relación con el amortiguamiento crítico. Se distinguen tres tipos de respuesta.

En primer lugar, el comportamiento subamortiguado, donde el amortiguamiento es menor que el crítico ($\zeta < 1$), se caracteriza porque el sistema oscila alrededor de su posición de equilibrio con una amplitud que decrece progresivamente en el tiempo debido a la disipación de energía, siendo el caso más habitual en estructuras reales; en segundo lugar, cuando el amortiguamiento es igual al crítico ($\zeta = 1$), se produce un comportamiento críticamente amortiguado, en el cual el sistema retorna a su posición de equilibrio de la manera más rápida posible sin experimentar oscilaciones, siendo ideal cuando se busca evitar movimientos vibratorios; finalmente, en el caso de amortiguamiento mayor que el crítico ($\zeta > 1$), se presenta el comportamiento sobreamortiguado, donde el sistema también retorna a su posición de equilibrio sin oscilaciones, aunque de forma más lenta que en el caso de amortiguamiento crítico.

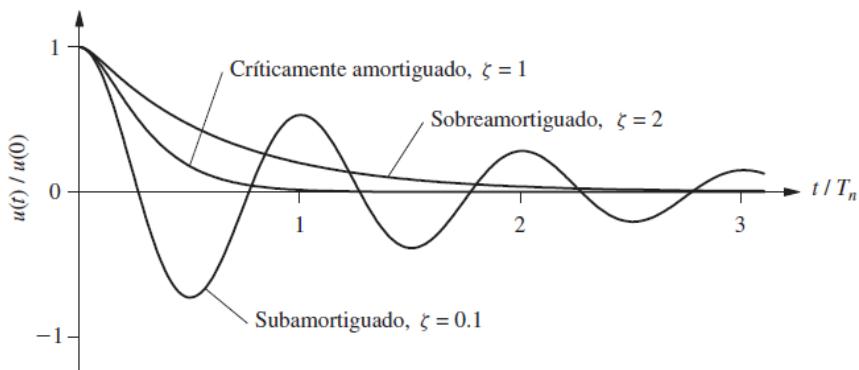


Ilustración 22. Vibración libre de sistemas subamortiguado, críticamente amortiguado y sobreamortiguado

Seguidamente, se analizará el comportamiento subamortiguado, dado que representa el fenómeno más común en estructuras sometidas a cargas dinámicas.

La solución de la ecuación sujeta a las condiciones iniciales de la ecuación para sistemas con $C < C_{cr}$ o $\zeta < 1$ es

$$u(t) = e^{-\zeta w_n t} \left[u(0) \cos w_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta w_n u(0)}{w_D} \cdot \sin w_D t \right] \quad (3.2.11)$$



La ecuación se representa en la siguiente gráfica, que muestra la respuesta a la vibración libre de un sistema de 1GDL con fracción de amortiguamiento $\zeta=0,05$.

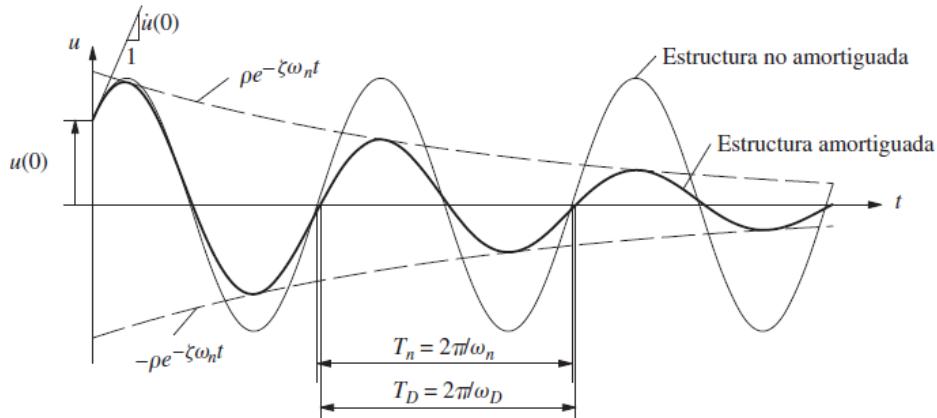


Ilustración 23. Efectos del amortiguamiento sobre la vibración libre

La figura presentada permite analizar de manera clara los efectos que introduce el amortiguamiento en la vibración libre de una estructura. Se representan dos respuestas dinámicas distintas: una correspondiente a un sistema no amortiguado y otra a un sistema amortiguado.

En el caso de la estructura no amortiguada, la amplitud de las oscilaciones permanece constante a lo largo del tiempo, ya que no existe ningún mecanismo de disipación de energía. La frecuencia de vibración en este caso es la denominada frecuencia natural w_n , asociada a un periodo natural $T_n = \frac{2\pi}{w_n}$ que representa el tiempo que tarda la estructura en completar un ciclo completo de vibración libre.

Por el contrario, para la estructura amortiguada, la vibración se caracteriza por un decaimiento progresivo de la amplitud a medida que transcurre el tiempo. Este fenómeno se debe a la disipación de energía introducida por el mecanismo de amortiguamiento, que provoca que la energía vibratoria se reduzca en cada ciclo. El decrecimiento de la amplitud sigue una ley de tipo exponencial, representada por las curvas envolventes $\pm \rho e^{-\zeta w_n t}$, donde ζ es el coeficiente de amortiguamiento adimensional, y w_n es la frecuencia natural no amortiguada.

Además, se observa que la presencia de amortiguamiento no solo afecta a la amplitud, sino también a la frecuencia de vibración del sistema. La estructura amortiguada vibra a una frecuencia ligeramente inferior a la natural, denominada frecuencia amortiguada w_D , lo que implica un periodo de vibración $T_D = \frac{2\pi}{w_D}$ algo mayor que el periodo T_n de la estructura no amortiguada.

Este análisis es de gran importancia en el estudio de estructuras sometidas a cargas dinámicas, ya que el comportamiento amortiguado condiciona la vida útil frente a fenómenos como el daño por fatiga. La disipación de energía a través del amortiguamiento puede ayudar a reducir las vibraciones inducidas por cargas cíclicas, evitando así resonancias peligrosas que amplifiquen las tensiones internas y aceleren los mecanismos de fallo estructural.

El efecto más importante del amortiguamiento es sobre la rapidez de decaimiento en vibración libre. En este caso, se consideran cuatro sistemas que poseen el mismo periodo natural de vibración T_n , lo que implica que sus propiedades de masa y rigidez son equivalentes, variando únicamente su fracción de amortiguamiento ζ , con valores del 2%, 5%, 10% y 20%. El desplazamiento normalizado $u(t) / u(0)$ se representa en función del tiempo también normalizado respecto al periodo T_n , permitiendo observar claramente la influencia del amortiguamiento en la evolución temporal de la respuesta dinámica.

Se aprecia en la ilustración 24 que a medida que aumenta el amortiguamiento, la estructura disipa energía más rápidamente, lo que se traduce en una reducción más rápida de la amplitud de las oscilaciones. En los sistemas con bajo amortiguamiento, como el de $\zeta=2\%$, las vibraciones persisten durante muchos ciclos antes de extinguirse de manera significativa. Sin embargo, conforme el amortiguamiento aumenta, como en los casos de $\zeta=10\%$ o $\zeta=20\%$, el decaimiento de la amplitud es mucho más rápido, limitando el número de ciclos apreciables de vibración.

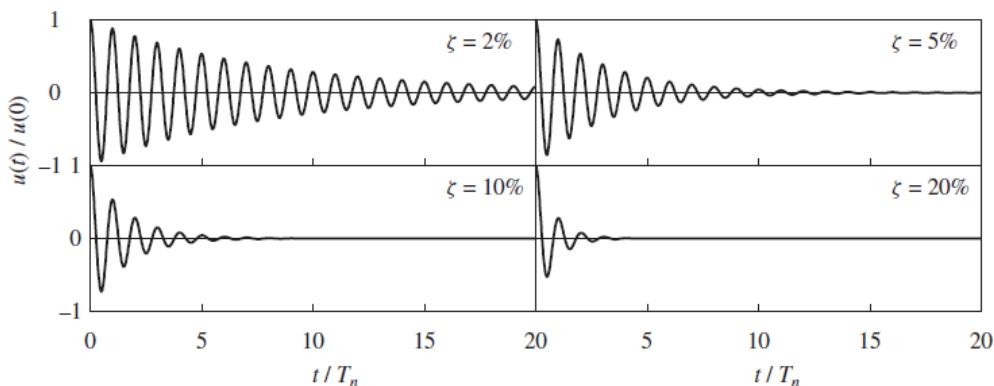


Ilustración 24. Respuesta de vibración libre de un sistema amortiguado subamortiguado



3.2.2 Vibración forzada

En dinámica estructural, el estudio de la respuesta a excitaciones armónicas y periódicas constituye una base fundamental para comprender el comportamiento de los sistemas ante acciones dinámicas recurrentes. Una excitación armónica se define como una fuerza que varía de manera sinusoidal en el tiempo, mientras que una excitación periódica puede descomponerse en una serie de componentes armónicas de diferentes frecuencias. La respuesta de una estructura a estas acciones no solo depende de la magnitud y frecuencia de la excitación, sino también de las propiedades dinámicas inherentes del sistema, como su masa, rigidez y amortiguamiento.

El análisis de la respuesta armónica permite evaluar cómo varían los desplazamientos, velocidades y aceleraciones en función de la frecuencia excitadora, poniendo especial atención a fenómenos críticos como la resonancia. Este fenómeno ocurre cuando la frecuencia de la excitación coincide o se aproxima a una de las frecuencias naturales de la estructura, dando lugar a amplitudes de vibración elevadas que pueden comprometer su integridad. Por otra parte, el amortiguamiento desempeña un papel clave al moderar la respuesta del sistema, atenuando los efectos de las cargas dinámicas.

3.2.2.1 Vibración armónica de sistemas no amortiguados

A continuación, se presenta el estudio de la vibración armónica en sistemas no amortiguados, basado en los fundamentos expuestos por Anil K. Chopra en *Dinámica de Estructuras*. Este análisis resulta esencial para comprender el comportamiento dinámico de las estructuras cuando están sometidas a cargas periódicas, como es el caso de las acciones cíclicas de viento sobre estructuras esbeltas. El estudio parte de un modelo simplificado de un sistema de un solo grado de libertad (1GDL), sin disipación de energía, que permite identificar la amplitud o valor máximo de la fuerza p_0 , y la frecuencia de excitación o fuerza de forzamiento w .

A continuación, estableciendo $p(t) = p_0 \operatorname{sen} wt$, se obtiene la ecuación diferencial que controla la vibración forzada armónica del sistema, que en los sistemas sin amortiguación se especifica como:

$$m\ddot{u} + ku = p_0 \operatorname{sen} wt \quad (3.2.12)$$

Esta ecuación debe resolverse para el desplazamiento o deformación $u(t)$ sometido a las condiciones iniciales.

A continuación, se ha graficado la respuesta de un sistema estructural idealizado de un solo grado de libertad y sin amortiguamiento frente a una excitación armónica. En la parte superior (a), se representa una fuerza externa periódica de tipo senoidal, caracterizada por una amplitud



p_0 y un periodo $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Esta carga modela fenómenos reales como el viento, en nuestro caso particular, pero también podría darse debido a una maquinaria rotativa o cualquier acción cíclica que actúe sobre una estructura. En la parte inferior (b), se muestra la respuesta dinámica del sistema, destacándose dos componentes principales: la respuesta total y la respuesta estacionaria. La respuesta total (línea continua) es el resultado de la combinación entre la respuesta transitoria, la cual es dependiente de las condiciones iniciales, y la respuesta estacionaria (línea discontinua), que vibra a la misma frecuencia que la fuerza excitadora.

Al tratarse de un sistema no amortiguado, la respuesta transitoria no se disipa con el tiempo, lo que implica que su influencia persiste indefinidamente. En el caso representado, la frecuencia de la carga aplicada es mucho menor que la frecuencia natural del sistema ($\omega/\omega_n = 0.2$), por lo que no se produce resonancia y la amplitud de la respuesta se mantiene moderada. Esta representación permite comprender cómo se comporta una estructura sometida a cargas periódicas en ausencia de mecanismos disipadores, subrayando la importancia del amortiguamiento en la dinámica estructural.

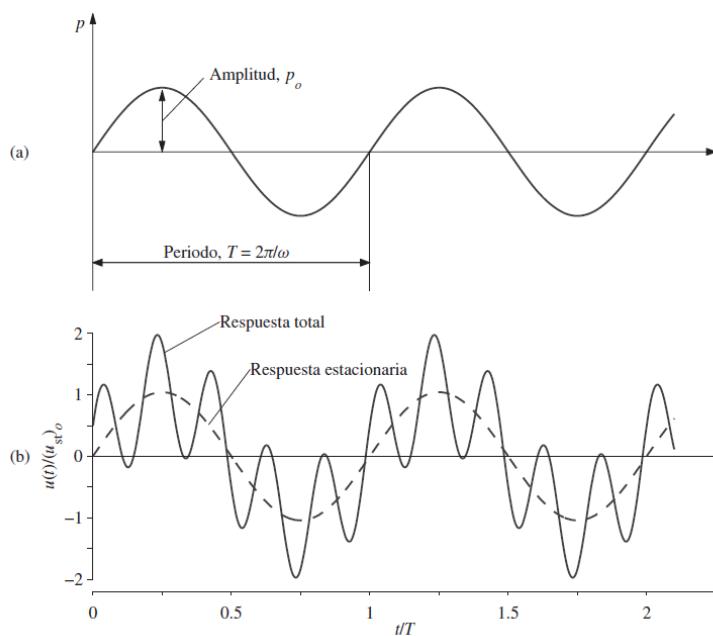


Ilustración 25. (a)Fuerza armónica (b)respuesta del sistema no amortiguado ante una fuerza armónica

Es de importancia recalcar que el componente transitorio se muestra como la diferencia entre las líneas continua y discontinua de la figura, donde se ve que continua indefinidamente. Ésta es solo una solución académica, porque el amortiguamiento inevitablemente presente en los sistemas reales hace que la vibración libre decaiga con el tiempo. Es por tal razón que este comportamiento se denomina vibración transitoria.



Una expresión simplificada de la respuesta en régimen permanente, omitiendo los efectos dinámicos iniciales, se expresa como:

$$u(t) = \left(\frac{\rho_0}{k} \cdot \frac{1}{1 - (w/w_n)^2} \right) \sin(wt) \quad (3.2.13)$$

Esta ecuación muestra cómo la amplitud de la respuesta dinámica depende fuertemente de la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del sistema.

Para w / w_n próximo a 1, el denominador tiende a cero, y la amplitud de la respuesta puede crecer de forma considerable, incluso sin la presencia de amortiguamiento. Esta situación ilustra la necesidad crítica de considerar fenómenos dinámicos en el diseño estructural, sobre todo cuando las estructuras están expuestas a fuerzas periódicas o cíclicas.

3.2.2.2 Vibración armónica con amortiguamiento viscoso

Cuando un sistema estructural idealizado de un solo grado de libertad (1GDL) es sometido a una excitación armónica, y además se considera la presencia de un mecanismo de disipación de energía mediante amortiguamiento viscoso, la respuesta dinámica del sistema cambia significativamente con respecto al caso no amortiguado.

El modelo matemático que describe este comportamiento es la ecuación diferencial de segundo orden:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = \rho_0 \operatorname{sen} wt \quad (3.2.14)$$

La solución general de esta ecuación consta de la respuesta transitoria que decae con el tiempo debido a la acción del amortiguamiento, y la respuesta estacionaria que representa el estado permanente al que llega el sistema, y que tiene la misma frecuencia que la fuerza excitadora. En presencia de amortiguamiento, el sistema alcanza un equilibrio dinámico donde la energía introducida por la fuerza externa es disipada constantemente por el mecanismo viscoso. Esto evita que se acumulen oscilaciones en el tiempo como ocurre en el caso no amortiguado, mitigando el efecto de la resonancia.

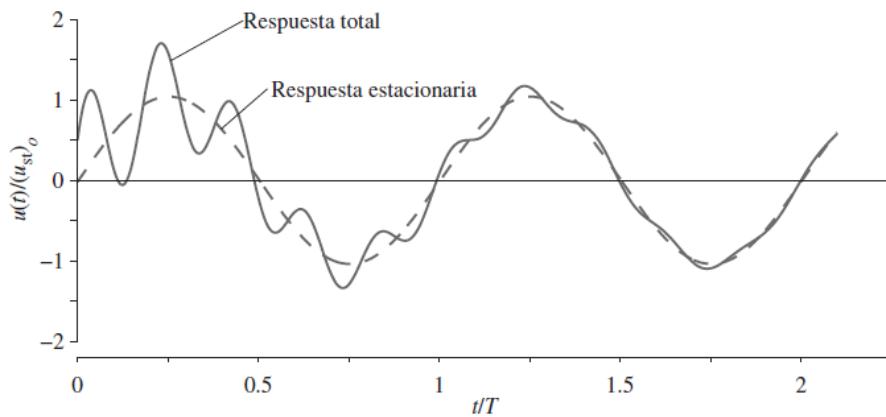
Aplicando las condiciones matemáticas iniciales obtenemos la solución completa de la ecuación:

$$u(t) = \underbrace{e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \operatorname{sen} \omega_D t)}_{\text{transitoria}} + \underbrace{C \operatorname{sen} \omega t + D \cos \omega t}_{\text{estacionaria}} \quad (3.2.15)$$

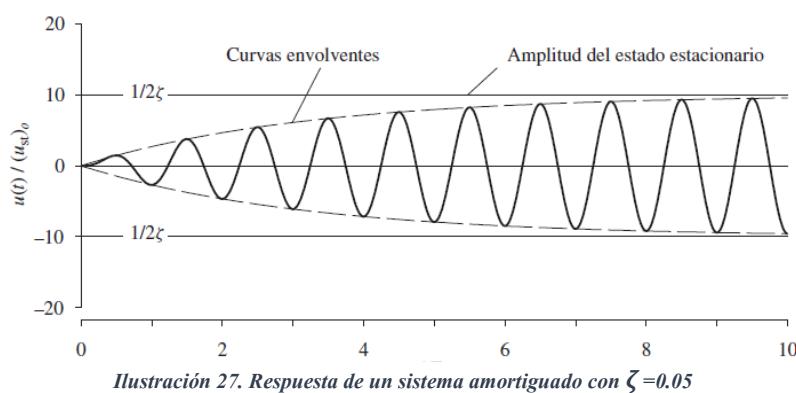


En la siguiente grafica se muestra la respuesta de un sistema con amortiguamiento viscoso sometido a una excitación armónica, dividiendo visualmente la respuesta total (línea continua) en dos componentes: la respuesta transitoria, que se manifiesta al inicio con oscilaciones de mayor amplitud y forma compleja debido a las condiciones iniciales, y la respuesta estacionaria (línea discontinua), que representa la oscilación permanente forzada con la misma frecuencia de la excitación.

A medida que transcurre el tiempo, la parte transitoria decae exponencialmente debido al efecto del amortiguamiento, hasta volverse despreciable, momento en el cual la respuesta total del sistema se aproxima a la respuesta estacionaria. Esta gráfica permite observar que, aunque el comportamiento a largo plazo del sistema es estable y periódico, pueden producirse máximos desplazamientos durante la fase transitoria, antes de alcanzar dicho estado estacionario.



Las siguientes dos gráficas ilustran cómo responde un sistema amortiguado a una fuerza sinusoidal cuando la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema (es decir, ocurre resonancia), considerando distintas proporciones de amortiguamiento viscoso.



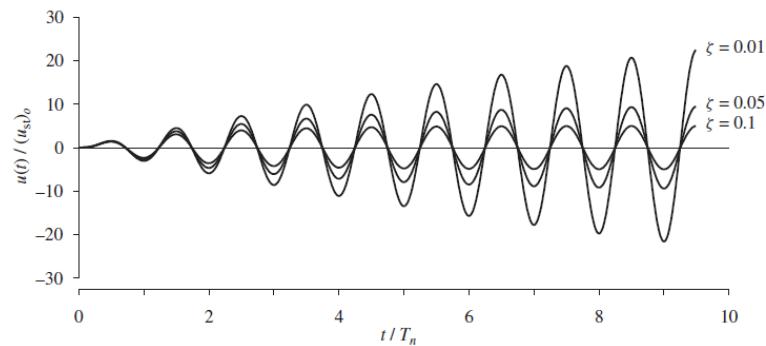


Ilustración 28. Respuesta de tres sistemas ($\zeta = 0.01, 0.05$ y 0.1)

En la ilustración 27, se muestra la respuesta de un sistema con amortiguamiento moderado ($\zeta = 0.05$). Al comienzo, la respuesta total crece rápidamente hasta alcanzar una amplitud estable, correspondiente a la respuesta en estado estacionario. Las curvas envolventes (líneas punteadas) delimitan la amplitud de la respuesta transitoria, y su forma decreciente muestra cómo el efecto de esta parte de la respuesta se atenúa con el tiempo debido al amortiguamiento. Finalmente, el sistema oscila con una amplitud constante, reflejando únicamente la influencia de la fuerza externa.

En la ilustración 28, se comparan tres sistemas con diferentes niveles de amortiguamiento ($\zeta = 0.01, 0.05$ y 0.1). Todos tienen la misma frecuencia de excitación igual a su frecuencia natural, pero la evolución de la respuesta varía significativamente. Para $\zeta = 0.01$ (amortiguamiento muy bajo), las oscilaciones iniciales crecen más antes de estabilizarse, alcanzando una mayor amplitud de respuesta en estado estacionario. A medida que ζ aumenta (0.05 y 0.1), el crecimiento de la respuesta se modera y la amplitud final disminuye. Esto demuestra que el amortiguamiento reduce la amplitud de resonancia y acelera la llegada al régimen estacionario, siendo un mecanismo crucial para controlar vibraciones excesivas.

3.2.2.2.1 Deformación máxima y cambio de base

Cuando un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso es sometido a una excitación armónica del tipo $\rho(t) = \rho_0 \sin(t)$, su respuesta en estado estacionario también tiene una forma sinusoidal, pero con una amplitud modificada y un desfase con respecto a la excitación. Este fenómeno es de especial interés en el análisis dinámico, ya que describe cómo un sistema responde ante cargas periódicas reales, como las generadas por maquinaria rotativa, vibraciones del suelo, o fuerzas sísmicas modeladas de forma simplificada.

La deformación o desplazamiento en estado estacionario se puede expresar como:

$$u(t) = (u_{st})_0 \cdot R(w) \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad (3.2.16)$$

Donde,

$(u_{st})_0 = \frac{\rho_0}{k}$	Deformación estática máxima bajo carga estática equivalente
$R(w)$	Factor de amplificación dinámica
ϕ	Representa el ángulo de desfase entre la fuerza y la respuesta

La deformación máxima ocurre en la vecindad de la resonancia, es decir, cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema ($w \approx w_n$). En este caso, la amplitud máxima de la respuesta se amplifica considerablemente, especialmente si el amortiguamiento ζ es bajo, alcanzando un valor aproximado de:

$$\max(u(t)) \approx (u_{st})_0 \frac{1}{2\zeta} \quad (3.2.17)$$

Este resultado muestra que la amplitud de la respuesta puede crecer significativamente ante bajos niveles de amortiguamiento, lo que subraya la importancia de considerar mecanismos de disipación de energía en el diseño estructural.

Por otro lado, el cambio de fase ϕ depende de la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del sistema. Este ángulo se determina mediante la siguiente relación:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta(w / w_n)}{1 - (w / w_n)^2} \quad (3.2.18)$$

Cuando $w \ll w_n$, la respuesta está casi en fase con la excitación, sin embargo, se encontrará en resonancia cuando $w = w_n$, con un desfase de 90° . Para el último caso, $w \gg w_n$, la respuesta se encuentra en contrafase con la excitación.

En el contexto del análisis dinámico estructural, la amplificación dinámica es un fenómeno fundamental que describe el aumento de la respuesta de una estructura cuando se somete a cargas armónicas en comparación con su respuesta bajo cargas estáticas equivalentes. Según lo expuesto en el libro *Dinámica de estructuras* de Chopra, este efecto se analiza particularmente en sistemas con un solo grado de libertad (SDF), donde se observa que la amplitud de las oscilaciones inducidas depende críticamente de la relación entre la frecuencia de excitación externa y la frecuencia natural del sistema, así como del nivel de amortiguamiento presente.

Para una fuerza armónica del tipo $p(t) = p_0 \sin wt$, la estructura responde en régimen permanente con una vibración de la misma frecuencia w , pero cuya amplitud y fase están modificadas por el sistema. Esta modificación se cuantifica mediante el factor de amplificación dinámica, una función que alcanza su valor máximo cuando la frecuencia de la excitación coincide con la frecuencia natural del sistema, fenómeno conocido como resonancia. En ausencia de amortiguamiento, esta amplificación puede ser teóricamente infinita, lo que pone de manifiesto el riesgo de colapso estructural si no se controla adecuadamente este parámetro.

En consecuencia, el estudio de la amplificación dinámica permite entender cómo pequeñas excitaciones pueden generar grandes respuestas en estructuras con ciertas características geométricas y materiales, como es el caso de las estructuras esbeltas analizadas en este trabajo.

3.2.2.2.2 Frecuencias y respuestas resonantes

La frecuencia resonante representa una condición crítica que se produce cuando la frecuencia de una excitación armónica externa coincide con la frecuencia natural de la estructura. Esta situación da lugar a un fenómeno conocido como respuesta resonante, caracterizado por un notable aumento en la amplitud de las vibraciones. Según Chopra (Dinámica de Estructuras), este comportamiento es particularmente relevante en sistemas de un solo grado de libertad (1GDL), donde la amplitud alcanza su valor máximo en condiciones de resonancia.

Para cuantificar este efecto, se introduce el concepto de factor de amplificación dinámica, definido como la relación entre la amplitud de la respuesta forzada en régimen permanente y la amplitud estática de la estructura sometida a la misma carga. Este factor se expresa como:

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + [2\zeta r]^2}} \quad (3.2.19)$$

Donde,

R_d	Es el factor de amplificación dinámica
$r = \frac{w}{w_n}$	Es la relación entre la frecuencia de excitación w y la frecuencia natural w_n
ζ	Es el coeficiente de amortiguamiento

Esta ecuación muestra que a medida que la frecuencia de excitación se approxima a la frecuencia natural ($r \rightarrow 1$), el denominador se minimiza y, por tanto, la respuesta se amplifica. En sistemas sin amortiguamiento ($\zeta=0$), el factor R_d tiende teóricamente al infinito en resonancia, lo que subraya la importancia del amortiguamiento en el diseño estructural para limitar los efectos resonantes.

3.2.2.2.3 Ancho de banda

Uno de los conceptos fundamentales es el ancho de banda, especialmente relevante en sistemas amortiguados de un solo grado de libertad (1GDL). Según el enfoque del libro *Dinámica de Estructuras* de Chopra, el ancho de banda se define como el intervalo de frecuencias alrededor de la resonancia en el cual la amplitud de respuesta del sistema es significativa, concretamente igual o superior al 70.7% del valor máximo alcanzado en la resonancia.

Este umbral corresponde a una caída de 3 dB en la respuesta, y es indicativo de la eficacia con la que el sistema disipa energía.

El ancho de banda está directamente relacionado con el coeficiente de amortiguamiento ζ , y se puede expresar mediante la relación $\Delta_w \approx 2\zeta w_n$, donde w_n es la frecuencia natural del sistema. A medida que aumenta el amortiguamiento, el ancho de banda también se amplía, lo que implica que la estructura mantiene una respuesta notable en un rango más amplio de frecuencias, aunque con menor intensidad máxima.

Por tanto, el ancho de banda constituye una herramienta clave para comprender la sensibilidad de la estructura ante excitaciones dinámicas en distintos rangos de frecuencia, y se debe considerar en el diseño estructural para prevenir efectos de resonancia indeseados.

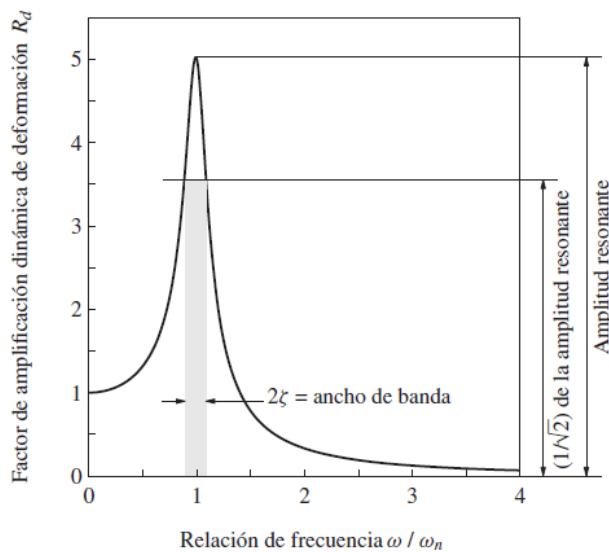


Ilustración 29. curva de respuesta en frecuencia



3.3 Fatiga

La fatiga es un proceso de deterioro de la estructura diferido en el tiempo que ocurre en aquellos elementos metálicos sometidos a ciclos de tensión repetidos, incluso por debajo del límite elástico. En estas circunstancias comienza la nucleación y el crecimiento progresivo de grietas, que se inician generalmente en defectos, tanto intrínsecos como extrínsecos del material, tales como cambios bruscos de geometría, en puntos de concentración de tensiones o, simplemente, en las partes más vulnerables, hasta que el tamaño de la grieta alcanza el punto crítico en el que sucede el fallo del elemento.

Este efecto fue estudiado en primer lugar en 1870 y fue publicado por Wöhler, un ingeniero alemán que analizó el fenómeno en vigas del ferrocarril y que realizó una gran campaña experimental de la que se obtuvieron las primeras "Curvas de Wöhler", que fueron la matriz de las que se conocen en nuestros días en la normativa, las Curvas S-N. Este dato se reseña y resulta interesante, como comentario, porque el fenómeno de la fatiga se ha comenzado a estudiar seriamente precisamente como un problema de ingeniería civil, que afectaba a la infraestructura del ferrocarril y que debía ser considerado en su proyecto y concepción.

Esta sección del proyecto tiene como finalidad introducir la metodología general aplicada en la verificación a fatiga de estructuras metálicas esbeltas, como es el caso del poste de iluminación objeto de estudio. Se presentarán los fundamentos conceptuales necesarios para entender los procedimientos normativos que se aplicarán más adelante, así como los factores clave que influyen en el desarrollo del daño por fatiga bajo cargas cíclicas inducidas por el viento. Asimismo, se comentarán las limitaciones de los modelos empleados en este tipo de análisis estructural.

Los principales factores que afectan al comportamiento frente a fatiga son, como se puede adelantar en base a lo dicho, las tensiones, el número de ciclos, la geometría, el material del detalle estructural y la agresividad medioambiental.

En lo relativo a las tensiones, hay dos factores a tener en cuenta en cada ciclo; el primero es el rango de tensiones, que es la diferencia entre las tensiones máxima y mínima del ciclo y, el segundo, es la tensión media, que es la media de la tensión en dicho ciclo, es decir, la media aritmética entre la tensión máxima y mínima del ciclo. El primer factor está relacionado principalmente con la variación de las acciones y, el segundo, puede vincularse con dicha variación o con tensiones residuales no deseadas, o tensiones medias debidas a otras acciones permanentes, como el efecto de pesos propios o el pretensado. Los conceptos de rango de tensión $\Delta\sigma$, tensión media σ_m y tensiones máxima y mínima, σ_{max} y σ_{min} , vienen especificados en la ilustración 30.

El mismo ciclo con una diferencia de tensión, en este caso residual, σ_{res} , no tendrá el mismo efecto en la propagación de la grieta de fatiga, siendo mayor cuanto mayor es la tensión media, tal como se verá más adelante.

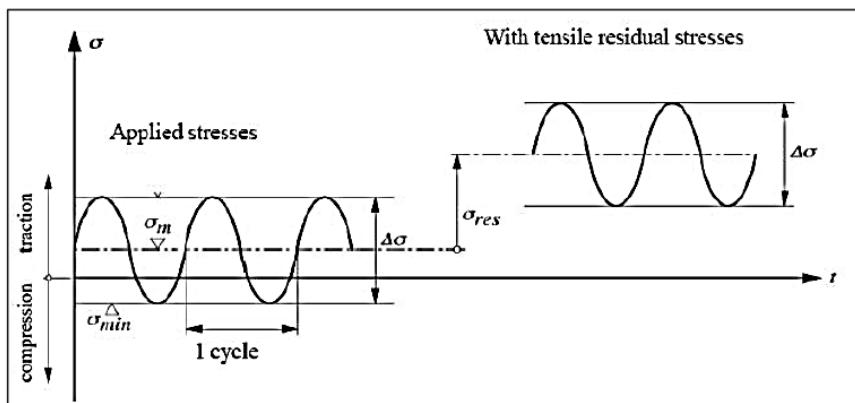


Ilustración 30. Definición de tensiones e influencia de las tensiones residuales

La geometría de un componente es un factor determinante en su comportamiento frente a la fatiga de materiales. Las discontinuidades geométricas, como muescas, agujeros, cambios bruscos de sección y esquinas vivas pueden generar concentraciones de tensiones que favorecen la iniciación y propagación de grietas bajo cargas cíclicas.

Para mejorar la resistencia a la fatiga, es esencial optimizar el diseño geométrico de los componentes. Algunas estrategias que se pueden aplicar son, por ejemplo, procurar transiciones suaves, evitando cambios bruscos en la sección de la pieza. Para ello, es recomendable utilizar empalmes y radios de curvatura adecuados, lo cual ayuda a reducir las concentraciones de tensiones. En segundo lugar, es importante eliminar los concentradores de tensiones. Esto implica diseñar los componentes sin muescas agudas ni orificios innecesarios, ya que estos elementos pueden actuar como puntos de inicio de grietas. Finalmente, se puede recurrir al uso de refuerzos estructurales. Incorporar nervaduras o elementos de refuerzo en las zonas más susceptibles permite distribuir las cargas de manera más uniforme y disminuir las tensiones locales.

El material seleccionado para la construcción de una estructura esbelta, como el poste de iluminación, desempeña un papel determinante en su comportamiento frente a la fatiga. Aun tratándose de un mismo detalle estructural, la resistencia a cargas cíclicas repetidas puede variar considerablemente en función del material utilizado, debido a sus propiedades mecánicas específicas (como el límite elástico, la tenacidad o el módulo de elasticidad), la forma de su curva tensión-deformación y su capacidad de disipar energía bajo solicitudes cíclicas, especialmente a distintas temperaturas.

Estas diferencias afectan directamente a la vida útil del componente estructural y a su vulnerabilidad frente al daño acumulativo por fatiga.

Sin embargo, el efecto del material no se limita únicamente a sus propiedades macroscópicas. Es esencial considerar factores microestructurales que derivan del proceso de fabricación y tratamiento posterior del material. Entre ellos se incluyen los tratamientos térmicos, químicos

o termoquímicos que modifican la microestructura y pueden influir tanto positiva como negativamente en la resistencia a fatiga. De igual forma, la presencia de impurezas o inclusiones no metálicas puede actuar como puntos de iniciación de fisuras.

En estructuras sometidas a ambientes exteriores, como es nuestro caso de estudio, deben tenerse en cuenta también fenómenos de degradación asociados a la exposición ambiental. La agresividad medioambiental está relacionada a su vez con dos nuevos factores fundamentales, por un lado, con la temperatura y por otro con la corrosión.

Las estructuras a elevadas temperaturas, en los casos prácticos más habituales en ingeniería estructural y civil, que no exceden de ciertos umbrales, no tienen un efecto reseñable en el comportamiento a fatiga del elemento estructural, aunque, no obstante, pueden ayudar aportando energía a otras formas de deterioro concomitantes, como la corrosión. Las bajas temperaturas, por el contrario, disminuyen considerablemente la resiliencia de los elementos estructurales, lo que a su vez disminuye los tamaños de grieta críticos a las que se produce el fallo de los elementos estructurales.

La corrosión más habitual se da en ambientes húmedos, en presencia de electrolitos corrosivos, como los cloruros, y es típica de ambientes marinos, no únicamente la zona inmediata a la costa, sino varios kilómetros tierra adentro. La presencia de humedad y de electrolito corrosivo se ve amplificada por errores de diseño a nivel global, como superficies horizontales, zonas de depósito y acumulación de aguas, errores a nivel local, como transiciones geométricas fuertes y mecanizaciones bruscas, combinaciones de materiales inapropiadas, acelerando la corrosión de uno que actúa como ánodo de sacrificio para el otro, acelerando el proceso de deterioro por procesos sinérgicos, o soldaduras mal practicadas, con inputs térmicos que evaporan elementos pasivantes, materiales de aporte inadecuados.

En estos casos, la corrosión y la fatiga ejercen un efecto sinérgico negativo, la corrosión ayuda en la fase de microiniciación de la fatiga, creando grietas a partir de las que se desarrolla la fatiga propiamente dicha, virtualmente borrando límites de durabilidad y llegando a acelerar considerablemente todo el proceso. Por otro lado, la fatiga puede romper capas del material pasivante y crear defectos superficiales a partir de los que se desencadene la corrosión.

Por último, deben valorarse también los aspectos asociados a las uniones soldadas. El tipo de soldadura, el material de aporte, las condiciones del proceso (velocidad, número de pasadas, input térmico, atmósfera protectora, etc.) y la calidad del cordón influyen directamente en el comportamiento a fatiga de la estructura. Las zonas afectadas térmicamente por el proceso de soldadura suelen presentar microestructuras heterogéneas que, si no se controlan adecuadamente, pueden convertirse en puntos críticos para la iniciación de grietas.

3.3.1 Tratamiento de la fatiga en la Normativa

Esta norma europea, EN 1993 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de aceros, especifica métodos de análisis de la resistencia a fatiga en elementos estructurales, conexiones y uniones sometidas a solicitudes de fatiga.

Los métodos de esta norma se basan en los resultados de ensayos de fatiga realizados con detalles constructivos de tamaño real, en los cuales se manifiestan los efectos de las imperfecciones geométricas y mecánicas resultantes de la fabricación del material y de la ejecución de los detalles, por ejemplo, los efectos de las tolerancias admitidas u de las tensiones residuales de soldadura.

Los métodos de análisis estructural de esta norma son aplicables a los aceros de construcción de todos los grados, a los aceros inoxidables, y a los aceros sin protección expuestos a la intemperie, excepto cuando se indica lo contrario en las tablas de categorías de detalle. Los tratamientos para mejorar la resistencia a fatiga posteriores a la ejecución de los detalles quedan fuera del ámbito de esta norma, a excepción de los de relajación de tensiones.

Los valores de resistencia a fatiga especificados en esta norma son aplicables a estructuras en servicio bajo condiciones atmosféricas normales, bien protegidas contra la corrosión y con mantenimiento regular.

3.3.1.1 Términos y condiciones

Antes de proceder con el desarrollo del cálculo, se presentan a continuación una serie de términos y conceptos fundamentales para la correcta comprensión del análisis posterior. Estas definiciones permiten establecer un marco técnico coherente en relación con la resistencia a fatiga en estructuras soldadas.

- Tensiones relevantes en el análisis estructural

Tensión nominal

Corresponde a la tensión experimentada por el material base o las uniones soldadas en regiones propensas a la iniciación de fisuras, determinada conforme a la teoría de la elasticidad lineal. Este valor no considera los efectos locales derivados de concentraciones de tensiones.

Tensión geométrica

Se refiere a la máxima tensión principal experimentada en el material base de un detalle constructivo, en las inmediaciones del pie del cordón de soldadura. Esta tensión se calcula considerando los efectos de concentración debidos a la configuración geométrica global del detalle.



Tensión residual

Las tensiones residuales son tensiones permanentes que permanecen en equilibrio dentro del material, sin depender de cargas externas. Estas pueden generarse durante procesos como la laminación, corte, retracción de soldaduras, montaje de componentes, o como resultado de plastificaciones por sobrecargas.

- Parámetros de solicitudación a fatiga

Proceso de carga

Secuencia determinada de cargas que se aplican repetidamente a lo largo de la vida útil de una estructura, generando un historial de tensiones.

Historial de tensiones

Secuencia de valores de tensión, medidos o calculados, que corresponden a los esfuerzos inducidos en un punto específico de la estructura debido al proceso de carga.

Carrera de tensión

Diferencia algebraica entre los valores extremos de tensión dentro de un ciclo específico del historial de tensiones.

Espectro de carreras de tensión

Distribución estadística que indica el número de veces que se repiten determinadas carreras de tensión dentro de un proceso de carga.

Vida útil de proyecto

Período de tiempo previsto durante el cual la estructura debe mantenerse segura y funcional, asegurando una probabilidad suficientemente baja de fallo por fatiga.

Sumatorio de Palmgren-Miner

Magnitud utilizada para evaluar el daño acumulado por fatiga en un componente estructural. Se obtiene como la suma de los cocientes entre los ciclos aplicados y los ciclos a fallo para cada nivel de carga.

- Resistencia a fatiga

Curva de resistencia a fatiga (curva S-N)

Relación cuantitativa entre la carrera de tensión y el número de ciclos necesarios para la rotura del material. Esta curva se emplea para determinar la categoría de detalle correspondiente a un componente estructural.

Categoría de detalle

Valor numérico que se asigna a un detalle estructural específico para una dirección de oscilación de la tensión dada. Define la curva de resistencia a fatiga aplicable para su análisis.

Este parámetro es esencial para:

- Estimar la vida útil de una estructura sometida a cargas cíclicas.
- Evaluar si el detalle puede soportar el número de ciclos previsto sin presentar fallo.
- Comparar diferentes alternativas de diseño en función de su comportamiento frente a la fatiga.



Límite de fatiga bajo amplitud constante

Valor máximo de la carrera de tensión (ya sea normal o cortante) que no genera daño por fatiga, determinado mediante ensayos con amplitud de carga constante.

Umbral de daño

Nivel de carrera de tensión por debajo del cual los ciclos presentes en el espectro de cálculo no contribuyen al incremento del daño acumulado.

3.3.1.2 Requisitos y métodos básicos

El cálculo de elementos estructurales frente a la fatiga debe garantizar una probabilidad suficientemente alta de funcionamiento seguro durante la vida útil de fatiga.

Los métodos de análisis de fatiga de esta norma se adaptan al principio de comparación de resistencias a la fatiga y efectos de acciones; esta comparación sólo es posible cuando las acciones de fatiga se cuantifican mediante los parámetros que emplea esta norma para evaluar la resistencia a fatiga.

Para que esta comparación sea válida, es esencial que las acciones de fatiga (las cargas o tensiones cíclicas aplicadas) se cuantifiquen utilizando los mismos parámetros que la norma emplea para evaluar la resistencia a la fatiga. Esto asegura una evaluación coherente y precisa del comportamiento del material o estructura bajo condiciones de fatiga.

Es importante recalcar que la aparición de una fisura de fatiga no significa necesariamente el final de la vida útil. Las fisuras deberían ser reparadas poniendo especial cuidado en evitar la creación de condiciones que propicien efectos entalla aún más desfavorables.

3.3.1.3 Método de análisis

El análisis estructural frente a la fatiga debería llevarse a cabo empleando bien el método de tolerancia al daño, o bien el método de integridad asegurada.

El método de tolerancia al daño tiene como objetivo garantizar, con un nivel adecuado de fiabilidad, el funcionamiento seguro de una estructura durante su vida útil de diseño. Este enfoque se basa en la premisa de que es posible que existan daños o defectos en la estructura y, por lo tanto, se centra en la detección y reparación temprana de estos antes de que alcancen un estado crítico. Para lograrlo, es esencial implementar y aplicar de manera regular un plan de inspección y mantenimiento riguroso, destinado a identificar y corregir daños ocasionados por fatiga.

Es fundamental destacar que la aplicación efectiva de este método es particularmente adecuada en situaciones donde, en caso de producirse daño por fatiga, se permite una redistribución de cargas entre las distintas partes del elemento estructural. Esta capacidad de redistribución asegura que la estructura pueda continuar operando de manera segura incluso cuando se detectan daños en componentes individuales. Además, la eficacia del método depende en gran



medida de la posibilidad de realizar inspecciones periódicas y de la previsión de que los defectos puedan ser detectados y reparados oportunamente.

Según lo establecido en la norma EN 1993-1-9:2005, se indica que el método de tolerancia al daño puede aplicarse cuando, en el evento de que ocurra daño por fatiga, es posible una redistribución de cargas entre los componentes de los elementos estructurales. Además, señala que el Anejo Nacional puede proporcionar disposiciones para programas de inspección, y que las estructuras evaluadas según esta norma, cuyo material se elige de acuerdo con la EN 1993-1-10 y que están sujetas a mantenimiento regular, se consideran tolerantes al daño.

Por tanto, el método de tolerancia al daño es una estrategia proactiva que reconoce la posibilidad de aparición de daños en la estructura y establece mecanismos para su detección y reparación antes de que comprometan la integridad estructural. Su aplicación es especialmente pertinente en estructuras donde es factible llevar a cabo inspecciones y mantenimientos regulares, y donde la redistribución de cargas en presencia de daños contribuye a mantener la seguridad y funcionalidad de la estructura durante su vida útil proyectada.

El método de integridad asegurada tiene como objetivo garantizar, con un nivel adecuado de fiabilidad, que una estructura opere de manera segura durante toda su vida útil de diseño sin necesidad de implementar planes regulares de inspección y mantenimiento específicos para detectar daños por fatiga. Este enfoque se basa en la premisa de que la estructura es concebida y construida de tal forma que no se anticipa la aparición de daños significativos por fatiga a lo largo de su vida operativa. Para lograrlo, es esencial una selección meticulosa de materiales de alta calidad y detalles constructivos que minimicen las concentraciones de tensiones, reduciendo así la susceptibilidad a la iniciación y propagación de grietas por fatiga.

Además, se requiere un análisis estructural exhaustivo que contemple todas las cargas cíclicas esperadas durante la vida útil de la estructura, asegurando que las tensiones inducidas permanezcan dentro de límites seguros para prevenir la acumulación de daño por fatiga.

La aplicación de factores de seguridad adecuados es también fundamental, ya que considera las incertidumbres inherentes en las cargas, propiedades de los materiales y métodos de análisis, proporcionando un margen adicional contra posibles fallos por fatiga.

Es importante destacar que, aunque el método de integridad asegurada reduce la dependencia de inspecciones periódicas específicas para detectar daños por fatiga, no implica la eliminación total de programas de mantenimiento general. Las estructuras deben seguir siendo objeto de inspecciones y mantenimientos regulares para garantizar su integridad frente a otros tipos de deterioro o daños no relacionados con la fatiga. Este método es especialmente adecuado en estructuras donde las inspecciones periódicas son difíciles de realizar o donde las consecuencias de una falla por fatiga podrían ser catastróficas. Al diseñar la estructura para que sea inherentemente resistente a la fatiga, se busca minimizar el riesgo de fallos inesperados y garantizar la seguridad durante toda la vida útil proyectada.

Según lo establecido en la norma UNE-EN 1993-1-9:2013, el método de integridad asegurada debe garantizar, con suficiente fiabilidad, el funcionamiento seguro de una estructura durante su vida útil de proyecto sin necesidad de un plan regular de vigilancia del daño debido a la fatiga. Esta norma también indica que el Anejo Nacional puede proporcionar disposiciones para

programas de inspección y que las estructuras evaluadas según esta norma, cuyo material se elige de acuerdo con la UNE-EN 1993-1-10 y que están sujetas a mantenimiento regular, se consideran tolerantes al daño.

El método de integridad asegurada es una estrategia de diseño que enfatiza la prevención de daños por fatiga mediante una combinación de selección adecuada de materiales, diseño cuidadoso y aplicación de factores de seguridad, reduciendo la necesidad de inspecciones específicas para la detección de fatiga y asegurando el funcionamiento seguro de la estructura a lo largo de su vida útil.

A los efectos del Eurocódigo 8, el grado de fiabilidad del análisis estructural frente a la fatiga es suficiente si el coeficiente parcial de seguridad de la resistencia a la fatiga se ajusta en función del método de análisis empleado y de las consecuencias del fallo.

Los valores de la resistencia a fatiga de esta norma se han determinado teniendo en cuenta los efectos entalla geométricos y metalúrgicos de los detalles constructivos. En cada detalle se indica también el lugar más probable de comienzo de la fisuración.

En el contexto de un poste de iluminación, como la de nuestro caso de estudio, la implementación del método de integridad asegurada se presenta como la opción más adecuada para garantizar su funcionamiento seguro durante toda su vida útil de diseño. Este enfoque se basa en diseñar y construir la estructura de manera que sea inherentemente resistente a los daños por fatiga, reduciendo así la necesidad de inspecciones periódicas específicas para detectar tales daños.

Las estructuras esbeltas, por su naturaleza, presentan desafíos significativos para la realización de inspecciones regulares debido a su altura y accesibilidad limitada. Estas dificultades pueden incrementar los riesgos y costos asociados a las evaluaciones periódicas de su estado estructural.

El nivel de fiabilidad requerido puede conseguirse con detalles constructivos y niveles de tensiones que den lugar a una vida útil de fatiga suficiente para alcanzar valores del coeficiente β al menos iguales a los de las comprobaciones de estado límite último al final de la vida útil de proyecto.

En la siguiente tabla se muestran valores recomendados del coeficiente parcial de seguridad para la resistencia a fatiga.

Método de evaluación	Consecuencias del fallo	
	Leves	Graves
Tolerancia al daño	1,00	1,15
Integridad asegurada	1,15	1,35

Ilustración 31. Valores del coeficiente parcial de seguridad para la resistencia a fatiga



3.3.1.4 Tensiones producidas por acciones de fatiga

Los modelos teóricos para la determinación de las tensiones nominales deberían tener en cuenta todos los efectos de las acciones, incluyendo los de la distorsión, y deberían suponer régimen elástico-lineal para los elementos estructurales y las uniones.

Tipo de unión		Cordones	Montantes	Diagonales
Uniones con separación	Tipo K	1,5	–	1,3
	Tipo N o KT	1,5	1,8	1,4
Uniones con solape	Tipo K	1,5	–	1,2
	Tipo N o KT	1,5	1,65	1,25

Ilustración 32. Factores K_1 para secciones circulares huecas bajo carga en el plano

3.3.1.5 Cálculo de tensiones

Las tensiones deberían calcularse en el estado límite de servicio (son condiciones de diseño que aseguran que una estructura mantenga su funcionalidad y apariencia durante su vida útil, limitando deformaciones, vibraciones y fisuras que puedan afectar su uso previsto).

Las tensiones nominales deberían calcularse en las zonas más proclives a la iniciación de fisuras de fatiga. Al identificar y analizar estas regiones críticas, se pueden estimar con mayor precisión las tensiones reales que el material experimentará bajo cargas cíclicas. Para detalles constructivos, las tensiones a considerar en el material base serán las tensiones normales nominales, σ , y, las tensiones cortantes nominales, τ .

En el análisis de fatiga de estructuras de acero, las soldaduras se consideran detalles constructivos críticos debido a que pueden introducir concentraciones de tensiones y variaciones en las propiedades del material, lo que las convierte en puntos susceptibles a la iniciación y propagación de fisuras por fatiga.

Las tensiones a considerar en los cordones de soldadura según la Norma Europea EN 1993-1-9, son:

- Las tensiones normales σ_{wf} perpendiculares al eje del cordón: $\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$
- Las tensiones cortantes τ_{wf} paralelas al eje del cordón: $\tau_{wf} = \tau_{||f}$



A continuación, mostraremos gráficamente las tensiones mencionadas en cordones de soldadura en ángulo.

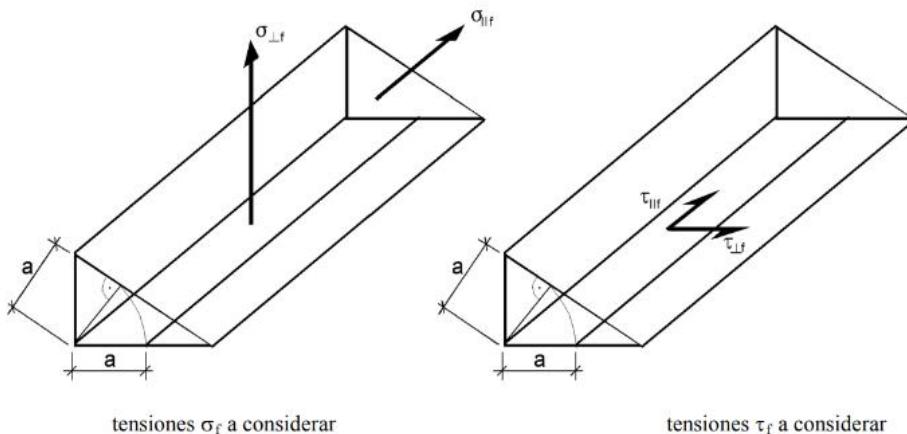


Ilustración 33. Tensiones a considerar en soldaduras en ángulo

3.3.1.5.1 Cálculo de carreras de tensión

Las carreras de tensiones se determinarán mediante las siguientes reglas:

1. Identificación de los ciclos de carga básicos (por ejemplo, cada paso del carro en un puente grúa) a partir de las especificaciones particulares del proyecto, y determinación del número de veces que se repiten a lo largo de la vida útil de la estructura.
2. Selección de los detalles constructivos a comprobar (por ejemplo, los cordones de ala de un empalme soldado en una viga carriera) y cálculo de las tensiones producidas por los ciclos de carga básicos (por ejemplo, las tensiones normales en las alas en la sección del citado empalme).
3. Para los detalles tipo incluidos en las tablas 37 y 38, basta calcular las tensiones nominales, que incluyen los efectos debidos al carácter dinámico de las acciones, pero no los de concentración de tensiones. Esta exclusión se debe a que la concentración de tensiones causada por la configuración geométrica del detalle está tenida en cuenta a través de las categorías de detalle que figuran en las tablas.
4. Cuando los detalles de las tablas 37 a 38 estén bajo el efecto de concentradores de tensión (cambios de sección, taladros, aberturas, etc.) no incluidos en la geometría tipificada del detalle, es necesario multiplicar las tensiones nominales por el correspondiente factor de concentración de tensiones. Las tensiones resultantes se denominan tensiones nominales modificadas.

5. En las estructuras en celosía formadas por perfiles tubulares circulares o rectangulares cargadas en su plano, las concentraciones de tensión debidas a los momentos secundarios en los nudos pueden tenerse en cuenta multiplicando las tensiones obtenidas a partir de un modelo convencional (de nudos articulados) por los factores k1 indicados en el apartado anterior.
6. En las uniones soldadas con fuertes gradientes de tensión en el pie de los cordones de soldadura, las tensiones nominales se sustituyen por las tensiones geométricas. Las tensiones geométricas son tensiones principales en el material base de la raíz del cordón que incluyen los efectos de las concentraciones de tensión debidas a la configuración geométrica global del detalle y a la configuración geométrica local del cordón de soldadura. Para las uniones soldadas de la tabla 8.1 basta emplear métodos de análisis capaces de considerar el efecto concentrador de tensiones debido a la geometría global del nudo, ya que el efecto del cordón se recoge en las categorías de detalle de la tabla.
7. Las carreras de tensión en los ciclos de carga básicos pueden determinarse a partir de las tensiones empleando el método del "vaciado del depósito" o el método de la "gota de agua". Junto con el valor de cada carrera de tensión habrá de determinarse también el número de veces que la carrera se repite en la vida útil de la estructura.
8. Para determinar las carreras de tensiones normales en detalles sin soldaduras o con soldaduras sometidas a un tratamiento de relajación de tensiones, las tensiones de compresión pueden reducirse al 60%.

En nuestro caso trabajaremos con carreras de tensión nominal para detalles constructivos expuestos en la normativa indicada.

3.3.1.5.2 Valores de cálculo para carreras de tensión nominal

En el análisis de fatiga, la carrera de tensión nominal se refiere al rango de variación de la tensión nominal en un material o componente estructural durante un ciclo de carga. Esta se calcula como la diferencia entre la tensión máxima (σ_{max}) y la tensión mínima (σ_{min}) experimentadas en el ciclo.

La tensión nominal se determina bajo la suposición de una distribución uniforme de tensiones en la sección transversal del componente, sin considerar concentraciones locales de tensión debido a discontinuidades geométricas o detalles específicos. Es fundamental en el diseño y evaluación de estructuras sujetas a cargas cíclicas, ya que permite estimar la vida útil del componente y prevenir fallos por fatiga.

Los valores de cálculo de las carreras de tensión nominal deberían determinarse según:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{Ff}Q_k)$$

Donde,

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k)$ e $\Delta\tau(\gamma_{Ff}Q_k)$ Son las carreras de tensión que producen las cargas de fatiga especificadas en la Norma Europea EN 1991

λ_i Son factores de equivalencia en daño, dependientes del espectro de cálculo tal como se especifica en las disposiciones aplicables de la Norma Europea 1993

3.3.1.6 Resistencia a Fatiga

La resistencia a fatiga para carreras de tensión nominal viene dada por una familia de curvas conocidas como curvas S-N, cada una de las cuales corresponde a un valor de categoría de detalle. La categoría de detalle es la cifra que expresa, en N/mm², los valores de referencia $\Delta\sigma_c$ e $\Delta\tau_c$ de la resistencia a fatiga a 2 millones de ciclos.

Una curva S-N de un determinado detalle estructural es una representación gráfica en escala logarítmica, tanto en eje de ordenadas como en eje de abscisas, que relaciona los rangos de tensión, $\Delta\sigma$, con el número de ciclos a dicho rango de tensiones, N , que dicho detalle, o elemento estructural, soportaría antes de fallar, con un margen de supervivencia del 95%, esto es, el número de ciclos que son superados por el 95 % de las probetas ensayadas a dicho rango de tensiones. Se diferencian de las curvas de Wöhler originales, en que relacionan rangos y no amplitudes de tensiones.

Un dato interesante que merece la pena resaltar es que, en la mayoría de los elementos estudiados, aparece un determinado umbral de rango de tensiones, llamado límite de fatiga, bajo el cual el número de ciclos que aguanta el detalle se dispara. Por otro lado, en el otro eje, las curvas S-N están pensadas para la fatiga de alto número de ciclos, HCF (High Cycle Fatigue, fatiga de altos ciclos), por lo que se suelen extender a partir de los 104 ciclos, límite por debajo del cual se considera la fatiga oligocíclica, LCF (Low Cycle Fatigue, fatiga de bajos ciclos).

Las curvas S-N están definidas, por lo tanto, de manera empírica para cada tipo de detalle estructural y material. Esto condiciona su aplicabilidad en casos en los que las condiciones reales se salgan del ámbito de dichos ensayos, o introducen nuevas variables.

Los ensayos son realizados con probetas iguales a ciclos con rangos de tensiones constantes, con tensión media nula, a temperatura ambiente, a gran velocidad o frecuencia de ciclos, para ser rentables y no ocupar los equipos demasiado tiempo, y en ambientes pasivos.

Por lo tanto, en aquellos casos en los que se varíen algunas de estas condiciones, que cómo se ha visto antes el comportamiento frente a fatiga de un determinado elemento estructural es bastante sensible a estos factores, no se podrán aplicar sin otras consideraciones adicionales metodologías de comprobación basadas en las curvas S-N, o curvas de Wöhler.

Con estas limitaciones, la mayoría de los procesos que ocurren en la práctica, que son aleatorios y en medios ambientes con cierta agresividad, quedarían fuera del ámbito de aplicación de las curvas S-N sin otras consideraciones o criterios de comprobaciones adicionales.

De este modo, se presentan tres tipos de interpretación de las curvas S-N.

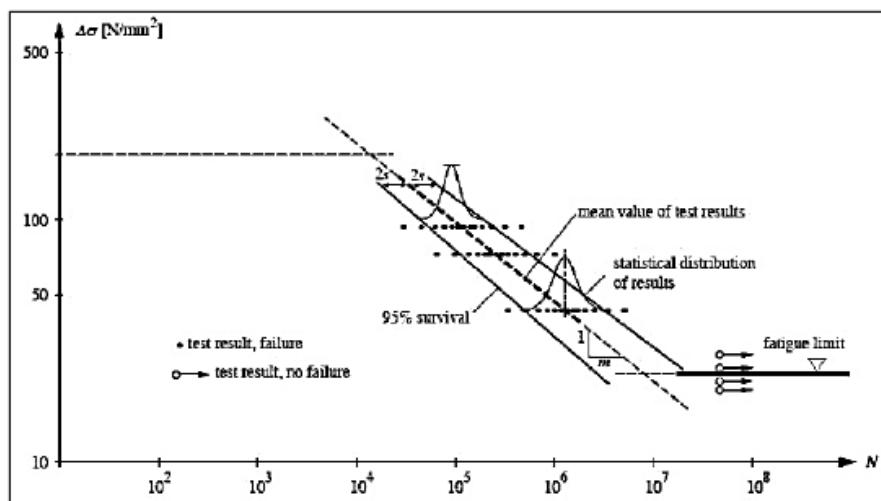


Ilustración 34. Ensayos de fatiga en elementos estructurales de acero, en doble escala logarítmica, realizados bajo carga constante

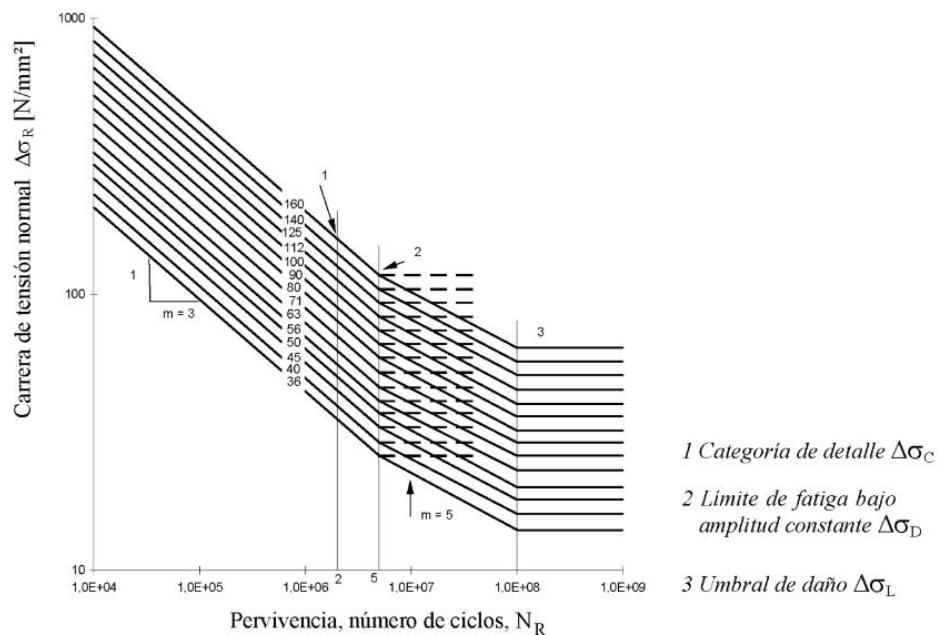


Ilustración 35. Curvas de resistencia a fatiga para carreras de tensión normal

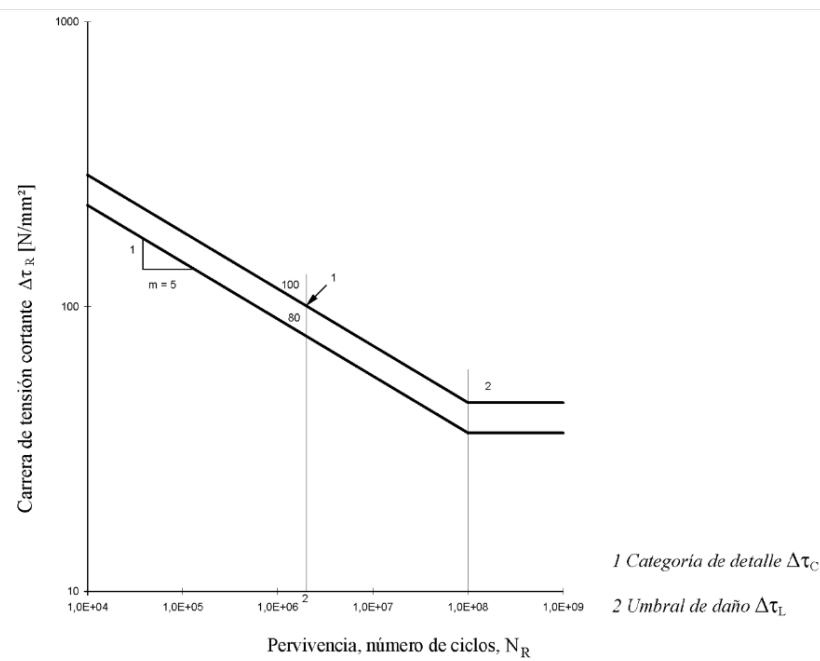


Ilustración 36. Curvas de resistencia a fatiga para carreras de tensión cortante



Es fundamental identificar y clasificar los detalles constructivos críticos que pueden ser susceptibles a la fatiga. La norma UNE-EN 1993-1-9 proporciona directrices para esta clasificación, asignando a cada tipo de detalle una categoría de detalle que refleja su resistencia a la fatiga.

En nuestro caso de estudio analizaremos dos detalles constructivos, que son los que se mostrarán a continuación:

Categoría de detalle	Detalle constructivo	Descripción	Requisitos
140		cierre de perfiles huecos con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida.	Espesor de pared t > 12,5 mm.
125		11) Soldaduras longitudinales de cierre de perfiles huecos con ejecución automática o completamente mecanizada ininterrumpida.	Espesor de pared t > 12,5 mm.
90		11) Ejecución con interrupciones.	

Los detalles I a 11 ejecutados con soldadura automática y con soldadura mecanizada tienen igual categoría de detalle.

Ilustración 37- Piezas armadas soldadas

La categoría de detalle 140 indica una resistencia a la fatiga de 140 N/mm² para un número de ciclos determinado, generalmente 2 millones de ciclos. Esta categoría se asocia comúnmente con uniones soldadas a tope de alta calidad, sin defectos significativos y con una ejecución cuidadosa. Es una de las categorías más altas, lo que implica una mayor resistencia a la fatiga.

Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	L ≤ 50 mm			
71	50 < L ≤ 80 mm		<u>Cartelas longitudinales:</u> 1) La categoría del detalle es función de la longitud L de la cartela.	El espesor de la cartela debe ser inferior a su altura. En caso contrario, véase la tabla 8.5, detalles 5 o 6.
63	80 < L ≤ 100 mm			
56	L > 100 mm			

Ilustración 38- Cartelas y rigidizadores soldados

La categoría de detalle 80 en el Eurocódigo EN 1993-1-9 indica una resistencia a la fatiga relativamente moderada, asociada a detalles estructurales donde hay una mayor concentración de tensiones o menos calidad en la transición geométrica.

3.3.2 Fatiga desde el enfoque de la mecánica de fractura

Además del enfoque tradicional basado en curvas S-N, la fatiga puede analizarse desde la perspectiva de la mecánica de fractura, especialmente cuando se trata de estructuras sometidas a ciclos prolongados o en los que el crecimiento de grietas es inevitable. Este enfoque es particularmente útil cuando se desea predecir la vida restante de una estructura una vez iniciada una grieta.

Uno de los modelos más utilizados es la ley de Paris-Erdogan, que describe el crecimiento de grietas por fatiga en función del rango del factor de intensidad de tensiones:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3.2.20)$$

Donde,

$\frac{da}{dN}$	Velocidad de crecimiento de la grieta por ciclo
ΔK	Variación del factor de intensidad de tensiones en el ciclo
C, m	Constantes dependientes del material

Esta ley se aplica en el rango de crecimiento estable de la grieta, entre el umbral Δk_{th} y el valor crítico k_{IC} que marca la fractura inestable.

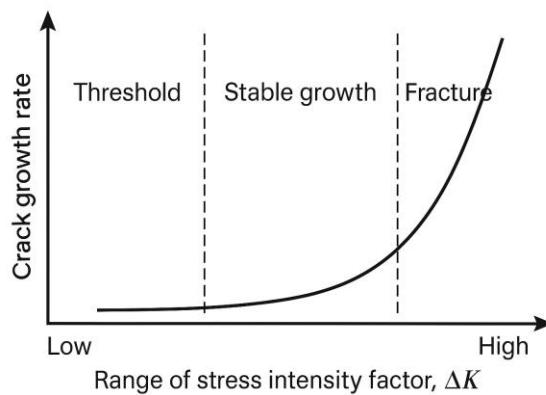


Ilustración 39. Fases del crecimiento de una grieta por fatiga

Este enfoque permite integrar el comportamiento de materiales más allá de los ensayos cílicos tradicionales y resulta particularmente útil cuando la detección de grietas mediante inspección estructural es posible.

3.3.2.1 Fatiga de bajo y alto número de ciclos

La fatiga se clasifica según el número de ciclos necesarios para alcanzar el fallo:

- Alta circulación (HCF): $N > 10^4$ ciclos. Es la más común en estructuras civiles como postes o puentes.
- Baja circulación (LCF): $N < 10^4$. Más relevante en maquinaria o estructuras sometidas a cargas muy elevadas pero pocas veces repetidas.

En estructuras como postes tubulares, aunque las cargas individuales sean relativamente bajas, el alto número de ciclos inducidos por el viento a lo largo de los años puede llevar a fatiga por alta circulación.

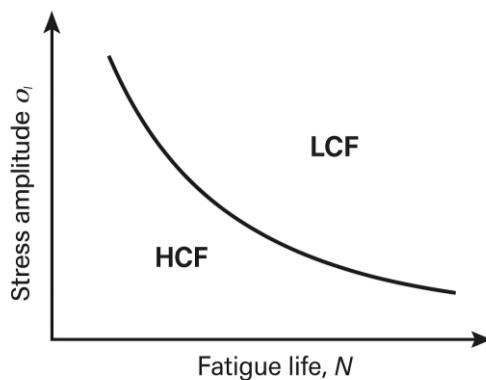


Ilustración 40. Comparativa entre fatiga de bajo y alto número de ciclos en una curva S-N

3.3.2.2 Modelos alternativos a Miner: Corten-Dolan y Haibach

El criterio de Miner es una de las aproximaciones más utilizadas para la acumulación de daño por fatiga, pero existen modelos alternativos más conservadores o con mejor ajuste para cargas variables. Entre ellos:

- Criterio de Corten-Dolan: modifica la linealidad del daño acumulado según un coeficiente β , considerando la interacción entre diferentes niveles de carga:

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^\beta \quad (3.2.21)$$

- Método de Haibach: utiliza una aproximación logarítmica en la extrapolación de las curvas S-N, especialmente útil en la zona de fatiga de alta circulación donde los ensayos no suelen alcanzar 10^7 ciclos.

Estos modelos pueden usarse para complementar los análisis normativos cuando se trata de condiciones especiales o estructuras críticas.

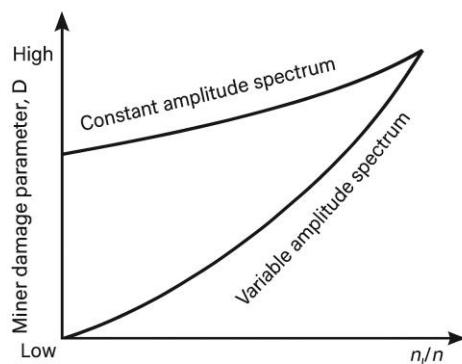


Ilustración 41. Comparación entre Miner (lineal) y Corten-Dolan (no lineal)

3.3.2.3 Materiales avanzados y tratamientos contra fatiga

Aunque el acero sigue siendo el material dominante en postes estructurales, la investigación en materiales compuestos (como GFRP o CFRP) ha demostrado una resistencia superior a fatiga en ciertos contextos. Además, existen tratamientos aplicables sobre aceros tradicionales que mejoran significativamente su comportamiento frente a cargas cíclicas:

- Shot peening (granallado superficial): genera tensiones residuales de compresión que retrasan el inicio de grietas.
- Post-tratamientos térmicos: modifican la microestructura para reducir tensiones internas.
- Alisado de cordones de soldadura: mediante limado o remachado, reduce los puntos de concentración de tensiones.

La aplicación de estas técnicas está recogida en documentos complementarios del Eurocódigo 3, aunque su uso sistemático depende de la importancia de la estructura, el acceso y los costes.



3.3.2.4 Evaluación experimental y monitoreo estructural

Las metodologías modernas de análisis estructural incluyen técnicas de monitoreo estructural en tiempo real, que permiten medir la tensión y deformación de estructuras sometidas a viento. Entre los métodos más utilizados:

- Strain gauges (galgas extensiométricas) para registrar microdeformaciones en zonas críticas.
- Técnicas de inspección no destructiva (NDT) como ultrasonidos, corrientes de Foucault o termografía.
- Sensores acelerométricos para detectar patrones de vibración resonante.

Integrar estos datos en modelos numéricos permite ajustar la predicción de vida a fatiga y planificar mantenimientos proactivos.

3.3.3 Comprobación a fatiga según normativa

Para evaluar este tipo de comportamiento, se utiliza ampliamente el criterio de daño acumulado de Palmgren-Miner, que permite verificar si la estructura puede resistir el número de ciclos previsto durante su vida útil sin alcanzar la rotura por fatiga.

Este método se basa en la hipótesis lineal de daño, que asume que el daño causado por cada ciclo de carga es proporcional al número de ciclos aplicados dividido entre el número total de ciclos que la estructura podría resistir bajo esa amplitud de carga. El daño total se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2.22)$$

Donde,

n_i	Número de ciclos reales aplicados con una amplitud de carga determinada
N_i	Número de ciclos que la estructura puede resistir a ese mismo nivel de carga antes de fallar

Según el criterio de Palmgren-Miner, la estructura fallará por fatiga cuando el daño total acumulado D sea igual o superior a 1. Por tanto, la condición de seguridad frente a fatiga se expresa como:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} < 1$$

Si se cumple esta desigualdad, la estructura no fallará por fatiga dentro del tiempo previsto de uso.

4 Simulación en programa RFEM

4.1 RFEM

RFEM 6 es la sexta generación del software de análisis estructural por el Método de los Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés: Finite Element Method), desarrollado por la empresa alemana DLUBAL Software GmbH. Esta herramienta avanzada es indispensable para ingenieros civiles, estructurales y mecánicos que requieren modelar y analizar estructuras sometidas a diversas cargas, tanto estáticas como dinámicas.

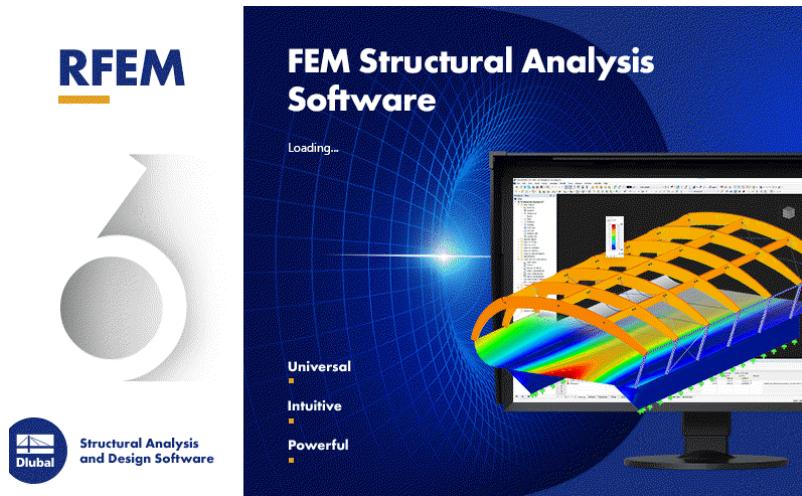


Ilustración 42. Software RFEM 6

El programa se basa en el método FEM, que divide una estructura compleja en una malla de elementos finitos sobre los cuales se resuelven numéricamente las ecuaciones de equilibrio. Este enfoque permite un análisis preciso de esfuerzos, deformaciones, tensiones y modos de vibración en estructuras de geometría arbitraria, materiales diversos y condiciones de carga complejas.

RFEM 6 se distingue por su capacidad para modelar estructuras en dos y tres dimensiones (pórticos, placas, muros, estructuras espaciales, cubiertas, membranas, domos, etc.). Su interfaz gráfica intuitiva facilita el modelado directo o la importación de modelos desde software CAD/BIM (como Revit, Tekla Structures o IFC). Además, ofrece compatibilidad con diversas normativas internacionales de diseño, incluyendo los Eurocódigos y normas estadounidenses (ACI, AISC).

Sus principales áreas de aplicación abarcan el cálculo de edificios, puentes, torres, naves industriales, instalaciones mecánicas, y estructuras de acero, concreto, madera, aluminio, vidrio, así como elementos no convencionales como membranas pretensadas o estructuras de cables. RFEM 6 simula condiciones reales de carga (peso propio, viento, nieve, sismo, temperatura, vibraciones, cargas móviles), incluyendo combinaciones automáticas según la normativa seleccionada.

Una de las características más notables de RFEM 6 es su estructura modular, que permite adaptar el software a las necesidades específicas de cada proyecto. Dispone de módulos complementarios para el diseño de uniones, análisis de estabilidad, diseño sísmico, pandeo lateral, verificación de fatiga y cálculo de cimentaciones, entre otros. Estos módulos se integran directamente con el modelo principal, garantizando una experiencia de cálculo coherente y centralizada.

Para el análisis de cargas cíclicas y estudios de fatiga estructural, RFEM 6 proporciona funcionalidades específicas para determinar la resistencia a la fatiga de elementos estructurales conforme a normas como EN 1993-1-9.

El software simula la repetición de cargas a lo largo del tiempo y evalúa el daño acumulado, identificando zonas críticas propensas a fisuras por fatiga debido a esfuerzos fluctuantes. Esto es crucial en puentes, plataformas, grúas y otras estructuras sujetas a solicitudes variables durante su vida útil.



4.2 Poste de iluminación

En la fase final del proyecto, se abordará el estudio de un poste de acero para la iluminación de un estadio situado en Hannover, Alemania. El objetivo es calcular, utilizando el procedimiento de cálculo previamente definido, la amplitud de oscilación de la estructura polar debido al desprendimiento de vórtices, y proporcionar la verificación de la fatiga del material para los detalles constructivos utilizando la teoría de daño acumulativo de Palmgren-Miner.

Para ello, previamente se realizó un análisis de la zona con el fin de determinar la velocidad media del viento y las condiciones orográficas, lo que permitió obtener resultados más precisos.

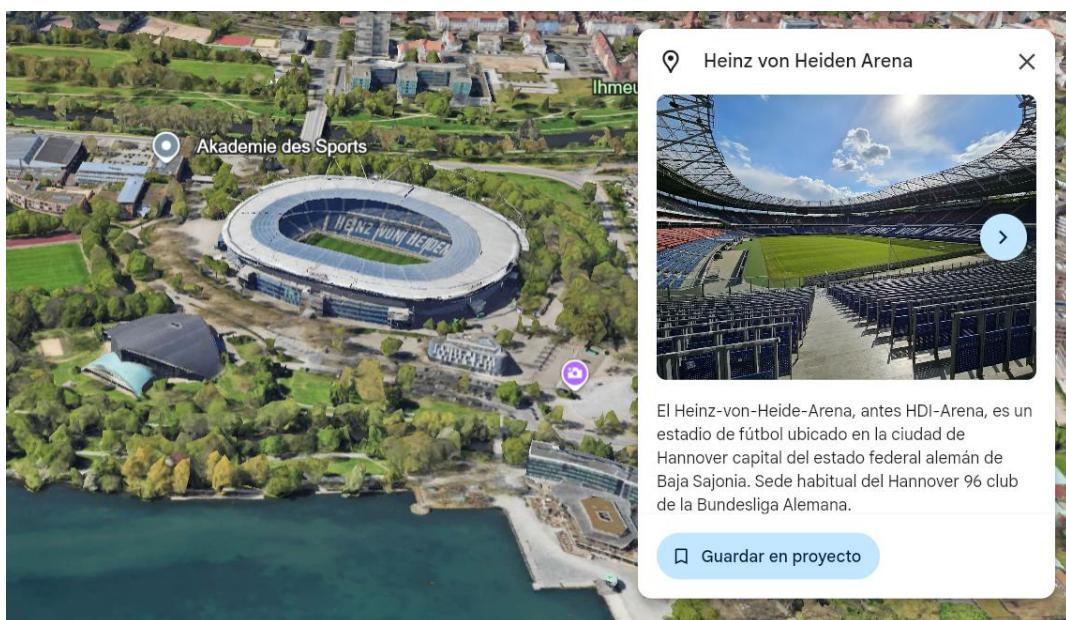


Ilustración 43. Ubicación estadio Hannover, Alemania

Con el fin de analizar el comportamiento estructural del poste de iluminación bajo las acciones del viento, y evaluar la influencia de los fenómenos dinámicos relacionados con la fatiga, se ha desarrollado un modelo numérico completo utilizando el software RFEM6, uno de los programas más avanzados en el campo del análisis estructural por elementos finitos.

Esta etapa del estudio permite reproducir con alta fidelidad las condiciones reales a las que está sometida la estructura, considerando sus propiedades geométricas variables, su comportamiento dinámico y las cargas aerodinámicas fluctuantes asociadas al desprendimiento de vórtices.

El procedimiento de cálculo se realizará con base en la teoría y el desarrollo expuestos previamente. Para ello, se consultará el sitio web de Dlubal.com con el fin de obtener la velocidad básica y la presión del viento en Hannover, conforme a la normativa del Eurocódigo.



Ilustración 44. Mapa viento RFEM

Según el Atlas Eólico Europeo, publicado por Ib Troen y Erik Lundtang Petersen, los coeficientes medios de distribución de Weibull ascienden a $A = 4,50$, $k = 1,79$.

A continuación, se seguirán detallando las características de la estructura.



Ilustración 45. Poste iluminación

Nro. [-]	y [m]	zeta [kg/m]
41	37,90	46,66
40	37,30	123,98
39	37,25	82,85
38	35,22	26,43
37	35,90	114,20
36	35,85	111,68
35	34,54	67,92
34	34,45	143,20
33	32,86	159,93
32	31,18	168,74
31	29,50	117,12
30	29,50	209,86
29	27,78	220,90
28	26,07	308,87
27	26,00	223,08
26	24,35	13,85
25	24,25	287,01
24	24,20	222,13
23	22,63	19,33
22	22,50	267,34
21	22,45	110,07

Ilustración 46. Distribución de masas

Nro. [-]	y [m]	zeta [kg/m]
20	21,70	807,49
19	21,65	109,80
18	20,92	265,08
17	19,20	247,89
16	19,20	410,50
15	17,22	430,09
14	15,24	449,68
13	13,26	469,27
12	11,28	488,85
11	9,30	508,38
10	9,30	717,82
9	7,44	744,83
8	5,58	134,97
7	5,25	220,73
6	5,20	289,18
5	4,50	241,02
4	4,45	305,94
3	3,72	798,85
2	1,86	422,88
1	0,90	389,48
0	0,00	264,54

El poste objeto de estudio presenta una configuración esbelta, con una sección circular variable a lo largo de su altura, lo cual representa un reto desde el punto de vista numérico, ya que requiere introducir adecuadamente el gradiente de diámetro y espesor.

La estructura mide 37.90 m de altura, con una pendiente de 25 mm/m, partiendo de un diámetro superior de aproximadamente 0.5 m hasta alcanzar más de 1.47 m en la base. El espesor del tubo también varía progresivamente, desde 3 mm en la parte alta hasta 12 mm en la zona inferior, con el fin de optimizar la rigidez sin penalizar excesivamente el peso propio. La

distribución de masas se obtiene a partir de los valores tabulados en la Tabla 1, proporcionados por el artículo de referencia.

Para representar esta geometría en RFEM6, se ha optado por modelar el poste mediante una discretización en tramos verticales, cada uno con su correspondiente sección transversal definida por su diámetro y espesor característico. Las masas se han ido distribuyendo a lo largo de la longitud del poste.

Esta metodología permite captar la evolución de las propiedades mecánicas a lo largo del eje longitudinal del mástil. Además, se han asignado los materiales correspondientes, conforme a los parámetros del acero estructural típicamente empleado en postes de iluminación, incorporando las propiedades necesarias para el análisis modal y de fatiga.

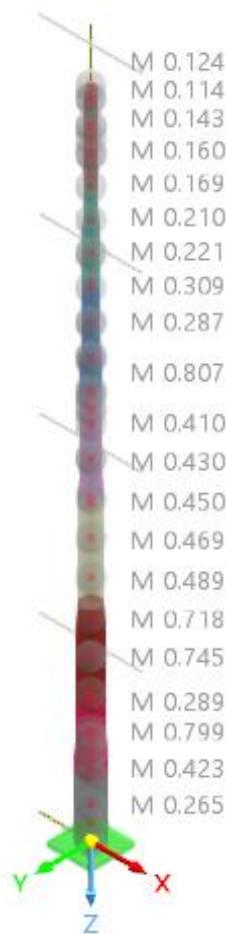


Ilustración 47. Geometría poste

La simulación se ha enfocado especialmente en la determinación de las frecuencias naturales de vibración y en la estimación de las tensiones inducidas por las cargas cíclicas del viento. Para ello, se ha realizado un análisis modal previo, identificando los modos principales de vibración, con especial atención al segundo modo, ya que, como se demuestra en el artículo base, es en

este dónde se manifiestan los efectos más significativos del desprendimiento de vórtices y donde se concentra el mayor daño por fatiga.

Al configurar el caso de carga modal, es fundamental que el peso propio esté activado. Este integra la distribución de masas de la estructura, lo cual es esencial para un análisis preciso.

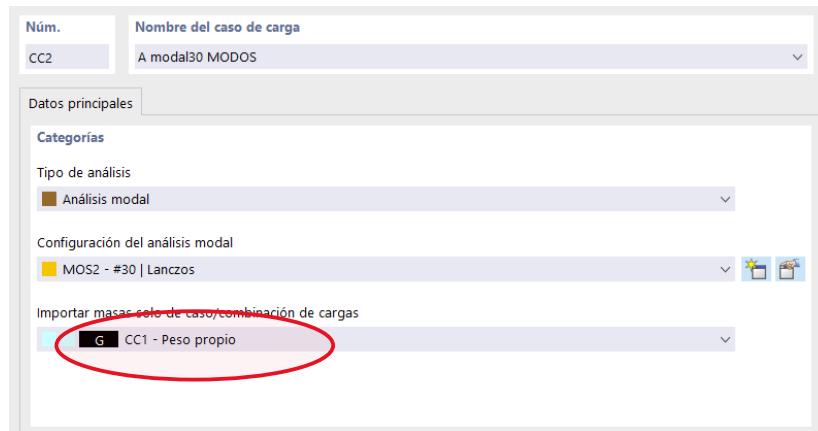
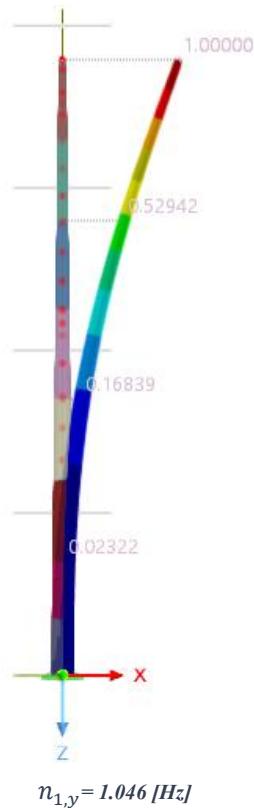
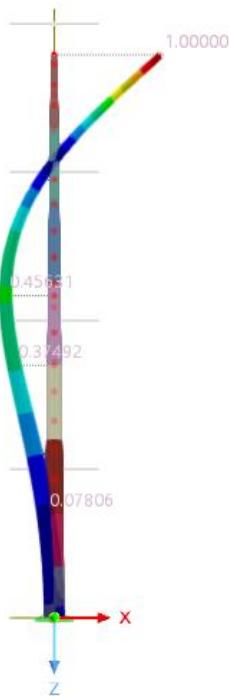


Ilustración 48. Caso carga modal

Las frecuencias obtenidas del análisis modal constituirán el dato principal para el subsiguiente análisis dinámico.





$$n_{2,y} = 3.785 \text{ [Hz]}$$

Una vez definida la estructura y determinados sus dos modos de frecuencia, se procederá al cálculo del desplazamiento máximo, paso previo al análisis dinámico.

4.2.1 Cálculo de desplazamiento máximo por desprendimiento de vórtices

El cálculo del desplazamiento transversal máximo ($y_{F,max}$) inducido por el desprendimiento de vórtices en estructuras esbeltas constituye un aspecto esencial en el análisis dinámico de elementos estructurales sometidos a la acción del viento.

Como hemos estudiado anteriormente, este fenómeno, ampliamente documentado en la literatura técnica y recogido en normativas como el Eurocódigo EN 1991-1-4, se presenta cuando el flujo de viento genera desprendimientos periódicos de vórtices en lados opuestos de una estructura, lo que origina fuerzas laterales oscilantes perpendiculares a la dirección del viento.

Cuando la frecuencia de estos desprendimientos coincide con la frecuencia natural de la estructura, se produce el fenómeno denominado lock-in o acoplamiento resonante. En este estado, la estructura entra en resonancia con la excitación del viento, generándose oscilaciones transversales de gran amplitud. Estas oscilaciones, si bien pueden no comprometer de forma inmediata la resistencia estructural estática, tienen consecuencias críticas tanto en el comportamiento estructural como en su durabilidad.

El cálculo preciso de $y_{F,max}$ resulta fundamental para el estudio del daño por fatiga ya que permite calcular las solicitudes internas (momentos y tensiones) asociadas al fenómeno, que luego son utilizadas en la verificación de la resistencia a fatiga mediante métodos como el de Palmgren-Miner. Sin esta información, no sería posible garantizar que la estructura cumplirá su vida útil sin daño acumulado.

Para estimar el desplazamiento transversal máximo que una estructura experimenta debido a este fenómeno, se utiliza el modelo del método de resonancia por vórtices. En este modelo, el desplazamiento se calcula mediante la siguiente fórmula, recogida en el Eurocódigo:

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2 Sc} \frac{1}{k \cdot k_w \cdot C_{lat}}$$

Para comenzar, en la siguiente tabla se presentan los parámetros más importantes para el cálculo posterior de los demás términos.

$n_{1,i}(\text{Hz})$	$m_e(\text{Kg/m})$	$St(-)$	$\delta_s (-)$	$p (\text{Kg/m}^3)$	$v (\text{m}^2/\text{s})$
1.046	170.213	0.18	0.015	1.250	$1.5 \cdot 10^{-5}$
3.785	230.468	0.18	0.015	1.250	$1.5 \cdot 10^{-5}$

Tabla 4.1. Parámetros computacionales

Importante destacar, la masa equivalente fue calculada según indica la normativa del eurocodigo en el anexo F.

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds}$$

Donde,

- | | |
|-------|--|
| m | Es la masa por unidad de longitud |
| l | Es la altura o la luz de la estructura |
| $i=1$ | Es el número del modo |

No obstante, dado que los resultados no fueron coincidentes y para asegurar una mayor similitud con el artículo de referencia, se mantuvo la masa efectiva con los valores indicados en la Tabla 1.

El primer paso del cálculo consiste en la determinación de la velocidad crítica a distintas alturas y distintas frecuencias. A tal efecto, se empleará la fórmula detallada en el capítulo "Acciones del Viento".

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{st}$$

La selección del diámetro b se realizará en función de la sección más crítica (la de mayor radio y menor espesor).

Para ilustrar el procedimiento, se comenzará el análisis con la frecuencia del modo 1 (1.046 Hz), a una altura crítica de 35.425 m.

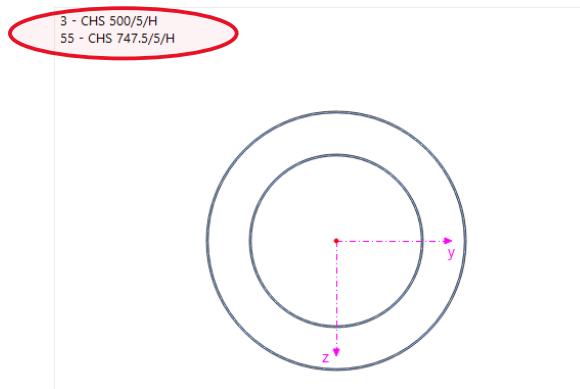


Ilustración 49. Diámetros RFEM

Conociendo el valor de los diámetros de la sección superior de la estructura, interpolamos y obtenemos que a la altura de 35.425 m el diámetro es de (b)= 0.5614 m. Por tanto:

$$v_{crit,i} = \frac{0.5614 [m] \cdot 1.046 [Hz]}{0.18}$$

$$v_{crit,i} = 3.262[m/s]$$

Seguidamente, se procederá a determinar el valor del número de Reynolds. Indicará principalmente el tipo de flujo alrededor de la estructura y, consecuentemente, cómo se comportará la estela y cómo se formarán y desprenderán los vórtices.

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu}$$

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{(0.5614) \cdot (3.262)}{(1.5 \cdot 10^{-5})}$$

$$Re(v_{crit,i}) = 122\,099$$

El valor de $Re(v_{crit,i}) = 122\,099$ es una señal de alerta crucial en el proceso de diseño y análisis de la estructura. Indica que la estructura operará en un régimen de flujo donde las fuerzas de excitación por vórtices son muy potentes y periódicas, lo que la hace altamente vulnerable a vibraciones de gran amplitud.

El coeficiente de fuerza lateral es un parámetro adimensional que cuantifica la magnitud de la fuerza oscilatoria perpendicular a la dirección del flujo (transversal) que actúa sobre una estructura, generada principalmente por el desprendimiento periódico de vórtices (efecto Kármán). Su valor depende fuertemente del número de Reynolds, ya que este influye en la regularidad del desprendimiento de vórtices. En el régimen subcrítico (por ejemplo, para $Re = 122\,099$), dicho coeficiente suele ser elevado y bien definido, lo que indica una excitación particularmente eficiente. El cálculo del coeficiente de fuerza lateral se basa en los valores de referencia proporcionados por el Eurocódigo, consultando la tabla pertinente.

Relación de velocidad crítica del viento	c_{lat}
$\frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \leq 0,83$	$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0,83 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} < 1,25$	$c_{lat} = \left(3 - 2,4 \cdot \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \right) \cdot c_{lat,0}$
$1,25 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}}$	$c_{lat} = 0$

donde
 $c_{lat,0}$ es el valor básico de c_{lat} tal como se define en la tabla E.2 y, para cilindros circulares, en la figura E.2;
 $v_{crit,i}$ es la velocidad crítica del viento (véase el capítulo E.1.3.1);
 $v_{m,Lj}$ es la velocidad media del viento (véase el apartado 4.3.1) en el centro de la longitud efectiva de correlación, tal como se define en la figura E.3.

Ilustración 50. Coeficiente lateral, en función de la relación de velocidad crítica del viento

En nuestro caso, y siguiendo con el ejemplo numérico del modo 1, la relación entre la velocidad crítica y la velocidad media del viento es de 0.13. Dado que este valor es inferior a 0.83, se cumple la condición que determina que el coeficiente de fuerza lateral c_{lat} es igual a su valor de referencia $c_{lat,0}$.

Se recurrirá a la gráfica empírica que relaciona el coeficiente de fuerza lateral con el Número de Reynolds para obtener el valor de $c_{lat,0}$.

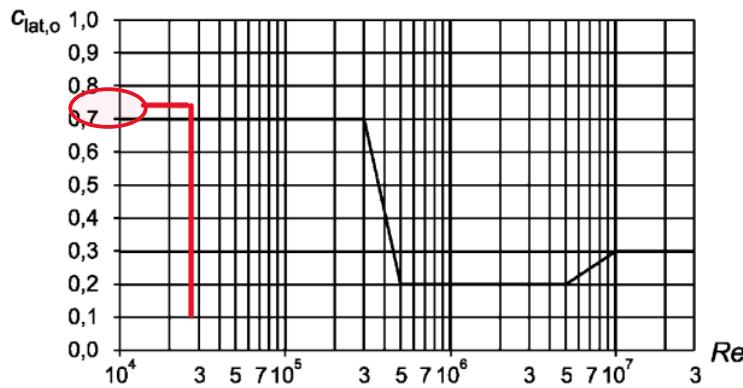


Ilustración 51. Valor básico del coeficiente lateral en función del valor de Reynolds

Consecuentemente, el coeficiente de fuerza lateral para el modo de vibración fundamental (modo 1) se establece en 0.7.

El siguiente paso será calcular el número de Scruton (Sc), herramienta principal para determinar si una estructura esbelta es propensa a sufrir vibraciones significativas y potencialmente dañinas cuando es expuesta a un flujo de fluido, en nuestro caso, el viento.

Muestra la relación entre la capacidad de amortiguamiento (dissipación de energía) de la estructura y las fuerzas de excitación aerodinámicas generadas por el desprendimiento periódico de vórtices (el famoso efecto Kármán).

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$$

$$Sc = \frac{2 \cdot (0.015) \cdot (170.213)}{(1.250) \cdot (0.5614)^2}$$

$$Sc = 12.962$$

Un Número de Scruton (Sc) de 12.96 es un valor generalmente favorable y se considera que indica un riesgo bajo a moderado de vibraciones inducidas por vórtices (VIV) severas para la mayoría de las estructuras esbeltas.



Continuamos calculando el factor de forma modal (k) y factor de longitud de correlación (k_w).

Sabiendo que nuestra estructura vibra de la siguiente forma modal:

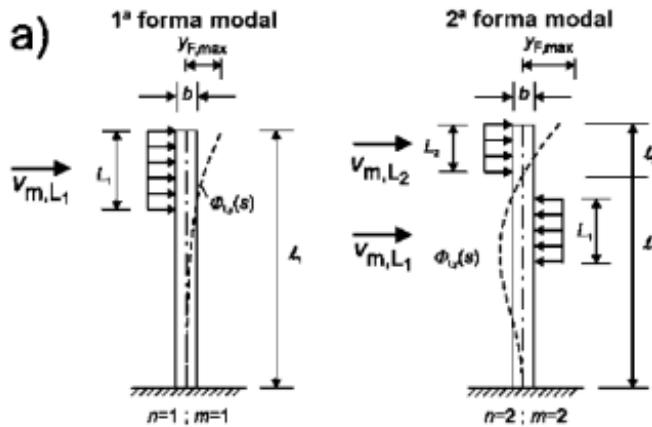


Ilustración 52. Ejemplos de aplicación de longitud de correlación

Estos diagramas son fundamentales para comprender la interacción fluido-estructura en el contexto de las vibraciones inducidas por vórtices.

Calcularemos el factor de longitud de correlación y del factor de forma modal con ayuda de las tablas de las figuras 1 y 2.

Para iniciar los cálculos, se considerará el primer escenario, caracterizado por una amplitud relativa $y_F(s_j) / b < 0,1$. Bajo esta condición, el parámetro principal para el desarrollo del análisis será la relación de esbeltez local $L_j / b = 6$.

$y_F(s_j) / b$	L_j / b
< 0,1	6
0,1 a 0,6	$4,8 + 12 \cdot \frac{y_F(s_j)}{b}$
> 0,6	12

Ilustración 53. Longitud efectiva de correlación

en función de la amplitud de vibración



Estructura	Forma modal $\Phi_{ly}(s)$	K_w	K
	Véase el capítulo F.3 con $\zeta = 2,0$ $n = 1; m = 1$	$3 \cdot \frac{L_j / b}{\lambda} \cdot \left[1 - \frac{L_j / b}{\lambda} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L_j / b}{\lambda} \right)^2 \right]$	0,13

NOTA 1 La forma modal, $\Phi_{ly}(s)$, se ha tomado del capítulo F.3. Los parámetros n y m se definen en la expresión (E.8) y en la figura E.3.

NOTA 2 $\lambda = \ell/b$.

*Ilustración 54. Factor de longitud de correlación (k_w)
y factor de forma modal (k)*

Obtendremos, por tanto, que el factor de longitud de correlación (k_w) será:

$$k_w = 3 \cdot \frac{6}{67.51} \left[1 - \frac{6}{67.51} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{6}{67.51} \right)^2 \right]$$

$$k_w = 0.243$$

Se dispone ahora de todos los datos esenciales para proceder al cálculo del desplazamiento máximo. La fórmula que se utilizará para este propósito es la que se presentó con anterioridad.

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2 Sc} k \cdot k_w \cdot C_{lat}$$

$$y_{F,max} = 29.866 \text{ [mm]}$$

Este valor indica el desplazamiento máximo de la estructura (normalizado por su dimensión característica) cuando es sometida a vibraciones inducidas por vórtices. Un mayor $y_{F,max}$ significa que la estructura experimenta más desplazamiento lateral bajo la acción del flujo.

Una vez conocido el valor de desplazamiento máximo, se debe comprobar el coeficiente lateral. Conforme al primer caso establecido, si $y_F(s_j) / b < 0.1$, el valor para los cálculos es: $L_j / b = 6$.

$$y_F(s_j) / b < 0.1$$

$$0.016 < 0.1$$

Este procedimiento de cálculo se ha replicado para los diferentes modos de vibración y sus respectivas alturas críticas. Los resultados obtenidos se consolidan en la siguiente tabla, elaborada con el soporte de Microsoft Excel.

$n_{1,i}$(Hz)	H_{crit}(m)	v_{crit}(m/s)	$C_{lat}(-)$	Sc (-)	Re (-)	K (-)	$K_w(-)$	y_{max}(mm)
1.046	35.43	3.262	0.7	12.96	122099	0.131	0.244	29.866
3.785	35.43	11.805	0.7	17.55	441822	0.184	0.244	30.982
3.785	22.5	18.610	0.2	7.06	1097965	0.184	0.364	51.835

Tabla 4.2. Valores calculados para el desprendimiento de vórtices en los primeros modos de oscilación



4.2.2 Análisis dinámico

En el análisis dinámico de una estructura sometida a fuerzas de viento perpendiculares, como es el caso de este estudio, la selección del método de análisis dinámico en RFEM es crucial. El objetivo es evaluar con precisión la respuesta estructural para poder estimar el daño por fatiga en sus detalles constructivos más críticos. RFEM ofrece principalmente dos enfoques: el análisis por superposición modal y el análisis por integración directa en el tiempo. A continuación, se detallan las diferencias fundamentales entre ambos.

- Análisis por Superposición Modal

Este método, también conocido como análisis modal o espectral (cuando la carga se define mediante un espectro), descompone la respuesta dinámica de la estructura en una serie de modos de vibración individuales, que se obtienen previamente mediante un análisis modal. Cada modo posee una forma característica y una frecuencia natural asociada. La respuesta total de la estructura se calcula sumando las contribuciones de cada modo ante la acción dinámica, utilizando reglas de combinación como SRSS (Suma Raíz Cuadrática) o CQC (Combinación Cuadrática Completa).

- **Ventajas:** Es un enfoque computacionalmente muy eficiente y resulta ideal cuando la carga dinámica puede representarse adecuadamente mediante un espectro (como en análisis sísmicos normativos o cargas de viento simplificadas) y, fundamentalmente, cuando la estructura exhibe un comportamiento predominantemente lineal.
- **Limitaciones:** Su principal restricción es que no es adecuado para modelar cargas transitorias complejas con historial de tiempo arbitrario, efectos no lineales (como plastificación o grandes deformaciones) o amortiguamiento no proporcional.

- Análisis por Integración Directa en el Tiempo

Este método resuelve directamente las ecuaciones diferenciales del movimiento estructural en el dominio del tiempo, paso a paso, empleando algoritmos numéricos (como los de Newmark o Hilbert-Hughes-Taylor). A diferencia de la superposición modal, no requiere una descomposición modal previa y permite simular la respuesta dinámica completa de la estructura ante cualquier tipo de excitación temporal.

- **Ventajas:** Es particularmente idóneo para cargas que varían de forma compleja e irregular en el tiempo, como ráfagas de viento, impactos, o el fenómeno de desprendimiento de vórtices. Permite capturar con precisión las respuestas oscilatorias, incluso cuando la excitación se acerca o coincide con una frecuencia natural de la estructura (resonancia). Además, este método es capaz de considerar comportamientos no lineales del material (plastificación), no linealidades geométricas (grandes desplazamientos) y formas de amortiguamiento más complejas.
- **Desventajas:** Su principal inconveniente es el mayor costo computacional, que se incrementa significativamente con el tamaño del modelo y la duración del análisis.

Dado que el fenómeno de desprendimiento de vórtices inducido por el viento genera vibraciones dinámicas y oscilatorias que pueden coincidir con las frecuencias naturales de la estructura, un análisis por integración directa en el tiempo es el más adecuado para este estudio. El análisis se llevará a cabo utilizando el método implícito lineal de Newmark.

El método de Newmark es un procedimiento numérico para resolver ecuaciones diferenciales de segundo orden, como las que describe el movimiento de una estructura. Es ampliamente utilizado en ingeniería estructural y geotecnia para analizar la respuesta dinámica de sistemas ante cargas sísmicas, viento, o explosiones. Se basa en la integración numérica de las ecuaciones de movimiento utilizando un esquema de integración en el tiempo. Esto significa que se calcula la posición, velocidad y aceleración de un sistema en cada paso de tiempo, utilizando la información de los pasos anteriores.

Este método es muy versátil debido a su capacidad de adaptación a los distintos problemas de dinámica estructural.

Es importante recalcar que el análisis en el dominio del tiempo es un análisis puramente lineal. No se pueden tener en cuenta las no linealidades geométricas y constructivas.

La siguiente expresión se utiliza para estimar la fuerza dinámica equivalente inducida por vibraciones de origen aerodinámico, como es el caso del desprendimiento de vórtices causado por la acción del viento perpendicular sobre estructuras esbeltas. Esta fuerza actúa sobre la estructura en una sección genérica s , y se proyecta sobre un modo de vibración específico:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2\pi n_{i,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max}$$

Donde,

$F_w(s)$	Representa la fuerza dinámica equivalente del viento en una posición s a lo largo de la estructura. Esta fuerza es una magnitud que simula el efecto dinámico de la excitación aerodinámica sobre la estructura en el dominio modal, y su valor depende tanto de la masa como de la forma modal en dicha sección
$m(s)$	Masa por unidad de longitud. La masa actúa con inercia local que reacciona ante las aceleraciones inducidas por la vibración
$\phi_{i,y}(s)$	Es la función de forma modal correspondiente al modo i en la dirección y , evaluada en el punto s . Esta función describe cómo se distribuyen espacialmente los desplazamientos del modo i a lo largo de la estructura. Al multiplicarla por la aceleración y la masa, se obtiene la distribución espacial de la fuerza modal

Esta formulación permite obtener la fuerza generalizada modal asociada a un modo i en la dirección y , a partir de la deformación máxima que experimenta la estructura bajo una excitación periódica o casi periódica como la inducida por la acción del viento.

En estructuras sometidas a desprendimiento de vórtices, el flujo de aire alterno genera fuerzas periódicas transversales que pueden resonar con los modos naturales de la estructura. Esto provoca oscilaciones sostenidas que, si bien no siempre representan un peligro de colapso inmediato, pueden generar acumulación de daño con el tiempo, especialmente en zonas de concentración de esfuerzos o soldaduras.

Por tanto, el uso de esta expresión permite transformar un desplazamiento modal conocido en una fuerza dinámica equivalente que puede ser utilizada en cálculos posteriores de amplitud de tensiones, conteo de ciclos y acumulación de daño mediante métodos como el de Palmgren-Miner.

Seguiremos mostrando el ejemplo de vibración de modo 1, paso a paso, con el fin de visualizar cómo se realizó el cálculo genérico.

En la figura se muestra la forma modal correspondiente al primer modo de vibración en la dirección x (denotada como ux). Este resultado forma parte del análisis modal, el cual permite caracterizar las frecuencias naturales y las formas propias de deformación asociadas a los distintos modos de vibración de la estructura.

En este modo se observa que el desplazamiento modal es máximo en el extremo izquierdo ($x=0$ m) y decrece progresivamente hasta valores próximos a cero en el extremo derecho ($x=37.9$ m). Esto indica que el primer modo de vibración corresponde a un comportamiento típico de estructura en voladizo o consola, es decir, una estructura con un extremo libre y otro empotrado. En esta configuración, las mayores deformaciones ante una excitación longitudinal se concentran en el extremo libre.

La tabla asociada muestra los valores del desplazamiento modal ux en distintos puntos a lo largo de la longitud de la estructura. Esta tendencia decreciente es coherente con la forma de vibración fundamental de una estructura flexible y esbelta sometida a una excitación axial o de tipo cortante en su plano longitudinal.

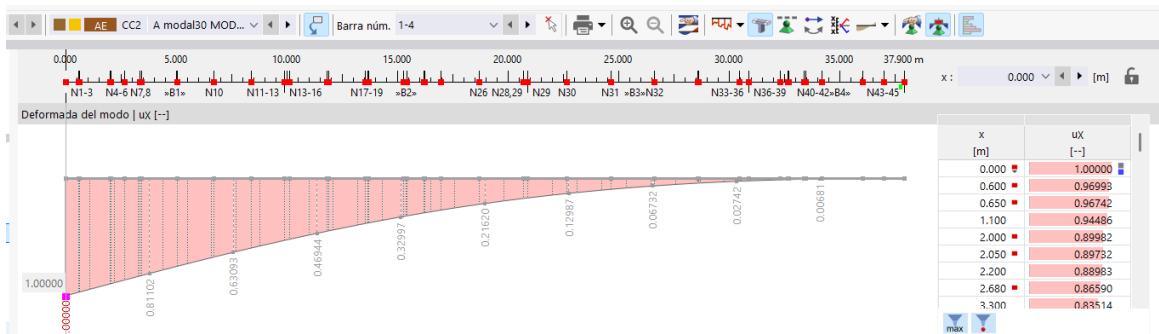


Ilustración 55. Diagrama de resultados de desplazamientos en x del modo 1

Los valores de la tabla asociada (los valores de ux en cada punto de la estructura) representan la forma modal normalizada del modo de vibración analizado, y son fundamentales para calcular la fuerza dinámica equivalente proyectada sobre la estructura.

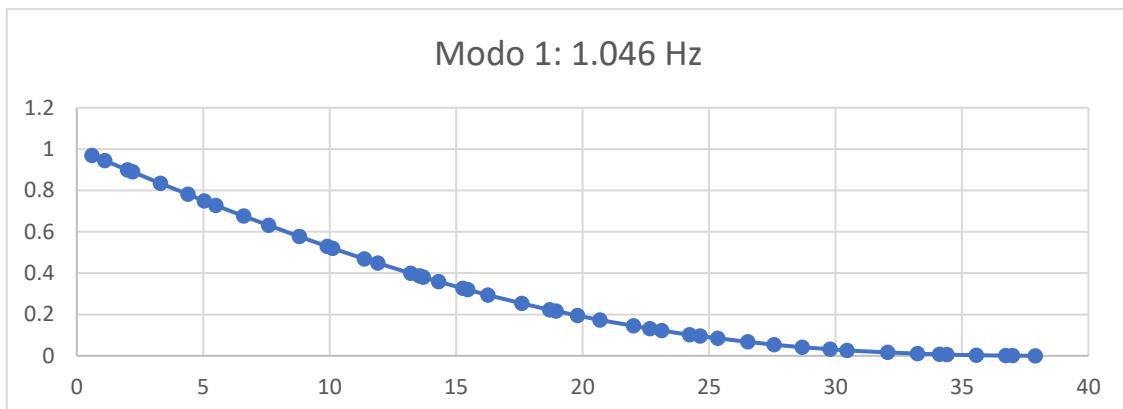


Ilustración 56. Forma modal correspondiente al primer modo de vibración en dirección longitudinal

La gráfica representa visualmente la evolución del desplazamiento modal a lo largo de la estructura para el primer modo. Permite apreciar con claridad cómo varía la participación de cada punto estructural en la vibración modal. Este tipo de representación facilita la identificación rápida de las zonas con mayor respuesta dinámica, lo cual es útil para aplicar criterios de evaluación local, como en la estimación del daño por fatiga.



Con ayuda del software Excel, se calculó la fuerza equivalente en cada punto de la estructura a partir de la forma modal obtenida. Posteriormente, estos valores se introdujeron en el modelo de RFEM para realizar la simulación dinámica correspondiente.

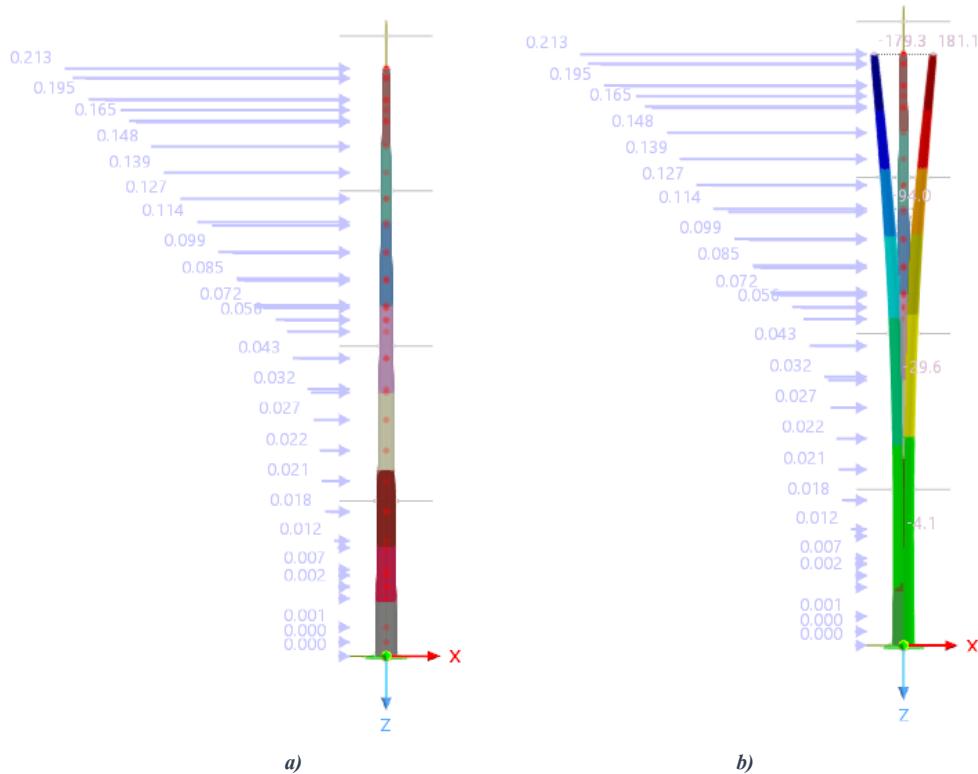


Ilustración 57. a) Efecto de la Carga de Viento Dinámica Equivalente en la Respuesta de la Estructura (RFEM) y b) Desplazamientos ux debido a la carga de viento

La razón por la que las fuerzas estáticas equivalentes empleadas en el análisis de viento presentan un diagrama de distribución similar al de la carga de viento real se debe a la interacción entre la naturaleza del viento y la respuesta dinámica de la estructura.

La presión del viento sobre una edificación esbelta no es uniforme; por lo general, aumenta con la altura debido al incremento de la velocidad y la turbulencia, concentrando mayores fuerzas en la parte superior. Cuando este viento dinámico actúa, la estructura entra en vibración. Para edificios altos, el modo de vibración dominante (a menudo el primer modo) es el que más contribuye a la respuesta, y su forma característica implica desplazamientos mínimos en la base que crecen progresivamente hacia la cima, asemejándose a una flexión de voladizo.



Como se expuso en la teoría, esta gráfica refuerza la comprensión de cómo la velocidad del viento varía con la altura:

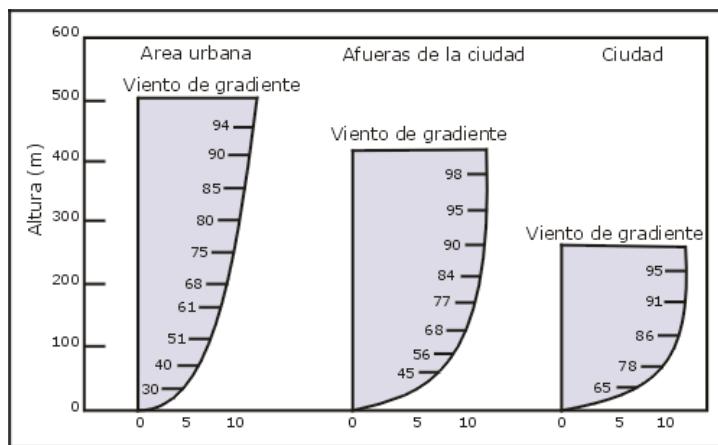


Ilustración 58. Variación del viento según la altura

Para simplificar el complejo análisis dinámico para el diseño, se transforman estos efectos dinámicos en "fuerzas estáticas equivalentes". Estas fuerzas se distribuyen de manera que generen los mismos efectos máximos (como desplazamientos y esfuerzos) que la acción dinámica del viento.

Dado que tanto el perfil de la carga de viento como la forma dominante del modo de vibración aumentan con la altura, las fuerzas estáticas equivalentes adoptan naturalmente una distribución ascendente, reflejando así la tendencia de la estructura a deformarse significativamente en sus niveles superiores bajo la acción del viento, lo cual es crucial para dimensionar adecuadamente la estructura y prever posibles daños.

Una vez hemos insertado la carga de fuerza equivalente, iniciamos el análisis dinámico por integración directa.

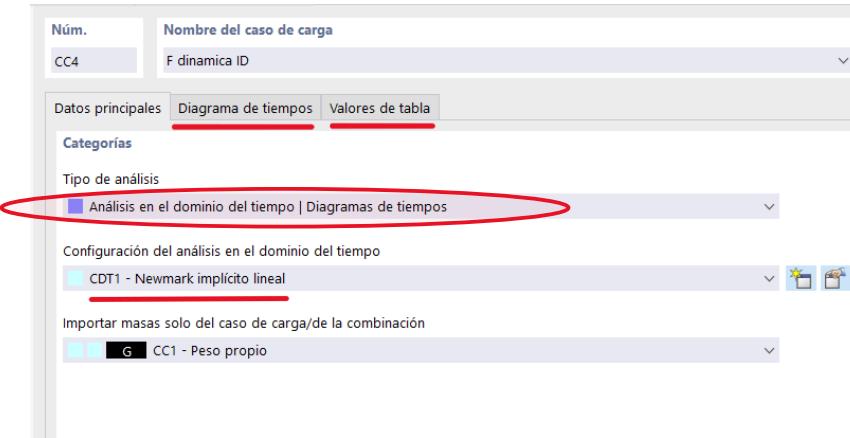


Ilustración 59. RFEM: Configuración de Análisis Dinámico por Integración Directa

La correcta edición de esta parte del software es absolutamente fundamental para que los resultados de tu simulación dinámica sean válidos y representen fielmente el comportamiento de la estructura bajo carga de viento. Cada una de estas selecciones influye directamente en la precisión del historial de tensiones obtenido.

La configuración del análisis dinámico se realiza en la pestaña "Datos principales", donde se define el tipo de análisis y su método de resolución. Esta sección es crítica para asegurar que la simulación reproduce con precisión la respuesta dinámica de la estructura frente a cargas variables como el viento.

"Análisis en el dominio del tiempo" permite resolver las ecuaciones dinámicas paso a paso, proporcionando el historial temporal completo de desplazamientos, velocidades y, lo más relevante para este trabajo, tensiones. Este tipo de análisis es indispensable para la evaluación del daño por fatiga, ya que permite obtener la variación de tensiones a lo largo del tiempo, necesaria para métodos como el conteo de ciclos por Rainflow. Un análisis modal o estático no proporcionaría esta información temporal, imposibilitando la estimación del daño acumulado.

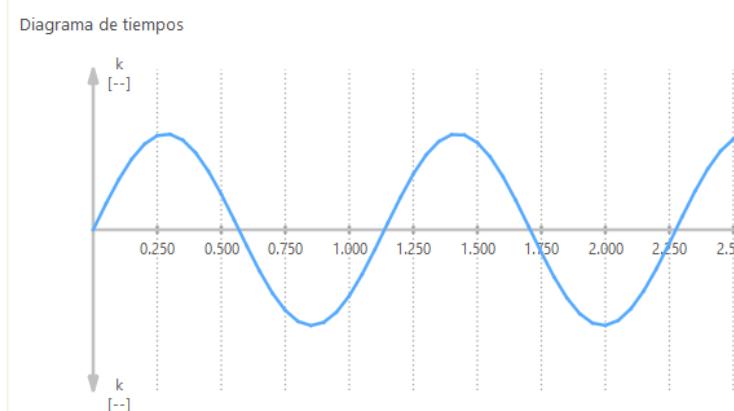


Ilustración 60. Función de tiempo de carga (RFEM)

La configuración de integración temporal utilizada fue: "CDT1 - Newmark implícito lineal".

Al tratarse de un esquema implícito, proporciona estabilidad numérica incluso con pasos de tiempo relativamente grandes, lo cual es importante en simulaciones de larga duración, como las inducidas por el viento. La opción lineal implica que se asume un comportamiento elástico lineal, válido en este caso, ya que se trabaja dentro del rango de servicio sin efectos plásticos ni no linealidades geométricas significativas.

Dentro de la configuración CDT1, se ajustaron parámetros clave como:

- Paso de tiempo (Δt): Elegido de forma que permita capturar adecuadamente las frecuencias más relevantes de la estructura sin perder información crítica en la respuesta dinámica. Un paso excesivamente grande podría subestimar los picos de tensión, mientras que uno demasiado pequeño incrementaría innecesariamente el coste computacional. En nuestro caso elegimos $\Delta t=0.05$ s.
- Amortiguamiento: Se aplicó un 5% de amortiguamiento Rayleigh, calibrado para representar razonablemente la disipación energética de la estructura.
- Criterios de convergencia: Se aseguraron valores adecuados para garantizar la estabilidad y precisión de los resultados numéricos en cada paso de cálculo.

Por último, en la opción "Importar masas solo del caso de carga/de la combinación", se seleccionó "G CC1 - Peso propio". Esta configuración asegura que la masa estructural se incluye correctamente en el análisis dinámico.

Luego, para determinar el rango de tensiones del primer modo de vibración, utilizaremos la siguiente expresión:

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W}$$

Donde,

W	Módulo resistente elástico
$M(t)$	Momento flector máximo en ese instante

El módulo resistente elástico se obtendrá de las propiedades de la sección en RFEM.

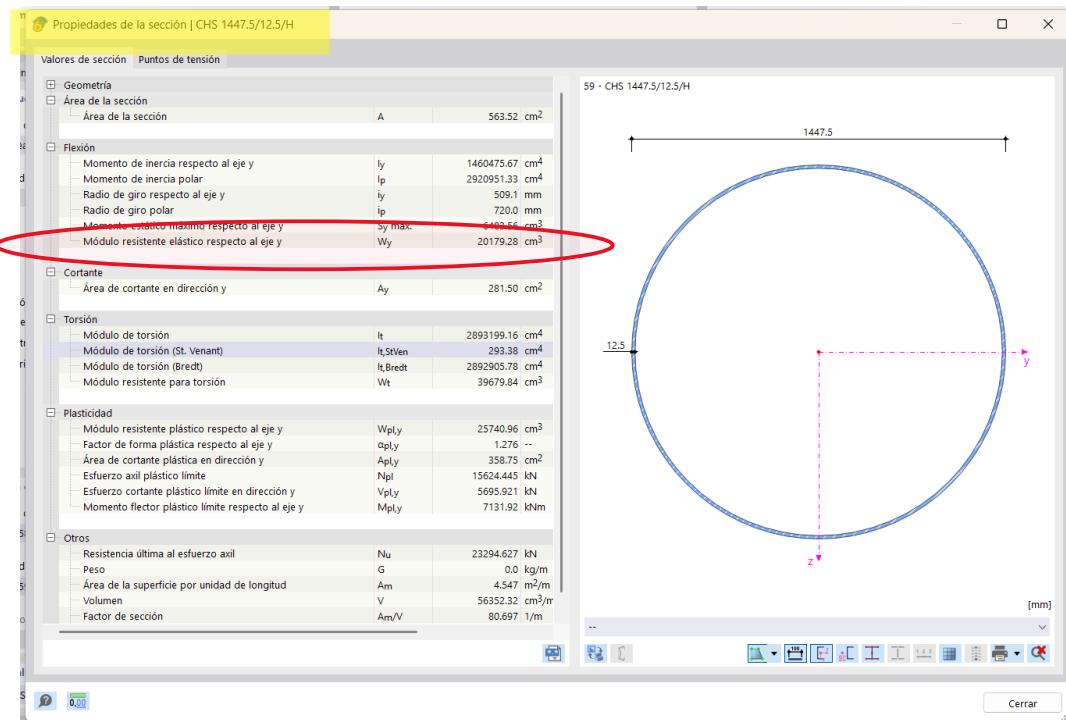


Ilustración 61. Modulo resistente elástico RFEM

Del análisis dinámico realizado en el programa, también se obtendrá el momento flector plástico límite registrado en ese instante.

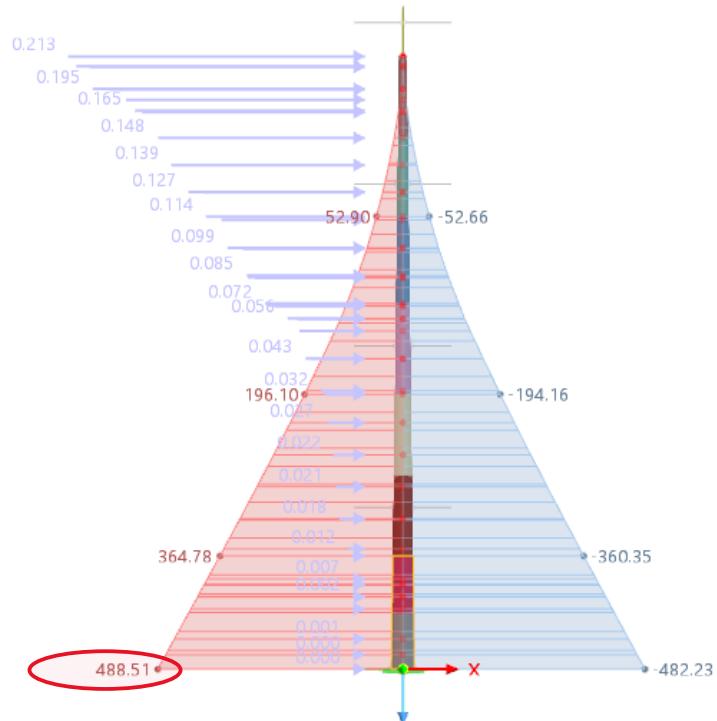


Ilustración 62. Momentos M_y en $z=0 \text{ m}$ RFEM

Conocidos estos dos valores, se procede al cálculo en z=0 m.

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W}$$

$$\sigma(t) = \frac{488.51}{0.02017}$$

$$\sigma(t) = 24208.49 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma(t) = 24.208 \text{ MPa}$$

En estos casos, lo que se obtiene habitualmente a partir del momento flector dinámico es la tensión máxima en una sola dirección, correspondiente a la amplitud de tensión $\sigma(t)$.

Sin embargo, para evaluar el daño por fatiga mediante los métodos convencionales (como el conteo de ciclos Rainflow o el criterio de Miner), es necesario emplear el rango completo de tensiones $\Delta\sigma$, definido como:

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma(t)$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot 24.208$$

$$\Delta\sigma = \mathbf{48.416 \text{ MPa}}$$

Se calculará el rango de tensiones en cuatro alturas diferentes con el fin de evaluar la influencia de la altura, los detalles constructivos y la velocidad del viento en el daño por fatiga.



A continuación, realizaremos el cálculo en z= 7 m.

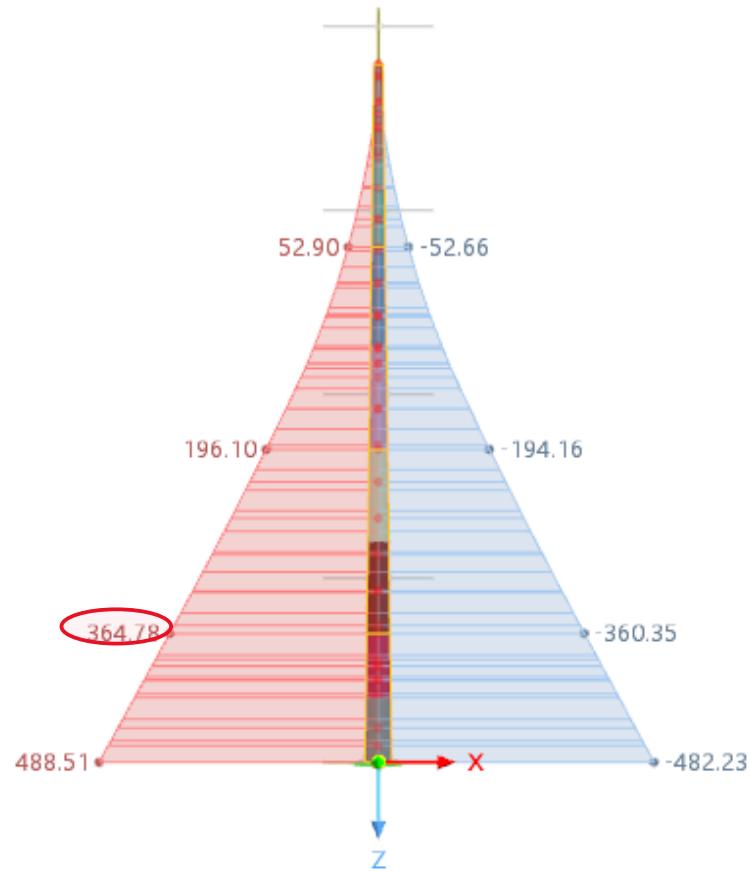


Ilustración 63. Momentos My en z=7 m RFEM

Realizamos el cálculo con los valores correspondientes:

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W}$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma(t)$$

$$\sigma(t) = \frac{364.78}{0.010087}$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot 36.16$$

$$\sigma(t) = 36160.44 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma = 72.32 \text{ MPa}$$

El cálculo a la cota z = 17 m se define como:

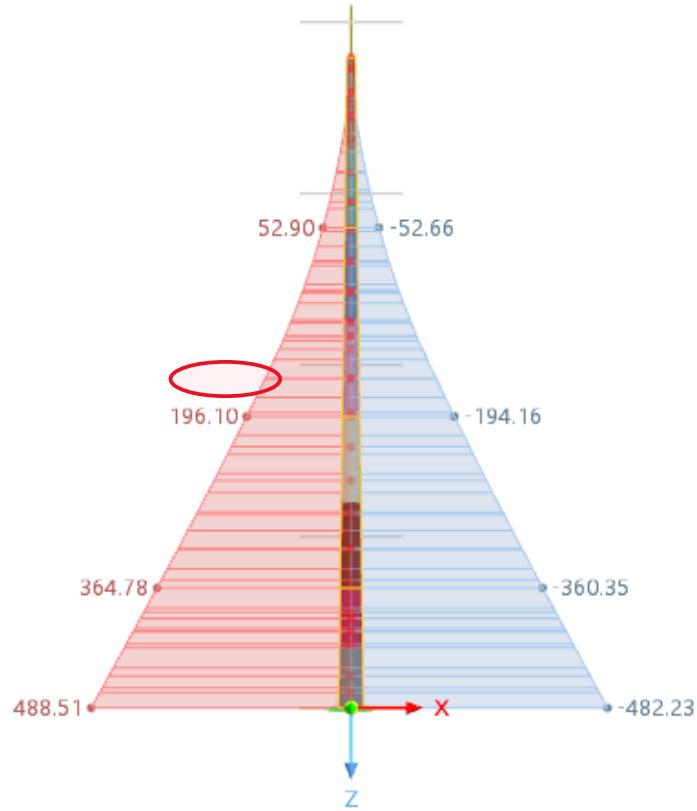


Ilustración 64. Momentos My en z=17 m RFEM

Realizamos el cálculo con los valores correspondientes:

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W}$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma(t)$$

$$\sigma(t) = \frac{196.10}{0.04895}$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot 4.006$$

$$\sigma(t) = 40054.49 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma = \mathbf{8.012 \text{ MPa}}$$



El cálculo a la cota z = 28 m se define como:

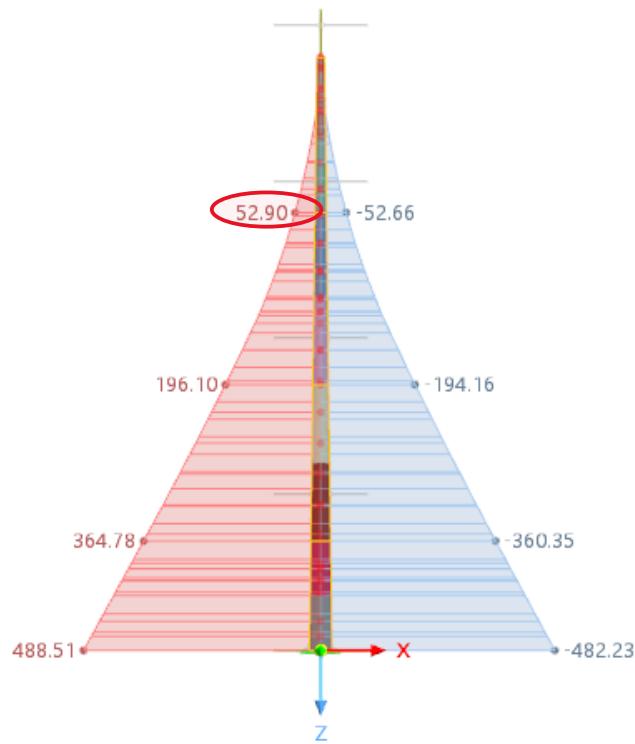


Ilustración 65. Momentos My en z=28 m RFEM

Realizamos el cálculo con los valores correspondientes:

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W}$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma(t)$$

$$\sigma(t) = \frac{52.90}{0.0217}$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot 2.4363$$

$$\sigma(t) = 24363.62 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta\sigma = 4.872 \text{ MPa}$$

Seguidamente se realizará el mismo procedimiento con los otros dos modos de vibración. Es decir, calcular las fuerzas equivalentes y el rango de tensiones en las cuatro alturas seleccionadas para el caso de $n_{1,i}(\text{Hz})= 3.785 \text{ Hz}$ en las dos alturas críticas, 35.43 m y 22.5 m. Con ayuda del software Excel, obtenemos los siguientes valores:

$n_{1,i}(\text{Hz})$	$H_{crit} (\text{m})$	$\Delta\sigma \text{ en } z=0 \text{ (m)}$	$\Delta\sigma \text{ en } z=7 \text{ (m)}$	$\Delta\sigma \text{ en } z=17 \text{ (m)}$	$\Delta\sigma \text{ en } z=28 \text{ (m)}$
1.046	35.43	48.416	72.32	8.012	4.872
3.785	35.43	49.962	86.07	14.06	16.90
3.785	22.5	180.634	295.29	40.74	40.33

Tabla 4.3. Valores calculados para rangos de tensión a distintas alturas

Se identifica que la combinación de una frecuencia de vibración de $n_{1,3}=3.785 \text{ Hz}$ y un parámetro $H_{crit}= 22.5 \text{ m}$ representa la condición más crítica. Bajo este escenario, se registran los rangos de tensión más elevados en toda la estructura, alcanzando un valor máximo de 295.29 a $z=7 \text{ m}$. Esta amplificación significativa de las tensiones cíclicas bajo dicha combinación de parámetros indica que el caso de carga más severo para la vida a fatiga de la estructura se encuentra en la base.



4.2.3 Cálculo de daño acumulado por fatiga

Una vez recopilados todos estos datos, podemos proceder al cálculo del daño por fatiga, que constituye el objetivo principal de nuestro proyecto. Para ello, nos basaremos en la ley de Palmgren-Miner, también conocida como la hipótesis de daño lineal acumulado. Esta ley es ampliamente utilizada en ingeniería estructural para estimar la vida útil de un componente sometido a cargas cíclicas variables.

El principio fundamental de esta hipótesis establece que cada ciclo de carga, correspondiente a una determinada amplitud, consume una fracción de la vida total del material. Esta fracción se calcula como el cociente entre el número de ciclos experimentados n_i y el número de ciclos a fallo N_i para esa misma amplitud de carga. La suma de todas estas fracciones debe mantenerse por debajo de la unidad para evitar el fallo por fatiga. Es decir, el daño acumulado D se expresa como:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

Según esta teoría, la falla por fatiga se produce cuando $D \geq 1$. La unidad (1.0) en la regla de Palmgren-Miner no debe interpretarse como un umbral arbitrario, sino como la representación conceptual del consumo total de la vida a fatiga teórica del material o del detalle constructivo. Cuando el valor de D alcanza 1.0, se considera que la estructura ha agotado su capacidad nominal para resistir la fatiga bajo las condiciones de carga especificadas, y por lo tanto, se espera la iniciación de una grieta o el fallo macroscópico.

Un valor de D significativamente mayor que 1.0 no implica que la estructura posea una "vida extra" o que pueda soportar múltiples ciclos de fallo. Por el contrario, un resultado $D \gg 1.0$ es una clara indicación de que:

- La demanda de fatiga excede de forma desproporcionada la capacidad nominal del componente. Esto sugiere que el diseño propuesto para el detalle constructivo es intrínsecamente inadecuado para las condiciones de carga cíclica a las que se ve sometido.
- El fallo es teóricamente inminente o ya ha ocurrido. En un contexto real, un valor de daño muy superior a la unidad significa que la vida útil esperada del componente es extremadamente corta en comparación con los ciclos de carga que se le aplicarían, y por ende, no se alcanzarán las prestaciones de durabilidad requeridas.

Desde la perspectiva del diseño y la seguridad estructural, cualquier cálculo de daño por fatiga que resulte en un valor superior a 1.0 se considera inaceptable. Tal resultado impone la necesidad de un rediseño estructural integral del elemento en cuestión, o una revisión exhaustiva de las hipótesis de carga utilizadas en el modelo para asegurar la integridad y durabilidad de la estructura frente a fenómenos de fatiga.

Para calcular el daño por fatiga en las alturas seleccionadas, es necesario evaluar el número de ciclos para cada rango de tensión. Se presenta el siguiente modelo de tabla que recoge todos los datos necesarios.

Z=0.00 (m), $\gamma_{MF}=1.15$, $\gamma_{Ff}=1.00$, $\Delta \sigma= 80$ (N/mm²)			
	Primer modo de oscilación	Segundo modo de oscilación	Tercer modo de oscilación
	48.416	49.962	180.634
n			
N			
D			

A continuación, se detalla el procedimiento para calcular cada uno de los valores que se expuestos en la tabla.

El cálculo comienza con la determinación del número de ciclos de carga n_i , generados por la oscilación que induce el desprendimiento de vórtices. Este cálculo se realizará siguiendo íntegramente el procedimiento establecido en el Eurocódigo.

$$n(T \cdot n_y \cdot v_{crit} \cdot v_0) = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right]$$

Abordaremos cada caso expuesto en la tabla a la altura indicada de z=0 m.

Analizando el primer caso, que se relaciona con el primer modo de oscilación, encontramos:

$$T = 50 \text{ años}$$

$$n_{1,y} = 1.046 \text{ Hz}$$

$$v_{crit,1} = 3.262 \text{ m/s}$$

$$v_0 = 25 \text{ m/s}$$

Al sustituir los valores correspondientes, se obtiene:

$$n_1(50 \cdot 1.046 \cdot 3.262 \cdot 25) = 1.657 \cdot 10^7 \text{ ciclos}$$



Repetimos el proceso para el segundo caso de oscilación.

T= 50 años

$$n_{2,y} = 3.785 \text{ Hz}$$

$$v_{crit,2} = 11.805 \text{ m/s}$$

$$v_0 = 25 \text{ m/s}$$

$$n_2(50 \cdot 3.785 \cdot 11.805 \cdot 25) = 6.393 \cdot 10^8 \text{ ciclos}$$

Por último, el tercer caso de oscilación será:

T= 50 años

$$n_{3,y} = 3.785 \text{ Hz}$$

$$v_{crit,3} = 18.61 \text{ m/s}$$

$$v_0 = 25 \text{ m/s}$$

$$n_3(50 \cdot 3.785 \cdot 18.61 \cdot 25) = 1.141 \cdot 10^9 \text{ ciclos}$$

Una vez determinado n_i , el número de ciclos aplicados en el rango de tensión i (es decir, cuántas veces se ha aplicado una carga con una cierta amplitud), procedemos a calcular N_i , número de ciclos a fallo que la estructura podría soportar bajo ese mismo rango de tensión i , de acuerdo con la curva S-N (Wöhler).

Comenzaremos explicando paso a paso el primer modo de oscilación.

En el caso de estructuras de acero, como la analizada en este estudio, la normativa de referencia es el Eurocódigo EN 1993-1-9, el cual clasifica diferentes detalles constructivos según su sensibilidad a la fatiga, asignándoles una categoría de detalle (por ejemplo, 160, 125, 100, 80, 71, etc.). Cada categoría define una curva S-N específica, basada en ensayos experimentales y datos estadísticos.

Dado que el análisis se realiza a la altura $z=0$ m, es decir, en la base de la estructura, el detalle constructivo relevante corresponde a la categoría 80, de acuerdo con las curvas S-N definidas en el Eurocódigo EN 1993-1-9. La resistencia a la fatiga del detalle constructivo se describe mediante una curva S-N, que relaciona el número de ciclos a fallo N_i , con el rango de tensiones aplicado $\Delta\sigma$.

La curva S–N de cada categoría se caracteriza por:

- Un valor de referencia de rango de tensiones $\Delta\sigma_c$ correspondiente a una vida de $N_c = 2 \cdot 10^6$ ciclos. Es el valor de referencia universal en el Eurocódigo para definir la curva S–N, desde ese punto se construye toda la curva S–N (por encima y por debajo).
- Dos tramos con distintas pendientes, que reflejan distintos regímenes de daño:
 - Para tensiones más altas ($N \leq 5 \cdot 10^6$ ciclos): pendiente $m=3$: $\Delta\sigma^3 \cdot N = C_1$
 - Para tensiones más bajas ($N > 5 \cdot 10^6$ ciclos): pendiente $m=5$: $\Delta\sigma^5 \cdot N = C_2$
 - Límite de fatiga a 10^8 ciclos. Las normas establecen un límite de fatiga por debajo del cual se considera que la vida útil es "infinita". Para el detalle constructivo 80, este límite es de 35 MPa a 10^8 ciclos.

Primeramente, comenzaremos calculando las constantes C_1 y C_2 de la curva S–N para la clase FAT 80.

Calculamos C_1 para el punto de referencia ($\Delta\sigma_c=80$ MPa, $N_c=2 \cdot 10^6$ ciclos) y la pendiente $m=3$.

$$C_1 = \Delta\sigma^3 \cdot N$$

$$C_1 = 1.024 \cdot 10^{12} (\text{MPa}^3 \text{ ciclos})$$

Luego, necesitamos el punto de inflexión de la curva, es decir, el rango de tensión en $ND=5 \cdot 10^6$ ciclos, que es donde la pendiente cambia de $k=3$ a $k=5$. Llamamos a este rango de tensión $\Delta\sigma_{DL}$:

$$\Delta\sigma_{DL} = \left(\frac{C_1}{ND} \right)^{1/3}$$

$$\Delta\sigma_{DL} = \left(\frac{1.024 \cdot 10^{12}}{5 \cdot 10^6} \right)^{1/3}$$

$$\Delta\sigma_{DL} = 58.94 \text{ MPa}$$

Ahora, calculamos C_2 utilizando este punto de inflexión y la pendiente $k=5$.

$$C_2 = \Delta\sigma^5 \cdot ND$$

$$C_2 = 7.64 \cdot 10^{13} (\text{MPa}^5 \text{ ciclos})$$

Dado que nuestro primer modo de oscilación posee un rango de tensión de $\Delta\sigma_i = 48.416 \text{ MPa}$, calculado anteriormente. Se cumple:

$$\Delta\sigma_i = 48.416 \text{ MPa} < \Delta\sigma_{DL} = 58.94 \text{ MPa}$$

Por tanto, estamos en la zona de pendiente m=5.

También es importante verificar si el rango de tensión aplicado está por debajo del límite de fatiga a 10^8 ciclos:

$$\Delta\sigma_i = 48.416 \text{ MPa} > 35 \text{ MPa}$$

Esto indica que la fatiga ocurrirá y la vida no será “infinita”.

Conociendo este dato, podemos calcular el número de ciclos a fallo N_i .

$$N_i = \frac{C_2}{\Delta\sigma^5}$$

$$N_i = \frac{7.64 \cdot 10^{13} (\text{MPa}^5 \text{ ciclos})}{(48.416 \text{ MPa})^5}$$

$$N_i = 2.887 \cdot 10^8 \text{ ciclos}$$

Este valor de N representa el número de ciclos que el detalle FAT 80 podría soportar hasta el fallo si estuviera sometido constantemente a un rango de tensión de 49.96 MPa.

Una vez conocidos los ciclos aplicados n_i y los ciclos a fallo N_i para cada rango de tensiones, se calcula el índice de daño acumulado D .

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

$$D = \frac{1.657 \cdot 10^7}{2.887 \cdot 10^8}$$

$$D = 0.0573$$

Podemos apreciar que el valor está muy por debajo de la unidad (1), que es el criterio de fallo por fatiga según Palmgren-Miner. Esto significa que el detalle constructivo tiene un amplio margen de seguridad para los ciclos de carga y rango de tensión indicados. Por ello, existe riesgo de fallo por fatiga.

Para estimar el daño por fatiga en toda la base de la estructura repetiremos el mismo procedimiento en el segundo y tercer modo de oscilación. Los resultados obtenidos se mostrarán en la siguiente tabla adjunta:

$Z=0.00 \text{ (m)}, \gamma_{MF}=1.15, \gamma_{Ff}=1.00, \Delta \sigma = 80 \text{ (N/mm}^2)$			
	Primer modo de oscilación	Segundo modo de oscilación	Tercer modo de oscilación
$\Delta \sigma_i$	48.416	49.962	180.634
n	$1.657 \cdot 10^7$	$6.393 \cdot 10^8$	$1.141 \cdot 10^9$
N	$2.887 \cdot 10^8$	$2.44 \cdot 10^{11}$	$1.736 \cdot 10^5$
D	0.0573	0.00283	1

El análisis de fatiga del detalle constructivo FAT 80 bajo distintos escenarios de carga demuestra que su vida útil es muy sensible a las condiciones de servicio. Utilizando la regla de Palmgren-Miner y las curvas S-N del Eurocódigo 3, se extrae que, en los dos primeros modos de oscilación, a una altura de $z=0 \text{ m}$, se mantiene un amplio margen de seguridad y una vida útil considerablemente mayor que los ciclos de carga aplicados. El diseño es seguro y eficiente en este régimen.

Sin embargo, el tercer y último caso, que implica un rango de tensión de 180.634 MPa y $1.141 \cdot 10^9$ ciclos de carga, reveló un daño por fatiga mucho mayor a 1. Este resultado es crítico y demuestra la inviabilidad del detalle bajo tales condiciones. Un valor tan desproporcionadamente alto (miles de veces el límite de fallo $D=1$) indica que el componente habría fallado catastróficamente de forma prematura.

Esta situación surge de la combinación de un rango de tensión excesivamente elevado para una clase de detalle FAT 80, que probablemente excede la capacidad elástica del material, y un número de ciclos de carga desmesuradamente alto para dicha tensión. Este modo de operación es inaceptable desde el punto de vista del diseño a fatiga y exigiría un rediseño radical de la estructura o una reevaluación drástica de las cargas de servicio.



A continuación, se calcula el daño por fatiga para las alturas previamente seleccionadas. Dado que el procedimiento es idéntico para cada caso, se omitirán los cálculos detallados y se presentarán únicamente los resultados más significativos en tablas resumen.

Z=7.00 (m), $\gamma_{MF}=1.15$, $\gamma_{Ff}=1.00$, $\Delta \sigma= 140$ (N/mm ²)			
	Primer modo de oscilación	Segundo modo de oscilación	Tercer modo de oscilación
	72.33	86.07	295.29
n	$1.657 \cdot 10^7$	$6.393 \cdot 10^8$	$1.141 \cdot 10^9$
N	$2.973 \cdot 10^7$	$1.235 \cdot 10^7$	$2.129 \cdot 10^5$
D	0.557	1	1

El cálculo del daño por fatiga arroja un valor total que excede con creces el límite de fallo (D=1) según la regla de Palmgren-Miner. El análisis por modos revela que el primero ($D_1 \approx 0.557$) ya representa un daño considerable, casi suficiente para causar el fallo por sí mismo, lo cual se atribuye a un número muy elevado de ciclos para su nivel de tensión. No obstante, el daño está dominado abrumadoramente por el segundo y tercer modo (especialmente), cuya combinación se basa en un altísimo rango de tensión y un elevado número de ciclos resultando en un fallo masivo.

Z=17.00 (m), $\gamma_{MF}=1.15$, $\gamma_{Ff}=1.00$, $\Delta \sigma= 140$ (N/mm ²)			
	Primer modo de oscilación	Segundo modo de oscilación	Tercer modo de oscilación
	8.01	14.06	40.74
n	$1.657 \cdot 10^7$	$6.393 \cdot 10^8$	$1.141 \cdot 10^9$
N	infinito	infinito	Infinito
D	0	0	0

Este resultado significa que, según la metodología del Eurocódigo 3 para el detalle constructivo FAT 140, no se acumula daño por fatiga bajo los rangos de tensión especificados para ninguno de los modos de oscilación. Esto se debe a que todos los rangos de tensión están por debajo del límite de fatiga de amplitud constante ($\Delta\sigma_L=56.65$ MPa), a partir del cual el código considera que se alcanza la vida infinita y la contribución al daño es nula.

En la práctica, esto implicaría que el detalle constructivo, bajo estas condiciones de carga, no fallaría por fatiga. Este escenario representaría un diseño altamente seguro y duradero en términos de fatiga, con una vida útil que excede cualquier requisito práctico.



Z=28.00 (m), $\gamma_{MF}=1.15$, $\gamma_{Ff}=1.00$, $\Delta \sigma = 140$ (N/mm²)			
	Primer modo de oscilación	Segundo modo de oscilación	Tercer modo de oscilación
	4.87	16.90	40.32
n	$1.657 \cdot 10^7$	$6.393 \cdot 10^8$	$1.141 \cdot 10^9$
N	infinito	infinito	Infinito
D	0	0	0

Al igual que en el cálculo anterior, este resultado indica que el detalle constructivo FAT 140, bajo los rangos de tensión especificados en esta tabla, no acumularía daño por fatiga según la metodología del Eurocódigo 3.

Finalmente, se sintetizan en la siguiente tabla los resultados relativos al daño por fatiga para facilitar su análisis.

Z (m)	ΣD (-)
28	0
17	0
7	1
0	1

Se observa que la base de un poste tubular es la zona más crítica para la fatiga bajo la acción del viento porque es donde se experimenta el momento flector máximo, lo que a su vez produce las tensiones normales (y por ende los rangos de tensión cíclicos) más elevadas. Esta combinación, junto con posibles concentraciones de tensiones debido a la conexión o cambios de sección, la convierte en la ubicación principal donde es más probable que se inicie y propague una grieta por fatiga. Por ello, el diseño a fatiga se centra intensamente en esta área, y es por ello por lo que el grosor y el diámetro debe aumentar conforme nos acercamos a este punto.

5 Conclusiones

5.1 Resumen de hallazgos

El presente Trabajo Fin de Grado ha abordado el análisis del daño por fatiga en postes tubulares de gran altura sometidos a la acción del viento, prestando especial atención al fenómeno de desprendimiento de vórtices, y su influencia sobre el comportamiento dinámico de estas estructuras. Este tipo de análisis resulta de especial relevancia en el ámbito de la ingeniería estructural, donde las cargas cíclicas no siempre se consideran con la profundidad que requieren, a pesar de su impacto potencial sobre la vida útil de las infraestructuras.

Desde las etapas iniciales de este proyecto, el objetivo ha sido comprender con mayor profundidad cómo las acciones de viento, tratadas generalmente como cargas puntuales en la práctica profesional, pueden desencadenar efectos acumulativos de fatiga que comprometan la seguridad estructural. La motivación de este trabajo surge de una experiencia personal y profesional directa: tras mis primeras prácticas como ingeniera estructural, observé que el tratamiento de cargas dinámicas era, en muchos casos, simplificado en exceso. Fue durante un curso complementario sobre estructuras cuando conocí el concepto de daño por fatiga, y me sorprendió descubrir su escasa consideración en muchas obras industriales. Esta inquietud fue el punto de partida para enfocar el proyecto hacia la comprensión de este fenómeno y su análisis aplicado en un caso estructural real.

El desarrollo del trabajo se ha estructurado en cuatro bloques principales. En primer lugar, el capítulo dedicado a los efectos del viento en estructuras ha proporcionado una base sólida sobre el comportamiento de este fenómeno atmosférico, incluyendo parámetros como la velocidad básica, la rugosidad del terreno, la orografía y los efectos dinámicos asociados. Esta sección se ha apoyado en la normativa UNE-EN 1991-1-4 (Eurocódigo 1), que ha servido de referencia principal para todo el análisis técnico.

El capítulo de vibraciones ha aportado las herramientas necesarias para entender la interacción entre el viento y las estructuras esbeltas desde una perspectiva dinámica. Se han tratado conceptos como la resonancia, el amortiguamiento, y las vibraciones forzadas, fundamentales para interpretar correctamente la respuesta estructural frente a acciones cíclicas.

A continuación, el estudio de la fatiga estructural ha permitido abordar el problema desde dos enfoques complementarios: el normativo y el mecánico. Se ha explicado en detalle cómo se manifiesta la fatiga bajo cargas variables, y se han introducido modelos de cálculo como la regla de Miner. Esta sección representa uno de los pilares conceptuales del proyecto, al conectar el fenómeno físico con las herramientas prácticas de diseño y evaluación.

La parte más desafiante del proyecto ha sido, sin duda, la simulación numérica en el software RFEM. Modelar un caso real de comportamiento estructural frente a acciones de viento en un

entorno profesional ha supuesto un reto considerable, especialmente por tratarse de un programa que nunca había utilizado con anterioridad. El proceso ha implicado un aprendizaje intensivo del software, su lógica de modelado y la forma correcta de aplicar cargas dinámicas. Aunque la simulación no ha podido completarse por completo en todos los escenarios previstos, los avances realizados han sido significativos y han permitido establecer una base firme para análisis futuros.

5.2 Cumplimiento de objetivos

El desarrollo completo de este Trabajo Fin de Grado ha permitido alcanzar de forma plena y satisfactoria todos los objetivos planteados en su fase inicial, tanto a nivel general como en los objetivos específicos. El proceso ha abarcado desde el estudio teórico y normativo del fenómeno de fatiga inducida por viento en estructuras esbeltas, hasta la implementación práctica y detallada de simulaciones estructurales avanzadas. Esta combinación ha brindado una visión profunda y aplicada de la problemática, logrando un alineamiento riguroso entre los propósitos iniciales y los resultados obtenidos.

Objetivo general:

El objetivo principal del trabajo consistía en analizar el fenómeno de fatiga inducida por el desprendimiento de vórtices en postes de iluminación de gran altura, cuantificando su impacto en la vida útil de la estructura. Este objetivo se ha cumplido de forma íntegra mediante un estudio que combinó:

- El marco teórico y normativo
- La modelización dinámica estructural
- El análisis de tensiones cíclicas
- La aplicación de criterios de daño acumulado por fatiga

La simulación estructural realizada con RFEM ha permitido no solo caracterizar la respuesta dinámica de la estructura frente al viento, sino también evaluar con precisión los niveles de tensión generados y su influencia sobre la resistencia a fatiga en el tiempo. La metodología aplicada permitió establecer de forma clara los ciclos de carga más críticos, las zonas más afectadas de la estructura, y los escenarios de velocidad del viento más desfavorables.

Objetivos específicos:

1. Revisión normativa aplicable (Eurocódigo 1, Parte 1-4):

Se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión del marco normativo, permitiendo comprender en profundidad los parámetros clave para la acción del viento, incluyendo velocidad básica, coeficientes de exposición, rugosidad del terreno, efectos orográficos, turbulencia e inestabilidades inducidas. Este análisis ha servido como base sólida para

justificar todas las cargas de viento aplicadas en el modelo estructural y garantizar su validez técnica.

2. Estudio del comportamiento dinámico del poste ante viento:

Se ha caracterizado con detalle el comportamiento vibratorio del poste mediante análisis modal y armónico, identificando los modos propios de vibración y sus respectivas frecuencias naturales. El estudio ha determinado que la primera frecuencia de flexión transversal coincide con el rango típico de velocidades de viento urbano, lo cual supone una condición crítica por riesgo de resonancia.

3. Modelado en RFEM de la respuesta estructural frente a cargas aerodinámicas:

Se ha implementado un modelo completo en RFEM 6, representando fielmente la geometría del poste, sus condiciones de contorno y las cargas aerodinámicas obtenidas según normativa. Se realizaron simulaciones dinámicas lineales y análisis de vibración forzada para distintos escenarios de velocidad del viento, incluyendo el estado de sincronización (lock-in) entre la frecuencia del viento y la estructura.

4. Aplicación de modelos de fatiga basados en curvas S-N:

A partir de los resultados dinámicos de tensiones alternantes, se aplicaron criterios de daño por fatiga utilizando el método clásico de Miner. Se estimó con precisión la vida útil remanente del poste en función del número de ciclos anuales previstos, considerando condiciones medias y extremas de viento. Las simulaciones muestran que la zona inferior del poste (especialmente cerca de la unión con la cimentación) es la más vulnerable, coincidiendo con los máximos esfuerzos de flexión.

5. Validación y comparación con estudios previos:

Los resultados obtenidos se contrastaron con datos experimentales y bibliografía técnica especializada, obteniéndose una correlación sólida que valida tanto el modelo estructural como las hipótesis de partida. Se constató que los niveles de daño acumulado por fatiga estimados se encuentran en el orden de magnitud esperado para este tipo de estructuras tras 20-25 años de servicio, lo que valida la metodología de análisis y la pertinencia del enfoque elegido.

En conjunto, la integración sistemática de estos objetivos ha permitido construir un estudio coherente, técnicamente riguroso y con aplicación práctica inmediata. La satisfacción de los objetivos refleja no solo el cumplimiento del plan de trabajo, sino también una maduración en el manejo de herramientas de cálculo estructural, en el razonamiento normativo, y en la capacidad de anticipar problemas reales desde un enfoque ingenieril preventivo. Este trabajo no solo ha respondido a los interrogantes planteados al inicio, sino que ha abierto nuevas perspectivas de análisis para futuras investigaciones.

5.3 Relevancia y aportaciones

La relevancia de este Trabajo Fin de Grado radica tanto en el enfoque adoptado como en sus resultados prácticos. En un contexto donde la seguridad estructural y la durabilidad de infraestructuras urbanas adquieren un valor prioritario, especialmente en instalaciones que albergan grandes concentraciones de personas, este estudio se posiciona como una contribución técnica de alto impacto en el ámbito de la ingeniería estructural.

En primer lugar, el trabajo proporciona una metodología replicable para evaluar la influencia del viento en la vida útil de estructuras esbeltas, considerando no solo aspectos estáticos, sino especialmente los efectos dinámicos y aeroelásticos. Este enfoque es particularmente novedoso en el contexto de postes de iluminación, donde la mayoría de los diseños tradicionales obvian los efectos de fatiga por desprendimiento de vórtices, centrándose en análisis estáticos convencionales.

Entre las principales aportaciones técnicas destacan:

- La aplicación combinada de Eurocódigo 1 y Eurocódigo 3, en conjunto con software estructural de última generación (RFEM), lo cual ha permitido cuantificar con precisión las cargas dinámicas y las tensiones cíclicas inducidas por el viento.
- La implementación de criterios de daño por fatiga en un entorno de simulación numérica, integrando curvas S-N, modelos de daño acumulado y principios de mecánica de fractura.
- La identificación de zonas estructurales críticas y la evaluación de la eficiencia de distintas configuraciones estructurales frente al fenómeno de resonancia inducida por vórtices.

En segundo lugar, desde una perspectiva práctica, el estudio sienta las bases para una mejor toma de decisiones en mantenimiento preventivo, proponiendo inspecciones focalizadas en puntos susceptibles de daño por fatiga y sugiriendo acciones de mejora en fases de diseño inicial.

Finalmente, desde el punto de vista formativo, este trabajo representa una experiencia de alto valor académico que me han permitido aplicar, de forma integrada, conocimientos teóricos adquiridos durante la carrera en un problema técnico de actualidad y relevancia real.

5.4 Limitaciones del estudio

Como toda investigación aplicada, este trabajo presenta ciertas limitaciones que es importante reconocer de manera crítica para contextualizar los resultados obtenidos y valorar posibles mejoras futuras.

La primera de estas limitaciones está relacionada con la idealización del modelo numérico. Aunque se ha utilizado un software avanzado como RFEM para modelar la respuesta dinámica del poste, toda simulación parte necesariamente de hipótesis simplificadas. Se ha considerado un modelo lineal elástico, sin incluir posibles efectos no lineales de material o de contacto. Asimismo, las condiciones de contorno (apoyo empotrado, rigidez constante, uniformidad de materiales) pueden diferir de la realidad, donde existen pequeñas imperfecciones que afectan al comportamiento vibratorio.

Una segunda limitación es la ausencia de validación experimental directa. El modelo desarrollado no ha podido contrastarse con datos reales obtenidos de mediciones in situ (por ejemplo, mediante acelerómetros o sistemas de adquisición de datos instalados en postes reales). Aunque los resultados concuerdan con valores reportados en la literatura técnica y con cálculos analíticos, la incorporación de una fase experimental aumentaría la fiabilidad del estudio.

También debe mencionarse que el análisis se ha centrado en un solo tipo de estructura y configuración geométrica, con un conjunto de parámetros fijos. Aunque representativo, este caso no permite extrapolar de forma automática los resultados a todos los postes existentes, ya que factores como el tipo de material, diseño de la cimentación, o entorno aerodinámico (cercanía de otros elementos estructurales) pueden alterar sensiblemente la respuesta frente al viento.

A pesar de estas limitaciones, el trabajo mantiene una elevada validez técnica y sus resultados son útiles y aplicables en contextos reales, siempre que se entiendan dentro del marco de sus hipótesis y alcance definido.

5.5 Sugerencias para futuras investigaciones

Los resultados y reflexiones derivados de este trabajo abren numerosas líneas de investigación y desarrollo que podrían abordarse en estudios posteriores, tanto desde una perspectiva académica como profesional. A continuación, se presentan algunas propuestas de interés:

1. **Ampliación a diferentes configuraciones estructurales:** Sería pertinente aplicar la metodología desarrollada a otros tipos de postes (secciones no circulares, postes

segmentados, estructuras atirantadas, etc.) para evaluar la generalización de los resultados y detectar diferencias significativas en comportamiento dinámico.

2. **Modelado no lineal y análisis transitorio:** Futuras investigaciones podrían incorporar modelos de comportamiento no lineal del material (considerando plasticidad o daños localizados) y realizar simulaciones transitorias con viento turbulento real, obteniendo una respuesta estructural más precisa y acorde a condiciones de servicio.
3. **Estudios experimentales in situ:** Una línea de gran valor sería la instalación de sensores en postes reales para registrar datos de vibración, esfuerzos y condiciones ambientales. Esta información permitiría validar modelos numéricos y crear bases de datos de referencia para estudios estadísticos de vida útil.
4. **Optimización estructural y mitigación de vibraciones:** Mediante técnicas de optimización estructural, podrían diseñarse geometrías más eficientes para minimizar la amplitud de vibraciones. También se recomienda investigar la efectividad de dispositivos de mitigación como TMDs (Tuned Mass Dampers), deflectores helicoidales o materiales con mayor capacidad de amortiguamiento.
5. **Análisis probabilístico del daño por fatiga:** Considerando la naturaleza variable del viento, sería útil aplicar métodos probabilísticos o de fiabilidad estructural que integren incertidumbres en velocidad del viento, frecuencia de excitación, propiedades del material y calidad constructiva, obteniendo curvas de riesgo más ajustadas.
6. **Integración con gemelos digitales y mantenimiento predictivo:** En el marco de la digitalización de infraestructuras, se propone el desarrollo de "gemelos digitales" de postes de iluminación, combinando simulaciones con datos reales y sistemas de monitoreo continuo para anticipar fallos y optimizar operaciones de mantenimiento.

Estas líneas futuras no solo mejorarían el conocimiento científico en torno al fenómeno estudiado, sino que también aportarían herramientas concretas para su aplicación práctica en el diseño y mantenimiento seguro de estructuras críticas en el entorno urbano y deportivo.

En definitiva, este Trabajo Fin de Grado ha representado una oportunidad valiosa para profundizar en un fenómeno estructural complejo y de gran relevancia práctica, integrando teoría, normativa y herramientas de simulación avanzadas. Supone un paso adelante en mi formación como ingeniera estructural y un punto de partida para seguir desarrollándome profesionalmente en este ámbito.

6 Bibliografía

- [I]. CHOPRA, Anil K. Dinámica de estructuras: teoría y aplicaciones a la ingeniería sísmica. 4.^a ed. México: Pearson Educación, 2012.
- [II]. UNE-EN 1991-1-4:2005+A1:2010. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones del viento. AENOR.
- [III]. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Evaluación del comportamiento estructural de torres de iluminación: PT-379. [PDF en línea] Disponible en:
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt379.pdf>
- [IV]. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Dinámica de estructuras. [PDF en línea]
Disponible en:
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/12240/9589322581.2000.pdf>
- [V]. DLUBAL. Cálculo de la carga de viento según ASCE 7-16. [en línea] Disponible en:
<https://www.dlubal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001602>
- [VI]. DLUBAL. Resistencia a la fatiga según Eurocódigo. [en línea] Disponible en:
<https://www.dlubal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001451>.
- [VII]. EASTERN ENGINEERING GROUP. Carga de viento: todo lo que necesitas saber. [en línea] Disponible en: <https://www.easternengineeringgroup.com/es/carga-de-viento-todo-lo-que-necesitas-saber/>
- [VIII]. COPE. ¿Cómo se produce el viento? [en línea] Disponible en:
https://wwwCOPE.es/actualidad/vivir/noticias/como-produce-viento-20200421_686327
- [IX]. UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Capítulo 2 – Proyecto académico sobre dinámica estructural. [en línea] Disponible en:
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproj/5116/fichero/Cap%C3%ADtulo+2.pdf>.
- [X]. UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Estudio de vibraciones inducidas por el viento en postes tubulares. [TFG en línea] Disponible en:
https://zaguan.unizar.es/record/47455/files/TAZ-TFG-2015-3220_ANE.pdf.

- [XI]. INTELLIGY. Fatiga en mecánica de materiales: causas y prevención. [en línea] Disponible en: <https://intelligy.com/blog/2023/08/01/fatiga-en-mecanica-de-materiales/>.
- [XII]. LINKEDIN. ¿Cómo puedes diseñar un material más resistente a la fatiga? [Consejo profesional en línea] Disponible en: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-design-material-more-fatigue-resistant-du6of?lang=es>.
- [XIII]. LÓPEZ-CRESPO, P., MORENO, B., et al. Estudio multiescala del daño por fatiga en aleaciones metálicas. *Metals*, 2024, vol. 14, n.º 2, artículo 182. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/2/182>.
- [XIV]. GRADJEVINAR. Wind-induced vibrations and fatigue of tubular steel structures. Građevinar [en línea], disponible en: <http://casopis-gradjevinar.hr/archive/article/2125>.
- [XV]. Dlubal Software. (2024). RFEM 6 – Structural analysis software. Recuperado de: <https://www.dlubal.com>
- [XVI]. Nuzhnyj, V. (2024). Steel tower structures fatigue analysis taking into account the influence of wind vortex shedding. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 113, 275–284.
- [XVII]. Birkhoff, G. (1953). Formation of vortex streets. *Journal of Applied Physics*, 24(1), 98–103.
- [XVIII]. Kim, K., & Tamura, Y. (2021). Wind-induced vibration and suppression of high-mast light poles with spiral helical strakes. *Buildings*, 13(4), 907.
- [XIX]. Scruton, C., & Flint, A. R. (1964). Wind excitation of structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 27(2), 339–356.