

Long Carbon Europe
Sections and Merchant Bars



ArcelorMittal

Guía de Diseño para el análisis de las vibraciones en forjados





Esta Guía de diseño presenta un método para evaluar la respuesta a vibraciones de un forjado garantizando el confort de los ocupantes. Este documento se basa en resultados recientes de investigación (RFCS – Project “Vibrations on floors”).

Los criterios respecto a la integridad estructural empleados en este documento se basan en enfoques comúnmente aceptados.

Contenido

1. Introducción	3
2. Definiciones	7
3. Determinación de las características de los forjados	11
4. Clasificación de las vibraciones	15
5. Procedimientos de diseño y diagramas	19
Anexo A Fórmulas para su utilización en cálculos manuales	31
Anexo B Ejemplos	43
Asistencia Técnica y Acabado	52
Referencias	52
Sus partners	53



1. INTRODUCCIÓN

1. Introducción

Los forjados se diseñan para condiciones de estado límite último y de estado límite de servicio:

- El estado límite último está relacionado con la resistencia y la estabilidad;
- El estado límite de servicio está principalmente relacionado con las vibraciones y, por lo tanto, guiado por aspectos tales como rigideces, masas, amortiguación y mecanismos de excitación.

Para estructuras de forjados esbeltas, tales como las realizadas en acero o en construcción mixta, los criterios de servicio gobiernan el diseño.

Se proporcionan indicaciones para:

- Especificaciones acerca de la vibración aceptable a través de la introducción del concepto de clase de aceptación (Capítulo 4) y
- Predicción de la respuesta del forjado ante una vibración inducida por las personas en relación con el uso pretendido del edificio (Capítulo 5).

En la Figura 1 se presenta una visión global del procedimiento general de diseño que se explica en el Capítulo 5.

En la predicción de vibraciones, hay que determinar diversas características dinámicas de los forjados. En este documento se describen brevemente estas características y los métodos simplificados para su determinación. También se presentan ejemplos de diseño en el Anexo B de esta Guía.

La Guía de diseño incluye métodos simples, herramientas de diseño y recomendaciones en relación con la aceptabilidad de estados de vibración en forjados creados por personas en el uso normal. Los métodos de diseño proporcionados se centran en la predicción de la vibración. En este respecto hay que tener en cuenta que las medidas llevadas a cabo una vez construido el forjado pueden presentar diferencias con respecto a los valores previstos.

Los métodos de diseño y evaluación de vibraciones de forjados están relacionados con vibraciones creadas por personas, normalmente al caminar sobre ellos en condiciones normales. Estas vibraciones pueden dar lugar a fenómenos de resonancia. Las vibraciones inducidas por máquinas o debidas al tráfico no están cubiertas por esta Guía de diseño.

Esta Guía de diseño no se debe utilizar para casos de pasarelas para peatones u otras estructuras que no tengan una característica estructural semejante a la de los forjados de edificios.

Figura 1. Procedimiento de diseño (ver Capítulo 5)

Determinar las características dinámicas de los forjados

- Frecuencia Natural
- Masa Modal
- Amortiguación

(Capítulo 3; Anexo A)



Leer el Valor OS-RMS₉₀

(Capítulo 5)



Determinar la Clase de Aceptación

(Capítulo 4)



2. DEFINICIONES

2. Definiciones

Las definiciones presentadas aquí son consistentes con la aplicación de la Guía de diseño.

Amortiguación D

La amortiguación representa la energía disipada por un sistema vibratorio. El amortiguamiento total consiste en

- Amortiguación material y estructural,
- Amortiguación inducida por los muebles y los acabados (p.ej. falso techo),
- Distribución de energía a través de toda la estructura.

Masa modal $M_{mod} =$ masa generalizada

Cada modo de un sistema con varios grados de libertad puede ser representado por un sistema con un único grado de libertad:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{mod}}{M_{mod}}}$$

where f la frecuencia natural del modo considerado,
 K_{mod} la rigidez modal,
 M_{mod} la masa modal.

De esta manera, la masa modal puede interpretarse como la masa activada en un modo específico. En el Capítulo 3 se describe la manera de determinar la masa modal.

Frecuencia Natural $f =$ Frecuencia Propia

Cada estructura tiene un comportamiento dinámico específico en relación con la forma y duración $T[s]$ de cada oscilación. La frecuencia f es la inversa del tiempo de oscilación $T(f = 1/T)$.

La frecuencia natural es la frecuencia de oscilación libre sin estar excitado continuamente por un agente excitador.

Cada estructura tiene tantas frecuencias naturales y modos asociados de vibración como grados de libertad. Estos modos se clasifican por la cantidad de energía que se active en la oscilación. Por lo tanto, la primera frecuencia natural es la que requiere un nivel inferior de energía y por lo tanto es la que se activa con mayor probabilidad.

La ecuación de la frecuencia natural de un sistema con un único grado de libertad es:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Siendo K la rigidez,
 M la masa.

La determinación de las frecuencias se describe en el Capítulo 3.

OS-RMS₉₀ =

RMS – RMS valor de la velocidad de un paso representativo que incluya la intensidad del 90 % de los pasos de personas andando normalmente

OS: Un paso

v_{RMS} : Valor cuadrático medio = valor efectivo de la velocidad v :

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \frac{v_{Peak}}{\sqrt{2}}$$

Siendo T el periodo de tiempo investigado.



3. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FORJADO

3. Determinación de las características del forjado

La determinación de las características del forjado puede realizarse por simples procedimientos de cálculo, por Análisis por Elementos Finitos (AEF) o por ensayos. Puesto que la Guía de diseño está pensada para ser usada para el diseño de nuevos edificios, los procedimientos de ensayo se excluyen y se proporcionan referencias en [1]

Diversos programas de elementos finitos pueden realizar cálculos dinámicos y ofrecen herramientas para la determinación de las frecuencias naturales. La masa modal es, en muchos programas, también el resultado del análisis de la frecuencia. También es específico de cada programa qué elementos pueden utilizarse, cómo se considera la amortiguación y cómo y qué resultados proporciona cada programa, por lo que en esta Guía de diseño se proporciona únicamente una información general en relación con el AEF.

Si se utiliza el AEF para el diseño de un forjado en relación con su comportamiento vibratorio hay que tener en cuenta que la respuesta del modelo AEF puede diferir significativamente de la utilizada en el diseño a estado límite último (ELU), puesto que en análisis vibratorio solo se esperan pequeñas deformaciones. Un ejemplo típico es la diferente consideración de las condiciones límites en el análisis vibratorio. En comparación con un análisis en ELU, una conexión que se supone articulada en ELU puede suponerse empotrada en un análisis de vibraciones.

Para el hormigón, el módulo dinámico de elasticidad debe considerarse un 10 % superior al módulo estático E_{cm} .

Si se utiliza el procedimiento manual de cálculo, el Anexo A proporciona fórmulas para la determinación de la frecuencia y de la masa modal para el caso de losas isotrópicas, losas ortotrópicas y vigas.

La amortiguación tiene una gran influencia en el comportamiento vibratorio de un forjado. Independientemente del método escogido para determinar la frecuencia natural y la masa modal, el valor del amortiguamiento de un sistema vibratorio puede determinarse con los datos proporcionados en la Tabla 1. Estos valores tienen en cuenta la influencia de la amortiguación estructural de distintos tipos de materiales, la amortiguación debida al mobiliario y a las terminaciones. La amortiguación D del sistema se obtiene sumando los valores apropiados de D_1 hasta D_3 .

En la determinación de las características dinámicas del forjado, una fracción realista de la carga de uso debe considerarse como parte de la masa del forjado. Los valores habituales considerados suelen ser de entre un 10 % y un 20 % de la carga de uso.

Tabla 1 Determinación de la amortiguación

Tipo	Amortiguación (% de la amortiguación crítica)
Amortiguación estructural D_1	
Madera	6%
Hormigón	2%
Acero	1%
Mixta (Hormigón – Acero)	1%
Amortiguación debida al mobiliario D_2	
Oficina tradicional para 1 a 3 personas con tabiques de separación	2%
Oficina sin papeles	0%
Oficina en planta diáfana	1%
Biblioteca	1%
Casas	1%
Escuelas	0%
Gimnasios	0%
Amortiguación debida a terminaciones D_3	
Cielos rasos bajo el forjado	1%
Parquet flotante	0%
Capa de compresión	1%
Amortiguación total $D = D_1 + D_2 + D_3$	



4. CLASIFICACIÓN DE LAS VIBRACIONES

4. Clasificación de las Vibraciones

La percepción de las vibraciones por las personas y la sensación individual de malestar depende de diversos factores. Las más importantes son:

- La dirección de la vibración. Sin embargo, en esta Guía de diseño solo se consideran vibraciones verticales;
- Otro factor es la postura de las personas, tales como de pie, tumbada o sentada.
- La actividad que está desarrollando la persona también es relevante para su percepción de las vibraciones. Personas que trabajan en producción en una empresa perciben las vibraciones de forma diferente que las que trabajan en una oficina o en un quirófano.
- También la edad y el estado de salud de las personas sometidas a las vibraciones pueden tener importancia en la percepción de las vibraciones.

En función de lo anterior se observa que la percepción de las vibraciones es un fenómeno muy individual que solamente puede describirse en una manera que satisfaga los requisitos de confort de la mayoría.

Hay que recordar que las vibraciones consideradas en esta Guía de diseño son únicamente relevantes para el confort de los ocupantes. No lo son para la seguridad estructural.

En la búsqueda de un procedimiento universal de evaluación de vibraciones inducidas por la acción de personas, se recomienda adoptar el llamado valor RMS de un paso (OS-RMS) como medida para evaluar las vibraciones perturbadoras en forjados. Los valores OS-RMS corresponden a la vibración armónica causada por un paso sobre el forjado.

Debido a que el efecto dinámico de las personas paseando sobre un forjado depende de varias condiciones de borde, tales como peso y velocidad de marcha, los zapatos utilizados, etc., se recomienda el valor 90% OS-RMS ($OS-RMS_{90}$) como valor de evaluación. El índice 90 indica que el 90 % de los pasos posibles sobre un forjado están cubiertos por ese valor.

La tabla siguiente clasifica las vibraciones en diferentes clases y proporciona también recomendaciones para la asignación de clases con respecto a la función del forjado considerado.

Tabla 2 Clasificación de la respuesta del forjado y recomendaciones para la aplicación de clases

Clase	OS-RMS ₉₀		Función del forjado									
	Límite Inferior	Límite Superior	Zona de Trabajo Crítica	Salud	Educación	Residencial	Oficina	Reunión	Comercio	Hotel	Industrial	Deporte
A	0.0	0.1	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
B	0.1	0.2	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
C	0.2	0.8	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
D	0.8	3.2	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
E	3.2	12.8	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada
F	12.8	51.2	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada	Recomendada





5. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO Y DIAGRAMAS

5. Procedimiento de diseño y Diagramas

En la Figura 2 se presenta una visión general del procedimiento de diseño. El diseño se lleva a cabo en 3 pasos y la determinación de las características dinámicas del forjado es la más compleja. El Anexo A proporciona ayuda detallada por medio de métodos simplificados. Las explicaciones generales se presentan en el Capítulo 3.

Una vez determinadas las masas modales y la frecuencia, el valor $OS-RMS_{90}$, así como el tipo de clase de percepción pueden determinarse a través de los diagramas que se presentan a continuación.

El diagrama relevante tiene que seleccionarse de acuerdo con las características del forjado en la situación de uso (considerando acabados y mobiliario). Ver, para ello, el Capítulo 3

Los diagramas han sido elaborados por el TNO Bouw, Países Bajos, en el marco de [1].

Figura 2 Procedimiento de diseño

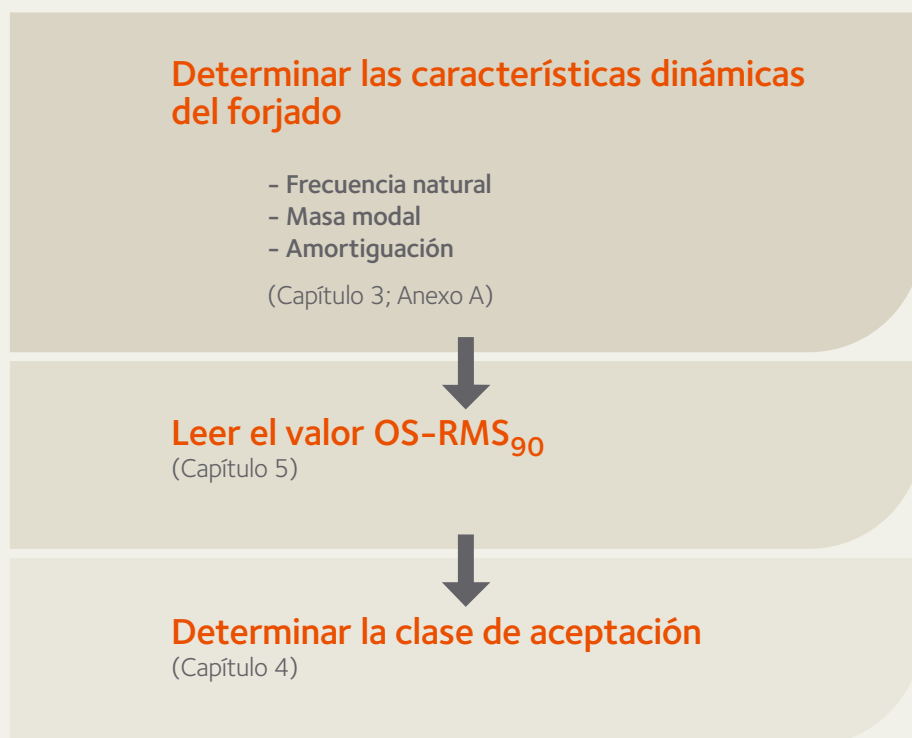
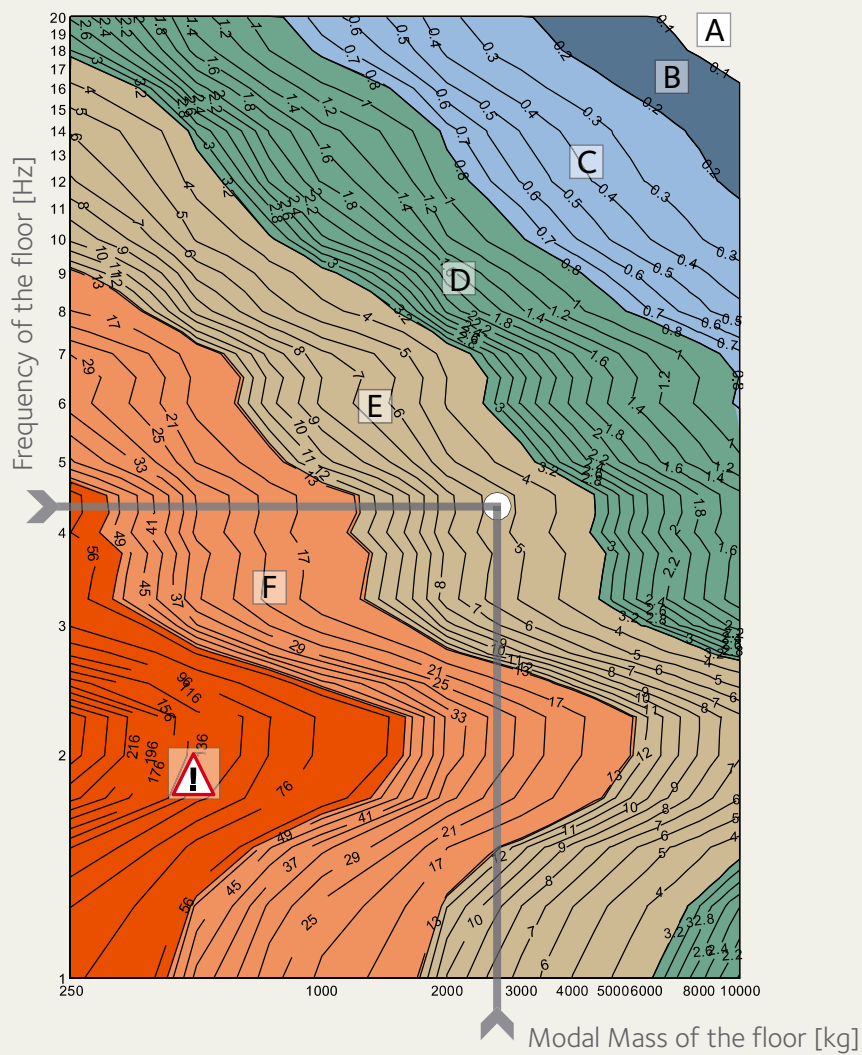


Figura 3 Aplicación de los diagramas

El diagrama se utiliza introduciendo el valor de la masa modal en el eje X y la correspondiente frecuencia en el eje Y. El valor OS-RMS y la clase de aceptación se pueden leer en la intersección de las extensiones en ambos puntos de introducción.



:significa estar fuera del rango de evaluación aceptable

Figura 4 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 1%

Clasificación basada en una amortiguación del 1%

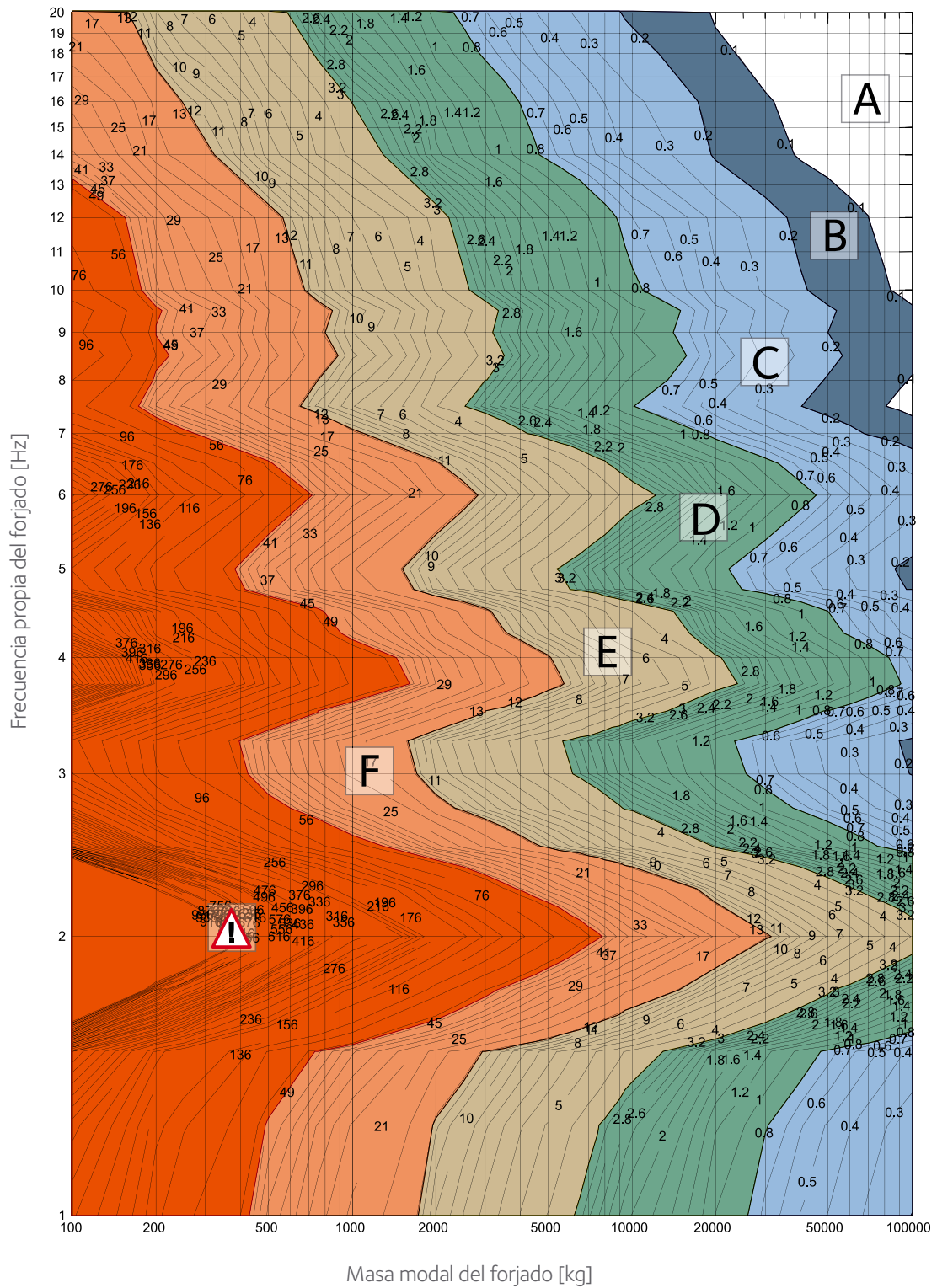


Figura 5 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 2%

Clasificación basada en una amortiguación del 2%

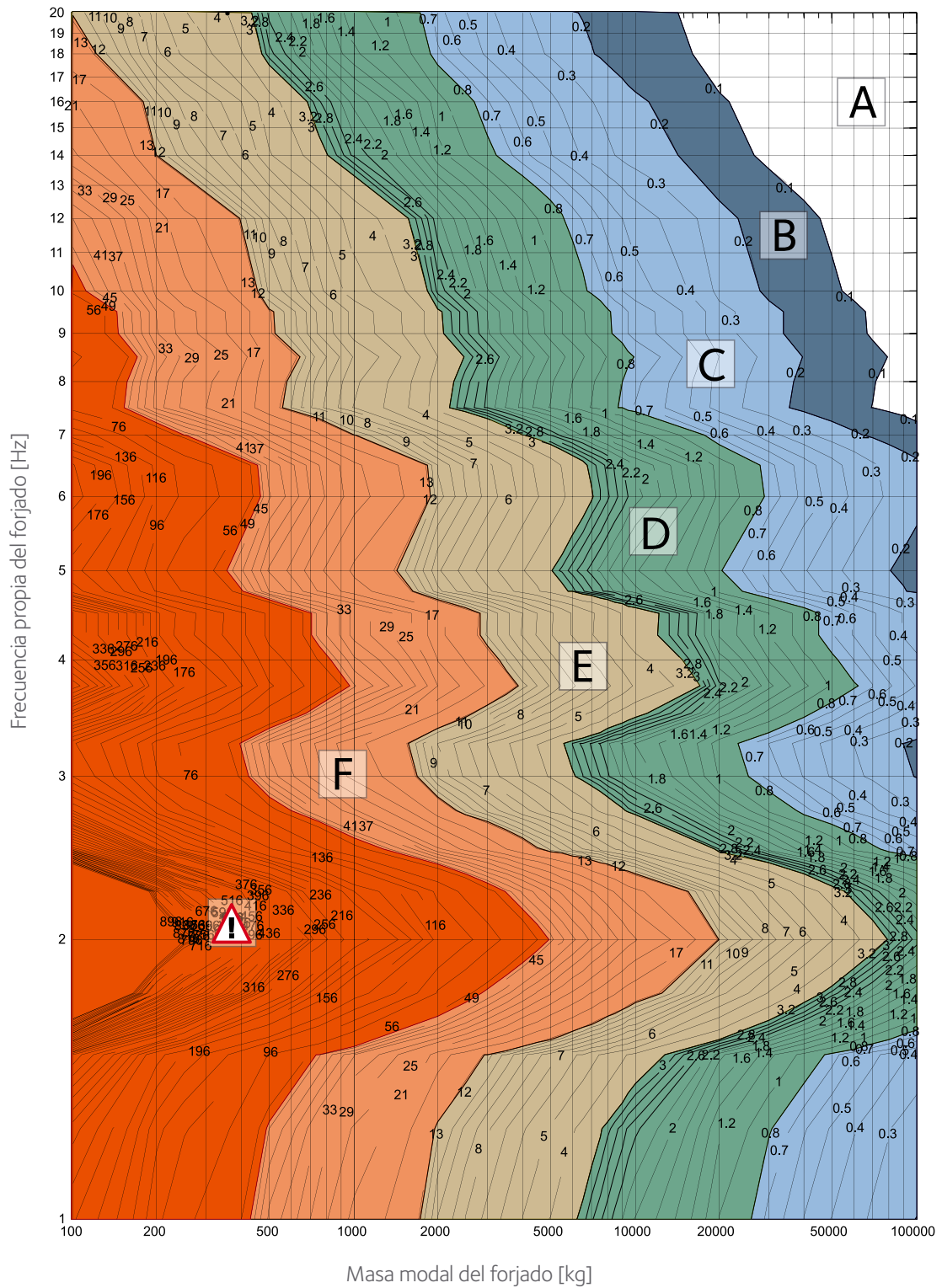


Figura 6 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 3%

Clasificación basada en una amortiguación del 3%

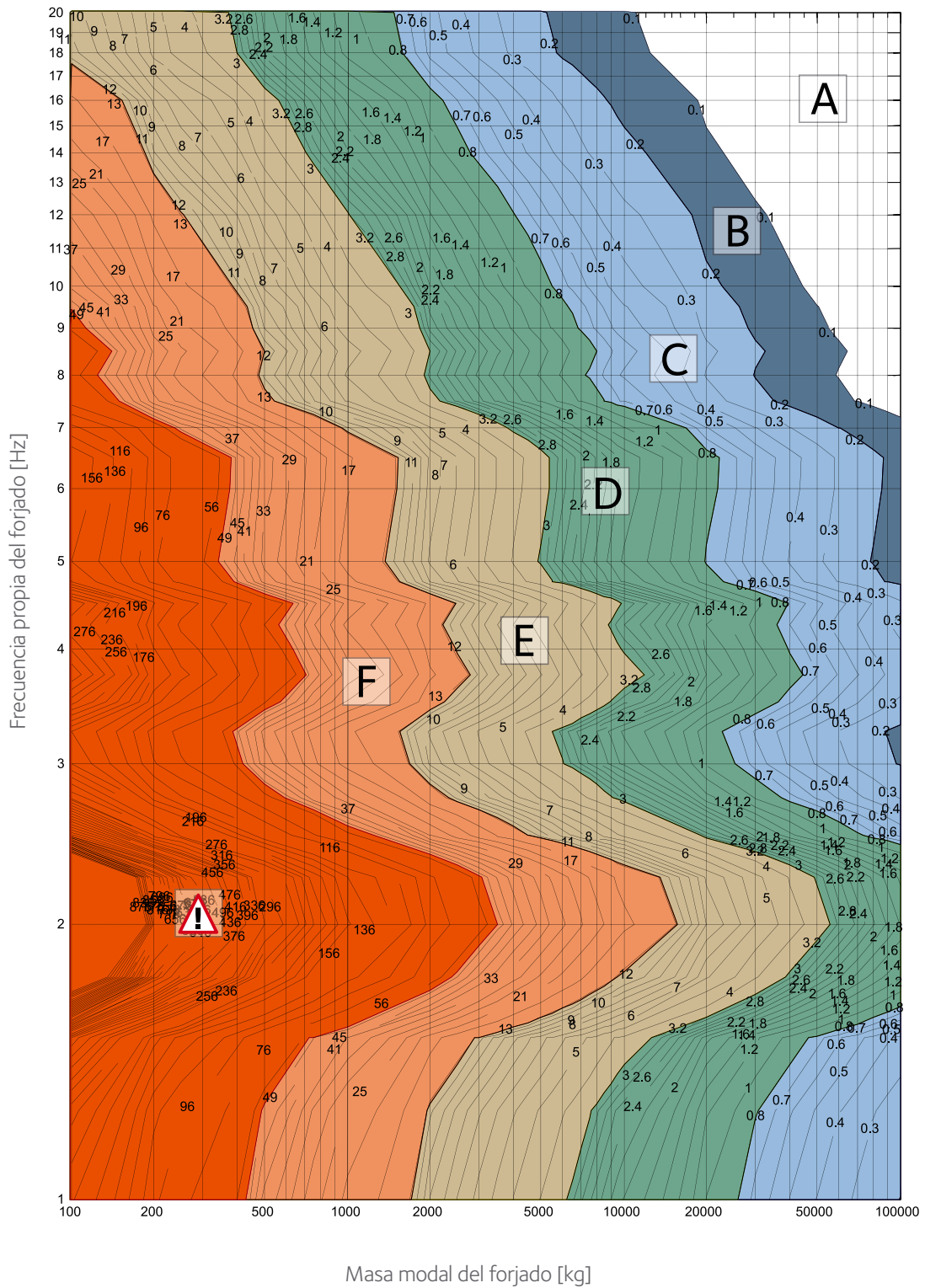


Figura 7 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 4%

Clasificación basada en una amortiguación del 4%

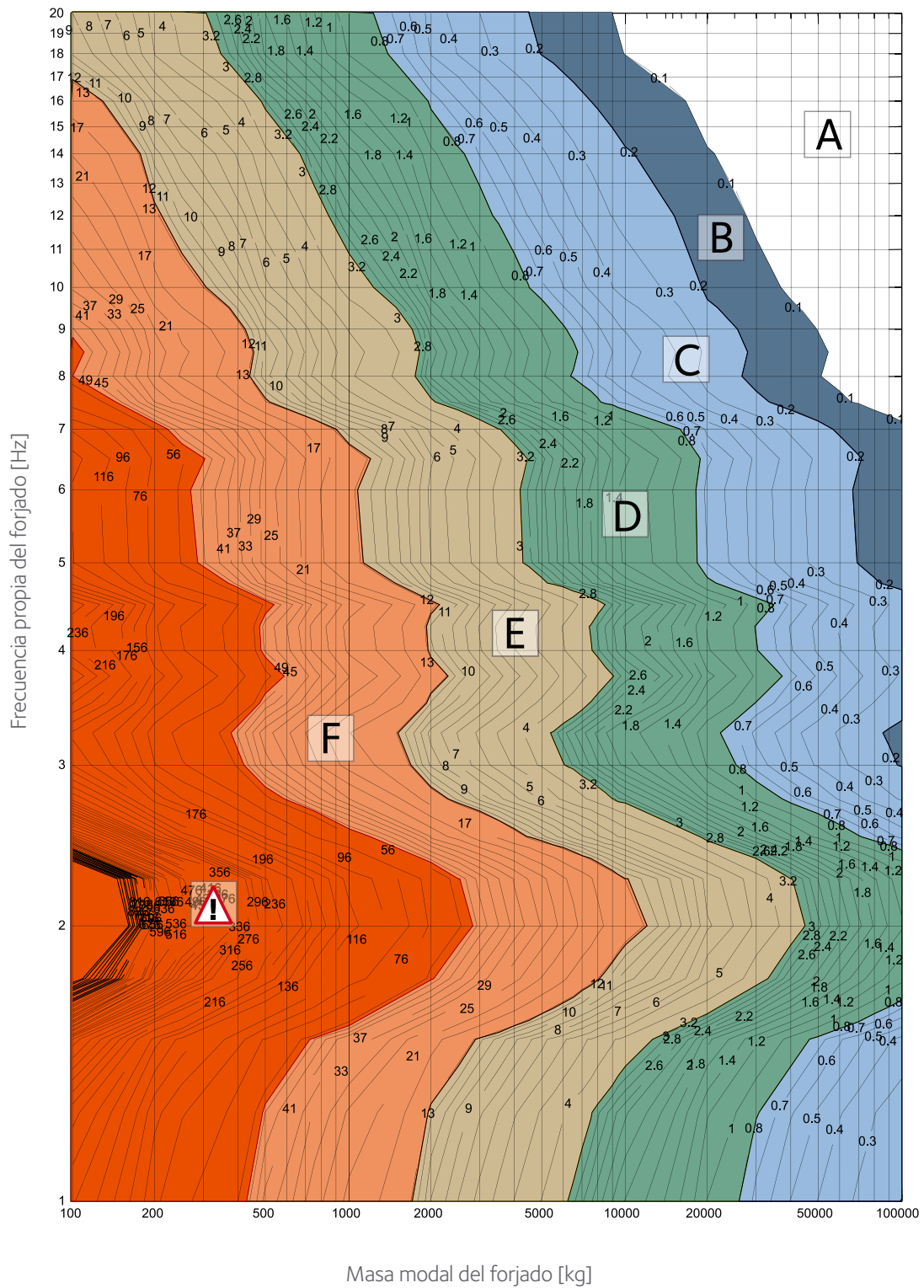


Figura 8 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 5%

Clasificación basada en una amortiguación del 5%

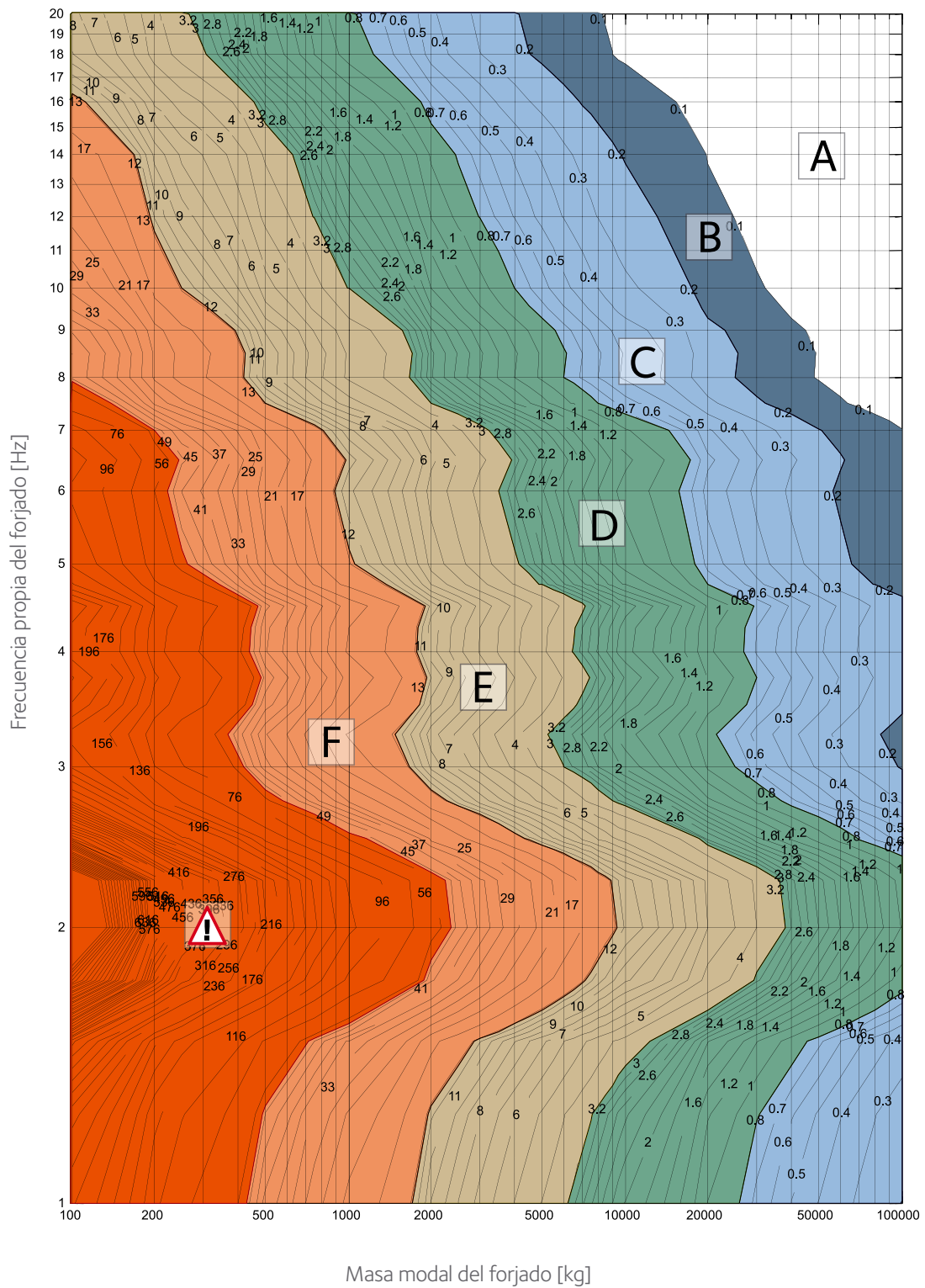


Figura 9 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 6%

Clasificación basada en una amortiguación del 6%

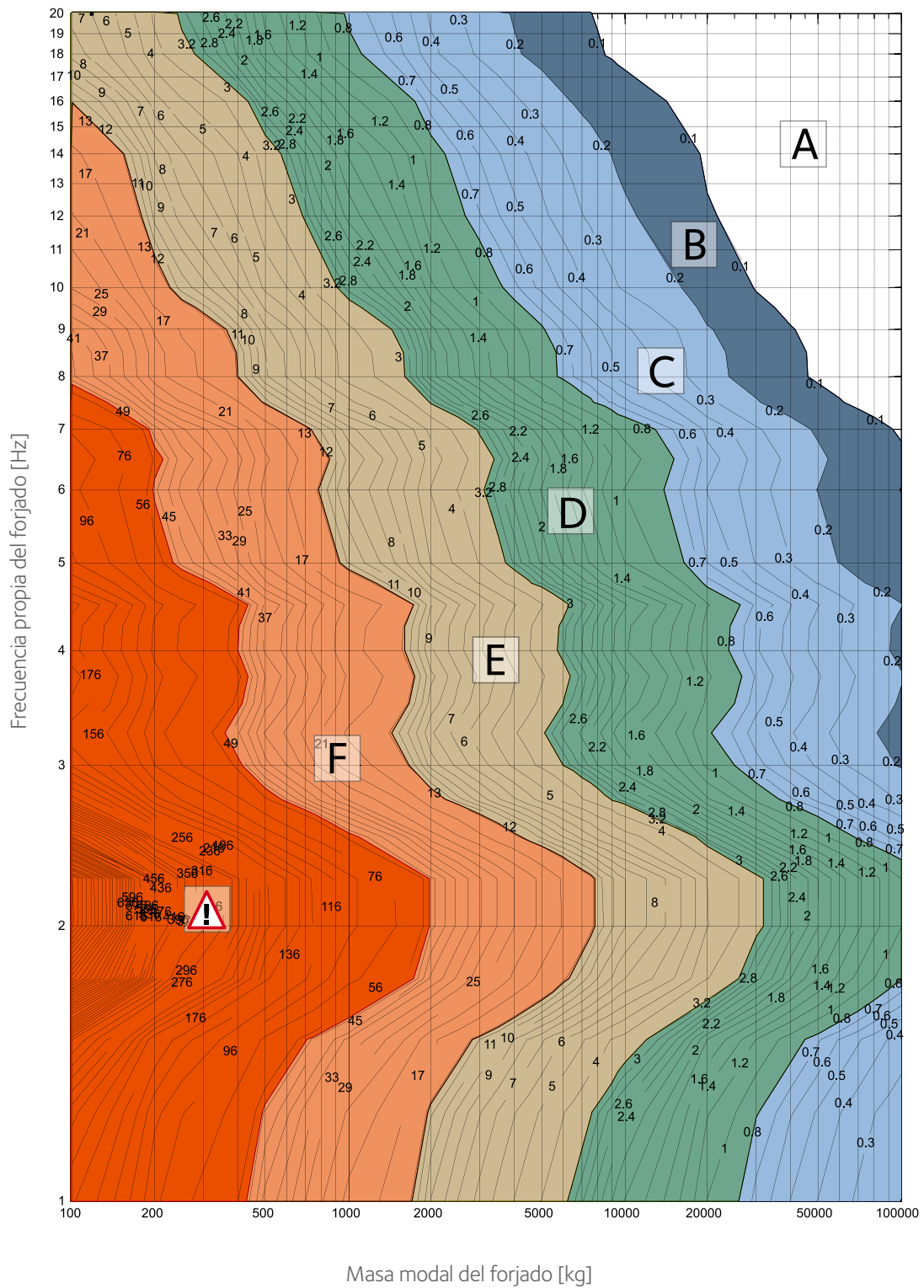


Figura 10 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 7%

Clasificación basada en una amortiguación del 7%

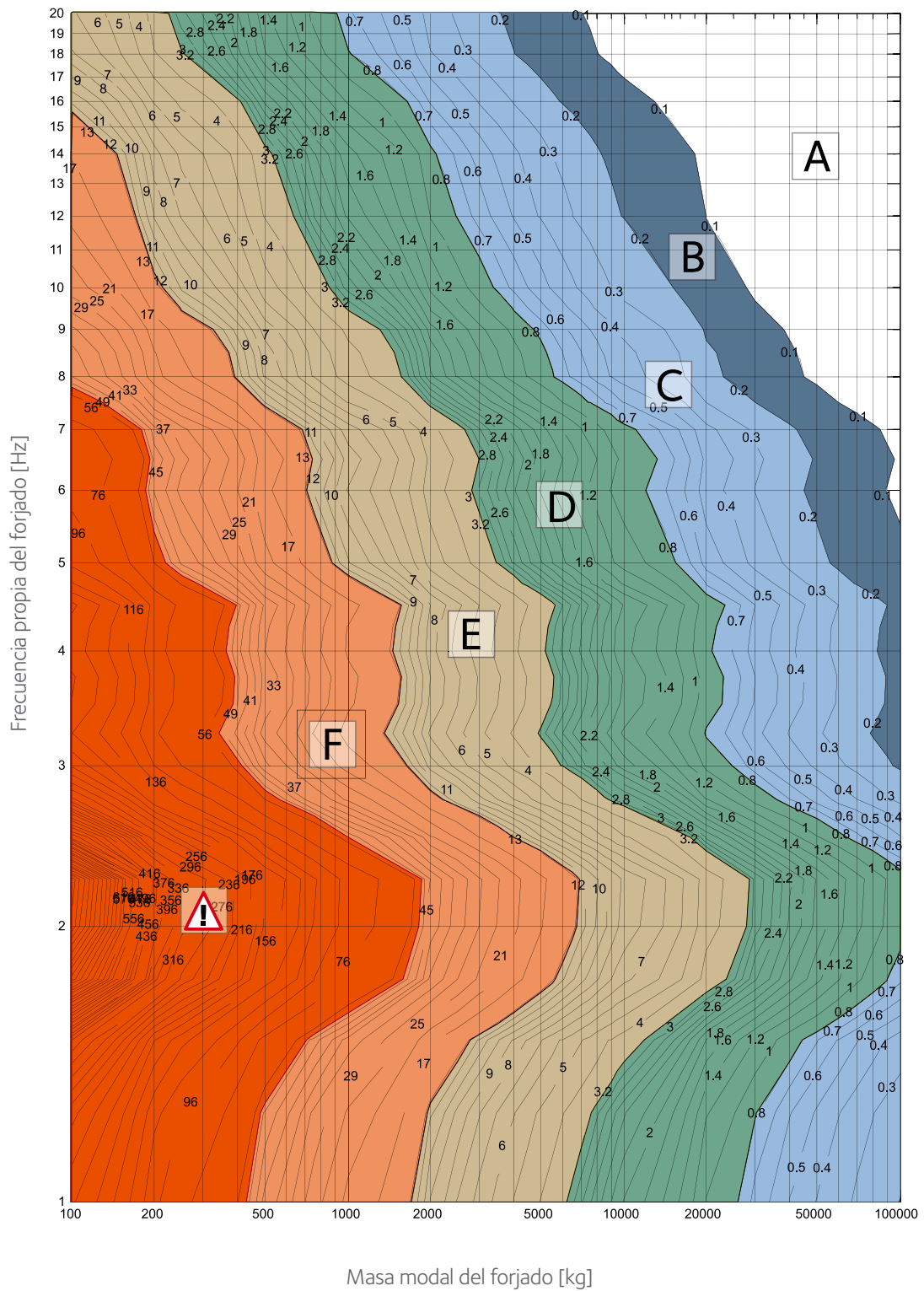


Figura 11 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 8%

Clasificación basada en una amortiguación del 8%

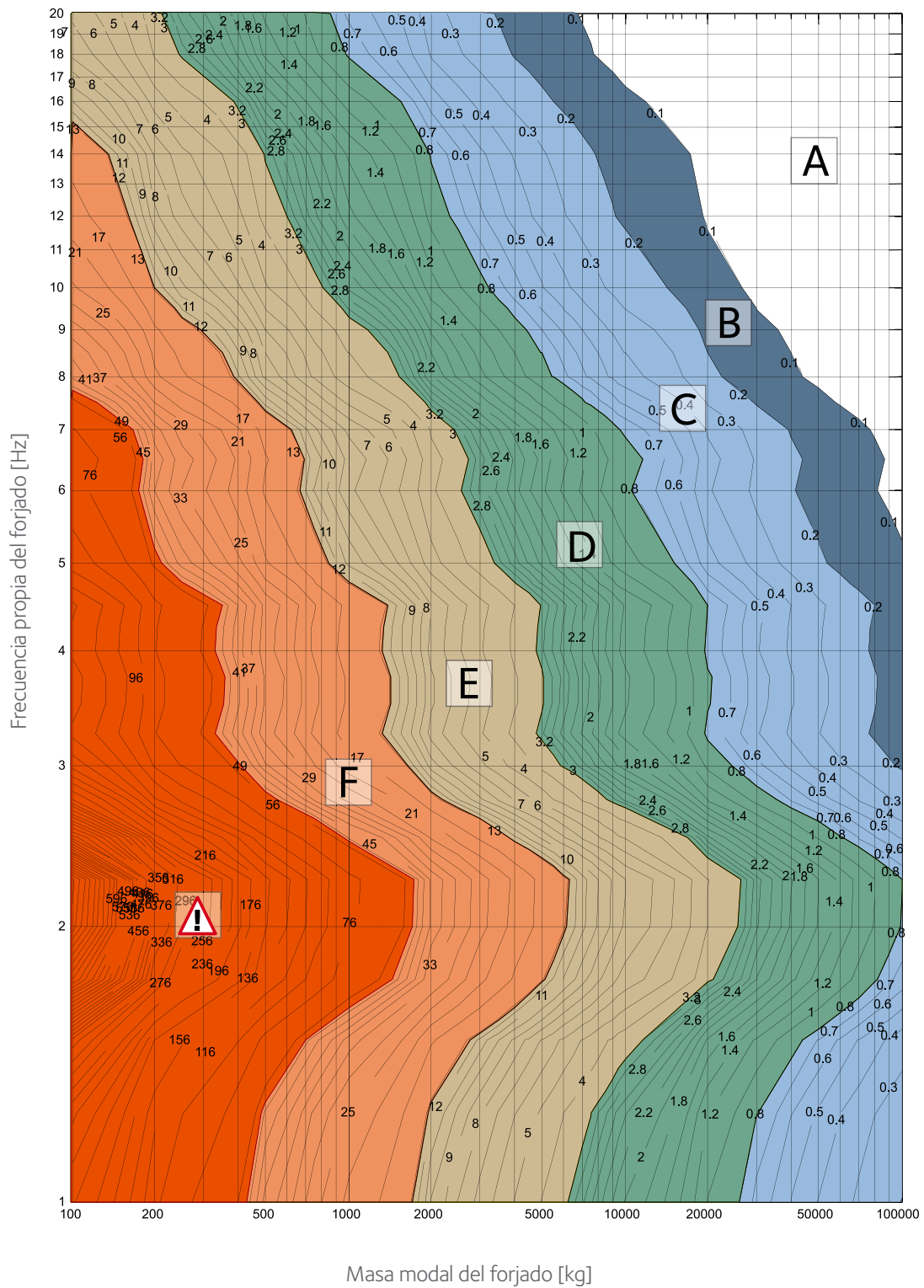
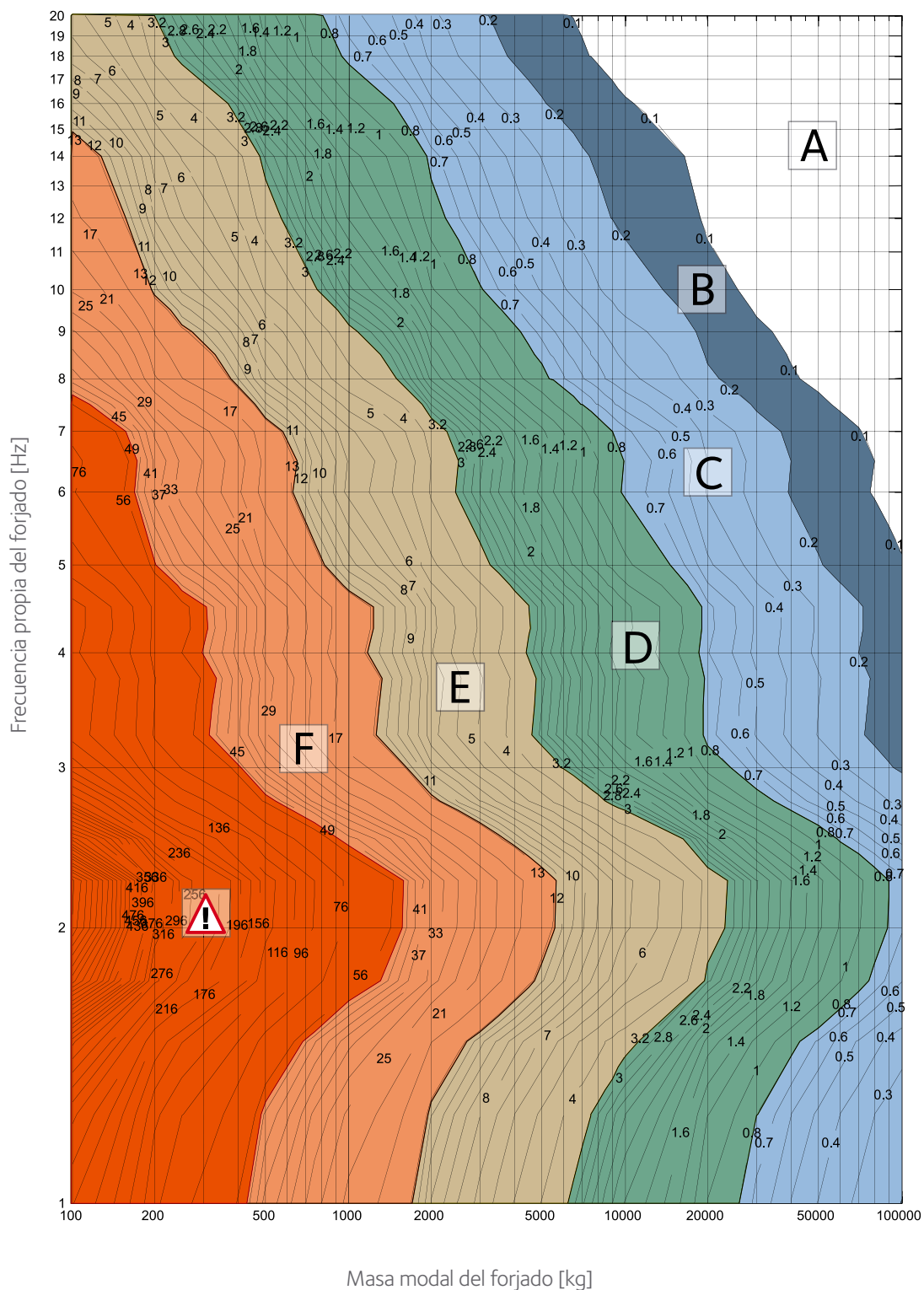


Figura 12 OS-RMS₉₀ con una amortiguación del 9%

Clasificación basada en una amortiguación del 9%



ANEXO A FÓRMULAS UTILIZADAS EN EL CÁLCULO MANUAL

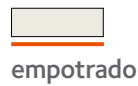
A.1	Frecuencia natural y Masa modal para losas isotrópicas	32
A.2	Frecuencia natural y Masa modal para vigas	34
A.3	Frecuencia natural y Masa modal para losas ortotrópicas	35
A.4	Enfoque de peso propio para el cálculo de la frecuencia natural	36
A.5	Enfoque de Dunkerley para el cálculo de la frecuencia natural	37
A.6	Aproximación de la Masa modal	38

A.1 Frecuencia natural y Masa modal para el caso de losas ortotrópicas

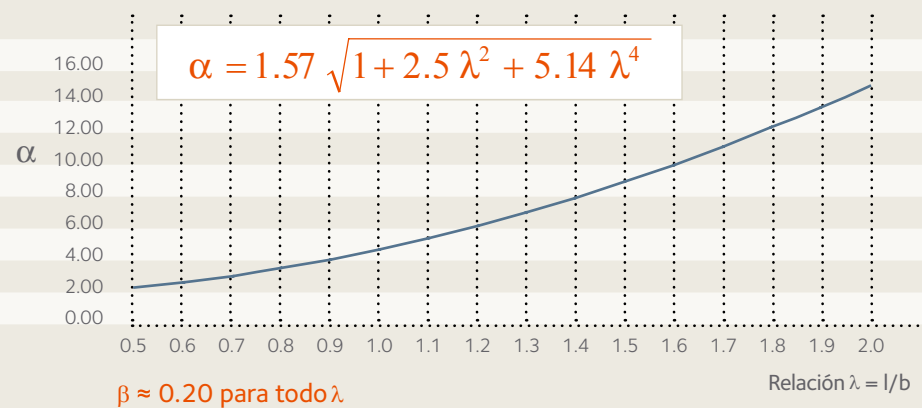
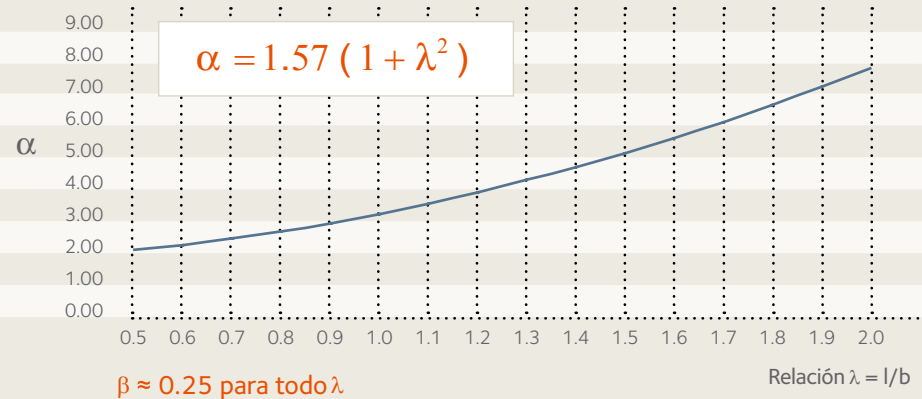
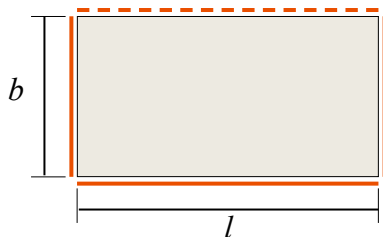
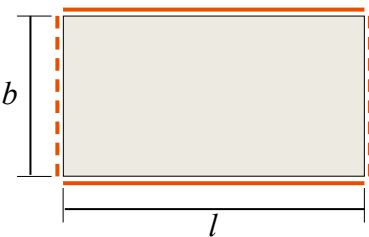
La tabla siguiente proporciona fórmulas para la determinación de la primera frecuencia natural (de acuerdo con [2]) y la masa modal para diferentes condiciones de apoyo. Para la aplicación de esas ecuaciones se supone que no hay deformaciones laterales en ningún borde de la losa.

Condiciones de apoyo:

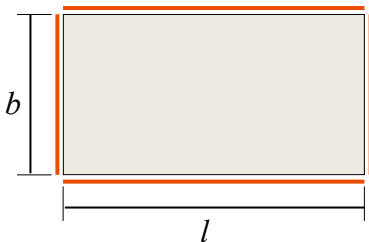
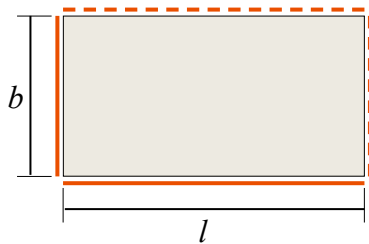
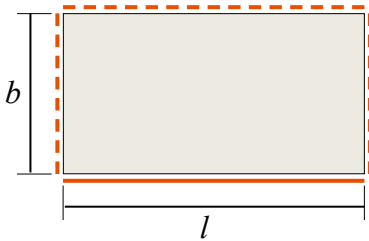
Frecuencia; Masa modal



$$f = \frac{\alpha}{l^2} \sqrt{\frac{E t^3}{12m(1-\nu^2)}} \quad ; \quad M_{\text{mod}} = \beta M$$



- E** Módulo de Young [N/m²]
- t** Espesor de la losa [m]
- m** Masa del forjado incluyendo terminación y un porcentaje adecuado de la carga de uso (ver Capítulo 3) [kg/m²]
- v** Módulo de Poisson
- M** Masa total del forjado, incluyendo terminación y un porcentaje adecuado de la carga de uso (ver Capítulo 3) [kg]

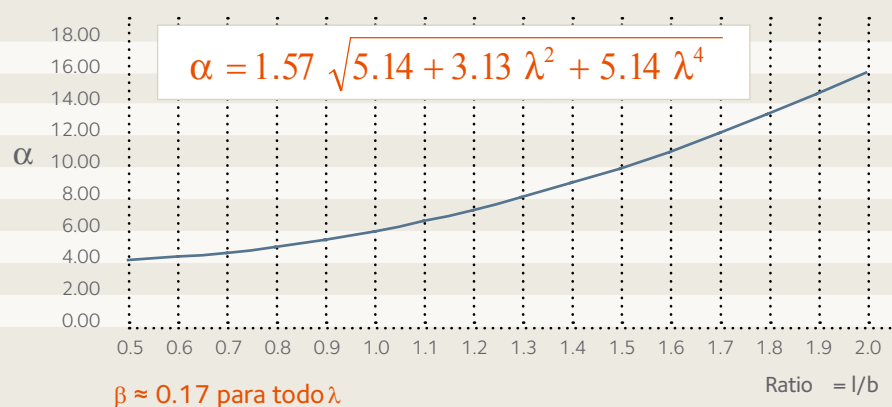
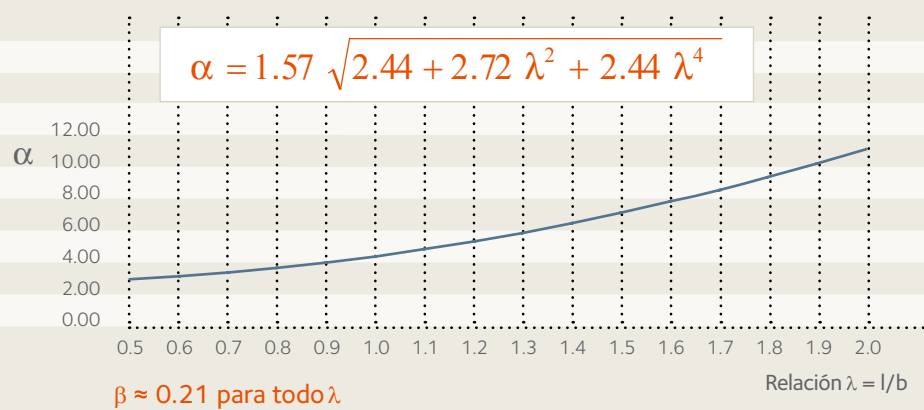
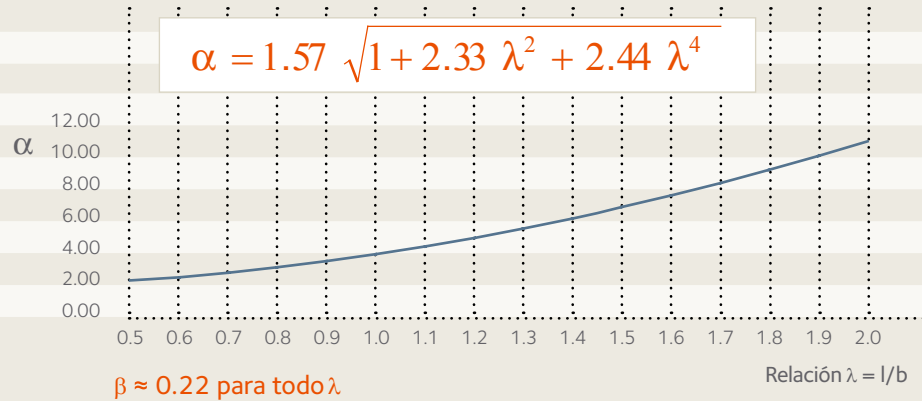


Condiciones de apoyo:



Frecuencia; Masa modal

$$f = \frac{\alpha}{l^2} \sqrt{\frac{E t^3}{12m(1-\nu^2)}} ; M_{\text{mod}} = \beta M$$

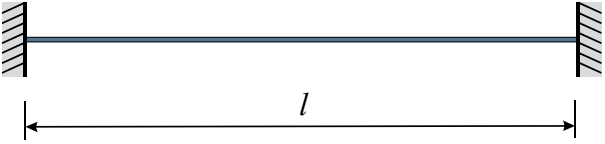
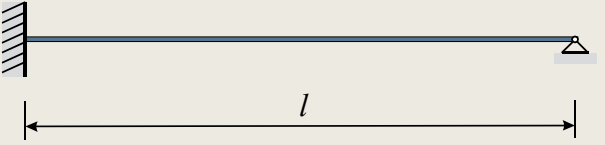
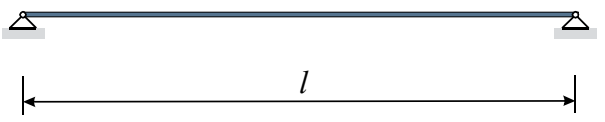
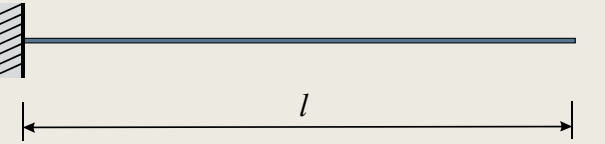


A.2 Frecuencia natural y Masa modal para el caso de vigas

La primera frecuencia propia de una viga puede determinarse con la fórmula de acuerdo con las condiciones de apoyo de la Tabla 3, siendo:

- E Módulo de Young [N/m²]
- I Momento de inercia [m⁴]
- μ Masa distribuida del forjado (ver página 33) multiplicada por la anchura de forjado [kg/m]
- l Longitud de la viga [m]

Tabla 3 Determinación de la primera frecuencia propia de vigas

Condiciones de apoyo	Frecuencia natural	Masa modal
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.37 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.2 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.49 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.24 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.64 \mu l$

A.3 Frecuencia natural y Masa modal para el caso de losas ortotrópicas

Los forjados ortotrópicos como, p.ej. los forjados mixtos compuestos por vigas en dirección longitudinal y una losa de hormigón en dirección transversal tienen diferentes rigideces en ambas direcciones ($EI_y > EI_x$). En la Figura 13 se presenta un ejemplo.

La primera frecuencia natural de la losa ortotrópica simplemente apoyada en los cuatro bordes puede calcularse con:

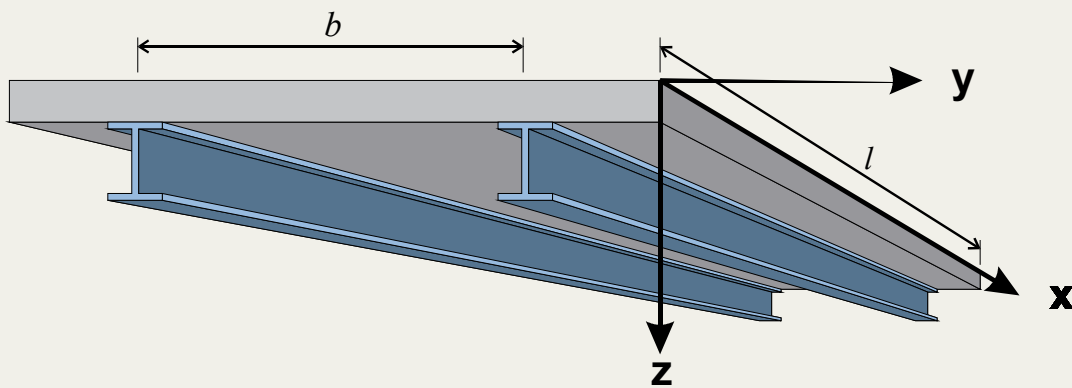
$$f_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_y}{m l^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{b}{l} \right)^2 + \left(\frac{b}{l} \right)^4 \right] \frac{EI_x}{EI_y}}$$

Siendo:

- m la masa de forjado incluyendo terminación y un porcentaje adecuado de la carga de uso (ver Capítulo 3) [kg/m^2],
- l la longitud del forjado (en dirección x) [m],
- b la anchura del forjado (en dirección y) [m],
- E el módulo de Young [N/m^2],
- I_x momento de inercia en relación con la flexión alrededor del eje x [m^4],
- I_y momento de inercia en relación con la flexión alrededor del eje [m^4].

Las fórmulas para el cálculo aproximado de las masas modales en el caso de losas ortotrópicas se presentan en el Anexo A.6.

Figura 13 Dimensiones y ejes de una losa ortotrópica



A.4 Enfoque del peso propio para el cálculo de la frecuencia natural

El enfoque del peso propio es una aproximación muy práctica en los casos en los que la deformación máxima δ_{\max} debida a la masa m ha sido ya calculada, p.ej. por elementos finitos.

Este método tiene su origen en la ecuación general de la frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

La rigidez K puede aproximarse por medio de la suposición:

$$K = \frac{Mg}{\frac{3}{4}\delta}$$

siendo:

M la masa total del sistema vibratorio [kg],

$g = 9.81$ la aceleración debida a gravedad [m/s^2] y

$\frac{3}{4}\delta$ la deformación media [mm].

La frecuencia natural aproximada es

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4g}{3\delta_{\max}}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_{\max} [mm]}}$$

siendo:

δ_{\max} la máxima deformación debida a la carga en relación con la masa m .

A.5 Enfoque de Dunkerley para el cálculo de la frecuencia natural

El enfoque de Dunkerley es una aproximación para la resolución por medio de cálculos manuales. Se aplica cuando la forma esperada del modo es compleja pero puede subdividirse en diferentes modos individuales para los cuales puede determinarse las frecuencias naturales. Ver A.1, A.3 y A.2

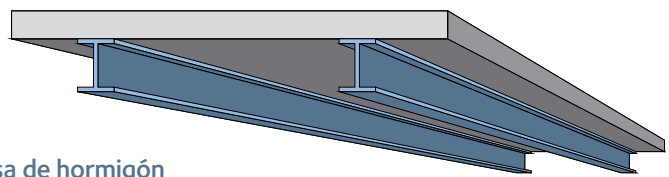
La Figura 14 muestra un ejemplo de un forjado mixto con dos vigas simplemente apoyadas y sin apoyo en los bordes de la losa de hormigón. La forma modal esperada se divide en dos modos individualmente independientes; uno para la losa de hormigón y otro para la viga mixta. Ambas formas modales tienen su propia frecuencia natural (f_1 para la losa de hormigón y f_2 para la viga mixta).

De acuerdo con Dunkerley, la frecuencia natural f del sistema total es:

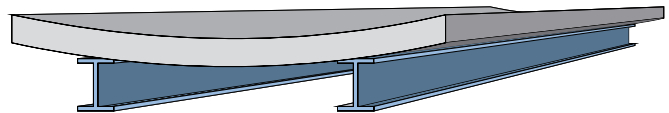
$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2} + \dots$$

Figura 14 Ejemplo de la descomposición de la forma modal

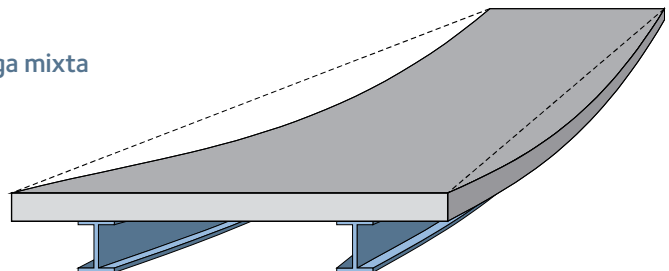
Sistema inicial



Modo de la losa de hormigón



Modo de la viga mixta



A.6 Aproximación de la Masa modal

La masa modal puede interpretarse como la fracción de la masa total del forjado que se activa cuando el forjado oscila con una forma modal específica. Cada forma modal tiene su frecuencia natural específica y su masa modal.

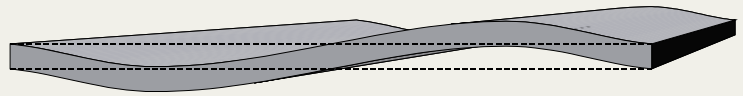
Para poder calcular la masa modal la forma del modo ha de determinarse y de normalizarse a la máxima deformación.

Ya que la forma modal no puede determinarse por cálculos manuales, habitualmente suelen utilizarse aproximaciones para el primer modo.

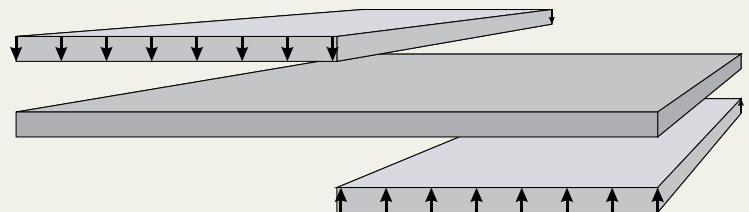
Como alternativa a los cálculos manuales, suele utilizarse el Análisis por Elementos Finitos. Si el software de Elementos Finitos no proporciona la masa modal como resultado del análisis modal, la forma modal puede aproximarse por la aplicación de cargas que conducen hasta la forma modal esperada. Ver Figura 15.

Figura 15 Aplicación de cargas hasta obtener la forma modal aproximada (ejemplo)

Forma modal esperada:



Aplicación de cargas:



Si la forma modal de un forjado puede aproximarse por medio de una función normalizada $\delta(x,y)$ (i.e. $|\delta(x,y)|_{\max} = 1.0$), la correspondiente masa modal del forjado puede calcularse por medio de la ecuación siguiente:

$$M_{\text{mod}} = \mu \int_F \delta^2(x,y) dF$$

Siendo:

μ la distribución de masa
 $\delta(x,y)$ la deformación vertical en el punto x,y

Si la forma modal se determina por AEF:

$$M_{\text{mod}} = \sum_{\text{Nodos } i} \delta_i^2 dM_i$$

Siendo:

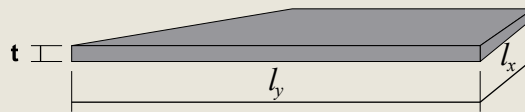
δ_i la deformación vertical en el nodo i (normalizado a la deformación máxima)
 dM_i la masa del forjado representada en el nodo i

Si la función $\delta(x,y)$ representa la solución exacta de la forma modal, la ecuación descrita arriba también proporciona la masa modal exacta.

A continuación se muestran unos ejemplos para la determinación de la masa modal por medio de cálculos manuales:

Ejemplo 1

Losa simplemente apoyada a lo largo de cuatro bordes, $l_y \sim l_x$



- Aproximación de la forma del primer modo

$$\delta(x, y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

- Distribución de masa

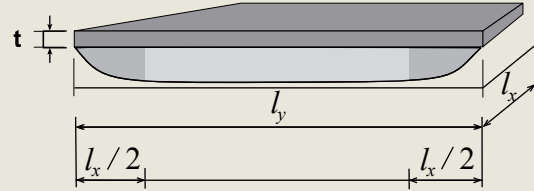
$$\mu = \frac{M}{l_x l_y}$$

- Masa modal

$$\begin{aligned} M_{\text{mod}} &= \mu \int_F \delta^2(x, y) dF = \frac{M}{l_x l_y} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) dx dy \\ &= \frac{M}{4} \end{aligned}$$

Ejemplo 2

Losa simplemente apoyada a lo largo de los cuatro bordes, $l_x < l_y$



- Aproximación de la forma del primer modo

$$1. \quad 0 \leq y \leq \frac{l_x}{2} \quad \text{and} \quad l_y - \frac{l_x}{2} \leq y \leq l_y : \delta(x, y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

$$2. \quad \frac{l_x}{2} \leq y \leq l_y - \frac{l_x}{2} : \delta(x, y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) 1.0$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

- Distribución de masa

$$\mu = \frac{M}{l_x l_y}$$

- Masa modal

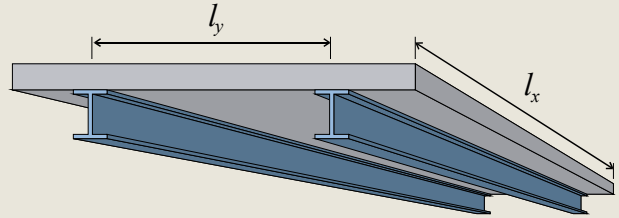
$$M_{\text{mod}} = \mu \int_F \delta^2(x, y) dF$$

$$= \frac{M}{l_x l_y} \left[2 \int_0^{l_x} \int_0^{y=\frac{l_x}{2}} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) dx dy + \int_0^{l_x} \int_0^{y=l_y-\frac{l_x}{2}} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) dx dy \right]$$

$$= \frac{M}{4} \left(2 - \frac{l_x}{l_y} \right)$$

Ejemplo 3

Losa apoyada uniaxialmente entre vigas.
Losa y vigas simplemente apoyadas



- Aproximación de la forma del primer modo:

$$\delta(x, y) = \frac{\delta_x}{\delta} \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

Siendo

δ_x = Deformación de la viga

δ_y = Deformación de la losa
suponiéndose que la deformación
de los apoyos (es, decir, la de la viga)
es cero

$$\delta = \delta_x + \delta_y$$

- Distribución de masa

$$\mu = \frac{M}{l_x l_y}$$

- Masa modal

$$\begin{aligned} M_{\text{mod}} &= \mu \int_F \delta^2(x, y) dF = \frac{M}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left[\frac{\delta_x}{\delta} \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) \right]^2 dx dy \\ &= M \left[\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2\delta^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\delta_x \delta_y}{\delta^2} \right] \end{aligned}$$



ANEXO B EJEMPLOS

B.1	Forjado de pre-losa con vigas mixtas ACB (edificio de oficinas)	44
B.1.1	Descripción del forjado	44
B.1.2	Determinación de las características dinámicas del forjado	47
B.1.3	Evaluación	47
B.2	Edificio de oficinas de tres alturas	48
B.2.1	Descripción del forjado	48
B.2.2	Determinación de las características dinámicas del forjado	50
B.2.3	Evaluación	51

B.1 Forjado de pre-losa con vigas mixtas ACB (edificio de oficinas)

B.1.1 Descripción del forjado

En este primer ejemplo, un forjado de pre-losa con falso techo en una oficina en planta abierta se verifica en relación con las vibraciones inducidas por el paso de personas.

La losa flexa uniaxialmente en una luz de 4.2 m entre vigas principales. Su espesor total es de 160 mm.

Las vigas principales son vigas alveolares de ArcelorMittal (ACB) funcionando como vigas mixtas. Estas vigas están unidas a los pilares por medio de uniones empotradas. La planta del forjado se muestra en la Figura 18. Para hacer un análisis de vibraciones es suficiente verificar únicamente una parte del forjado (un vano representativo del mismo). La parte representativa del forjado considerada en este ejemplo se muestra como zona rayada en la Figura 18.



Figura 16 Estructura del edificio



Figura 17 Unión viga con pilar

Figura 18 Planta del forjado

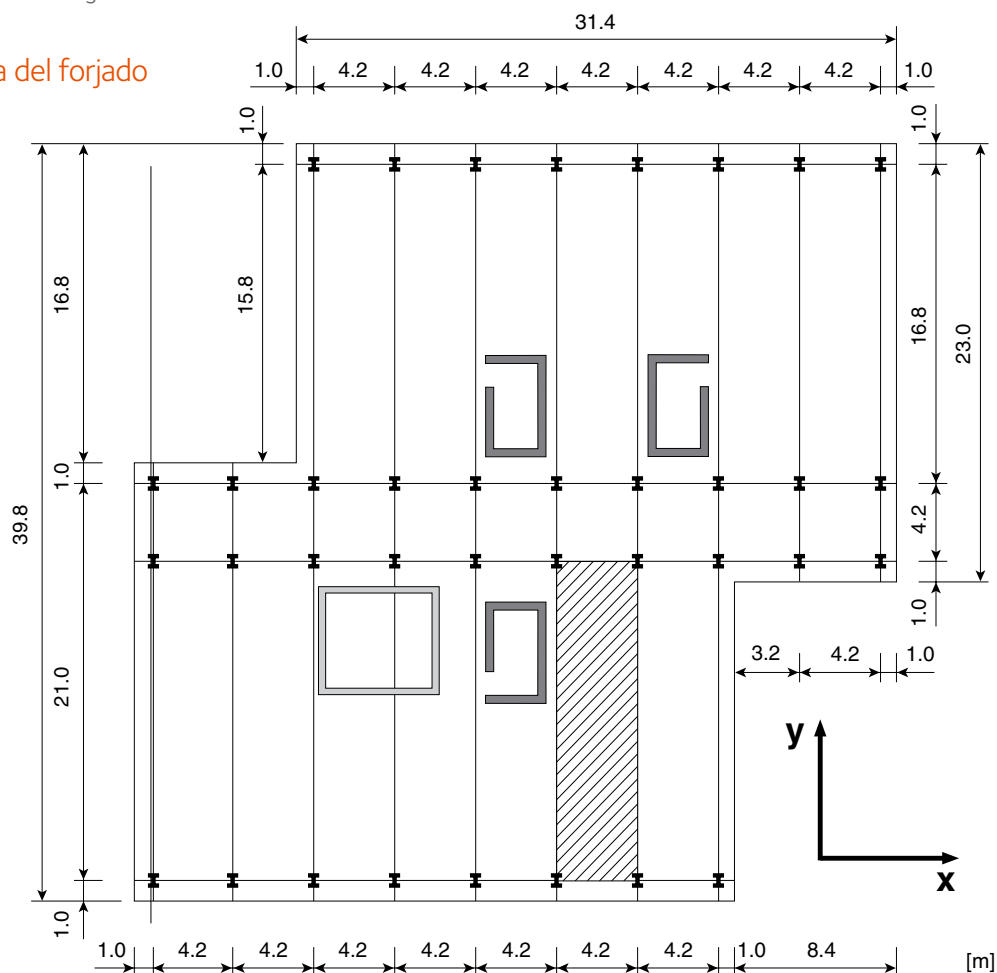
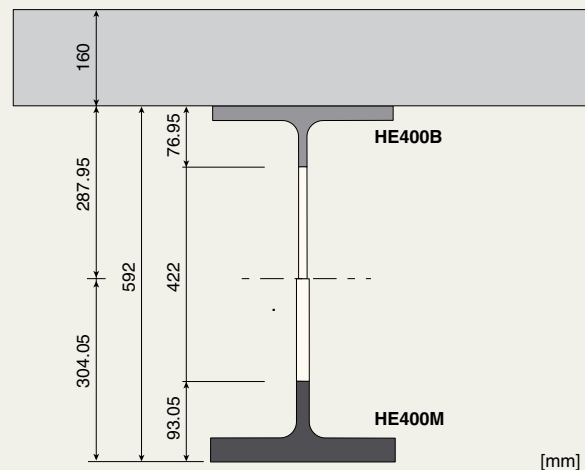


Figure 19 Sección transversal



Como vigas principales (luz de 16.8 m) se han utilizado perfiles ACB/HEM400/HEB400 de acero S460. Ver Figura 19. Las vigas principales, en dirección del vano corto de 4.2 m están realizadas en perfiles ACB/HEM360 en acero S460.

Las vigas transversales tendidas en dirección x pueden despreciarse a efectos de los cálculos posteriores, ya que no contribuyen a la transferencia de carga de la estructura.

Las propiedades nominales del material son

- Acero S460: $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$
- Hormigón C25/30: $E_{cm} = 31000 \text{ N/mm}^2$, $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

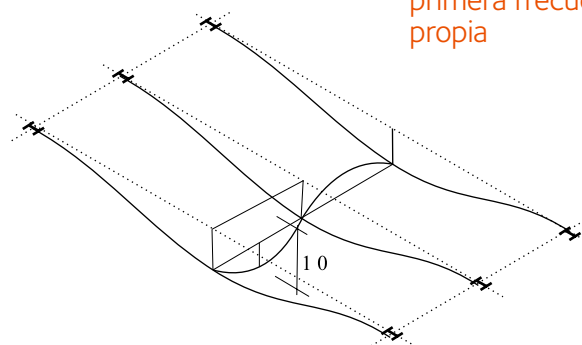
Tal como se establece en el Capítulo 3, el módulo elástico nominal del hormigón se incrementa al realizar cálculos dinámicos:

$$E_{c,dyn} = 1.1 E_{cm} = 34100 \text{ N/mm}^2$$

La forma esperada del modo de la parte de forjado considerada que corresponde a la primera frecuencia propia se muestra en la Figura 20. A partir de la forma del modo se deduce que cada vano de la losa de hormigón puede suponerse simplemente apoyada a la hora de realizarse los siguientes cálculos dinámicos.

En relación con las condiciones de borde de las vigas principales (ver la unión viga a pilar en la Figura 17) se supone que para pequeñas deformaciones, tal como suceden en un análisis de vibraciones, la unión viga – pilar proporciona una restricción suficiente al giro, es decir, que las vigas principales se pueden considerar totalmente empotradas.

Figure 20 Forma esperada del modo de la parte considerada del forjado correspondiente a la primera frecuencia propia



Propiedades de la sección

Losa

Las propiedades relevantes de la sección en la dirección x son:

$$A_{c,x} = 160 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$I_{c,x} = 3.41 \times 10^5 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Viga principal

Suponiendo el primer modo de vibración previamente descrito, la anchura efectiva de la viga mixta puede obtenerse a partir de la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} b_{eff} &= b_{eff,1} + b_{eff,2} = \frac{l_0}{8} + \frac{l_0}{8} \\ &= 2 \times \frac{0.7 \times 16.8}{8} = 2.94 \text{ m} \end{aligned}$$

Las propiedades relevantes de la sección de la viga principal para el análisis en el estado límite de servicio (no fisuración) son:

$$\begin{aligned} A_{a,net} &= 21936 \text{ mm}^2 \\ A_{a,total} &= 29214 \text{ mm}^2 \\ A_i &= 98320 \text{ mm}^2 \\ I_i &= 5.149 \times 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Cargas

Losa

- Peso propio (incluye 1.0 kN/m² de falso techo):

$$g_{slab} = 160 \times 10^{-3} \times 25 + 1.0 = 5 \text{ kN/m}^2$$

- Carga de uso: Habitualmente se recomienda una carga característica de uso de 3 kN/m² en edificios de oficinas. La fracción de la carga de uso considerada en los cálculos dinámicos se supone aproximadamente de un 10 % de la carga de uso total, es decir para realizar una verificación dinámica se supone que

$$q_{slab} = 0.1 \times 3.0 = 0.3 \text{ kN/m}^2$$

Viga principal

- Peso propio (incluye 2 kN/m para vigas ACB)

$$g_{beam} = 5.0 \times \frac{4.2}{2} \times 2 + 2.0 = 23.00 \text{ kN/m}$$

- Carga de uso:

$$q_{slab} = 0.3 \times \frac{4.2}{2} \times 2 = 1.26 \text{ kN/m}$$

B.1.2 Determinación de las características dinámicas del forjado

Frecuencia propia

La primera frecuencia propia se calcula en base a la aproximación del peso propio. La deformación total máxima puede obtenerse por superposición de la deformación de la losa y la de las vigas principales, es decir,

$$\delta_{\max} = \delta_{slab} + \delta_{beam}$$

Siendo

$$\delta_{slab} = \frac{5 \times (5.0 + 0.3) \times 10^{-3} \times 4200^4}{384 \times 34100 \times 3.41 \times 10^5} = 1.9 \text{ mm}$$

$$\delta_{beam} = \frac{1 \times (23.0 + 1.26) \times 16800^4}{384 \times 210000 \times 5.149 \times 10^9} = 4.7 \text{ mm}$$

la máxima deformación es

$$\delta_{\max} = 1.9 + 4.7 = 6.6 \text{ mm}$$

De esta forma la primera frecuencia propia puede obtenerse (de acuerdo con el Anexo A.4) de

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{6.6}} = 7.0 \text{ Hz}$$

Masa modal

La masa total del vano considerado del forjado es

$$M = (5 + 0.3) \times 10^2 \times 16.8 \times 4.2 = 37397 \text{ kg}$$

De acuerdo con el Capítulo A.6, Ejemplo 3, la masa modal del forjado considerado puede calcularse como

$$M_{\text{mod}} = 37397 \times \left[\frac{1.9^2 + 4.7^2}{2 \times 6.6^2} + \frac{8}{\pi^2} \times \frac{1.9 \times 4.7}{6.6^2} \right] = 17246 \text{ kg}$$

Amortiguación

La relación de amortiguación del forjado de acero-hormigón con falso techo se determina de acuerdo con la tabla 1:

Siendo

$$\begin{aligned} D_1 &= 1.0 \text{ (forjado acero-hormigón)} \\ D_2 &= 1.0 \text{ (oficina de planta abierta)} \\ D_3 &= 1.0 \text{ (falso techo)} \end{aligned}$$

B.1.3 Evaluación

Con base en las propiedades modales anteriormente calculadas el forjado se clasifica como clase C (Figura 6). El valor OS-RMS esperado es de aproximadamente 0.5 mm/s.

De acuerdo con la Tabla 2, la clase C se clasifica como conveniente para edificios de oficinas, es decir, que se cumplen los requisitos exigidos.

B.2 Edificio de oficinas de tres alturas

B.2.1 Introducción

El método conduce, en general, a valores conservadores cuando se aplica como método de vano único utilizando el modo relacionado con la frecuencia fundamental. Sin embargo, en casos especiales, en los que la masa modal para modos superiores es significativamente baja, también los modos superiores tienen que ser tenidos en cuenta. Ver el ejemplo siguiente.

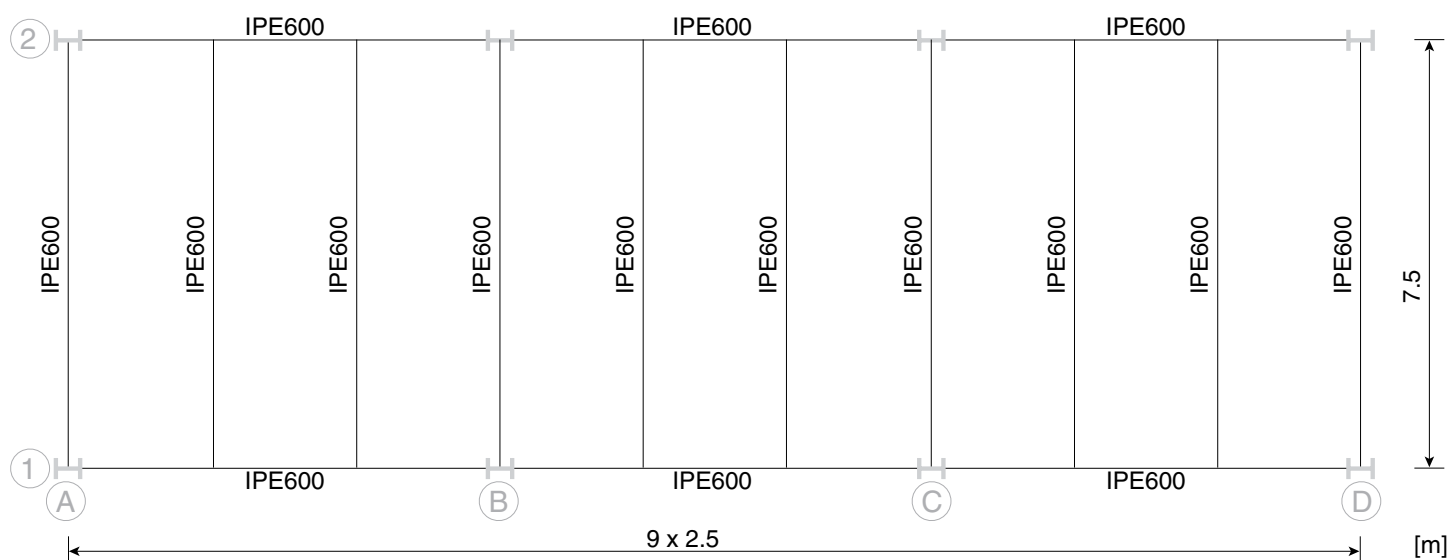
B.2.2 Descripción del forjado

El forjado de este edificio de oficinas, Figura 21, salva un vano de 15 m. entre vigas de borde. En este espacio, las vigas secundarias son perfiles IPE 600 espaciadas 2.5 m entre sí. Las vigas primarias, que salvan un vano de 7.5 m de pilar a pilar, también consisten en perfiles IPE 600. Ver Figura 22.

Figura 21 Aspecto general del edificio



Figura 22 Plano del forjado mostrando las secciones



El forjado es una losa de 15 cm de espesor total con chapa colaborante COFRASTRA 70, Figura 23. Para más información en relación con el forjado COFRASTRA 70, consúltese con www.arval-construction.fr. Las propiedades nominales del material son:

- Acero S235: $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
- Hormigón C25/30: $E_{cm} = 31000 \text{ N/mm}^2$, $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

Para llevar a cabo cálculos dinámicos (análisis de vibraciones), el módulo elástico debe incrementarse de acuerdo con el Capítulo 3:

$$E_{c, dyn} = 1.1 E_{cm} = 34100 \text{ N/mm}^2$$

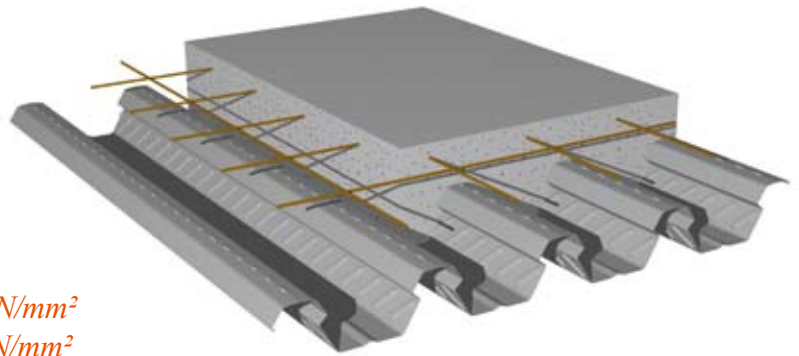


Figura 23 Forjado con utilización de COFRASTRA 70

Propiedades de la sección

Losa (transversal a la viga, E = 210000 N/mm²)

$$A = 1170 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$I = 20355 \text{ cm}^4/\text{m}$$

Viga mixta

($b_{\text{eff}} = 2,5 \text{ m}$; E = 210000 N/mm²)

$$A = 468 \text{ cm}^2$$

$$I = 270089 \text{ cm}^4$$

Cargas

Losa

Peso propio:

$$g = 3.5 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta g = 0.5 \text{ kN/m}^2$$

$$g + \Delta g = 4.0 \text{ kN/m}^2 \text{ (carga permanente)}$$

Carga de uso

$$q = 3.0 \times 0.1 = 0.3 \text{ kN/m}^2$$

(10% de la carga de uso total)

Viga mixta

Peso propio:

$$g = (3.5+0.5) \times 2.5 + 1.22 = 11.22 \text{ kN/m}$$

Carga de uso:

$$q = 0.3 \times 2.5 = 0.75 \text{ kN/m}$$

B.2.3 Determinación de las características dinámicas del forjado

Condiciones de apoyo

Las vigas secundarias terminan en las vigas primarias, las cuales son perfiles abiertos con poca rigidez a torsión. Por lo tanto, puede suponerse que estas vigas están simplemente apoyadas.

Frecuencia propia

En este ejemplo, la frecuencia propia se determina según tres métodos: la fórmula para la viga, despreciándose la rigidez transversal del forjado, la fórmula válida para losas ortotrópicas y el método del peso propio considerando la rigidez transversal.

- Aplicación de la ecuación de la viga (Capítulo A.2)

$$p = 11.97 \text{ kN/m} \Rightarrow \mu = 11.97 \times 1000 / 9.81 = 1220 \text{ kg/m}$$

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.49 \mu l^4}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 \times 210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{0.49 \times 1220 \times 15^4}} = 4.8 \text{ Hz}$$

- Aplicación de la ecuación de vigas ortotrópicas (Capítulo A.3)

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_y}{m l^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{b}{l} \right)^2 + \left(\frac{b}{l} \right)^4 \right] \frac{EI_x}{EI_y}} \\ &= \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{1220 \times 15^4}} \times \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{2.5}{15} \right)^2 + \left(\frac{2.5}{15} \right)^4 \right] \frac{3410 \times 20355}{21000 \times 270089}} \\ &= 4.8 \times 1.00 = 4.8 \text{ Hz} \end{aligned}$$

- Aplicación de la aproximación del peso propio (Capítulo A.4):

$$\delta_{\max} = \delta_{slab} + \delta_{beam}$$

$$\delta_{slab} = \frac{5 \times 4.3 \times 10^{-3} \times 2500^4}{384 \times 34100 \times 2.0355 \times 10^5} = 0.3 \text{ mm}$$

$$\delta_{beam} = \frac{5 \times 11.97 \times 15000^4}{384 \times 210000 \times 270089 \times 10^4} = 13.9 \text{ mm}$$

$$\delta_{\max} = 0.3 + 13.9 = 14.2 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow f_1 = \frac{18}{\sqrt{14.2}} = 4.8 \text{ Hz}$$

Masa modal

La determinación de la frecuencia propia muestra que el comportamiento resistente del forjado puede aproximarse por un modelo de viga. De este modo, este modelo puede utilizarse para calcular la masa modal:

$$M_{\text{mod}} = 0.5 \mu l = 0.5 \times 1220 \times 15 = 9150 \text{ kg}$$

Amortiguación

La relación de amortiguación del forjado mixto acero –hormigón se determina de acuerdo con la Tabla 1:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 1 + 1 + 1 = 3\%$$

Siendo

$$D_1 = 1.0 \text{ (forjado acero – hormigón)}$$

$$D_2 = 1.0 \text{ (oficina de planta abierta)}$$

$$D_3 = 1.0 \text{ (cielo raso bajo el forjado)}$$

B.2.4 Evaluación

Con base en las propiedades modales anteriormente calculadas el forjado se clasifica como clase D (Figura 6). El valor esperado OS-RMS_{g0} es de aproximadamente 3.2 mm/s

De acuerdo con la Tabla 2, la clase D se considera conveniente para edificios de oficinas, es decir, que se cumplen los requisitos exigidos.

Asesoramiento técnico y acabado de las vigas

Asesoramiento técnico

Les proponemos asesoría técnica gratuita para optimizar el uso en sus proyectos de nuestros productos y soluciones así como para responder a sus preguntas en relación con la utilización de perfiles y aceros comerciales. Dicha asesoría técnica cubre el diseño de elementos estructurales, los detalles constructivos, la protección de las superficies, la protección frente incendios, la metalurgia y la soldadura.

Nuestros especialistas están a su disposición para acompañarle en sus iniciativas en todo el mundo.

Para facilitar el dimensionamiento de sus proyectos, le proponemos asimismo un conjunto de herramientas de software y documentación técnica que pueden consultar o bien descargar desde la página.

www.arcelormittal.com/sections

El acabado de las vigas

Para completar las posibilidades técnicas de nuestros socios, nos hemos dotado de eficientes herramientas de acabado y ofrecemos un gran abanico de servicios, tales como:

- taladrado
- oxicorte
- cortes en T
- entallado
- contraflechado
- curvado
- enderezado
- corte en frío con medidas exactas
- soldadura de conectores
- granallado
- tratamientos de superficie

Building & Construction Support

ArcelorMittal dispone de un equipo de profesionales multiproducto dedicado al mercado de la construcción: la división Building and Construction Support (BCS).

Toda una completa gama de productos y soluciones pensados para la construcción en todas sus formas: estructuras, fachadas, cubiertas, etc. está disponible en la Web

www.constructalia.com

Referencias

- [1] European Commission – Technical Steel Research: “Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls”, RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>
- [2] Hugo Bachmann, Walter Ammann: “Vibration of Structures induced by Man and Machines” IABSE-AIPC-IVBH, Zürich 1987, ISBN 3-85748-052-X

Sus socios

ArcelorMittal
Comercial Perfiles
Ctra. Toledo, Km. 9,200
E-28021 Madrid
Tel: +34 917 972 30 0
Fax: +34 915 050 25 7

www.arcelormittal.com/sections

ITEA - Instituto Técnico de la
Estructura en Acero
Parque Tecnológico de Donostia - San Sebastián
Paseo de Mikeletegi, 56. Oficinas 108 - 109
E- 20009 Donostia - San Sebastián
Tel: +34 943 887 47 6
Fax: +34 943 887 62 2

www.arcelormittal.com/itea

Building & Construction Support
C/ Albacete 3 - 3º Planta
E-28027 Madrid

www.constructalia.com

Autores

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Dr.-Ing. Ch. Heinemeyer
Dr.-Ing. B. Völling
RWTH Aachen University
Institut und Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

ArcelorMittal
Comercial Perfiles

Ctra. Toledo, Km. 9,200
E-28021 Madrid
ESPAÑA
Tel: +34 917 972 30 0
Fax: +34 915 050 25 7

www.arcelormittal.com/sections

Version 2009-1



Fuentes Mixtas

Grupo de producto de bosques bien
gestionados y otras fuentes controladas.
www.fsc.org Cert no. IMO-COC-027742
© 1996 Forest Stewardship Council