

UNIVERSIDAD POLTÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS

Master Universitario en Ingeniería de las Estructuras,  
Cimentaciones y Materiales



# CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE UN EMPLAZAMIENTO

Autor

David Rodríguez Gómez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Tutor

Francisco Martínez Cutillas

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Septiembre de 2015*

## ÍNDICE

1. OBJETO .....	2
2. INTRODUCCIÓN .....	3
3. EFECTO DEL SUELO .....	4
3.1 Amplificación geométrica.....	4
3.2 Amplificación dinámica .....	4
4. ANÁLISIS DE RESPUESTA UNIDIMENSIONAL .....	6
4.1 RESPUESTA LINEAL .....	6
4.1.1 Funciones de transferencia .....	8
4.2 RESPUESTA LINEAL -EQUIVALENTE .....	11
4.2.1 Propiedades dinámicas del suelo .....	12
4.2.2 Cálculo lineal equivalente .....	14
5. MÉTODOS DE CÁLCULO .....	16
5.1 MÉTODO DE SERIES TEMPORALES .....	16
5.2 MÉTODO DE LA TEORÍA DE VIBRACIONES ALEATORIAS .....	18
5.2.1 Cálculo partiendo de un espectro de respuesta .....	20
6. NORMATIVA .....	22
6.1 Norma de la Construcción Sismorresistente Española. NCSE-02.....	22
6.2 Eurocódigo 8.....	24
7. METODOLOGÍA.....	29
8. CONCLUSIONES .....	47
9. BIBLIOGRAFÍA .....	48

## 1. OBJETO

Analizar la influencia de las características geotécnicas en un emplazamiento en la respuesta frente a un terremoto y comprobar la amplificación de los movimientos. Se le ha querido dar al trabajo un enfoque diferente y en vez de utilizar la metodología habitual en la que se generan acelerogramas artificiales en el dominio del tiempo para obtener la respuesta, en este caso los análisis se realizan en el dominio de la frecuencia exclusivamente. Este enfoque es relativamente novedoso y se comprobará que es muy eficiente.

## 2. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más importantes y más comunes dentro la ingeniería sísmica geotécnica es la evaluación de la respuesta dinámica del suelo. Actualmente, se utilizan análisis de la respuesta del terreno para predecir los movimientos superficiales del suelo para el desarrollo de los espectros de respuesta de diseño, la determinación de las tensiones para la evaluación del riesgo de licuefacción, y para la determinación de las fuerzas inducidas por los terremotos que pueden conducir a la inestabilidad de las estructuras.

En condiciones ideales, para realizar un análisis completo de la respuesta del terreno habría que modelar el mecanismo de ruptura en la fuente del terremoto, la propagación de las ondas de tensión a través del subsuelo hasta el afloramiento de la roca y finalmente determinar cómo se ve influido el movimiento superficial del terreno por los suelos que se encuentran por encima de la roca. Sin embargo, el mecanismo de ruptura de la falla es tan complicado y la naturaleza de la transmisión de energía entre la fuente y el emplazamiento es tan incierto que este enfoque no es práctico para aplicaciones de ingeniería comunes. Por ello, el problema del análisis de la respuesta del suelo se convierte entonces en uno de determinación de la respuesta del depósito de suelo para el movimiento del lecho rocoso inmediatamente por debajo.

A pesar de que las ondas sísmicas pueden viajar a través de decenas de kilómetros de roca y a menudo menos de 100 metros de la superficie del suelo, éstos metros más superficiales juegan un papel muy importante en la determinación de las características del movimiento de la superficie.

La influencia de las condiciones locales del terreno sobre la naturaleza de los daños del terremoto es sobradamente conocida desde hace muchos años. Desde la década de 1920, sismólogos y, más recientemente, los ingenieros de terremotos geotécnicos han trabajado hacia el desarrollo de métodos cuantitativos para predecir la influencia de las condiciones locales del suelo durante un terremoto. A través de los años, se han desarrollado un gran número de técnicas para el análisis de la respuesta suelo.

### 3. EFECTO DEL SUELO

La amplificación del movimiento del suelo es la responsable del daño extenso en áreas constituidas por depósitos de gran potencia de sedimentos blandos y poco compactados.

La amplificación es típicamente mayor para terremotos de magnitud pequeña en áreas a una cierta distancia epicentral donde sería esperable que las ondas sísmicas redujesen la amplitud debido a los efectos de atenuación en la propagación de la señal sísmica por el interior de la tierra.

Dos mecanismos contribuyen a los efectos de amplificación de la señal en el suelo: la amplificación geométrica y la amplificación dinámica. (M. Rodríguez Segurado, 2005)

#### 3.1 AMPLIFICACIÓN GEOMÉTRICA

Corresponde a los efectos de amplificación debidos al contraste de impedancias entre dos medios en contacto. El contraste de impedancias se expresa como

$$\alpha = \frac{\rho_s v_s}{\rho_r v_r} \quad (1)$$

Donde el subíndice s indica suelo y r roca,  $\rho$  es la densidad y  $v$  es la velocidad de las ondas sísmicas.

El contraste de impedancias es mayor en materiales más jóvenes y menos consolidados y esto provoca mayor nivel de amplificación de la señal sísmica. Asimismo, provoca el atrapamiento de las ondas sísmicas dentro de un nivel con baja impedancia y esto provoca la amplificación de las frecuencias características. La velocidad de las ondas sísmicas en el suelo decrece, particularmente cuando el depósito sedimentario está situado sobre un sustrato rocoso duro y cristalino, aumentando así el contraste de impedancias. Como se ha comentado, los depósitos del suelo se comportan como filtros para la energía de alta frecuencia (o corto período) pero la amplificación de las bajas frecuencias puede causar daño potencial a estructuras que tienen frecuencias naturales bajas, como por ejemplo edificios altos y puentes.

#### 3.2 AMPLIFICACIÓN DINÁMICA

Se conoce como efecto de resonancia y considera la diferencia entre la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia natural del suelo. Si la frecuencia de la onda sísmica es

aproximadamente igual a la frecuencia natural del depósito se produce amplificación incrementándose la amplitud del movimiento del suelo significativamente. Una estimación de la frecuencia natural del suelo es:

$$f_n = \frac{v_s}{4H} \quad (2)$$

Donde  $v_s$  es la velocidad de la onda sísmica en m/s,  $H$  es la potencia del sedimento en m y  $f_n$  es la frecuencia natural del depósito de sedimentario en Hz.

Cuando una onda elástica se propaga a través de un material, el flujo de energía transmitida, que está definido por  $\rho V_s u$  donde  $\rho$  es la densidad del material  $V_s$  es la velocidad de la onda S y  $u$  la velocidad de la partícula. Este flujo de energía permanece constante y en consecuencia las amplitudes del movimiento del suelo en materiales con baja velocidad de propagación de las ondas sísmicas son mayores, dado que la velocidad de la partícula,  $u$ , y la velocidad de las ondas sísmicas S es inversamente proporcional. Como consecuencia, materiales como las arenas sueltas o las arcillas blandas amplifican el movimiento del suelo significativamente.

## 4. ANÁLISIS DE RESPUESTA UNIDIMENSIONAL

Cuando se produce un terremoto debajo de la superficie de la Tierra, las ondas viajan lejos de la fuente en todas las direcciones. A medida que se alcanzan límites entre diferentes materiales geológicos, que se reflejan y refractan. Dado que las velocidades de propagación de la onda de los materiales superficiales son generalmente más bajas que los materiales por debajo de ellos, los rayos inclinados que llegan a los límites de capas horizontales generalmente se reflejan en una dirección más vertical. En el momento en que las ondas alcanzan la superficie del suelo, las refracciones se curvan en una dirección prácticamente vertical.

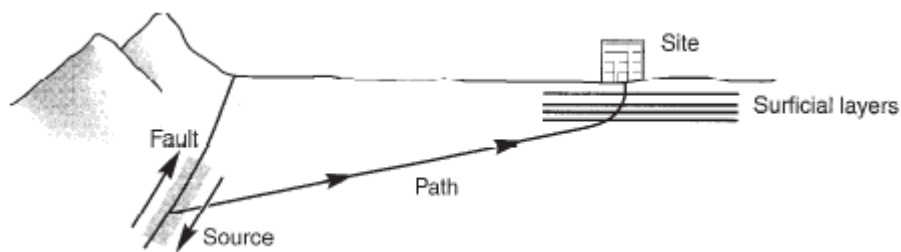


Figura 1. Proceso de refracción que produce que produce propagación de ondas casi verticales cerca de la superficie del suelo. (Kramer, 1996)

Los análisis de respuesta unidimensional de un suelo se basan en la suposición de que todas las condiciones de contorno son horizontales y que la respuesta de un depósito de suelo es causada predominantemente por ondas que se propagan verticalmente desde el lecho de roca subyacente. En este tipo de análisis, se supone que la superficie del suelo y la roca madre se extienden infinitamente en la dirección horizontal. Se ha demostrado que los procedimientos basados en el supuesto de predecir la respuesta del suelo dan unos resultados más que aceptables en comparación con la respuesta medida. (Kramer, 1996)

### 4.1 RESPUESTA LINEAL

Para el caso de la propagación de la onda unidimensional elástico lineal, se supone que el suelo se comporta como un sólido Kelvin-Voigt, en el que la respuesta dinámica se describe utilizando un muelle puramente elástico y un amortiguador puramente viscoso (Kramer 1996). La solución a la ecuación de onda unidimensional para una frecuencia de onda única proporciona el desplazamiento ( $u$ ) en función de la profundidad ( $z$ ) y el tiempo ( $t$ )

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^*z)} + Be^{i(\omega t - k^*z)} \quad (3)$$

A y B representan las amplitudes de las ondas y el número complejo de onda ( $k^*$ ) en la ecuación está relacionada con el módulo de elasticidad transversal ( $G$ ), factor de amortiguamiento ( $D$ ), y la densidad de masa ( $m$ ) del suelo usando:

$$k^* = \frac{\omega}{v_s^*} \quad (4)$$

$$v_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} \quad (5)$$

$$G^* = G(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2}) \cong G(1 + i2D) \quad (6)$$

$G^*$  and  $v_s^*$  son el módulo de elasticidad transversal complejo y la velocidad de onda transversal compleja, respectivamente.

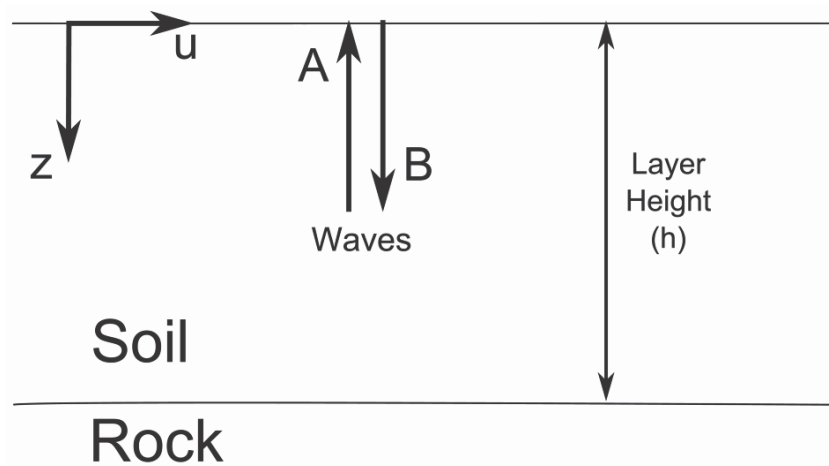


Figura 2. Notación empleada en la descripción de ondas. (Technical Manual for Strata)

Las amplitudes de onda (A y B) dentro del perfil del suelo se calculan en cada frecuencia (suponiendo que la rigidez y la amortiguación conocida dentro de cada capa) y se utilizan para calcular la respuesta en la superficie de un sitio. Este cálculo se realiza mediante el establecimiento de  $A_l = B_l = 1,0$  en la superficie y recursivamente el cálculo de las amplitudes de onda ( $A_{m+l}$ ,  $B_{m+l}$ ) en capas sucesivas hasta que se alcanza el (base) capa de entrada. La función de transferencia entre el movimiento en la capa de interés ( $m$ ) y en la capa de roca ( $n$ ) en la base del depósito se define como:

$$F_{m,n}(\omega) = \frac{u_m(\omega)}{u_n(\omega)} \quad (7)$$

Para establecer una relación entre la roca y la superficie de suelo se define una función de transferencia entre la entre el movimiento del suelo en la superficie (m) y de la roca en la base del depósito (n)

Donde  $\omega$  es la frecuencia de la onda armónica. La función de transferencia es la relación de la amplitud de movimiento armónico, ya sea desplazamiento, velocidad o aceleración-entre dos capas de interés y varía con la frecuencia.

La respuesta en la superficie del terreno se calcula multiplicando el espectro de amplitud de Fourier (FAS) del movimiento de entrada de la roca por la función de transferencia.

$$Y_m(\omega) = F_{m,n}(\omega)Y_n(\omega) \quad (8)$$

Donde  $Y_n$  es la FAS de entrada en la capa superior de la roca y  $Y_m$  por lo contrario, en la parte superior del suelo, es decir en la capa de estudio.

#### 4.1.1 Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia dependen las condiciones geotécnicas. Dichas condiciones geotécnicas pueden considerarse más sencillas o más complejas en este caso se van a analizar tres de ellas para ilustrar como el cambio en las condiciones cambia la función de transferencia. Aunque las más complejas son las que mejor describen la realidad y por lo tanto las más empleadas. (*Kramer, 1996*)

##### **Suelo uniforme no amortiguado sobre roca rígida**

Se considera una capa uniforme de suelo isotrópico, lineal y elástico sobre una roca rígida, este es el caso más simple.

La Función de transferencia se obtiene tal y como antes se ha descrito y para este caso es la siguiente:

$$F_1(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{v_s}\right)} \quad (9)$$

Se puede observar que el desplazamiento en superficie va a ser siempre al menos tan grande como el del lecho rocoso (el denominador no puede ser mayor que 1) y en ciertas frecuencias es mucho más grande. Cuando  $\frac{\omega H}{v_s}$  se aproxima a  $\pi/2 + n\pi$  el denominador se aproxima lo que implica una amplificación infinita o resonancia. Incluso este modelo tan simple demuestra que la respuesta de un suelo depende mucho de la frecuencia de movimiento base y que la frecuencia a la que se produce una fuerte amortiguación depende de la geometría (espesor) y las propiedades del material (velocidad de onda).

$|F_1(\omega)|$  representa la relación entre la amplitud en la relación entre la amplitud de movimiento en la superficie y en la roca.

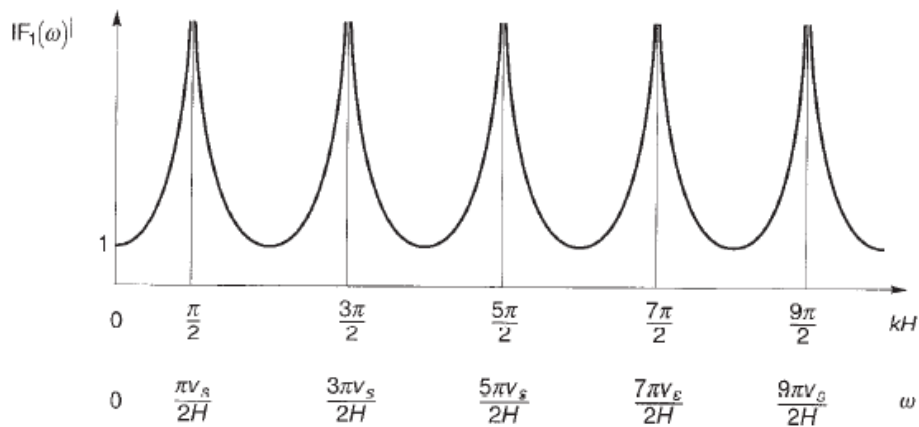


Figura 3. Función de transferencia en un suelo no amortiguado. (Kramer, 1996)

**Suelo uniforme amortiguado sobre roca rígida**

El análisis anterior no asumía pérdida de energía o amortiguamiento en el suelo, el amortiguamiento está presente en todos los materiales por lo que tenerlo en cuenta proporcionaría un resultado más real.

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos\left[\frac{\omega H}{v_s}(1 - i\xi)\right]} \quad (10)$$

Para un mejor análisis se analiza el módulo

$$|F_2(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{v_s}\right) + \left(\xi \frac{\omega H}{v_s}\right)^2}} \quad (11)$$

La amplificación alcanzará un máximo cuando  $KH \approx \pi/2 + n\pi$  pero nunca llegará a ser infinito, para  $\xi > 0$ , ya que el denominador será siempre mayor de 0. Las frecuencias que corresponden con el máximo son las frecuencias naturales del depósito del suelo. El siguiente gráfico representa la variación del factor de amplificación (relación entre la amplitud en la relación entre la amplitud de movimiento en la superficie y en la roca) con la frecuencia para diferentes valores de amortiguamiento.

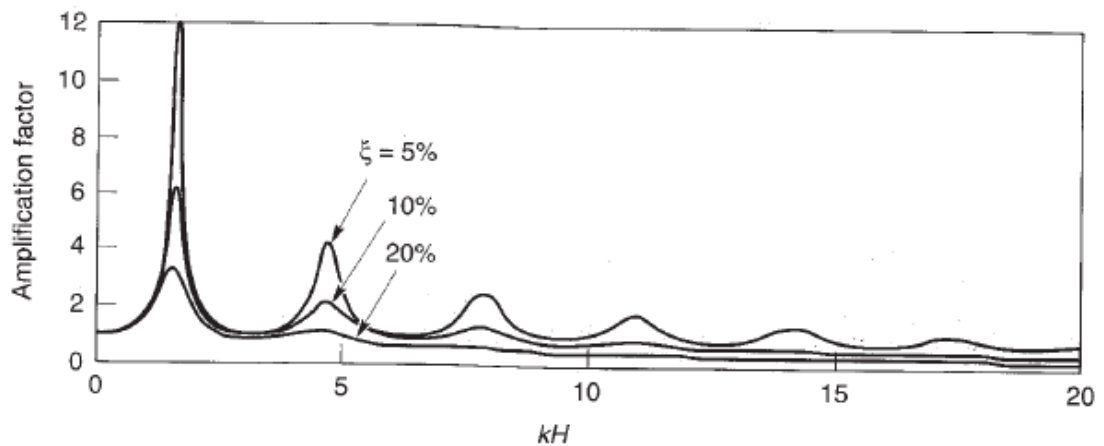


Figura 4. Función de transferencia en un suelo amortiguado, para distintos valores de amortiguamiento. (Kramer, 1996)

Como los máximos van decreciendo según aumenta la frecuencia natural debido al amortiguamiento, la mayor amplificación ocurrirá para la menor frecuencia natural, conocida como frecuencia fundamental.

$$\omega_0 = \frac{\pi v_s}{2H} \quad (12)$$

#### **Suelo uniforme amortiguado sobre roca elástica**

Si la base del suelo es rígida su movimiento no se verá afectado por los movimientos en la capa superior de suelo, actuará como un extremo fijo. Cualquier onda que viaje en el suelo hacia abajo será reflejada hacia el suelo otra vez por la capa rígida, por ello toda la energía de las ondas se quedarán atrapadas en la capa del suelo.

Por el contrario, si la roca es elástica las ondas que llegan a la capa roca-suelo se reflejarán solo parcialmente, transmitiendo parte de la energía hacia abajo a través de la roca. Esto es una especie de amortiguamiento por radiación y causa que la amplitud del movimiento en superficie sea menor que si la roca fuera rígida.

$$F_3(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{v_s}\right) + i \cdot \alpha \cdot \sin\left(\frac{\omega H}{v_s}\right)} \quad (13)$$

Donde  $\alpha$  es el contraste de impedancias previamente descrito.

El módulo no se puede expresar de una forma compacta, por lo que para ilustrar el efecto de la roca elástica se utiliza para suelo no amortiguado.

$$|F_3(\omega, \xi = 0)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_s H + \alpha^2 \sin^2 k_s H}} \quad (14)$$

Se puede apreciar que incluso en el caso de suelo no amortiguado no puede ocurrir resonancia. La rigidez del sustrato de suelo, que viene reflejado por la constante de impedancias, varía la amplificación que se produce tal y como se representa en la siguiente gráfica.

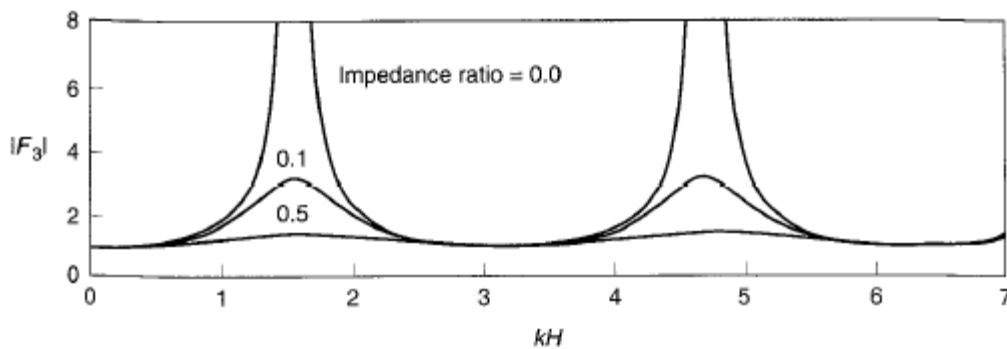


Figura 5. Función de transferencia en suelo sobre roca rígida con un amortiguamiento nulo para diferentes valores de contraste de impedancias. (Kramer, 1996).

## 4.2 RESPUESTA LINEAL -EQUIVALENTE

En la sección anterior se ha supuesto que el suelo es lineal elástico. Sin embargo, el suelo es no lineal, de tal manera que las propiedades dinámicas de suelo (módulo de elasticidad transversal,  $G$ , y coeficiente de amortiguamiento,  $\xi$ ) varían con la deformación por esfuerzo cortante, y por lo tanto con la agitación de un terremoto. En el análisis lineal equivalente de la respuesta del emplazamiento, la respuesta no lineal del suelo es aproximada mediante la modificación de las propiedades elásticas lineales del suelo en base al nivel de tensiones inducido. Debido a que las tensiones inducidas dependen de las propiedades del suelo, el módulo de elasticidad transversal y el amortiguamiento se calculan de forma iterativa en función de la tensión calculada. (Technical Manual for Strata, 2009)

### 4.2.1 Propiedades dinámicas del suelo

Las propiedades que gobiernan la respuesta en un sistema dinámico son la masa la rigidez y el amortiguamiento. En el caso de un suelo bajo una carga tangencial, la masa está caracterizada por la densidad y la altura del estrato, la rigidez por el módulo de elasticidad transversal ( $G$ ) y el amortiguamiento por el ratio de amortiguamiento viscoso  $\xi$ . La rigidez y el amortiguamiento del sistema van cambiando con la tensión tangencial, por lo que el comportamiento dinámico del suelo es difícil de modelar.

Obtener la densidad del suelo es sencillo, ya que se puede estimar en función del tipo de suelo. Sin embargo la rigidez y la amortiguación es más complejo y si se quiere un valor preciso requiere de pruebas de campo y laboratorio.

#### Módulo de elasticidad transversal.

El secante del módulo de elasticidad transversal de un elemento de suelo varía con la tensión tangencial. Para amplitudes de tensión bajas el secante del módulo es alto sin embargo según crece la tensión va decreciendo.

En el origen cuando la tensión es mínima se obtiene el máximo módulo de elasticidad transversal ( $G_{max}$ ).  $G_{max}$  depende de la velocidad de onda transversal y se puede definir como:

$$G_{max} = \gamma v_s^2 \quad (15)$$

Donde  $\gamma$  es la densidad del emplazamiento y  $v_s$  es la velocidad de onda tangencial

Sin embargo la velocidad de onda depende de la profundidad, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen la velocidad de onda aumenta con la profundidad (se representa para un suelo estratificado).

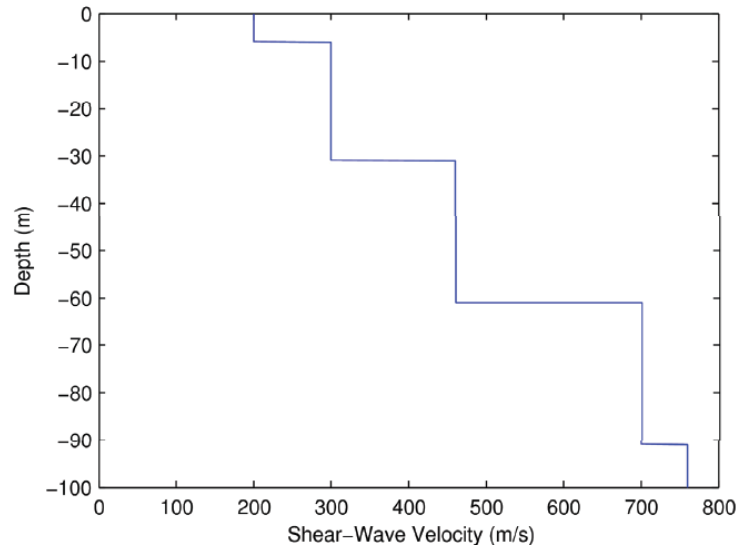


Figura 6. Velocidad de onda en función de la profundidad (Manual técnico para Strata)

Según aumenta  $\gamma$  la relación  $G/G_{max}$  (ratio del módulo) va bajando de 1, por lo que se produce una reducción de la rigidez del suelo. En la siguiente imagen se puede ver una curva de reducción del módulo transversal.

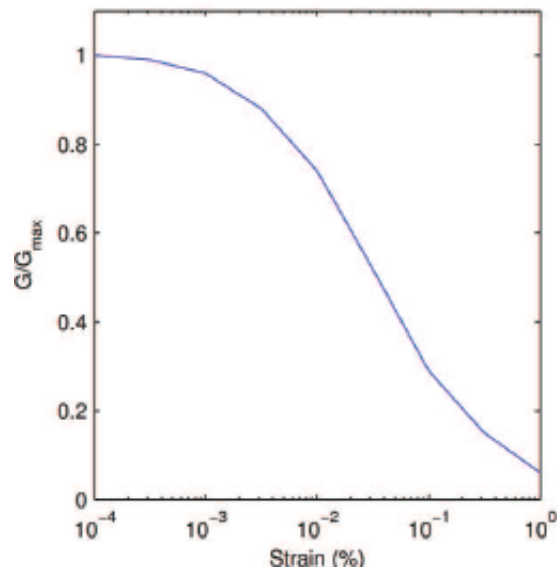


Figura 7. Curva de degradación del módulo de elasticidad transversal (Manual técnico para Strata)

Esta curva se puede obtener de medidas en el laboratorio o con fórmulas empíricas en función del tipo de suelo y otras variables.

### Ratio de amortiguamiento

Con el aumento de la tensión se produce una disipación de energía, por lo que con el aumento de la tensión se produce un aumento del ratio de amortiguamiento. Incluso para valores muy bajos de nivel de tensiones se produce una disipación de energía, por lo que el ratio de amortiguamiento nunca es cero.

En la siguiente imagen se puede ver dicho aumento

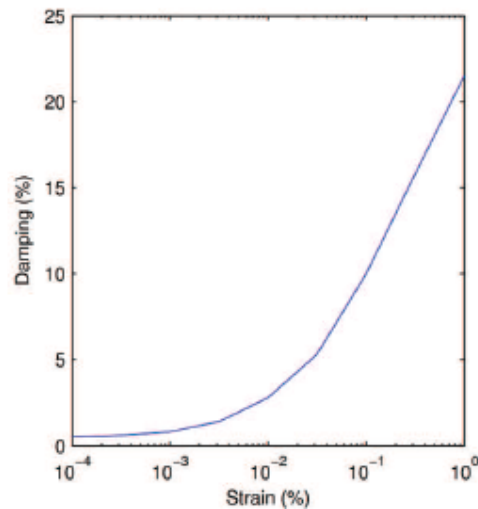


Figura 8. Curva de aumento de amortiguamiento (Manual técnico para Strata)

### 4.2.2 Cálculo lineal equivalente

Una vez definidas propiedades no lineales dependientes de la tensión, el modulo transversal equivalente y el ratio de amortiguamiento equivalente, se va a definir el proceso lineal equivalente.

Para calcular la tensión tangencial en el estrato en función del movimiento de entrada en el afloramiento, se utiliza una función de transferencia. La tensión tangencial se toma en el medio del estrato y se emplea para calcular las propiedades del suelo compatibles con la tensión. A diferencia de las funciones de transferencia anteriores que simplemente amplifican el espectro de amplitud de Fourier, esta función de transferencia de tensión amplifica el movimiento y convierte la aceleración en tensión.

$$TF = \frac{\gamma \left( \omega, z = \frac{h_m}{2} \right)}{u_{n.afloramiento}(\omega)} = \frac{ik_m^* \left( A_m \cdot e^{\left( \frac{ik_m^* h_m}{2} \right)} - B_m \cdot e^{\left( -\frac{ik_m^* h_m}{2} \right)} \right)}{-2A_n \omega^2} \quad (16)$$

Donde  $\gamma$  es la densidad del emplazamiento y  $v_s$  es la velocidad de onda tangencial.

El espectro de amplitud de Fourier de tensión en un estrato se calcula aplicando la función de transferencia al espectro de amplitud de Fourier del movimiento de entrada. La máxima tensión dentro del estrato, por lo tanto se deriva de dicho movimiento de entrada. Sin embargo, no es apropiado utilizar la tensión máxima dentro de un estrato para calcular las propiedades del suelo compatibles con la tensión debido a que la deformación máxima se produce sólo para un instante. En su lugar, se utiliza una tensión efectiva  $\gamma_{eff}$  calculada a partir de la tensión máxima. Normalmente, la tensión efectiva suele ser el 65% de la tensión máxima

El análisis de la respuesta lineal equivalente de un emplazamiento, incluye los siguientes pasos:

1. Se realizan las estimaciones iniciales de G y  $\xi$  para cada estrato.
2. Se calculan las amplitudes de onda (A y B) de cada estrato.
3. Se calcula la función de transferencia de tensión de cada estrato.
4. Aplicando la Función de transferencia de tensión al espectro de amplitud de Fourier de entrada se calcula la tensión máxima.
5. A partir de la tensión máxima se calcula la tensión efectiva ( $\gamma_{eff}$ )
6. En base a la nueva estimación de la tensión efectiva se recalculan el módulo de elasticidad transversal y el ratio de amortiguamiento compatibles con la tensión.
7. Las nuevas propiedades no lineales G y  $\xi$  se comparan con las previas a la iteración y se calcula el error. Si el error está por debajo de un umbral previamente definido se para el proceso sino se vuelve a recalcular.

## 5. MÉTODOS DE CÁLCULO

La sección anterior describe como las funciones de transferencia que transforman el espectro de amplitud de Fourier de entrada (FAS) en uno de salida. Las funciones de transferencia también se pueden derivar para calcular la respuesta de un oscilador de un solo grado de libertad. Tanto en el dominio del tiempo como en métodos de teoría de vibraciones aleatorias, las mismas funciones de transferencia se aplican a la FAS de entrada. La diferencia entre los métodos reside en cómo esta FAS se convierte del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

### 5.1 MÉTODO DE SERIES TEMPORALES

En el método de series de tiempo, se utiliza un acelerograma de entrada y la FAS de entrada se calcula a partir de series de tiempo mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) para calcular la transformación de Fourier discreta en la serie de tiempo proporcionado. La transformada inversa de Fourier discreta se utiliza para calcular una serie de tiempo para un FAS dado. Una vez la FAS del movimiento haya sido calculada se puede llevar a cabo un análisis de la respuesta del emplazamiento con el movimiento. El siguiente es un resumen de los pasos para calcular el tiempo de la serie aceleración superficie para el sitio descrito

1. Obtener el acelerograma del movimiento de entrada
2. Calcular la FAS de entrada de la base de la roca con el de Fourier rápida transformación (FFT).
3. Calcule la función de transferencia que relaciona el movimiento en la superficie del suelo (output) con el de la base de la roca (input) para las propiedades del sitio.
4. Calcular el FAS en la superficie (output) aplicando la función de transferencia a la FAS de la roca (output).
5. Calcular el acelerograma en la superficie del suelo a través de la FFT inversa de la FAS en superficie.

Las siguientes gráficas resumen los valores obtenidos en cada uno de los pasos anteriores.

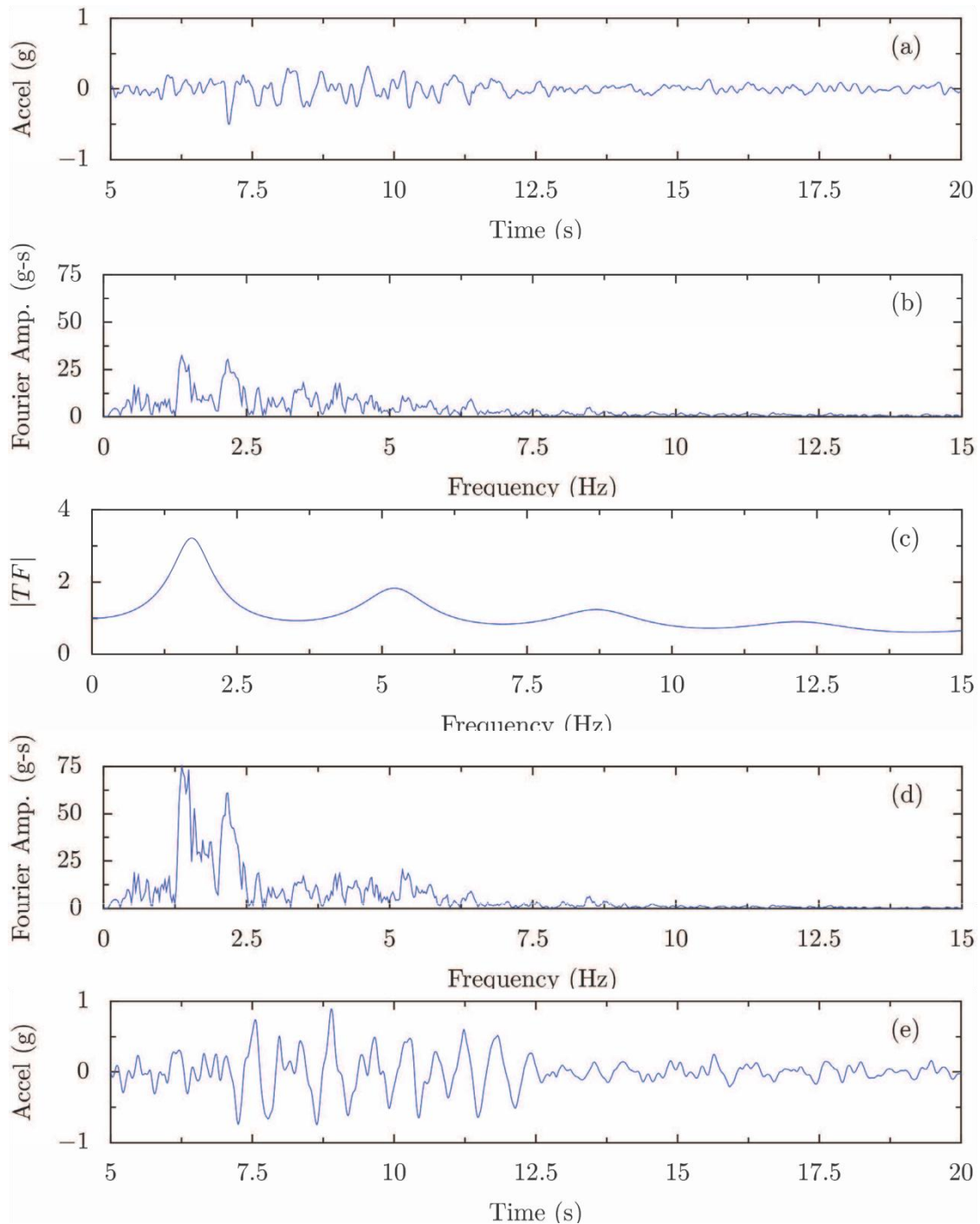


Figura 9. Ejemplo de método de series temporales: (a) acelerograma de entrada, (b) FAS de entrada, (c) Función de transferencia de la roca a la superficie, (d) FAS de la superficie, (e) acelerograma de la superficie

## 5.2 MÉTODO DE LA TEORÍA DE VIBRACIONES ALEATORIAS

La utilización de la teoría de vibración aleatoria (RVT) para análisis de la respuesta de un sitio, se trata de un método relativamente moderno, fue propuesto por primera vez en 1991 (Schneider ) y posteriormente ha sido aplicado al análisis de la respuesta de un emplazamiento (Silva et al. 1997, Rathje y Ozbey 2006 y , Rathje y Kottke 2008). Este método no utiliza el movimiento de entrada en el dominio de tiempo, sino que inicia todos los cálculos con el FAS de entrada. Dicha serie de Fourier es de amplitud única, no hay información de fase. Debido a que no tiene los ángulos de fase de acompañamiento a las amplitudes de Fourier, no se puede calcular un acelerograma. En lugar de ello, se utilizan las estadísticas de los valores extremos para calcular parámetros pico en el dominio del tiempo (por ejemplo, la aceleración máxima del terreno, la aceleración espectral) a partir de la información de amplitud de Fourier. Debido a la naturaleza estocástica del RVT, un análisis puede proporcionar una estimación media de la respuesta del emplazamiento con un solo análisis y sin la necesidad de emplear movimientos de entrada en el dominio del tiempo. (Technical Manual for Strata, 2009)

La teoría de la vibración aleatoria se puede separar en dos partes: (1) la conversión entre el dominio del tiempo y de la frecuencia usando el teorema de Parseval y (2) la estimación del factor de pico utilizando estadísticas de valores extremos.

Considerando una señal variable en el tiempo  $Y(t)$ , con un espectro de amplitud de Fourier asociado,  $Y(f)$ . El valor cuadrático medio de la señal  $Y_{rms}$  es una medida de su valor medio durante un período de tiempo determinado,  $T_{rms}$  y se calcula a partir de la integral de la serie temporal durante ese período de tiempo:

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{rms}} \int_0^{T_{rms}} [Y(t)]^2 dt} \quad (17)$$

El teorema de Parseval relaciona la integral de la serie temporal con la integral de su transformada de Fourier de tal modo que la ecuación (2.22) se puede escribir en términos de Serie de Fourier de la señal:

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T_{rms}} \int_0^{\infty} |Y(f)|^2 df} = \sqrt{\frac{m_0}{T_{rms}}} \quad (18)$$

Donde  $m_0$  es el momento cero del FAS. El momento  $n$ -ésimo se define como:

$$m_n = 2 \int_0^{\infty} (2\pi f)^n |Y(f)|^2 df \quad (19)$$

El factor de pico (PF) representa la relación entre el valor máximo de la señal  $x_{max}$  y su valor cuadrático medio  $x_{rms}$ , de tal manera que conociendo  $x_{rms}$  y el PF se puede calcular  $x_{max}$

$$Y_{max} = PF \cdot Y_{rms} \quad (20)$$

Cartwright y Longuet-Higgins (1956) estudiaron las estadísticas de amplitudes de onda del océano, y consideraron la distribución de probabilidad de los máximos de una señal para desarrollar expresiones de factor pico con características de la señal. Cartwright y Longuet-Higgins (1956) obtuvieron una expresión integral de los valores esperados del factor de pico en función del número de extremos ( $N_e$ ) y el ancho de banda ( $\xi$ ) de la serie temporal (Boore 2003)

$$E[PF] = \sqrt{2} \int_0^{\infty} [1 - \xi e^{-z^2}]^{N_e} dz \quad (21)$$

Siendo el ancho de banda:

$$\xi = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (22)$$

Y el número de extremos:

$$N_e = \frac{T_{gm}}{\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (23)$$

#### Definición del movimiento de entrada

En la Teoría de Vibraciones Aleatorias el movimiento de entrada (input) está definido por un FAS y la duración de movimiento del terreno (Tgm). El FAS puede ser calculado directamente de una fuente sísmológica o se puede calcular a partir de un espectro de respuesta.

### 5.2.1 Cálculo partiendo de un espectro de respuesta

El FAS de entrada de la roca ( $Y(f)$ ) se puede derivar de un espectro de respuesta utilizando una técnica inversa. La técnica de inversión sigue la metodología básica propuesta por Gasparini y Vanmarcke (1976) y además descrito por Rathje et al. (2005). La técnica de inversión utiliza las propiedades de una función de transferencia de un grado de libertad (SDOF) utilizada para calcular los valores espectrales de respuesta.

El cuadrado del espectro de respuesta de la frecuencia natural del oscilador de un grado de libertad puede representarse en función de la aceleración espectral ( $S_{a,f_n}$ ), el factor de pico (PF), el valor cuadrático medio de la duración del movimiento ( $T_{rms}$ ), el cuadrado de la potencia ( $|Y(f)|^2$ ) en las frecuencias inferiores a la frecuencia natural, y la integral de la función de transferencia de un grado de libertad ( $|H_{f_n}(f)|^2$ )

$$|Y(f_n)|^2 \cong \frac{1}{\int_0^\infty |H_{f_n}(f)|^2 df - f_n} \left( \frac{T_{rms} S_{a,f_n}^2}{2 PF^2} - \int_0^{f_n} |Y(f)|^2 df \right) \quad (24)$$

La integral de la función de transferencia es constante para una frecuencia y ratio de amortiguamiento dados, pudiendo así simplificar la ecuación:

$$|Y(f_n)|^2 \cong \frac{1}{f_n \left( \frac{\pi}{4\beta} - 1 \right)} \left( \frac{T_{rms} S_{a,f_n}^2}{2 PF^2} - \int_0^{f_n} |Y(f)|^2 df \right) \quad (25)$$

EL valor de pico en la ecuación depende de los momentos del FAS, que están inicialmente sin definir, por ello en una primera aproximación hay que suponer un valor pico para todas las frecuencias naturales.

La ecuación se utiliza primero para la aceleración espectral de la frecuencia más baja (periodo más largo). Para esta frecuencia, el término integral del FAS se puede asumir como 0. A continuación se aplica a las frecuencias que van aumentando sucesivamente, utilizando los valores calculados previamente de  $|Y(f_n)|$  para evaluar la integral.

Para mejorar la igualdad entre el espectro de respuesta derivado del proceso RVT  $S_a^{RVT}(f)$  y el espectro de respuesta objetivo  $S_a^{Obj}(f)$ , el FAS derivado del RVT es corregido multiplicándolo por el ratio de los dos espectros de respuesta. Este proceso iterativo mejora el resultado con cada iteración:

$$|Y_{(i+1)}(f)| = \frac{S_a^{RVT}(f)}{S_a^{Obj}(f)} \cdot |Y_i(f)| \quad (26)$$

De esta forma el recién definido espectro de potencia se utiliza para obtener los factores pico para cada frecuencia.

## 6 NORMATIVA

En general los espectros de diseño o de proyecto propuestos en las normativas de construcción, son formas espectrales suavizadas, medias o envolventes, construidas con tramos rectos (en escala logarítmica) que aproximan espectros de respuesta reales de la zona de aplicación.

Estas formas espectrales han sido normalizadas por el valor de la aceleración máxima del terreno, por lo que, en realidad las ordenadas espectrales de la aceleración vienen dadas como factores de amplificación para distintos tramos de frecuencias o periodos, en función del amortiguamiento, del tipo de suelo, y del tipo de terremoto. (G. Hernández Ruiz, 2007)

### 6.1 NORMA DE LA CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE ESPAÑOLA. NCSE-02

La Norma NCSE-02 define los espectros de respuesta elástica de diseño, para periodos de retorno de 500 años, a partir de una forma espectral de 3 tramos. Establece un espectro normalizado de respuesta elástica para aceleraciones horizontales, correspondiente a un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 5% respecto al crítico, definido por los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 \text{Si } T < T_A & \quad \alpha(T) = 1 + 1,5T/T_A \\
 \text{Si } T_A \leq T \leq T_B & \quad \alpha(T) = 2,5 \\
 \text{Si } T > T_B & \quad \alpha(T) = K \cdot C/T
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Siendo:

$\alpha(T)$ : Valor del espectro normalizado de respuesta elástica

T: Periodo propio del oscilador en segundos

C: Coeficiente del terreno, que tiene en cuenta las características geotécnicas del terreno de cimentación

K: coeficiente de contribución

$T_A, T_B$ : Periodo característico del espectro de respuesta cuyos valores son:

$$T_A = K \cdot \frac{C}{10} \quad (28)$$

$$T_B = K \cdot \frac{C}{2,5} \quad (29)$$

De esta forma, el espectro de potencia depende del tipo de suelo del emplazamiento a través del coeficiente del terreno C, y del llamado coeficiente de contribución K, cuyo objetivo final es valorar que la mayor peligrosidad de que el terremoto proceda falla Azores-Gibraltar (Varía entre 1,3 y 1 en función de la cercanía)

Los terrenos se clasifican en los siguientes tipos:

- Terrenos tipo I: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso ( $V_s > 750m/s$ )
- Terrenos tipo II: Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros ( $400 < V_s < 750m/s$ )
- Terrenos tipo III: Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme ( $200 < V_s < 400m/s$ )
- Terrenos tipo IV: Suelo granular suelto o suelos cohesivo blando ( $V_s < 200m/s$ )

Cada tipo de terreno tiene asignado un coeficiente C

Tipo Terreno	Coeficiente C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

Tabla 1. Coeficiente C para cada tipo de suelo NCSE-02

La construcción final del espectro de respuesta se hace teniendo en cuenta que

$$\alpha(T) = PSA(T)/PGA \quad (30)$$

PGA = aceleración máxima del terreno (periodo de retorno de referencia 500 años),

PSA(T) = pseudo-espectro de respuesta de aceleración.

El espectro de respuesta del movimiento horizontal, se construye así, conociendo el valor de la aceleración máxima de cada emplazamiento dada por el cálculo de peligrosidad sísmica. Para el movimiento vertical la Norma propone tomar el 70% del espectro del movimiento horizontal.

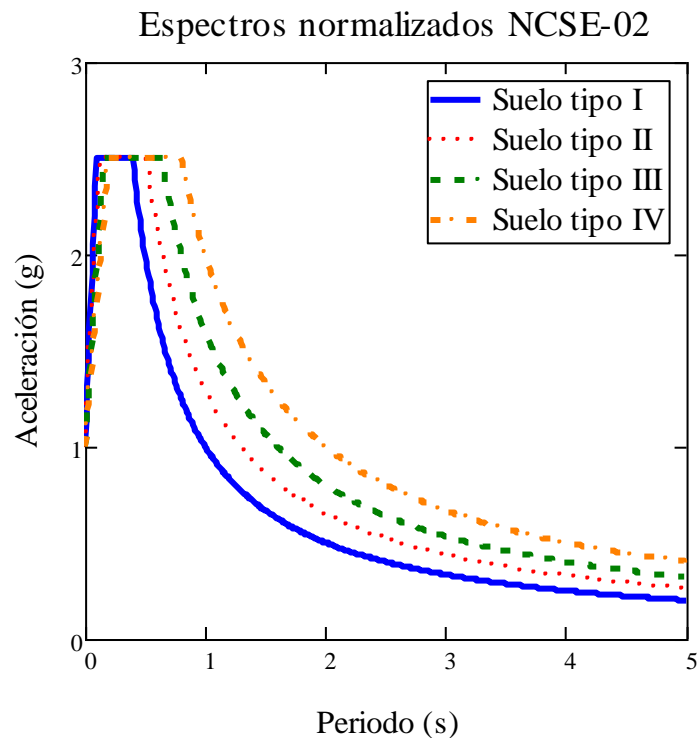


Figura 10. Espectros normalizados de la NCSE-02 para diferentes tipos de suelo

## 6.2 EUROCÓDIGO 8

El Eurocódigo 8, " Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes" recoge en su Parte 1-1 "Reglas generales. Acciones sísmicas y requisitos generales de las estructuras", todo lo referente a caracterización y representación del movimiento del suelo.

El Eurocódigo 8 define cinco tipos de terrenos, que se emplean para tener en cuenta la influencia de las condiciones locales del terreno, en caso de una acción sísmica. En la siguiente tabla se muestra la clasificación:

Tipo de Terreno	Descripción	Parámetros		
		V <sub>s</sub> (m/s)	SPT	C <sub>u</sub> (kPa)
<b>A</b>	Roca u otra formación geológica similar a roca, con 5m de material debil en superficie como máximo	> 800		-
<b>B</b>	Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura caracterizado por un incremento de las propiedades mecánicas en profundidad	360-800	50	>250
<b>C</b>	Depósitos profudos de arena densa o de densidad media, gravas, o arcilla dura.	180-360	5-50	70-250
<b>D</b>	Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo.	<180	15	<70
<b>E</b>	Un perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial con valores de Vs de tipo C o D, y con un espesor entre 5 y 20 m, encima de un material duro de Vs > 800 m/s			

Tabla 2. Clasificación del terreno del Eurcódigo 8

Según el Eurocódigo el movimiento sísmico en un punto dado de la superficie se representa generalmente por un espectro de respuesta elástica de la aceleración del suelo.

El espectro de respuesta elástica,  $S_e(T)$ , para movimiento horizontal y para el periodo de retorno de referencia (475 años) definido por esta Normativa, está dado por:

$$\begin{aligned}
 0 \leq T \leq T_B &\rightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C &\rightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \\
 T_C \leq T \leq T_D &\rightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\
 T_D \leq T \leq 4s &\rightarrow S_e(T) = a_g \cdot S \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

donde

- $T$  es el periodo de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad.
- $a_g$  es la aceleración de proyecto del suelo en un terreno tipo A.

- $T_B$  y  $T_C$  son los límites inferior y superior respectivamente, del tramo de aceleración espectral constante.
- $T_D$  es el valor que define el comienzo del tramo de desplazamiento espectral constante.
- $S$  es el factor del suelo.
- $\eta$  es el factor de corrección del amortiguamiento, con un valor de referencia  $\eta = 1$  para amortiguamiento viscoso del 5%;  $\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55$

Los periodos  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  y el factor  $S$  de suelo dependen del tipo de terreno. El eurocódigo propone dos tipos de espectro: Tipo 1 y Tipo 2. Si el terremoto tiene una magnitud de onda de superficie  $M_S$  no mayor que 5,5 se recomienda utilizar un espectro tipo 2. Es decir, los tipo 2 son terremotos de baja magnitud, tienen menos capacidad de disipación de energía, por lo que suelen ser terremotos más cercanos.

En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados por el Eurocodigo 8 para ambos tipos de espectros en función del suelo.

### **Tipo 1**

Subsuelo	S	$T_B$	$T_C$	$T_D$
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Tabla.3. Valores recomendados para el espectro de respuesta Tipo 1 Eurocódigo 2

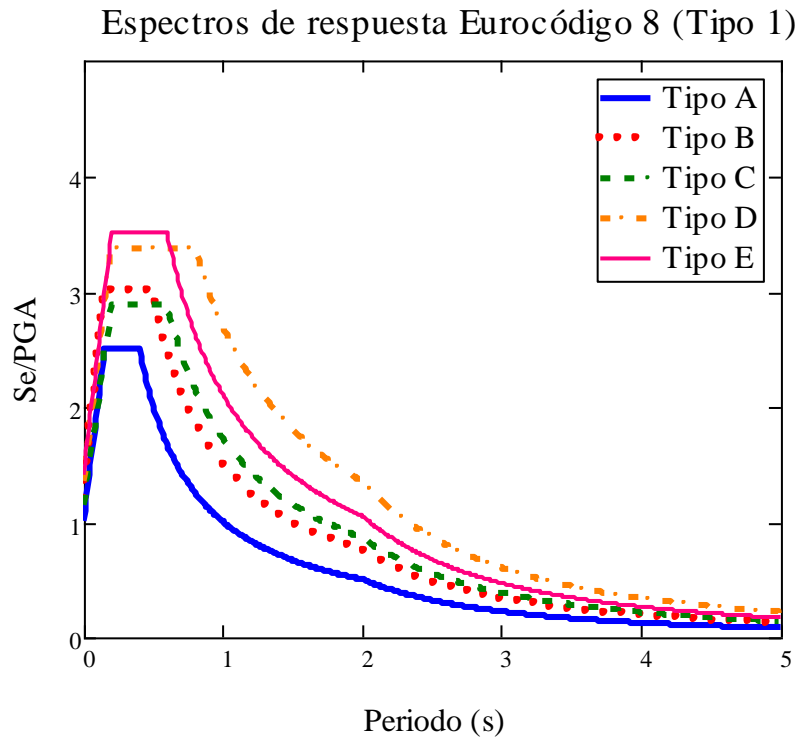


Figura 11. Espectros del Eurocódigo 8 tipo 1 para diferentes tipos de suelo

**Tipo 2**

Subsuelo	S	$T_B$	$T_C$	$T_D$
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Tabla 4. Valores recomendados para el espectro de respuesta Tipo 2 Eurocódigo 2

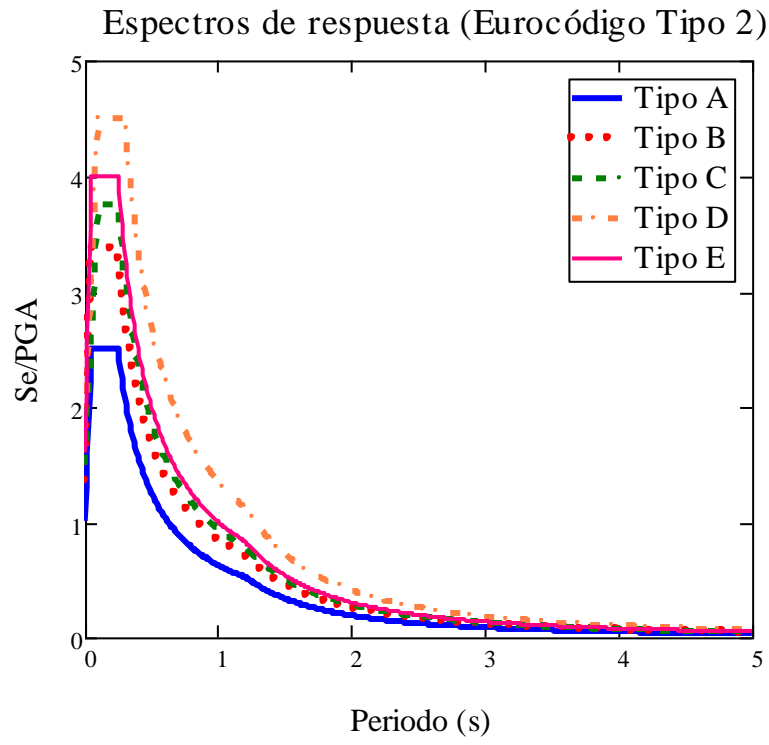


Figura 12. Espectros del Eurocódigo 8 tipo 2 para diferentes tipos de suelo

## 7 METODOLOGÍA

Como bien se ha dicho anteriormente, el objeto del trabajo es ver la influencia que tiene un suelo en el efecto de un terremoto.

El siguiente diagrama resume las diferentes posibilidades a la hora de tratar un problema sísmico.

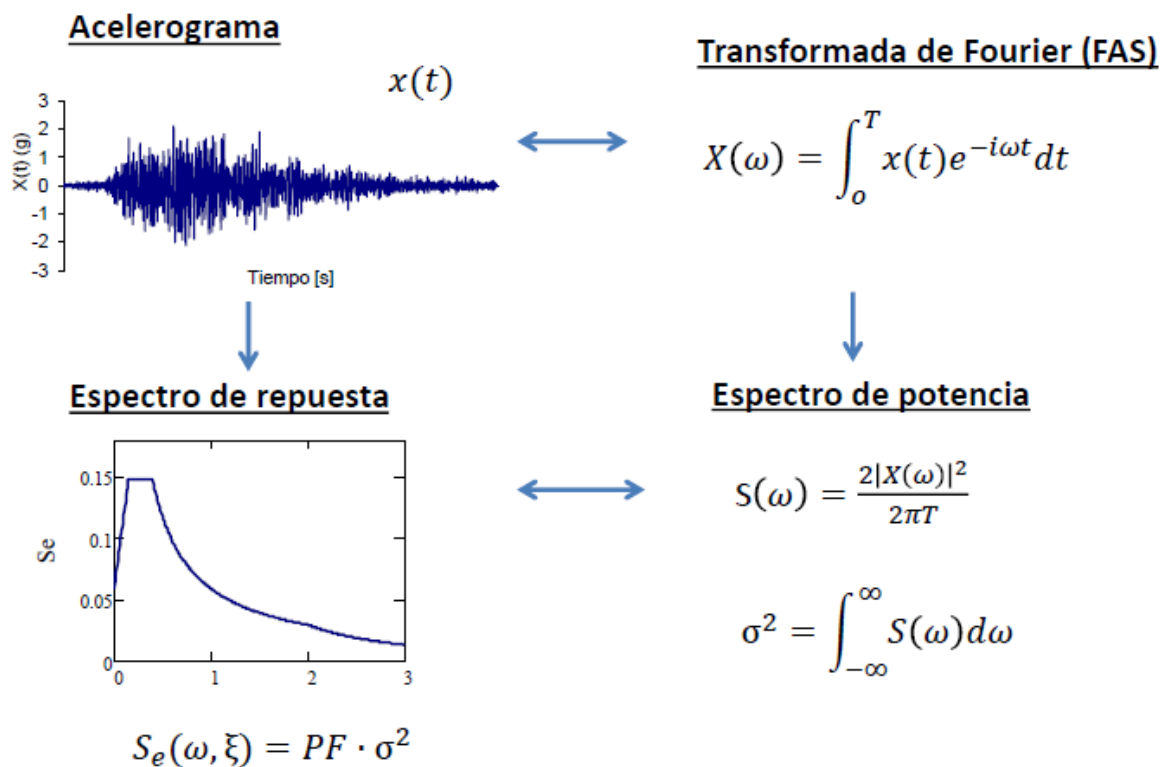


Figura 13. Cuadro resumen con las diferentes formas de tratar un problema sísmico

La metodología habitual parte de un espectro de respuesta y mediante métodos estocásticos obtiene un acelerograma artificial (en el dominio del tiempo), compatible con el espectro de respuesta. Una vez se tiene el acelerograma se deduce el FAS de dicho acelerograma, pasa otra vez al dominio de la frecuencia, mediante la transformada de Fourier. Y por último mediante el espectro de potencia se obtiene el espectro de respuesta final.

En este trabajo se quiere evitar tener que obtener un acelerograma artificial la necesidad de emplear movimientos de entrada en el dominio del tiempo, ya que no aporta nada novedoso. Por ello, se va a trabajar durante todo el proceso en el dominio de la frecuencia.

El proceso que se sigue en este trabajo se describe paso por paso a continuación.

Se parte de un espectro de respuesta base, en este caso se adopta como referencia el Eurocódigo 8 y se utiliza el espectro de respuesta para suelos tipo A con un amortiguamiento  $\xi=5\%$ . En el Eurocódigo el espectro de respuesta viene definido en función del tiempo.

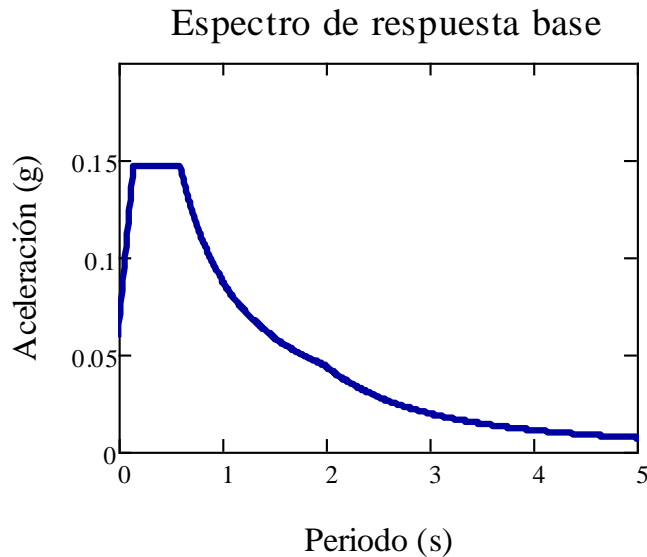


Figura 14. Espectro de respuesta base tomado del Eurocódigo para suelo tipo A.

A continuación se pasa el espectro de respuesta base del eurocódigo que se expresa en términos de período, se modifica para expresarlo en frecuencia, ya que es como se va a trabajar.

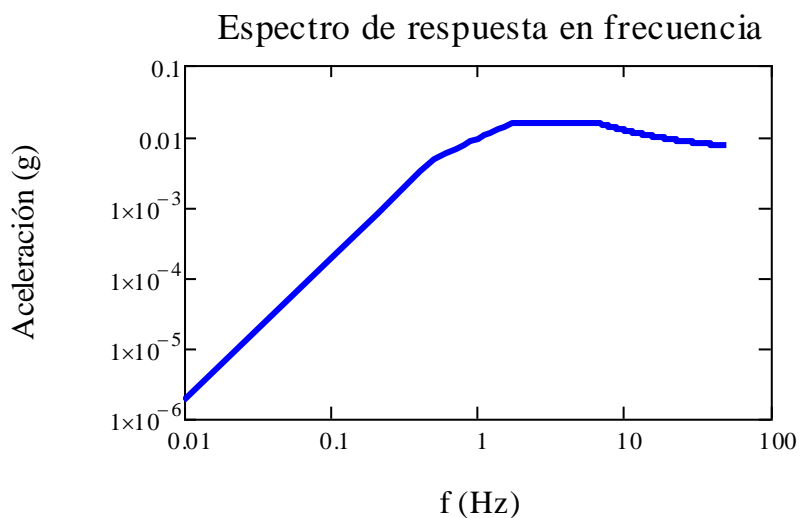


Figura 15. Espectro de respuesta base en el dominio de la frecuencia

Partiendo del espectro de potencia en el dominio de la frecuencia  $S_e(f)$  se calcula el FAS del movimiento de entrada de la roca  $Y(f)$ , utilizando una técnica inversa. Tal y como se ha definido anteriormente el cuadrado del espectro de respuesta de la frecuencia natural del oscilador de un grado de libertad se representa mediante la siguiente ecuación. Se utiliza la siguiente expresión para cada frecuencia.

$$|Y(f_n)|^2 \cong \frac{1}{f_n \left( \frac{\pi}{4\beta} - 1 \right)} \left( \frac{T_{rms} S_{a,f_n}^2}{2 PF^2} - \int_0^{f_n} |Y(f)|^2 df \right) \quad (25)$$

Se considera como factor de pico  $PF=3,6$ , ya que se sabe que va a salir en ese entorno y como periodo se toma  $T_{rms} = 10s$

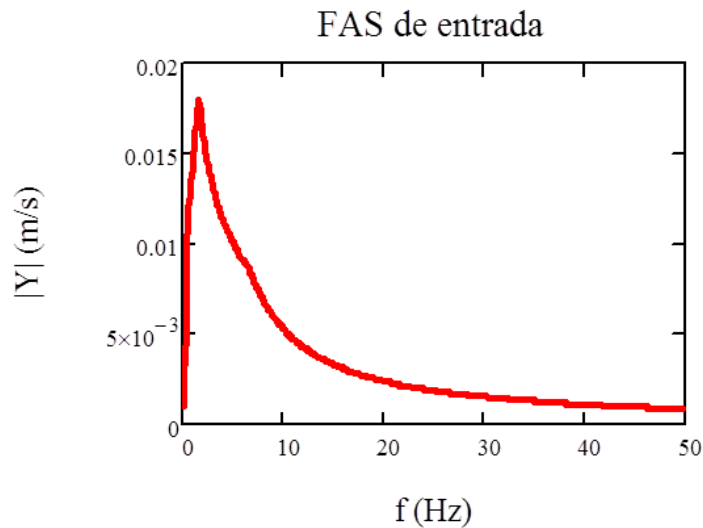


Figura 16. Espectro de amplitud de Fourier del movimiento de entrada

A continuación se calcula el FAS de entrada del movimiento

$$PSA = Y_{max} \cdot \omega_0^2 \quad (32)$$

Siendo:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (33)$$

$$Y_{max} = PF \cdot Y_{rms} \quad (34)$$

La obtención de  $Y_{max}$  proviene de la teoría de vibraciones aleatorias anteriormente descrita, y en la que se espectro de amplitud de Fourier de partida el FAS del movimiento de entrada de la roca  $Y(f)$ .

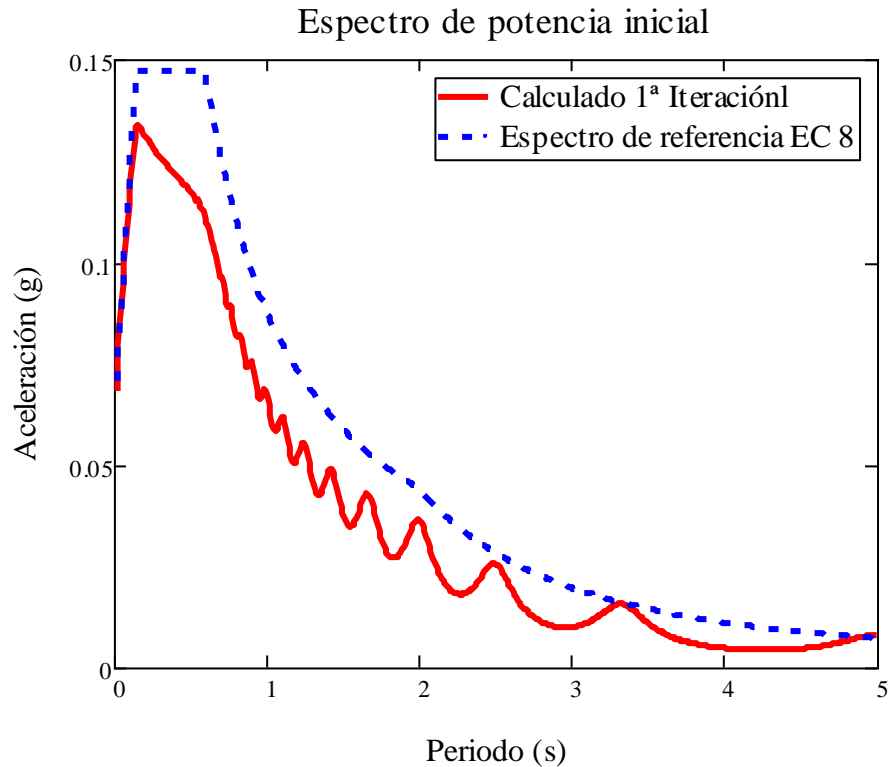


Figura 17. Espectro de respuesta en la primera iteración del movimiento de entrada

Como se puede apreciar la diferencia entre los dos espectros es considerable. Por ello, El FAS derivado del RVT es corregido multiplicándolo por el ratio de los dos espectros de respuesta.

$$|Y_{(i+1)}(f)| = \frac{S_a^{RVT}(f)}{S_a^{Obj}(f)} \cdot |Y_i(f)| \quad (26)$$

De esta forma se obtiene un nuevo FAS del movimiento de entrada mejor que el anterior. Se trata de un proceso iterativo y con cada iteración se va mejorando el resultado. En este caso se han realizado dos iteraciones y el espectro de respuesta obtenido del último FAS del movimiento  $Y_3(f)$  se parece mucho al espectro de respuesta tomado como base.

De esta forma el recién definido espectro de potencia se utiliza para obtener factores pico para cada frecuencia.

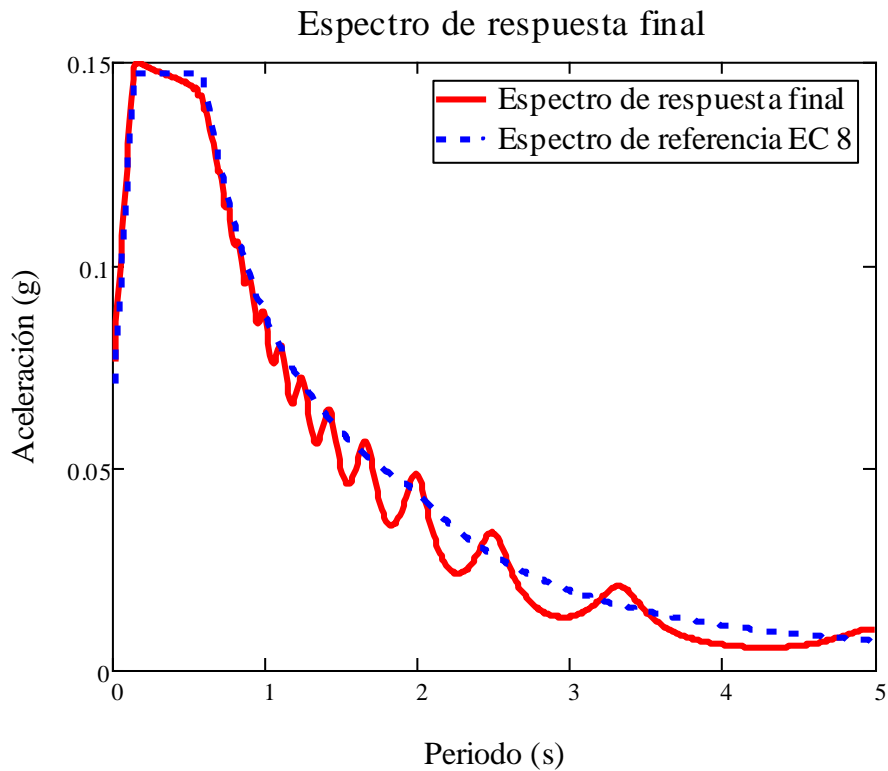


Figura 18. Espectro de respuesta en la tercera iteración (final) del movimiento de entrada

Por último hay que introducir las características que definen el suelo y la transformada que pase del movimiento de entrada en la base del suelo al movimiento de salida en la superficie del terreno.

Las características consideradas son las siguientes:

- Altura del estrato H (se considera generalmente  $H=30\text{m}$ )
- Densidad del suelo  $\rightarrow \rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3$
- Densidad de la roca  $\rightarrow \rho_r = 2500 \text{ kg/m}^3$
- Velocidad de onda en el suelo  $\rightarrow V_s = v_s(1 + i\xi_s)$  (35)
  - $v_s \rightarrow$  parte real de la velocidad de la onda en el suelo (su valor se irá cambiando ya que representa la dureza del terreno, y por lo tanto los distintos tipos de terreno)
  - $\xi_s \rightarrow$  amortiguamiento del suelo (10%)
- Velocidad de onda en el suelo  $\rightarrow V_r = v_r(1 + i\xi_r)$  (36)

- $v_r \rightarrow$  parte real de la velocidad de la onda en la roca (se toma como referencia  $v_r = 800m/s$ , ya que es el que utiliza el Eurocodigo 8)
- $\xi_r \rightarrow$  amortiguamiento del suelo ( se toma como referencia  $\xi_r = 3\%$ )

En cuanto a la función de transferencia, se considera un suelo amortiguado sobre roca elástica, debido a que es el que mejor representa la realidad. Por lo que la función de transferencia utilizada es

$$TF(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{v_s}\right) + i \cdot \alpha \cdot \sin\left(\frac{\omega H}{v_s}\right)} \quad (13)$$

La respuesta del movimiento de salida se obtiene como

$$Y_{out}(f) = Y_3(f) \cdot TF(2\pi f) \quad (37)$$

La siguiente gráfica representa la amplificación que se produce debido al suelo, es decir la amplificación del FAS del movimiento de salida (en la superficie del suelo)  $Y_{out}(f)$  respecto al FAS de entrada corregido  $Y_3(f)$ .

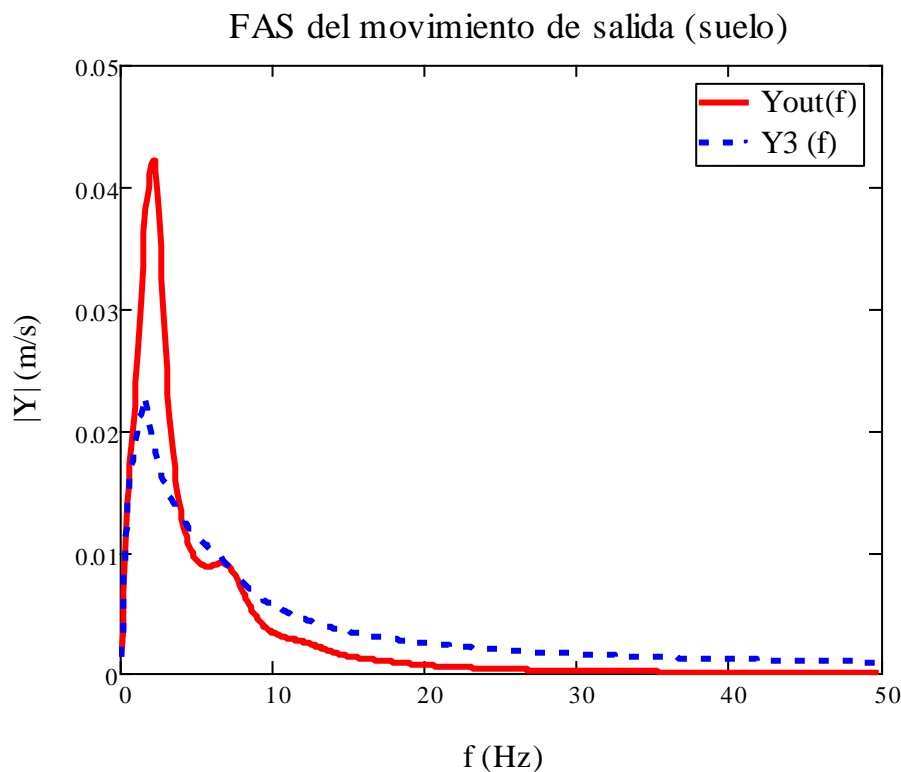


Figura 19. Espectro de amplitud de Fourier del movimiento de salida en la superficie

Con el fin de poder compararlo con los espectros proporcionados por el Eurocódigo para distintos tipos de suelos se obtiene el espectro de potencia del FAS del movimiento de salida.

Como se ha explicado antes el Eurocódigo 8 proporciona dos tipos de espectro de respuesta el tipo 1 y el tipo 2 por lo que se han utilizado ambos como dato de partida y de esta forma poder compararlos. Los terremotos tipo 2 son terremotos de baja magnitud, se producen más cerca por lo que tienen mayor intensidad pero menor duración y en principio son los que mejor se deben adaptar a la situación objeto de estudio.

En los siguientes gráficos se ve cómo cambia la amplificación con la velocidad de onda del suelo que se toma.

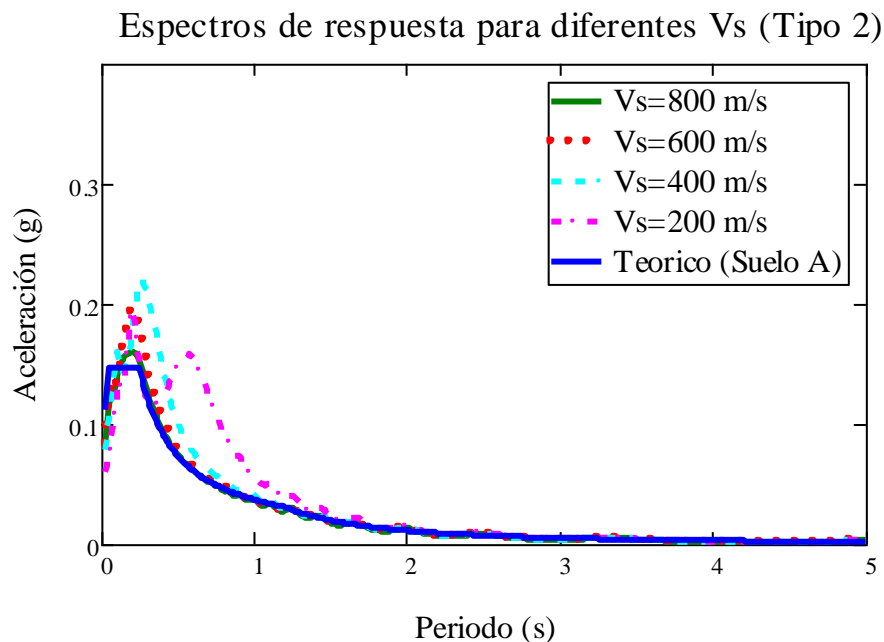


Figura 20. Espectros de respuesta para diferentes velocidades de onda en el suelo tomando como base el espectro Tipo 2 del Eurocódigo.

Como se puede observar para una  $v_s = 800\text{m/s}$  el espectro de respuesta coincide prácticamente con el espectro para un suelo tipo A, es decir el Eurocódigo toma como velocidad de onda de roca  $v_r = 800\text{m/s}$ . Según se va reduciendo la velocidad la respuesta va aumentando, como era de esperar ya que para suelos menos compactos la amplificación es mayor. Sin embargo, para velocidades menores a  $v_s = 400\text{m/s}$  la amplificación en vez de aumentar se reduce, esto se debe a la no linealidad del suelo. Por lo que, este modelo para velocidades de onda bajas no funciona correctamente.

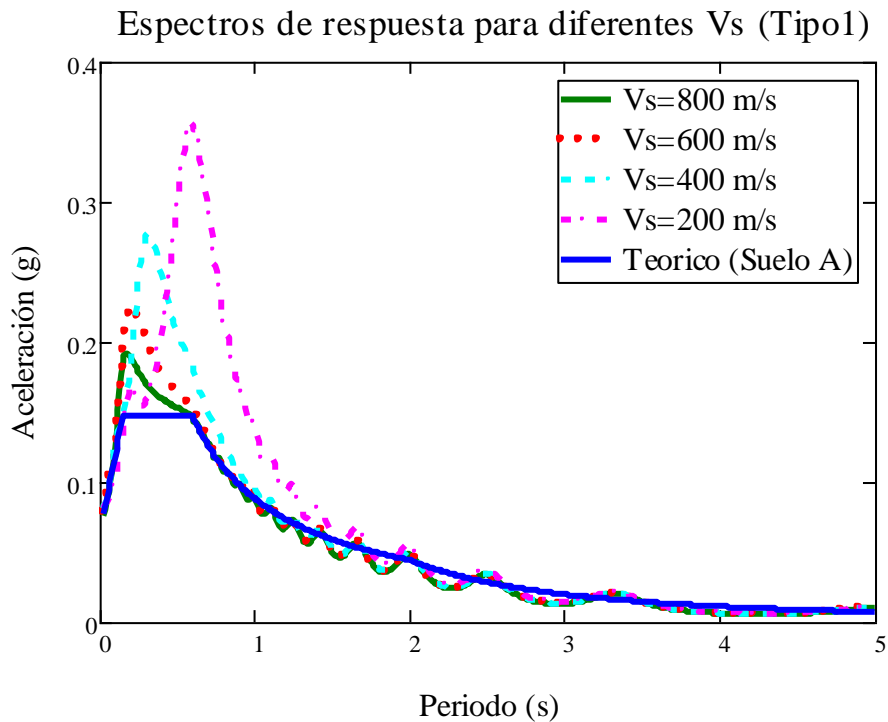


Figura 21. Espectros de respuesta para diferentes velocidades de onda en el suelo tomando como base el espectro Tipo 1 del Eurocódigo.

Si se toma como dato de partida los espectros Tipo 1 se puede observar como para  $v_s = 800\text{m/s}$  no coincide con el proporcionado con el Eurocódigo para suelo A, tan bien como antes. Sin embargo, al ir reduciendo la velocidad de onda se va aumentando la amplificación, obteniendo así la máxima respuesta para un  $v_s = 200\text{m/s}$ .

Con el fin de evaluar mejor los resultados se compara los espectros de respuesta obtenidos con el espectro teórico que le corresponde a la velocidad de onda.

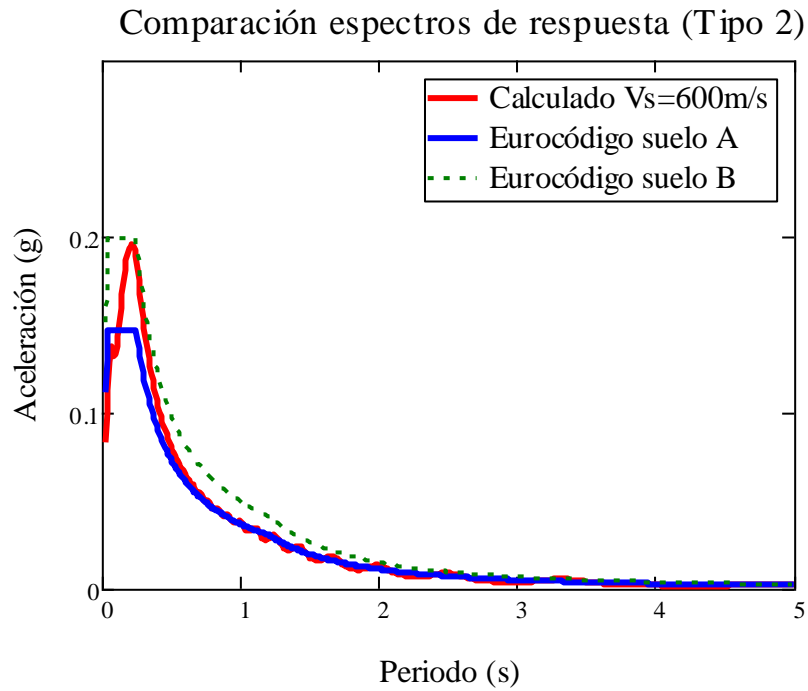


Figura 22. Compara del espectro de respuesta calculado para una velocidad de onda en el suelo de 600m/s y el del Eurocódigo espectro tipo 2 para un suelo tipo B.

Tal y como se puede comprobar tomando los tipo 2 como referencia para una  $v_s = 600\text{m/s}$  se obtiene una espectro de respuesta similar al propuesto por el Eurocódigo.

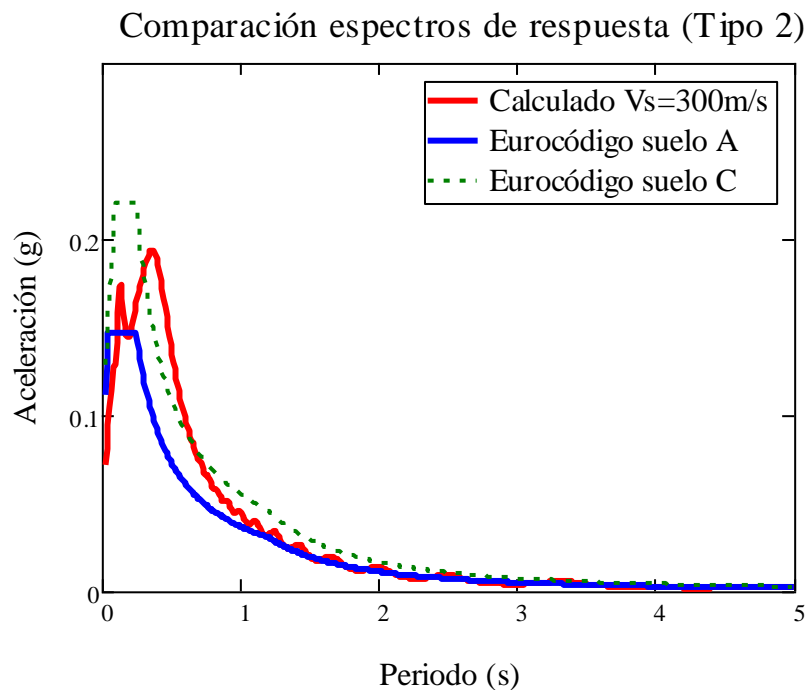


Figura 23. Compara del espectro de respuesta calculado para una velocidad de onda en el suelo de 300m/s y el del Eurocódigo espectro tipo 2 para un suelo tipo C.

Sin embargo para  $v_s = 300m/s$  el resultado es menor al que debería ser según el Eurocódigo, y esto se debe como se ha explicado antes a que para valores bajos de velocidad se obtienen resultados peores

Se realiza la misma comparación tomando como partida el tipo 1

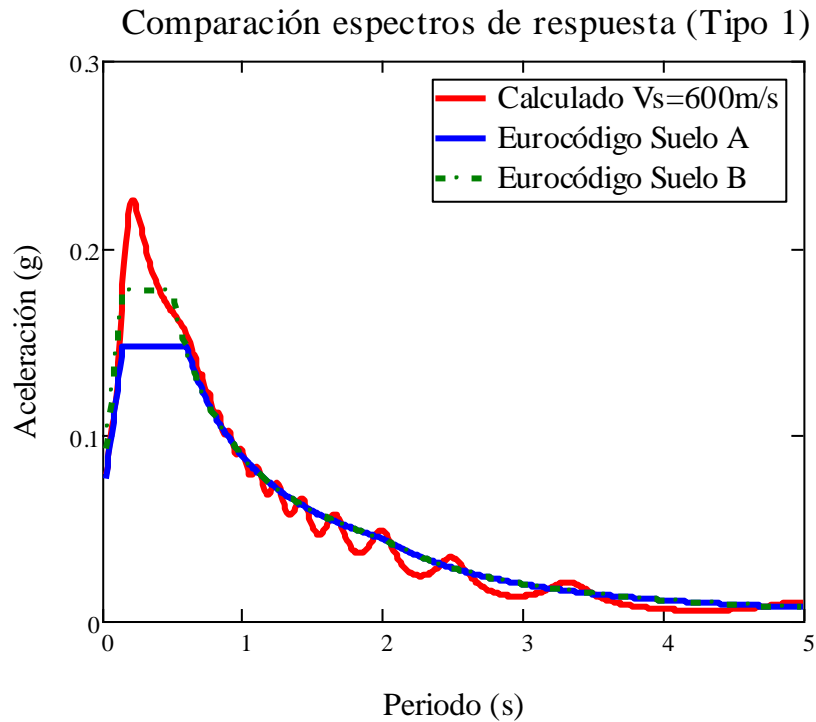


Figura 24. Compara del espectro de respuesta calculado para una velocidad de onda en el suelo de  $600m/s$  y el del Eurocódigo espectro tipo 1 para un suelo tipo B.

Para una velocidad de  $v_s = 600m/s$  la amplificación que se produce es mayor que la que teóricamente debería ser

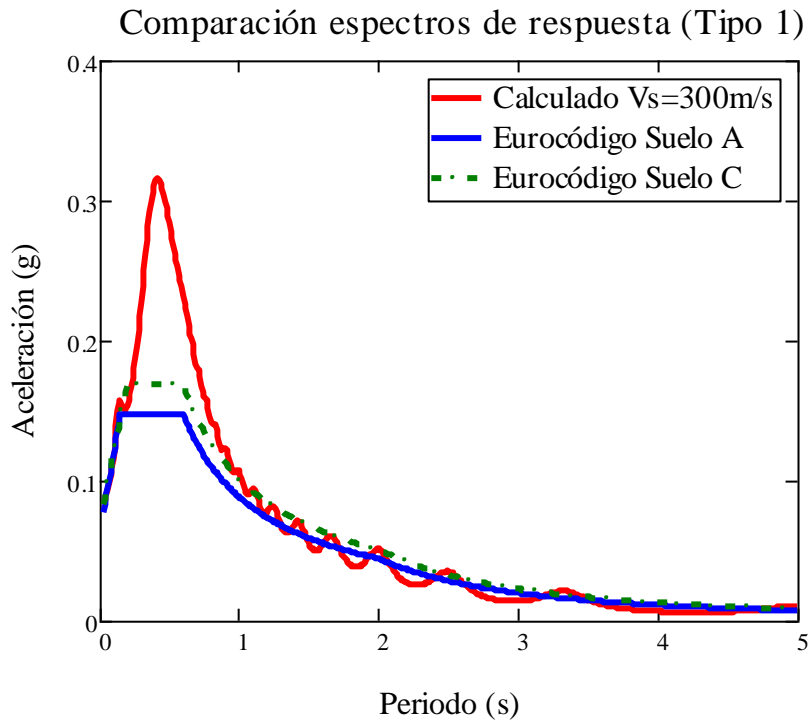


Figura 25. Compara del espectro de respuesta calculado para una velocidad de onda en el suelo de 300m/s y el del Eurocódigo espectro tipo 1 para un suelo tipo C.

Para  $v_s = 300m/s$  el espectro de respuesta obtenido es muy superior al que proporciona el Eurocódigo, por lo que no es aceptable.

Se puede deducir, que los terremotos tipo 2 se adaptan bien para velocidades de onda elevadas pero muy mal para bajas. Los espectros tipo 1 tomados como base producen una amplificación mayor de lo debido. Po lo que, el cálculo lineal no representa bien la realidad y hay que considerar la no linealidad del suelo.

Para todos los cálculos previos se ha utilizado una velocidad de onda en roca  $v_r = 800m/s$ , con el fin de compatibilizarlo con el resultado. Sin embargo, las velocidades de onda de onda en la roca pueden ser más elevadas, por ello se ha representado la influencia que tendría tomar dichas velocidades con un valor mayor.

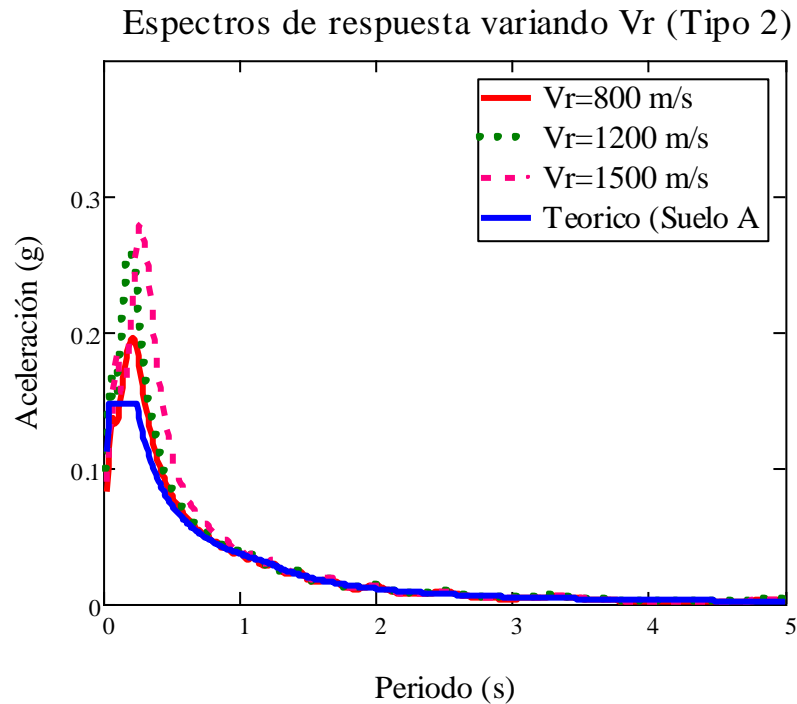


Figura 26. Espectros de respuesta para una velocidad de onda de suelo de 600m/s variando la velocidad de onda en roca.

Tal y como se puede apreciar, al aumentar la velocidad de onda en roca aumenta la amplificación producida por el suelo, y esto se debe a que aumenta el contraste de impedancias entre el suelo y la roca.

### **Cálculo lineal-equivalente**

Tal y como se ha dicho anteriormente, en el cálculo lineal-equivalente, la respuesta no lineal del suelo es aproximada mediante la modificación de las propiedades elásticas lineales del suelo en base al nivel de tensiones inducido. Para este caso, únicamente se ha tomado como espectro de partida el tipo 2 proporcionado por el Eurocódigo, ya que en teoría se adapta mejor.

El proceso es el siguiente

Las operaciones realizadas hasta obtener el FAS de la respuesta de entrada mejorada  $Y_3(f)$  son iguales que en el caso lineal.

La primera diferencia es que se ha de definir la reducción de la rigidez con la tensión como curva de reducción del ratio  $G/G_{max}$ , que en este tramo se ha definido por tramos.

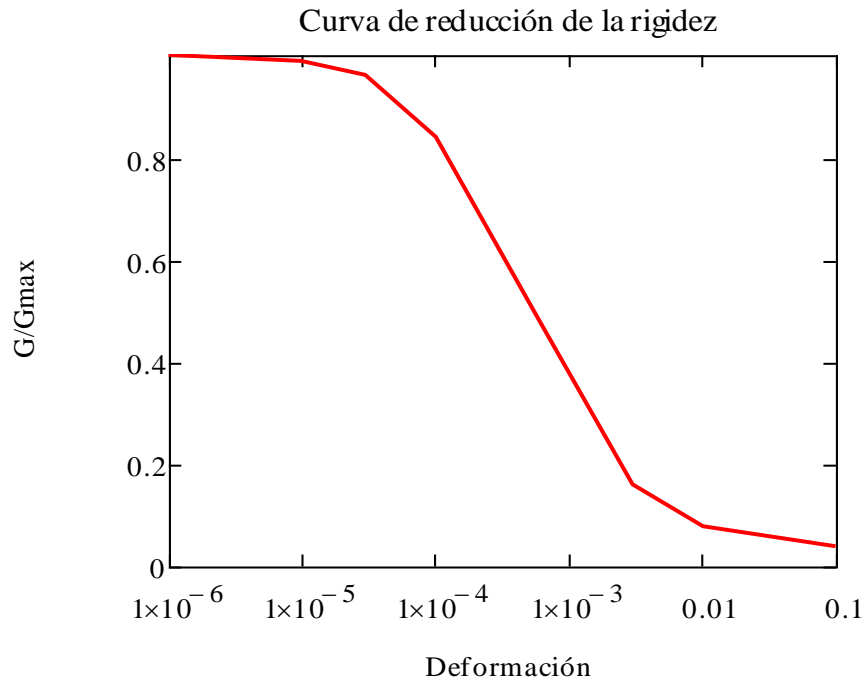


Figura 27. Curva de degradación del módulo de elasticidad transversal.

Así mismo, se define la curva de amortiguamiento del suelo, en función del nivel de tensiones.

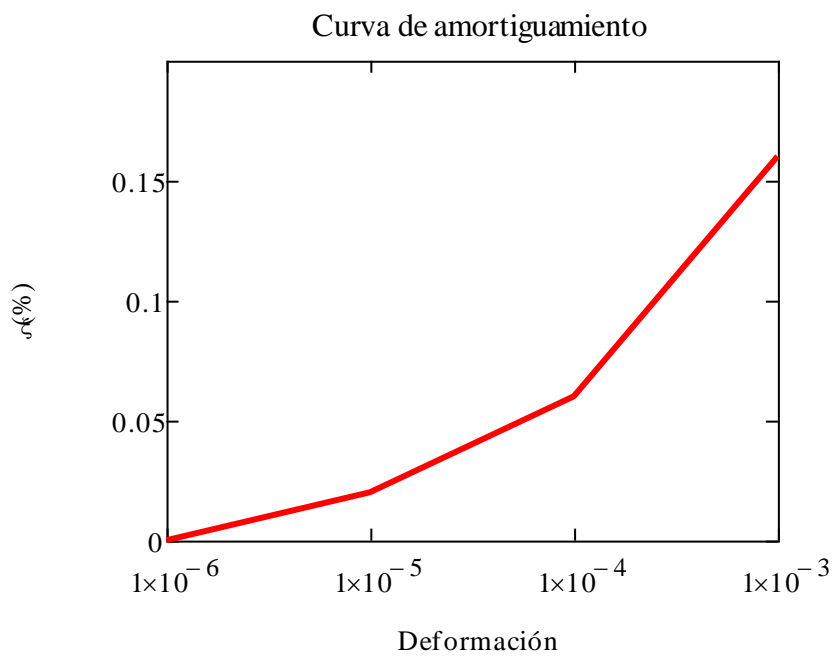


Figura 28. Curva de amortiguamiento.

A continuación, para un primer cálculo en el que se desconoce el nivel de tensiones actuante, se definen las propiedades del suelo, tal y como se definieron para el cálculo no lineal, con el fin de obtener una primera respuesta en superficie y poder iterar conociendo el nivel de tensiones.

Se define también el módulo de elasticidad transversal, tanto del suelo, como de la roca

$$G_r = \rho_r \cdot V_r^2 \quad (38)$$

$$G_s = \rho_s \cdot V_s^2 \quad (39)$$

Con el fin de obtener un cálculo más preciso se divide el suelo en estratos de altura  $H/8$ , es decir se crean 8 estratos y se definen las propiedades entre límites de estratos siendo el primero la superficie del suelo y el último la roca (se da las propiedades en diez puntos los nueve primeros tienen las mismas características, por que el suelo no cambia, y el último tiene las de la roca)

$$G = \begin{pmatrix} G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_s \\ G_r \end{pmatrix} \quad (40) \quad \xi = \begin{pmatrix} \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_s \\ \xi_r \end{pmatrix} \quad (41)$$

Con estas propiedades se obtiene la transformada entre la base de roca y la superficie del suelo, y multiplicando esta transformada por el FAS del movimiento de entrada se obtiene el FAS de la respuesta del suelo en superficie

$$Y_{out}(f) = Y_3(f) \cdot TF \quad (42)$$

Para calcular la deformación tangencial en el estrato en función del movimiento de entrada en el afloramiento, se utiliza una función de transferencia. La tensión tangencial se toma en el medio del estrato. Esta función de transferencia de tensión amplifica el movimiento y convierte la aceleración en tensión.

$$TF_{no-lineal} = \frac{ik_m^* \left( A_m \cdot e^{\left(\frac{ik_m^* h_m}{2}\right)} - B_m \cdot e^{\left(-\frac{ik_m^* h_m}{2}\right)} \right)}{-2A_n \omega^2} \quad (16)$$

Multiplicando dicha transformada por el FAS de la respuesta del suelo en superficie se obtiene la tensión

$$\gamma = TF_{no-lineal} \cdot Y_{out}(f) \quad (43)$$

Ahora se obtiene la tensión máxima obteniendo el factor de pico por la teoría de vibraciones aleatorias.

$$\gamma_{max} = PF \cdot \gamma_{rms} \quad (44)$$

La tensión efectiva será el 65% de la tensión máxima.

$$\gamma_{eff} = 0,65 \cdot \gamma_{max} \quad (45)$$

Al tener la tensión efectiva en el puto medio de cada estrato se puede obtener una distribución de la tensión en función de la profundidad.

También se puede utilizar la curva de degradación de la rigidez y la curva de amortiguamiento anteriormente definidas para obtener las propiedades en cada estrato en función del nivel de tensiones.

Una vez calculadas las propiedades en función de la tensión actuante, se vuelve a calcular la transformada entre la roca y la superficie del suelo y se multiplica por el FAS de entrada para calcular el de salida.

$$Y_{out2}(f) = Y_3(f) \cdot TF_2 \quad (46)$$

Con esta respuesta se vuelve a calcular la tensión eficaz y con el fin de obtener un resultado mejor se vuelve a iterar y así se obtiene la a respuesta y la tensión eficaz final. Se considera que con tres iteraciones se obtiene resultado aceptable.

En las siguientes gráficas se muestra la evolución tanto de la respuesta como de la tensión eficaz con el paso de las iteraciones.

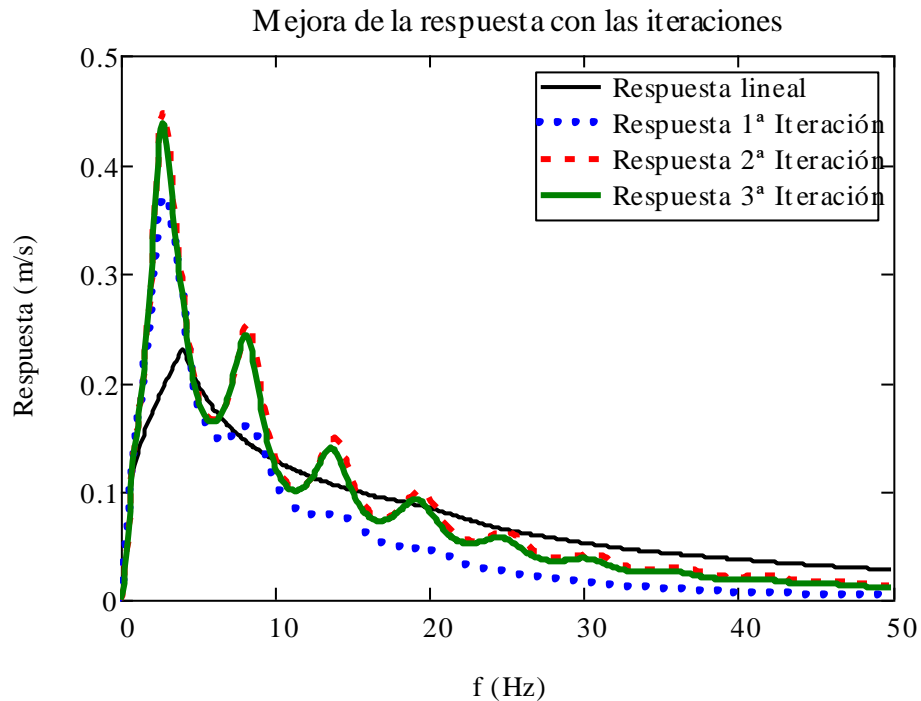


Figura 29. Variación del espectro de amplitud de Fourier de salida en la superficie para cada iteración

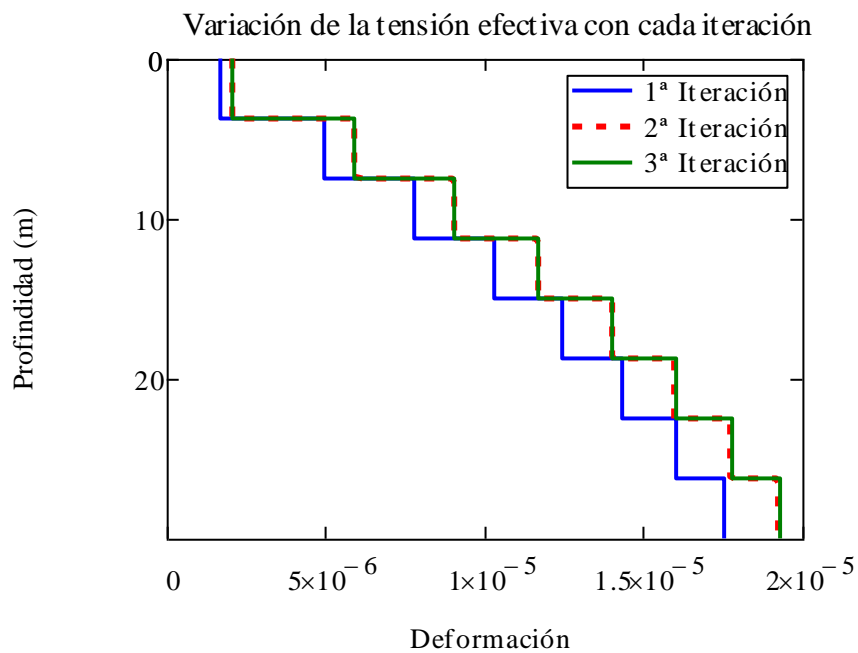


Figura 30. Variación de la deformación con la profundidad para cada una de las tres iteraciones.

Como se puede apreciar la diferencia entre la segunda y la tercera iteración es mínima.

Por último con la respuesta final se puede obtener el espectro de respuesta del movimiento del suelo en superficie, para poder compararlo con los valores proporcionados por el Eurocódigo.

Ahora se va a calcular los espectros de respuesta obtenidos por este modelo para diferentes velocidades de onda, con el teórico que propone el Eurocódigo para dicha velocidad.

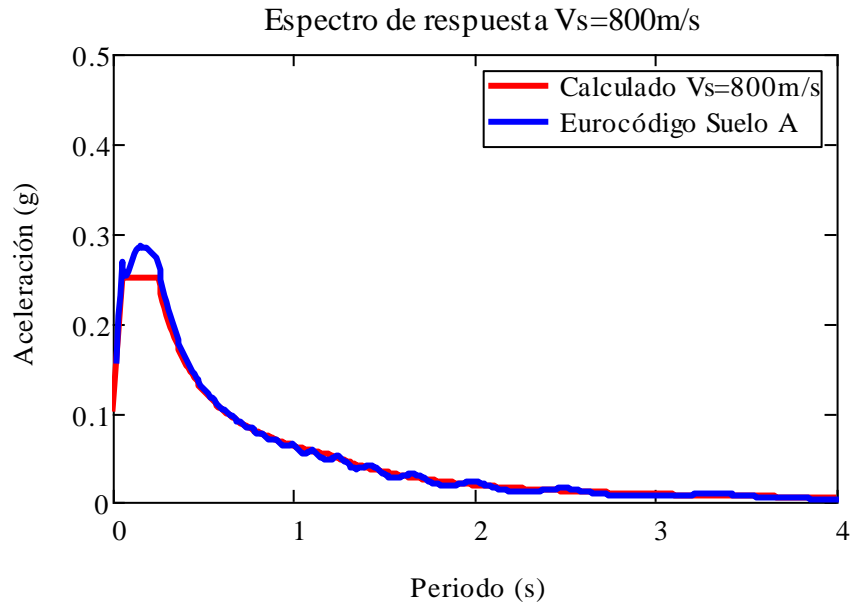


Figura 31. Comparación entre el espectro de respuesta calculado en la superficie para una velocidad de onda en el suelo de 800m/ y el proporcionado por el eurocódigo para un suelo A.

Para una velocidad  $v_s = 800m/s$ , al igual que antes el espectro de respuesta calculado coincide con el de suelo tipo A proporcionado por el Eurocódigo.

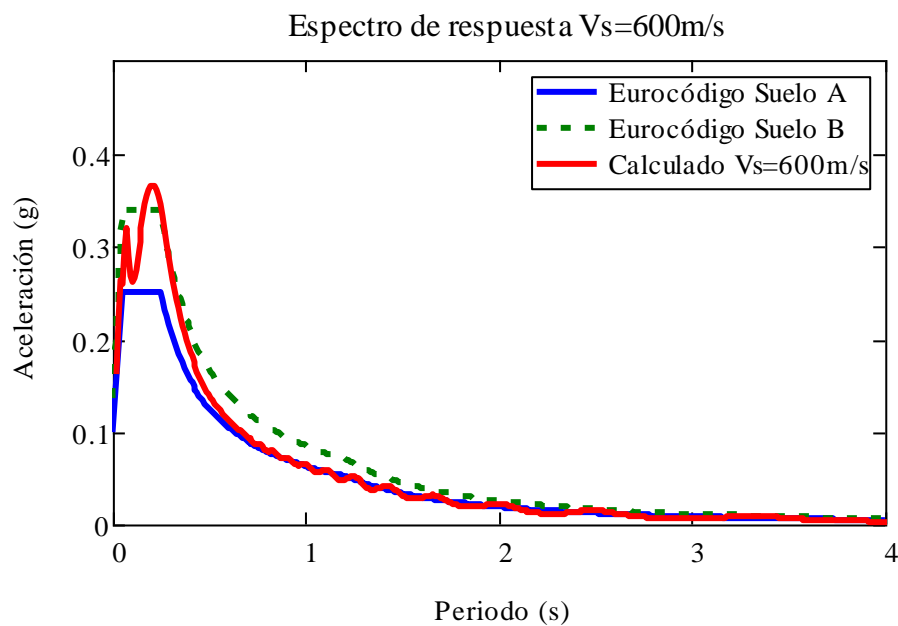


Figura 32. Comparación entre el espectro de respuesta calculado en la superficie para una velocidad de onda en el suelo de 600m/ y el proporcionado por el eurocódigo para un suelo B.

Para una velocidad  $v_s = 600\text{m/s}$  el espectro calculado coincide bastante con el propuesto por el Eurocódigo para suelo B. Sin embargo, se puede apreciar que aparecen dos picos y esto es debido a que se representa tanto el primero como el segundo modo de vibración.

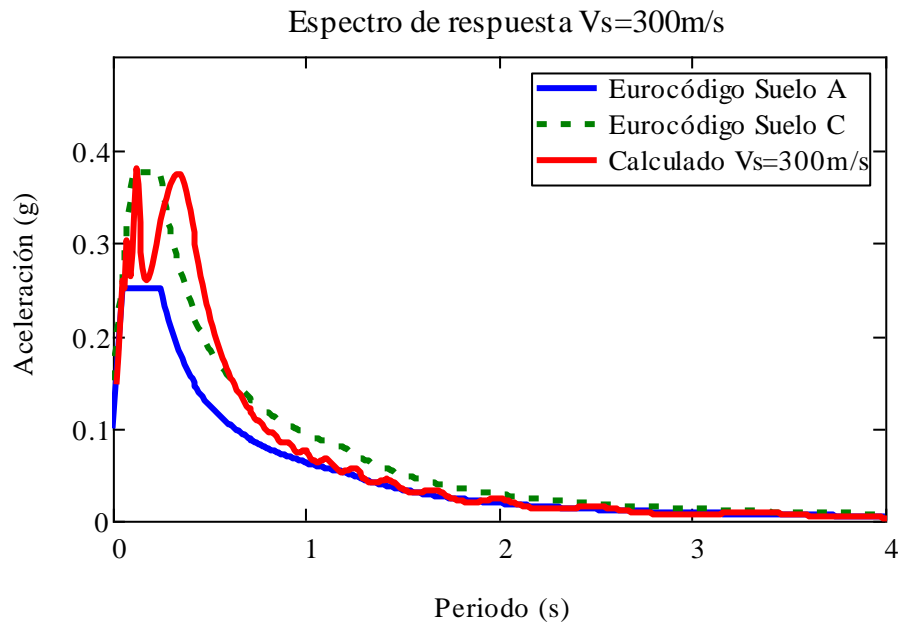


Figura 33. Comparación entre el espectro de respuesta calculado en la superficie para una velocidad de onda en el suelo de  $300\text{m/s}$  y el proporcionado por el Eurocódigo para un suelo C.

Por último, para una velocidad  $v_s = 300\text{m/s}$ , al igual que antes se representan los dos modos de vibración. Sin embargo, el resultado es bastante bueno y se adapta con bastante exactitud al propuesto por el Eurocódigo. Al obtener un resultado tan favorable para una velocidad de onda baja, que eran las que en el método lineal habían dado problemas, se puede decir que el método lineal equivalente representa bastante bien la realidad.

## 8 CONCLUSIONES

El comportamiento dinámico de los estratos del terreno más superficiales es crítico en la amplificación dinámica de la respuesta sísmica. El principal factor que se ha analizado en este trabajo es el valor de dicha amplificación en función del tipo de suelo. Cuanto menos compacto sea el suelo la amplificación de la señal sísmica, tal y como se preveía, ha sido mayor. Las características que dependen en la amplificación son las siguientes:

- Velocidad de onda en el suelo, como se ha comentado cuanto menor velocidad de onda (suelo menos compacto) mayor amplificación.
- Potencia del estrato, al aumentar ésta como es lógico también aumentara la amplificación debida al suelo.
- Velocidad de onda en la roca, al aumentar se aumenta el contraste de impedancias entre el suelo y la roca, produciendo así una mayor amplificación. Se ha podido observar que el Eurocódigo toma como referencia un valor de 800m/s (es el valor que se ha empleado para comparar espectro de respuesta), sin embargo en base a diferentes estudios este valor puede ser bajo y también se ha calculado respuestas para velocidades mayores.

En cuanto a la fiabilidad del método propuesto se pueden sacar diversas conclusiones:

- El análisis lineal, sólo funciona bien para suelos con velocidad de onda elevadas, ya que para velocidades pequeñas no representa correctamente la realidad (amplificaciones demasiado elevadas o demasiado bajas). Esto es debido a que las características del suelo no son constantes y cambian en función del nivel de deformaciones.
- El análisis lineal equivalente representa la respuesta real esperada con mucha mayor exactitud y el único problema es que se representan los dos primeros modos de vibración. Para una representación mejor se debería usar un análisis no lineal, que incrementaría mucho la complejidad, por ello con un análisis lineal equivalente en la mayoría de los casa será suficiente.

El hecho de trabajar en todo momento en el dominio de la frecuencia, ha permitido utilizar una metodología cómoda y relativamente sencilla, sin la necesidad de emplear programas alternativos que construyan acelerogramas compatibles. Además ha servido para analizar una forma de trabajo distinta a la habitual.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Eurocódigo 8 " Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes": Parte 1-1 "Reglas generales. Acciones sísmicas y requisitos generales de las estructuras.
- Norma de la construcción sismorresistente española. NCSE-02.
- Steven L. Kramer (1996) "*Geotechnical Earthquake Engineering*", Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Albert R. Kottke and Ellen M. Rathje (2009) "*Technical Manual for Strata*", University of Texas (Austin)
- Belén Benito y Luis Cabañasv (1999) "*Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica*", Física de la Tierra vol. 11.
- Sonia Álvarez Rubio (1999) "*El efecto Local sobre el Movimiento Sísmico del Suelo: Fenomenología y Resultado Recientes*" Física de la Tierra vol. 11.
- Gustavo Hernández Ruíz (2007) "Análisis comparativo de los espectros de diseño y de los acelerogramas reales. Aplicación a España y Europa" Tesis presentada en E.T.S.I.C.C.P. de Barcelona.
- Ioannis N. Psycharis "*Site effects on ground motion*", National Technical University of Athens.
- E. Alarcón (1989) "*Respuesta Dinámica de Suelos*", Física de la Tierra vol. 1.
- Montse Rodríguez Segurado (2005) "*Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos Aplicación a la Ciudad de Barcelona*" Tesis presentada en E.T.S.I.C.C.P. de Barcelona.
- Saeed V. Vaseghi (2008) "*Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*", John Wiley & Sons.
- Gökçe Tönük, Atilla Ansal, Barbaros Çetiner "*Site specific response analysis for performance based design earthquake characteristics*", Bogazici University (Istanbul).
- J. P. Walf (1985): *Dynamic of soil-structure interaction*. Prentice-Hall.