

INFLUENZA DEGLI SPETTRI DI ACCELERAZIONE NELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Romolo Di Francesco & Francesco Pisante (gennaio 2011)

Con gli articoli dedicati alla “**Risposta Sismica Locale**” sono stati affrontati i vari aspetti connessi con la definizione delle azioni sismiche secondo le NTC 2008, confrontandoli nel contempo con gli effetti di sito reali e la loro modellazione mediante equazioni a complessità crescente. In sintesi, gli aspetti salienti toccati sono stati:

- 1) *Parte I – definizione e concetti*: previsioni normative; scoperta della risposta sismica locale; modelli concettuali; relazione di Okamoto; equazione monodimensionale;
- 2) *Parte II – un viadotto risonante*: esempio applicativo relativo ad un caso reale;
- 3) *Parte III – analisi sismica territoriale*: esempio relativo alla città di Teramo e confronto con gli effetti dovuti al successivo sisma del 6 aprile 2009;
- 4) *Parte IV: terremoti e monumenti nell’antica Roma*: il Colosseo; le Colonne Traiana e di Marco Aurelio; riflessioni sull’interazione terreno – struttura in prospettiva sismica.

Limitando in tale sede l’argomento alle sole problematiche normative occorre ricordare che il punto di partenza è rappresentato dall’individuazione della categoria di sottosuolo (*par. 3.2.2: categorie di sottosuolo e condizioni topografiche*), derivabile dalla preliminare definizione della $V_{s,30}$, e della categoria topografica, conducendo in definitiva alla costruzione degli **spettri di risposta elastica in accelerazione** (*par. 3.2.3: valutazione dell’azione sismica*) da introdurre nella progettazione di strutture sismoresistenti; tutti elementi che prendono origine dalla figura 1, relativa alla **categoria di sottosuolo A**, per la quale non si configurano fenomeni di amplificazione sismica locale.

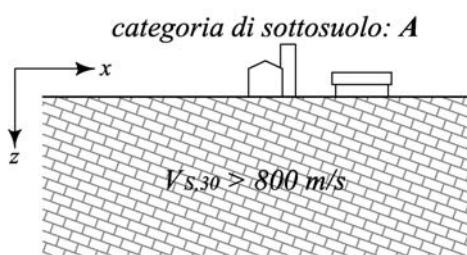
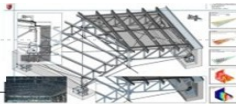


Figura 1. Geometria di riferimento per la definizione del fenomeno dell’amplificazione sismica
(estratta da: *Geotecnica, guida pratica alla luce delle nuove NTC*)

La norma, nel contempo, non risulta affatto limitata a tali aspetti, come potrebbe risultare da una lettura superficiale, considerato che invoca anche analisi più complesse basate su modellazioni 1D e 2D mediante il ricorso ad accelerogrammi reali registrati rappresentativi della sismicità locale (*par. 7.11.3: risposta sismica e stabilità del sito*). Contestualmente, al par. 3.2.3.2.1 (*Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali*) è anche specificato che: “*Per categorie speciali di sottosuolo, per determinati sistemi geotecnici o se si intenda aumentare il grado di accuratezza nella previsione dei fenomeni di amplificazione, le azioni sismiche da considerare nella progettazione possono essere determinate mediante più rigorose analisi di risposta sismica locale. Queste analisi presuppongono un’adeguata conoscenza delle proprietà geotecniche dei terreni e, in particolare, delle relazioni sforzi – deformazioni in campo ciclico, da determinare mediante specifiche indagini e prove. In mancanza di tali determinazioni per le componenti orizzontali del moto e per le categorie di sottosuolo di fondazione definite al par. 3.2.2, la forma spettrale su sottosuolo di categoria A è modificata attraverso il coefficiente stratigrafico S_s , il coefficiente topografico S_T e il coefficiente C_C che modifica il valore del periodo T_C* ”.

Purtroppo, seguendo tali linee procedurali si scopre, come evidenziato nei 4 articoli relativi alla risposta sismica locale, che il punto debole dell’intera metodologia di lavoro è insito proprio nella definizione del contenuto spettrale del terremoto di progetto, la cui influenza nell’analisi dell’interazione terreno – struttura in prospettiva sismica è superiore a quella derivante dagli ulteriori fattori se non addirittura decisiva; senza dimenticare che in caso di analisi più approfondite si sconfinava in un campo appartenente più alla ricerca scientifica che alla pratica professionale.



Infine, approfondendo brevemente l'argomento, dal par. 3.2.3.6 (*impiego di accelerogrammi*) si scopre anche che:

- gli stati limite possono essere verificati mediante l'uso di accelerogrammi artificiali, simulati o naturali;
- la durata degli **accelerogrammi artificiali** (derivanti in pratica dall'utilizzo delle categorie di sottosuolo e topografiche) deve essere stabilita sulla base della magnitudo e degli altri parametri fisici che determinano la scelta del valore dell'accelerazione massima e di S_s . In assenza di studi specifici, se la durata complessiva degli accelerogrammi non deve essere inferiore ai 25 secondi quella della parte stazionaria (porzione orizzontale dello spettro) non deve essere inferiore a 10 secondi, mentre il loro uso non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici;
- l'uso degli **accelerogrammi registrati** è ammesso a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismico resistent della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito. In altre parole occorre una profonda conoscenza non solo della geologia locale ma anche del comportamento della struttura sismico resistent del sito!

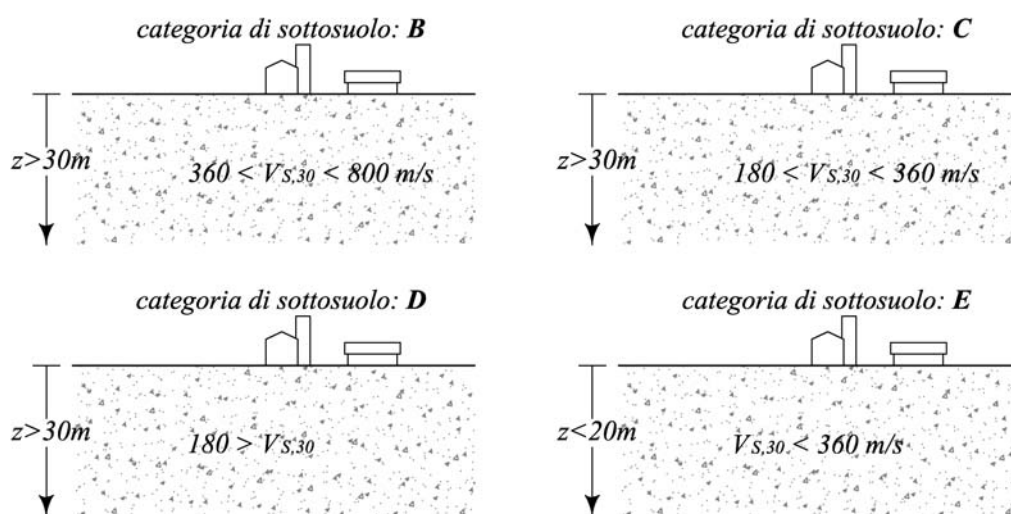


Figura 2. Identificazione delle categorie normative di sottosuolo in funzione degli spessori e delle velocità di propagazione delle onde di taglio.

Nella traduzione di tutti gli elementi introdotti finora si scopre, in buona sostanza, che il dimensionamento strutturale è svolto ricorrendo quasi esclusivamente alla metodologia semplificata basata sulla definizione preliminare delle categorie di sottosuolo e topografiche le quali, con riferimento alla figura 2, conducono ad incrementi delle sollecitazioni sismiche di progetto nella sequenza $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$, tenuto anche conto che la categoria E deriva dalle C e D per spessori inferiori ai 20 metri dei terreni soffici di copertura.

In effetti, le NTC 2008 prevedono la costruzione degli spettri di accelerazione mediante il seguente set di equazioni:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \quad \text{se: } 0 \leq T \leq T_B \quad (1)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \quad \text{se: } T_B \leq T \leq T_C \quad (2)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \quad \text{se: } T_C \leq T \leq T_D \quad (3)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right) \quad \text{se: } T_D \leq T \quad (4)$$

nelle quali compaiono la massima accelerazione orizzontale al suolo a_g (a sua volta funzione delle coordinate del sito), il coefficiente S , che tiene conto delle categorie di sottosuolo e topografiche, il fattore di smorzamento η , il fattore di amplificazione F_0 e i periodi T_B , T_C e T_D corrispondenti al tratto orizzontale.



Osservando tali equazioni appare evidente che **tra il coefficiente S e l'accelerazione spettrale S_e esiste un rapporto di proporzionalità**, tale da consentire un'analisi del fenomeno limitando l'attenzione all'influenza delle categorie di sottosuolo, dal momento che vale:

$$S = S_S \cdot S_T \quad (5)$$

A sua volta nell'equazione (5) compaiono i coefficienti S_S ed S_T , i quali possono essere desunti dalle seguenti tabelle 3.2.V e 3.2.VI (figura 3), estratte dalle NTC 2008, risultando anch'essi direttamente proporzionali ad S_e .

| Categoria sottosuolo | S_S | C_C |
|----------------------|---|------------------------------|
| A | 1,00 | 1,00 |
| B | $1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$ | $1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$ |
| C | $1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$ | $1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$ |
| D | $0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$ | $1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$ |
| E | $1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$ | $1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$ |

| Categoria topografica | Ubicazione dell'opera o dell'intervento | S_T |
|-----------------------|--|-------|
| T1 | - | 1,0 |
| T2 | In corrispondenza della sommità del pendio | 1,2 |
| T3 | In corrispondenza della cresta del rilievo | 1,2 |
| T4 | In corrispondenza della cresta del rilievo | 1,4 |

Figura 3. Tabelle relative alla categorie di sottosuolo e topografiche (estratte da: DM 14.01.2008)

Tenendo ben presenti tali elementi è possibile limitare l'analisi alla sola tabella relativa alle categorie di sottosuolo, utilizzando ad esempio la categoria topografica T1 per quale vale un coefficiente $S_T = 1$; in questo modo si scopre che il passaggio dalla categoria di riferimento A ($S_S = 1$, ossia assenza di amplificazione) verso le categorie superiori B, C e D conduce ad un progressivo incremento dell'amplificazione sismica, con la sola eccezione della categoria E che, posta in posizione inizialmente intermedia tra la C e la D tende ad intersecare quest'ultima con il crescere del prodotto $F_0 \times a_g$ (figura 4 estratta dalla Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 del C.S.LL.PP.).

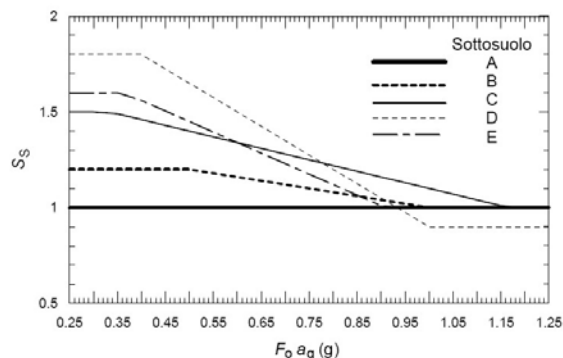
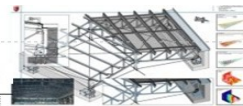


Figura 4. Tabella relativa alla variazione del coefficiente di amplificazione (S_S , estratto da: Circolare n. 617 del 02.02.2009)

Non resta che applicare tali elementi alle stratigrafie di riferimento per le varie categorie di sottosuolo, confrontando infine i risultati ottenuti con i modelli derivanti dall'utilizzo dell'equazione monodimensionale illustrata nell'articolo "Risposta sismica locale: parte I – definizione e concetti".

Quindi, al fine di pervenire ad elementi di riscontro, sono state ipotizzate le seguenti stratigrafie:



- 1) strato di spessore di 30 metri a velocità $V_S = 400$ m/s (**categoria B monostrato**);
- 2) strato di spessore di 15 metri a velocità $V_S = 300$ m/s sovrastante strato di spessore di 15 metri a velocità $V_S = 500$ m/s (**categoria B a due strati**);
- 3) strato di spessore di 30 metri a velocità $V_S = 300$ m/s (**categoria C monostrato**);
- 4) strato di spessore di 15 metri a velocità $V_S = 200$ m/s sovrastante strato di spessore di 15 metri a velocità $V_S = 400$ m/s (**categoria C a due strati**);
- 5) strato di spessore di 30 metri a velocità $V_S = 150$ m/s (**categoria D monostrato**);
- 6) strato di spessore di 15 metri a velocità $V_S = 120$ m/s sovrastante strato di spessore di 15 metri a velocità $V_S = 180$ m/s (**categoria D a due strati**);
- 7) strato di spessore di 20 metri a velocità $V_S = 400$ m/s sovrastante un substrato a $V_S > 800$ m/s (**categoria E monostrato**);
- 8) strato di spessore di 10 metri a velocità $V_S = 300$ m/s sovrastante strato di spessore di 10 metri a velocità $V_S = 500$ m/s e con sottostante substrato a $V_S > 800$ m/s (**categoria E a due strati**),
avendo ipotizzato un sito per al quale corrisponde un'accelerazione orizzontale $a_g = 0.11$ m/s².

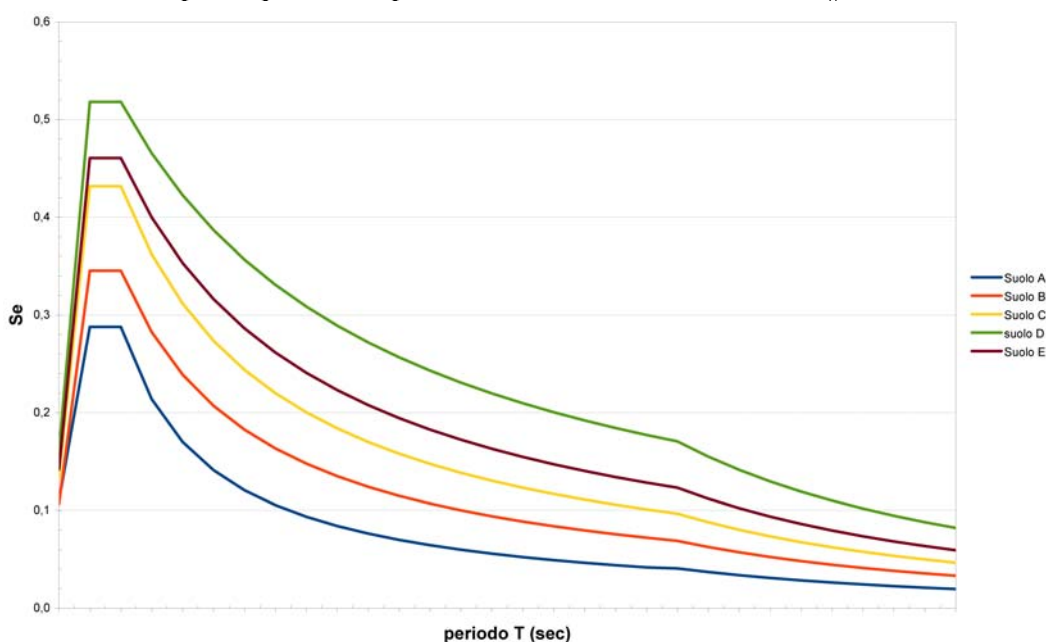


Figura 5. Spettri di accelerazione relativi alle diverse categorie di sottosuolo per un sito con $a_g = 0.11$ m/s².

Nel caso degli spettri di accelerazione normativi relativi ai soli casi monostrato (1, 3, 5, 7) sono stati ottenuti dapprima i seguenti **coefficienti S**, **1_A**, **1.2_B**, **1.5_C**, **1.8_D**, **1.6_E** con i pedici relativi alle diverse categorie di sottosuolo, e successivamente gli spettri di progetto riprodotti nella figura 5; notare, innanzitutto, che lo spettro di accelerazione relativo alla categoria D sovrasta tutti gli altri e che le massime accelerazioni spettrali orizzontali di progetto sono risultate:

- categoria B: $S_e = 0.35$ m/s²
- categoria C: $S_e = 0.43$ m/s²
- categoria D: $S_e = 0.52$ m/s²
- categoria E: $S_e = 0.46$ m/s²

ricordando che gli stessi sono validi solo per strutture aventi periodo fondamentale inferiore a 4 secondi (par. 3.2.3.2 – $f_1 > 0.25$ Hz). Per strutture con periodo fondamentale superiore le norme impongono, invece, la definizione dell'azione sismica mediante l'uso degli accelerogrammi.

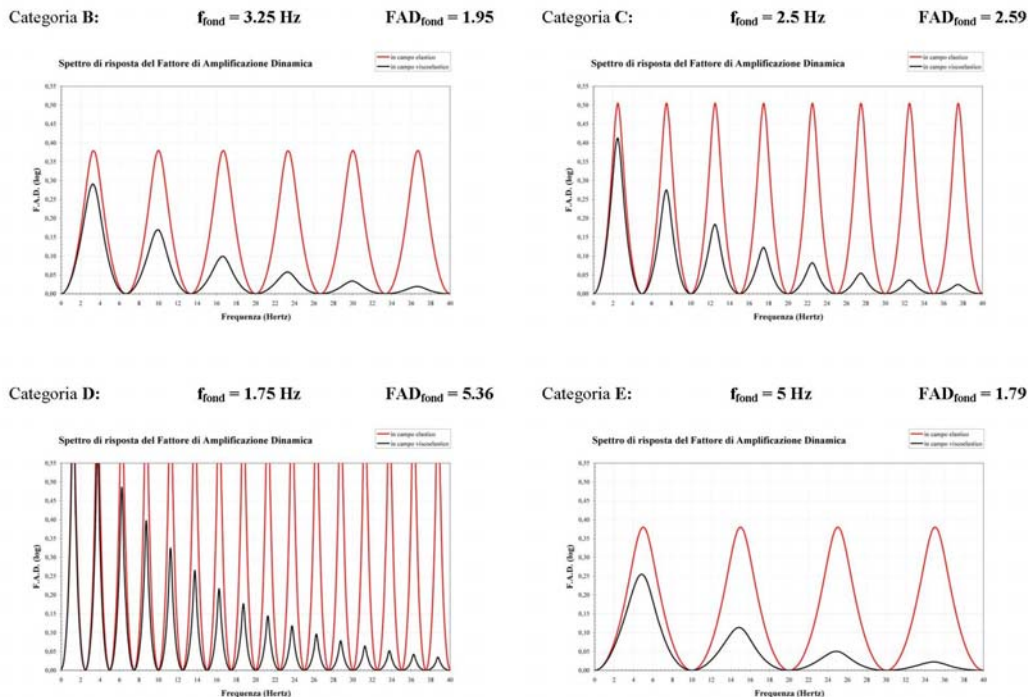
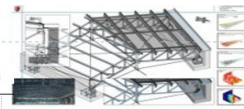


Figura 6. Spettri di amplificazione dinamica 1D in campo elastico e viscoelastico calcolati per le medesime condizioni di cui alla figura 5.

A loro volta, le simulazioni mediante il modello 1D hanno invece fornito gli spettri di amplificazione dinamica di cui alla figura 6, dai quali si evince che in campo elastico vale:

- categoria B: $f_1 = 3.25 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.308 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.39$ - $S_e = 0.26 \text{ m/s}^2$
- categoria C: $f_1 = 2.50 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.400 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 3.20$ - $S_e = 0.35 \text{ m/s}^2$
- categoria D: $f_1 = 1.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.571 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 6.40$ - $S_e = 0.70 \text{ m/s}^2$
- categoria E: $f_1 = 5.00 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.200 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.40$ - $S_e = 0.26 \text{ m/s}^2$

mentre in campo viscoelastico:

- categoria B: $f_1 = 3.25 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.308 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 1.95$ - $S_e = 0.21 \text{ m/s}^2$
- categoria C: $f_1 = 2.50 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.400 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.59$ - $S_e = 0.28 \text{ m/s}^2$
- categoria D: $f_1 = 1.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.571 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 5.36$ - $S_e = 0.59 \text{ m/s}^2$
- categoria E: $f_1 = 5.00 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.200 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 1.79$ - $S_e = 0.20 \text{ m/s}^2$

Confrontando infine le accelerazioni massime ottenute con i due metodi:

- categoria B: $S_{e,norm} = 0.35 \text{ m/s}^2$ > $S_{e,model} = 0.26 \text{ m/s}^2$
- categoria C: $S_{e,norm} = 0.43 \text{ m/s}^2$ > $S_{e,model} = 0.35 \text{ m/s}^2$
- categoria D: $S_{e,norm} = 0.52 \text{ m/s}^2$ < $S_{e,model} = 0.70 \text{ m/s}^2$
- categoria E: $S_{e,norm} = 0.46 \text{ m/s}^2$ > $S_{e,model} = 0.26 \text{ m/s}^2$

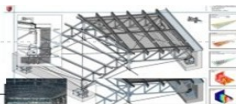
si scopre che solo nella categoria di sottosuolo D si assiste ad accelerazioni normative inferiori a quelle modellate con l'equazione monodimensionale.

È evidente, dall'esempio proposto, che gli spettri normativi di accelerazione sono vincolati, oltre che al valore di a_g , alla categoria di sottosuolo mentre quelli di accelerazione modellati dipendono dalle impedenze caratteristiche dei terreni soffici amplificanti e dall'articolazione della stratigrafia.

Di fatti, nel caso di strutture a due strati (casi 2, 4, 6, 8 e figura 7) i risultati in campo elastico dei modelli sono stati:

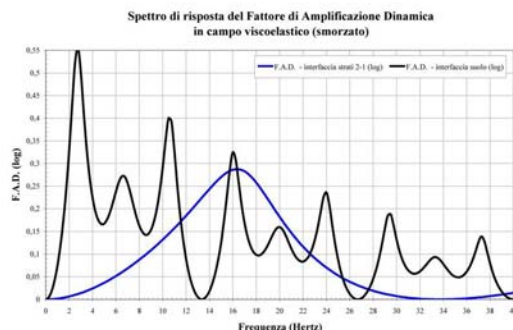
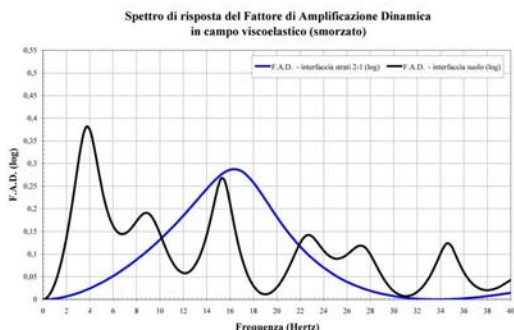
- categoria B: $f_1 = 3.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.267 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.78$ - $S_e = 0.31 \text{ m/s}^2$
- categoria C: $f_1 = 2.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.364 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 4.18$ - $S_e = 0.46 \text{ m/s}^2$
- categoria D: $f_1 = 1.25 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.800 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 5.19$ - $S_e = 0.57 \text{ m/s}^2$
- categoria E: $f_1 = 5.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.174 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.79$ - $S_e = 0.31 \text{ m/s}^2$

mentre in campo viscoelastico:



- categoria B: $f_1 = 3.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.267 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.41$ - $S_e = 0.27 \text{ m/s}^2$
- categoria C: $f_1 = 2.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.364 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 3.60$ - $S_e = 0.40 \text{ m/s}^2$
- categoria D: $f_1 = 1.25 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.800 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 4.79$ - $S_e = 0.53 \text{ m/s}^2$
- categoria E: $f_1 = 5.75 \text{ Hz}$ - $T_1 = 0.174 \text{ sec}$ - $FAD_1 = 2.25$ - $S_e = 0.25 \text{ m/s}^2$

Categoria B: $f_{\text{fond}} = 3.75 \text{ Hz}$ $FAD_{\text{fond}} = 2.41$ Categoria C: $f_{\text{fond}} = 2.75 \text{ Hz}$ $FAD_{\text{fond}} = 3.6$



Categoria D: $f_{\text{fond}} = 1.25 \text{ Hz}$ $FAD_{\text{fond}} = 4.79$ Categoria E: $f_{\text{fond}} = 5.75 \text{ Hz}$ $FAD_{\text{fond}} = 2.25$

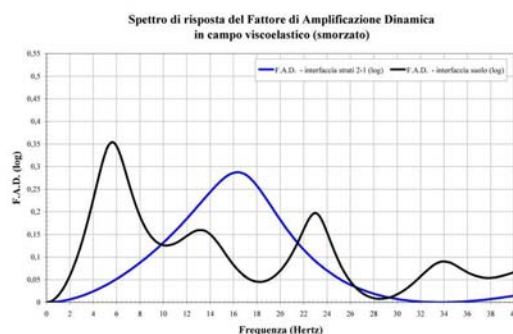
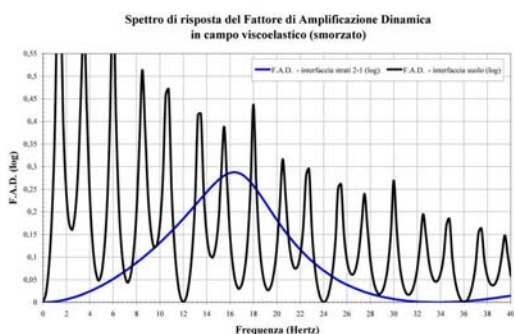


Figura 7. Spettri di amplificazione dinamica 1D in campo elastico e viscoelastico calcolati per strutture di sottosuolo a tre strati.

Nuovamente, dal confronto tra i due metodi:

- categoria B: $S_{e,norm} = 0.35 \text{ m/s}^2$ > $S_{e,model} = 0.31 \text{ m/s}^2$
- categoria C: $S_{e,norm} = 0.43 \text{ m/s}^2$ < $S_{e,model} = 0.46 \text{ m/s}^2$
- categoria D: $S_{e,norm} = 0.52 \text{ m/s}^2$ < $S_{e,model} = 0.57 \text{ m/s}^2$
- categoria E: $S_{e,norm} = 0.46 \text{ m/s}^2$ > $S_{e,model} = 0.31 \text{ m/s}^2$

risulta che le accelerazioni normative sono ora inferiori a quelle modellate anche nel caso della categoria C.

Sintetizzando, infine, tali risultati si giunge alle medesime conclusioni già evidenziate nella prima parte degli articoli dedicati alla risposta sismica locale ovvero che "l'utilizzo dei parametri di progetto previsti nelle NTC 2008 non consente una trattazione esaustiva dell'argomento dal momento che pur adottando i coefficienti più restrittivi, applicati ad esempio a punti di riferimento del territorio aquilano, si ottiene una massima accelerazione al suolo molto inferiore rispetto a quella rilevata strumentalmente negli stessi, in occasione del sisma del 6 aprile 2009, e pari ad una media di 0.7g con punte ben superiori a 1g."

Tutti elementi dai quali dipende una corretta progettazione di strutture sismoresistenti, considerato che in caso di fallimento, ovvero di danneggiamento sismico, **di fronte alla legge vale il solo rispetto delle normative vigenti.**

* * * * *

