

# Analisi della risposta sismica locale con particolare attenzione agli antichi campanili del Comune di Argenta (Fe)

Giulia Sgattoni<sup>1</sup> e Raffaele Brunaldi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laureata in Scienze Geologiche, Università di Bologna

<sup>2</sup> Geologo, libero professionista

## 1. PREMESSA<sup>1</sup>

Il territorio di Argenta, pur essendo stato soggetto a eventi sismici rilevanti (es. 1570, 1624, 1898), non era classificato tra le zone sismiche d'Italia secondo le normative vigenti prima del 2003. Con l'entrata in vigore dell'OPCM 3274/2003, il Comune di Argenta venne inserito in zona 2 (a differenza degli altri comuni della provincia di Ferrara, classificati in zona 3) e la pianificazione urbanistica dovette necessariamente includere anche una valutazione di risposta sismica di sito, obbligatoria oggi anche a fronte delle Norme Tecniche per le Costruzioni (2008). In questo lavoro verrà presentata una caratterizzazione di risposta sismica locale focalizzata ai siti in cui sorgono alcuni antichi campanili. Essi sono stati scelti per la loro vulnerabilità all'azione sismica e poiché sono tra i pochi edifici di interesse storico sopravvissuti agli ultimi eventi bellici nel territorio comunale. Dall'analisi delle fonti storiche è altresì noto che gli eventi sismici succedutisi nel territorio hanno causato il crollo di torri e campanili. Celebre ad esempio il quadro del Ricci ("Terremoto di Argenta"), custodito nella Pinacoteca Comunale, che ritrae il crollo di alcune torri a seguito del terremoto del 1624. Lo studio ha riguardato i suoli di fondazione e i campanili delle chiese di S. Nicolò, S. Giacomo, S. Domenico (Argenta), Madonna del Rosario (frazione di Boccaleone) e S. Zeno (frazione di Consandolo) (Figura 1). Le aree di studio si sviluppano su ambienti deposizionali di transizione fra depositi granulari (da limoso-sabbiosi a sabbiosi) ascrivibili al paleo corso del Po di Primaro e i depositi fini (da argillosi ad argilloso-limosi) degli ambienti di palude sul quale il fiume scorreva e divagava. Sino al XVI- XVII sec. il Primaro ha rappresentato un'importante via d'acqua per il territorio del Comune di Argenta ed i siti oggetto del presente articolo distavano poche deci-

ne di metri dal corpo idrico (Figura 1).

La definizione del modello geologico dei vari siti è stata effettuata tramite indagini geotecniche e geofisiche. La definizione dei modelli strutturali dei campanili è stata effettuata attraverso indagini di tipo sismico passivo, che sono le uniche applicabili a beni di rilievo architettonico per la loro non invasività. I risultati finali saranno infine messi a confronto con la classificazione semplificata dei terreni proposta dalle NTC 2008 (§ 3.2.2).

Nel presente articolo si riporterà solo il caso del sito di Consandolo, che può essere ritenuto il più esplicativo, rimandando a Sgattoni (2010) per i restanti casi.

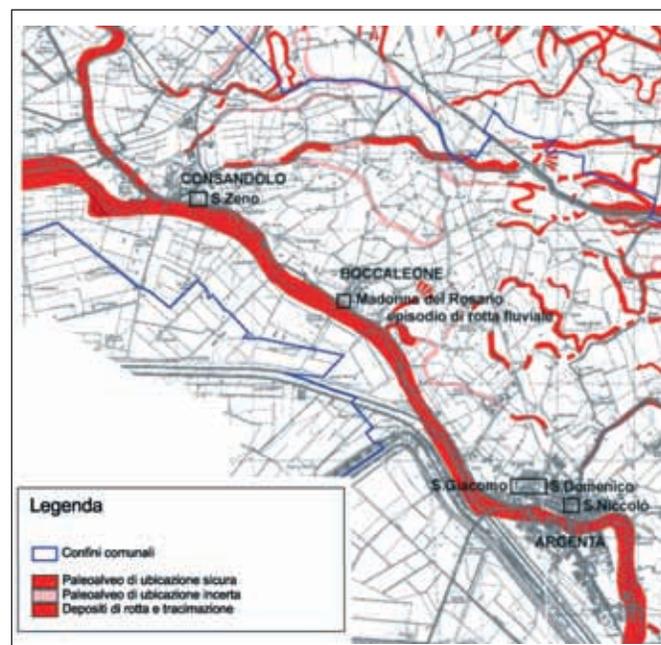


Figura 1 – Percorso dell'antico Po di Primaro e dei canali distributori dell'antico corpo del delta ancora visibili nei dintorni delle aree di studio. Nei pressi dell'abitato di Boccaleone è riconoscibile un episodio di rotta fluviale importante (da Tavole del PSC dei Comuni di Argenta, Migliarino, Ostellato, Portomaggiore e Voghiera).

<sup>1</sup> Il presente articolo costituisce una sintesi dei risultati dell'omonima Tesi di Laurea Magistrale della Dott.ssa Giulia Sgattoni (Relatori: Prof. F. Mulargia, Dott.ssa S. Castellaro; Correlatori: Arch. M. Bondanelli, Dott. R. Brunaldi), Università di Bologna (Anno 2010).

## 2. SITO DI INDAGINE DI CONSANDOLO

### 2.1 Caratterizzazione del suolo di fondazione

Per la definizione del modello del sottosuolo, in termini di profilo di Vs (velocità delle onde sismiche di taglio) e profondità dei principali riflettori sismici, sono state effettuate le seguenti indagini:

- prove sismiche passive a stazione singola (H/V; Castellaro e Mulargia, 2009);
- prove sismiche attive in *array* di tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves, Park *et al.*, 1999);
- prove sismiche passive in *array* di tipo ReMi (Refraction Microtremor, Louie, 2001);
- prove penetrometriche di tipo C.P.T.

Le prove sismiche a stazione singola sono state effettuate con tromometro Tromino (Micromed), le prove sismiche in *array* con sistema multicanale SoilSpy (Micromed), le prove C.P.T., sono state eseguite con penetrometro statico tipo Gouda e dotato di punta Begemann. Le prove geofisiche sono state interpreta-

te con software Grilla a corredo degli strumenti.

In Figura 2 è mostrata l'ubicazione delle indagini effettuate nelle immediate vicinanze della Chiesa di S. Zeno. Con le prove penetrometriche è stata elaborata la sezione geologica schematica di Figura 3. Utilizzando congiuntamente le varie tecniche di indagine è stato ottenuto il modello di sottosuolo, in termini di profilo di Vs, mostrato in Figura 4b. In particolare le prove in *array* (MASW, Figura 4a; ReMi Figura 4c) e le prove C.P.T. hanno fornito informazioni fino a circa 30 m di profondità, permettendo di individuare un primo strato di spessore 12 m e  $V_s \approx 140$  m/s. Il fit della curva H/V (Figura 4d) ha permesso di ricostruire in modo approssimato il profilo di Vs fino alla profondità di circa 300 m, corrispondente all'ultimo riflettore individuato dal picco a 0.4 Hz, che rappresenta la frequenza fondamentale del terreno. La curva H/V ha permesso di individuare anche un altro picco rilevante a 0.9 Hz.

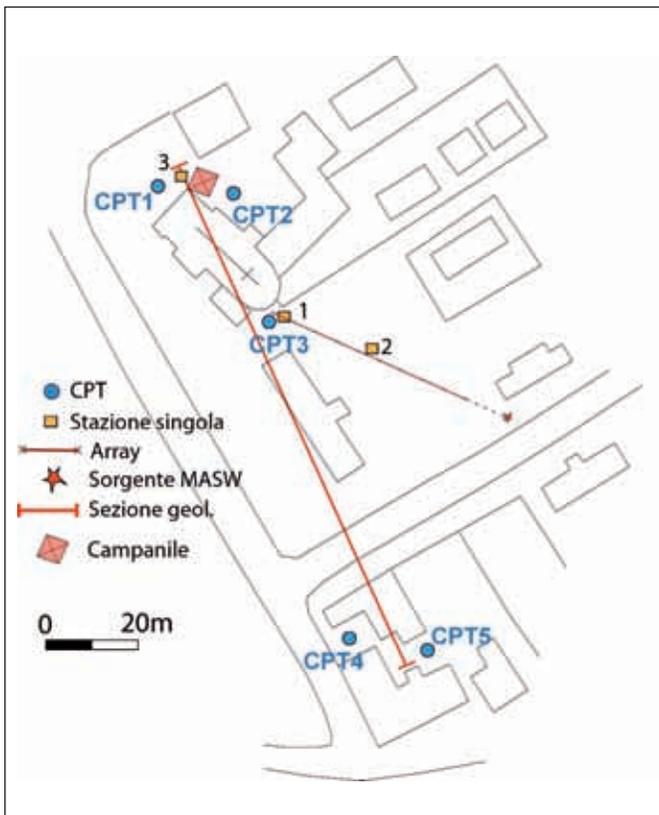


Figura 2 – Ubicazione delle prove effettuate nei pressi del campanile di Consandolo (colorato in rosso).

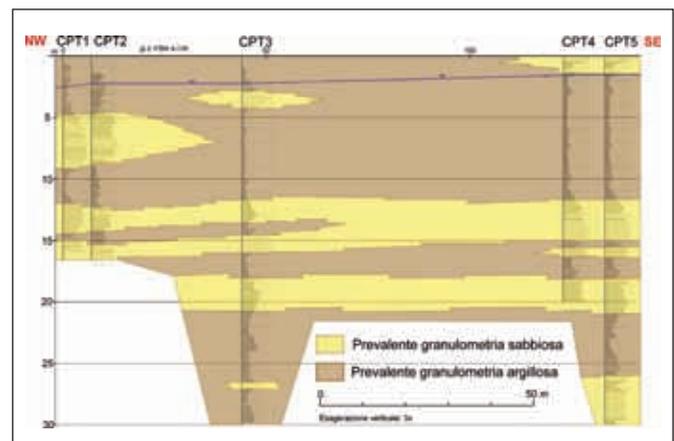


Figura 3 – Sezione geologica schematica effettuata con i dati delle prove penetrometriche CPT disposte come in Figura 2.

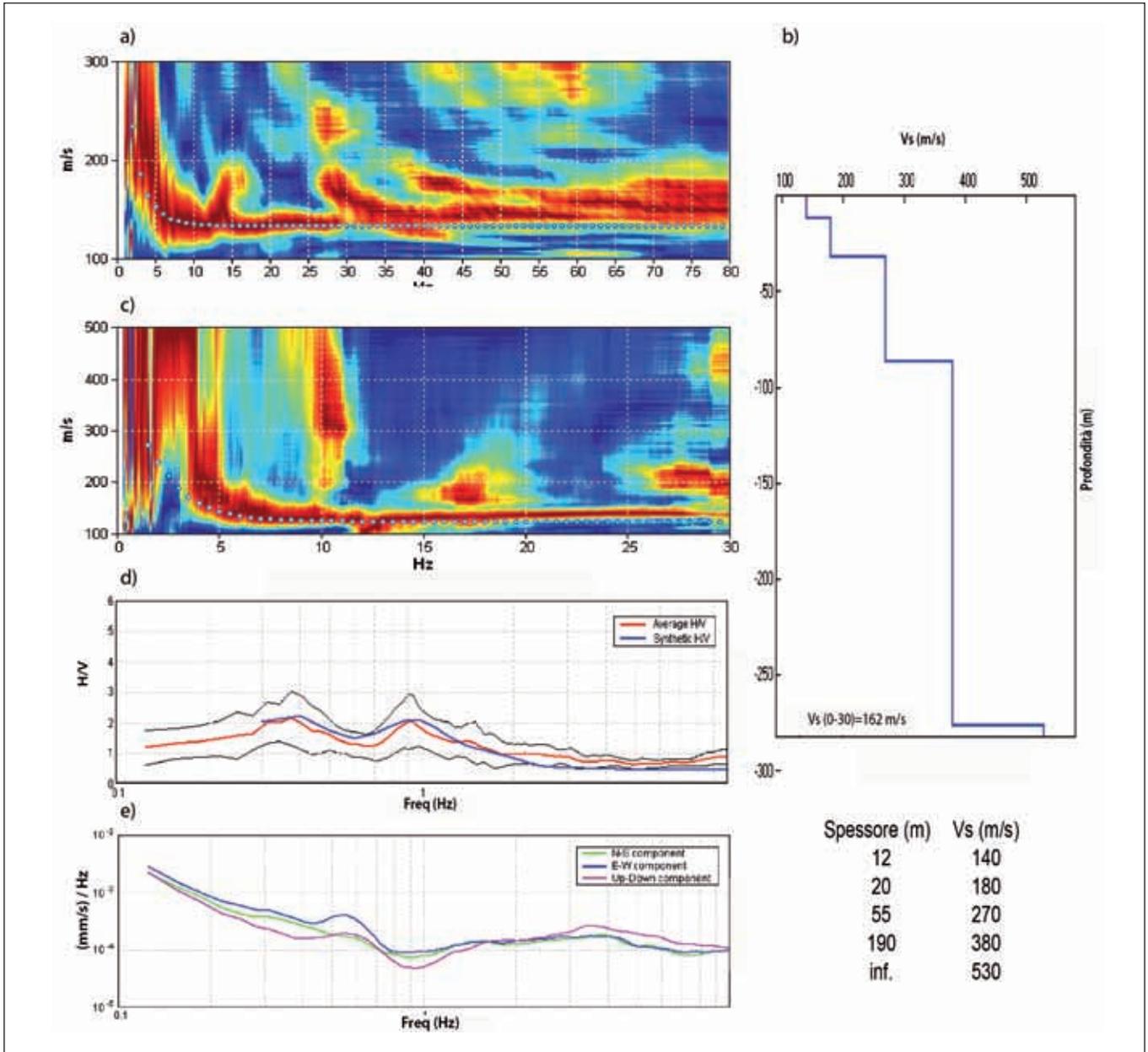


Figura 4. a) e c) spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh (contour) ottenuti rispettivamente dalle prove MASW e ReMi. I pallini corrispondono alla curva di dispersione teorica del modo fondamentale ottenuta dal modello di sottosuolo del pannello b). La prova MASW ha fornito informazioni fino a 5 Hz (15 m), la ReMi fino a 3 Hz (35m), la restante parte del modello è ottenuta dal fit della prova H/V; b) modello di sottosuolo in termini di profilo di Vs ottenuto con il fit congiunto delle prove in array e a stazione singola; d) curva H/V sperimentale (media in rosso e deviazione standard in nero) e curva H/V teorica (in blu) ottenuta per il modello di sottosuolo del pannello b); e) spettri delle singole componenti del moto (NS, EW e Z).

## 2.2 Caratterizzazione della struttura

Per la definizione del modello dinamico del campanile, sono state acquisite registrazioni del rumore sismico ambientale a stazione singola, su diversi livelli (Figura 5). Esse sono poi state elaborate secondo il metodo SSR (Standard Spectral Ratio, Snieder & Safak, 2006; Ca-

stellaro e Mulargia, 2010) per rimuovere l'effetto del suolo, ottenendo le funzioni  $H_i/H_0$ , ovvero i rapporti tra le componenti orizzontali omologhe del livello  $i$ -esimo e del livello 0. Da tali funzioni si possono individuare le frequenze dei diversi modi di vibrare. In Figura 6 spicca la frequenza del modo fondamentale flessionale, nelle due direzioni orizzontali ortogonali, pari a 1.8 Hz.

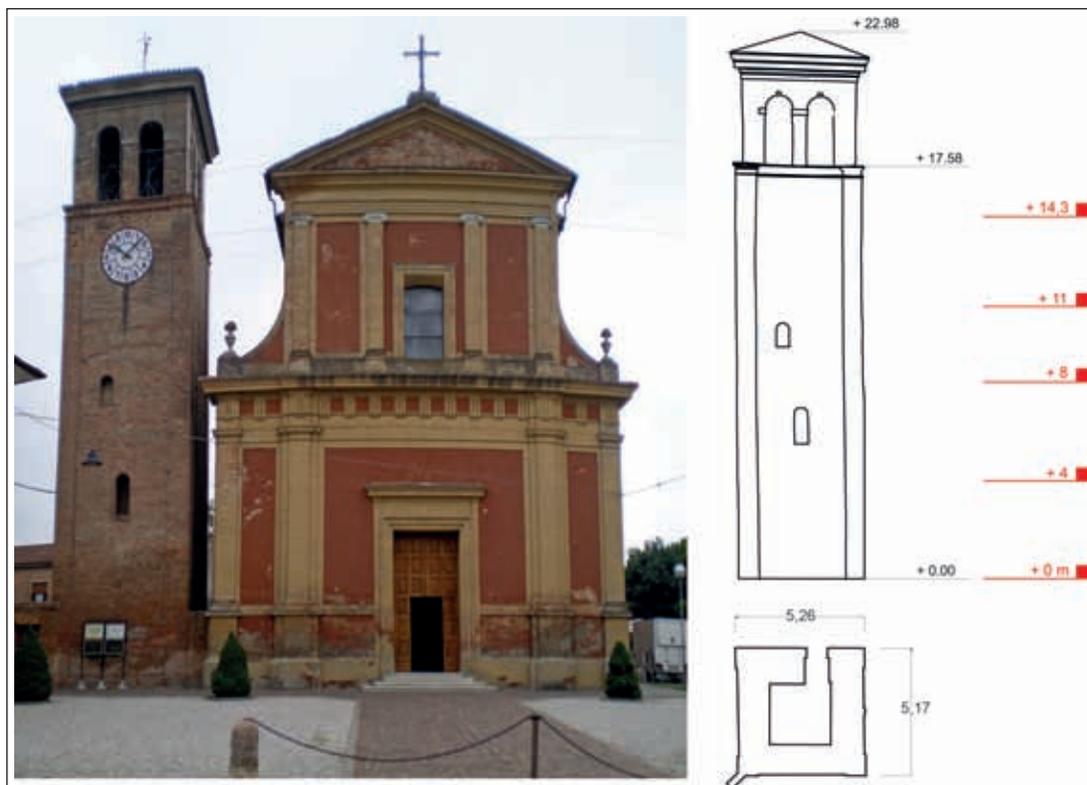


Figura 5. Chiesa di S. Zeno, Consandolo. Nel disegno a destra, in rosso sono indicati i livelli a cui sono state effettuate le registrazioni di microtremore.

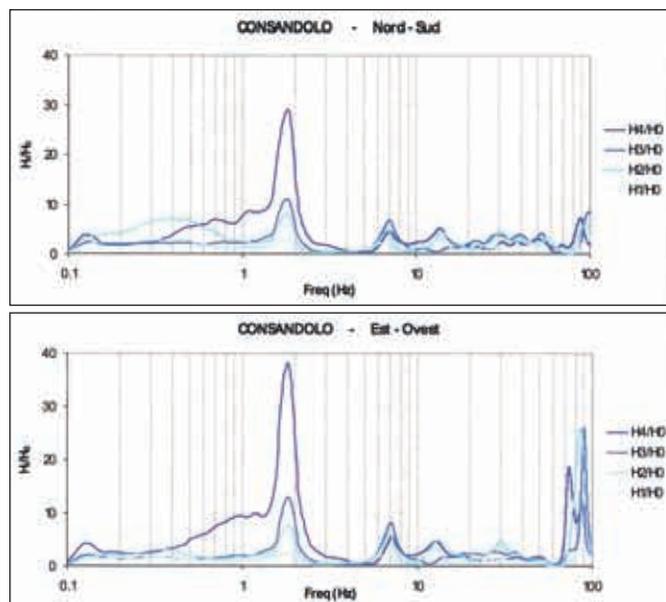


Figura 6. Rapporti spettrali  $H_i/H_0$  tra le componenti orizzontali dei livelli  $i$ -esimi e la componente orizzontale del livello 0. In alto: funzione  $H_i/H_0$  per le componenti Nord-Sud (asse longitudinale della struttura). In basso: componenti Est-Ovest (asse trasversale della struttura).

## 3. MODELLAZIONE SISMICA DELL'AREA

Per determinare la risposta del sottosuolo attesa in superficie a partire da un input (terremoto) tipico atteso al *bedrock*, è stato utilizzato il codice EERA (*Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses*; J.P.Bardet et al., 2000), in grado di modellare la propagazione unidimensionale delle onde di taglio in un mezzo a stratificazione orizzontale. I casi esaminati in questo lavoro sono infatti riconducibili alla situazione più semplice di deposito caratterizzato da topografia piana e stratificazione orizzontale, in tali casi è possibile adottare un modello geometrico mono-dimensionale.

Come moto di input sono stati adottati i terremoti "tipici" della regione, forniti dal database della Regione Emilia-Romagna (Atto di Indirizzo 112/2007). Tali segnali (denominati 'Norm1', 'Norm2', 'Norm3') sono scalati in modo che la loro accelerazione massima corrisponda al valore di accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni attesa nel comune secondo le Norme

Tecniche, ovvero 0.16 g.

Per ognuno di questi segnali e per ciascun sito sono state ottenute le funzioni di trasferimento accelerazione in superficie / accelerazione al *bedrock*. Sono stati ricavati inoltre gli spettri di risposta, ossia i valori massimi di accelerazione attesi per un oscillatore armonico semplice ad un grado di libertà (edificio tipo) in funzione della sua frequenza naturale e dello smorzamento (assunto pari al 5%, sebbene questo valore sia probabilmente troppo grande per strutture in muratura quali quelle analizzate). Per il sito di Consandolo le funzioni di trasferimento ottenute (poste a confronto con la curva H/V in Figura 7) suggeriscono un fattore di amplificazione massimo pari a 2.3 in corrispondenza della frequenza principale di risonanza individuata dalla curva H/V (0.9 Hz).

Gli spettri di risposta (Figura 8) forniscono una stima dell'accelerazione massima attesa per la struttura, che va individuata in corrispondenza del periodo proprio del campanile (linea rossa verticale in Figura 8). Tale accelerazione è compresa tra 0.2 e 0.4 g, con un valore medio di 0.32 g.

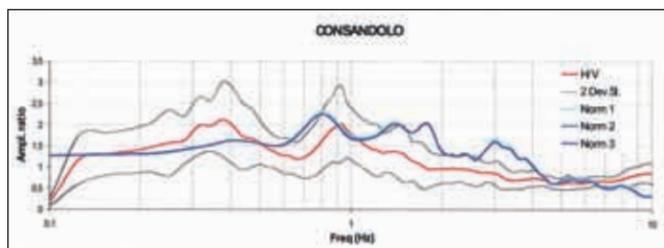


Figura 7. In toni di azzurro: funzioni di trasferimento *bedrock-superficie* ottenute dalla modellazione con il codice EERA per il modello di sottosuolo di Figura 4b con gli accelerogrammi di riferimento per il Comune di Argenta (da Atto di Indirizzo 112/2007 della Regione Emilia-Romagna; PGA0=0.16g). In rosso: curva H/V misurata.

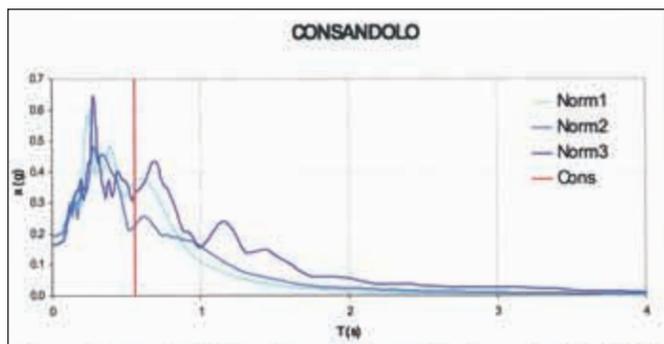


Figura 8. Spettri di risposta elastici dell'oscillatore armonico semplice ad un grado di libertà (edificio tipo) in funzione della sua frequenza naturale e dello smorzamento (assunto pari al 5%), ottenuti per il sito Consandolo. La linea verticale corrisponde al periodo proprio del campanile indagato.

#### 4. CONFRONTO CON IL METODO SEMPLIFICATO E CONSIDERAZIONI SULLA SUA VALIDITA' PER LE AREE DI STUDIO

Secondo la tabella 3.2.2 delle NTC 2008, il suolo di fondazione esaminato è classificabile in categoria D ( $V_{s30} < 180$  m/s). Lo spettro di risposta semplificato relativo alla categoria di terreno D riferito allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (ovvero riferito ad una azione sismica con probabilità di superamento del 10% in 50 anni) è illustrato in verde in Figura 9 sovrapposto a quelli ottenuti dall'analisi numerica presentata precedentemente. Tale spettro fornisce in tutto il dominio valori di accelerazione maggiori rispetto a quelli ottenuti con la modellazione numerica. Per il caso in esame anche lo spettro di risposta per terreni di categoria C risulterebbe quasi sempre cautelativo. Analoghi risultati sono stati ottenuti negli altri siti del comune di Argenta.

Siamo pertanto di fronte ad un esempio interessante in cui l'applicazione dell'approccio semplificato di normativa porterebbe ad applicare parametri di progetto notevolmente più dispendiosi di quanto suggerito invece da un'analisi numerica specifica.

La discrepanza di risultati tra i due approcci è comprensibile se si considera peraltro che la categoria semplificata di normativa D deve fornire valori 'ragionevoli' per una ampia gamma di suoli con  $V_{s30} < 180$  m/s (quindi anche molto minore di questo valore) mentre nel caso di studio il valore di  $V_{s30}$  era molto prossimo al limite superiore della classe D ( $V_{s30} \approx 170$  m/s).

#### 5. ESTRAPOLAZIONE DEL PROFILO DI VELOCITÀ FINO AL BEDROCK E CONSIDERAZIONI SULLA SUA VALIDITA' PER LE AREE DI STUDIO

Secondo la normativa regionale (Atto d'Indirizzo 112/2007), per le analisi di III livello, quando le indagini

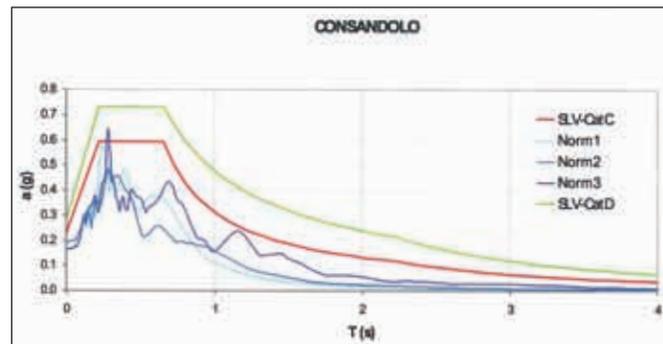


Figura 9. In toni di azzurro: spettri di risposta elastici ottenuti con la modellazione per il sito Consandolo. In verde: spettro di risposta elastico (elaborato secondo l'approccio semplificato delle NTC 08) per categoria di sottosuolo D, riferito allo Stato Limite di salvaguardia della Vita. In rosso: spettro di risposta semplificato riferito allo SLV per categoria di sottosuolo C.

a 30 m di profondità non raggiungono il *bedrock* (inteso come profondità alla quale  $V_s \geq 800$  m/s), è possibile estrapolare il profilo di  $V_s$  fino ad ottenere una velocità di 800 m/s, secondo un gradiente lineare individuato dall'ultimo tratto del profilo sperimentale ("Qualora le indagini non abbiano raggiunto il *bedrock* sismico o non abbiano evidenziato la presenza di una superficie di discontinuità che identifichi il tetto di un substrato rigido assimilabile al *bedrock* sismico, il profilo di  $V_s$  viene estrapolato in profondità mantenendo il gradiente dell'ultimo tratto della curva sperimentale fino al raggiungimento di  $V_s=800$  m/s"). Si è quindi analizzato se per i casi in esame tale procedura possa applicarsi in maniera corretta.

Sono state perciò confrontate le funzioni di trasferimento *bedrock*-superficie ottenute con il codice EERA per profili di  $V_s$  determinati sperimentalmente fino al *bedrock* con gli analoghi profili interrotti a 30 m ed estrapolati fino a 800 m/s al di sotto di questa profondità. In Figura 10 sono mostrati i profili reali ed i profili estrapolati (linea blu e linea rossa). Le funzioni di trasferimento relative ai due modelli sono date in Figura 11. Tra le due curve si osservano naturali e ovvie differenze sia in frequenza sia in ampiezza, a dimostrazione di quanto l'applicazione cieca di questa procedura possa portare a modelli distorti rispetto alla realtà. A questo problema si può facilmente ovviare utilizzando la tecnica H/V, che permette di "posizionare" il *bedrock* misurando direttamente le frequenze di risonanza che questo genera.

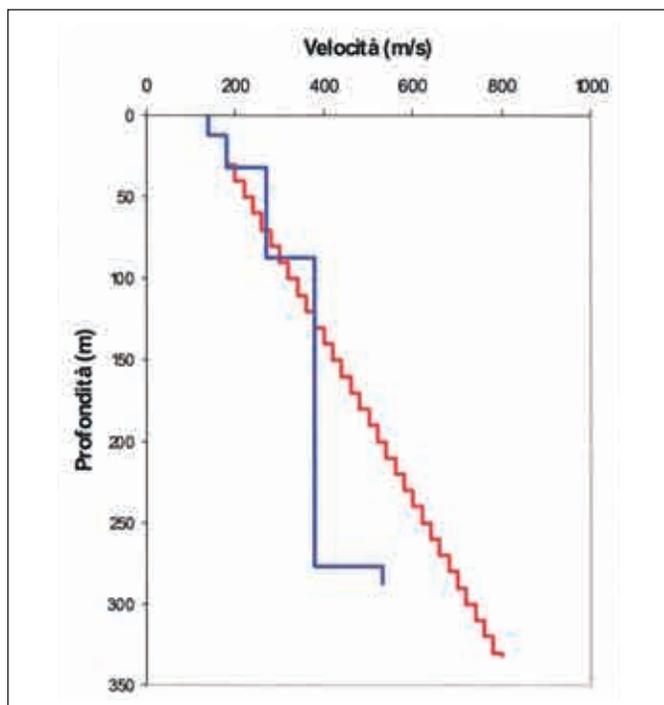


Figura 10. In blu: profilo di  $V_s$  reale. In rosso: profilo di  $V_s$  reale fino a 30 m ed estrapolato fino alla profondità a cui  $V_s=800$  m/s secondo un gradiente lineare.

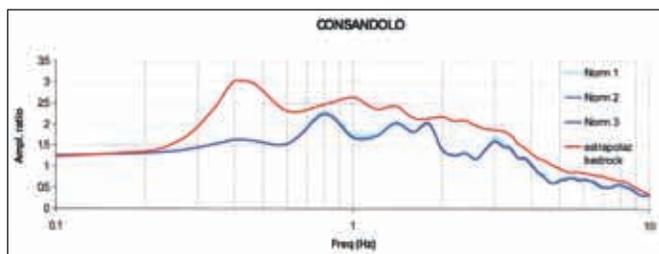


Figura 11. Funzioni di trasferimento ottenute per i modelli di sottosuolo di Figura 10, in blu per il profilo reale, in rosso per quello estrapolato.

## 6. RISULTATI OTTENUTI PER GLI ALTRI SITI STUDIATI

Dai modelli ottenuti si è riscontrata – come atteso essendo i siti ubicati in una zona di bassa pianura – una scarsa variabilità tra i siti indagati.

La tecnica H/V ha indicato che in tutti i siti la frequenza principale di risonanza si colloca a 0.9 Hz ed è attribuibile ad un *bedrock* sismico posto a circa 80 m di profondità. Le misurazioni del microtremore effettuate sulle strutture hanno fornito le seguenti frequenze fondamentali per i campanili studiati:

- S. Nicolò (Argenta):  $\approx 1.3$  Hz;
- S. Giacomo (Argenta):  $\approx 3.2$  Hz per la componente longitudinale e  $\approx 2.7$  Hz per quella trasversale;
- S. Domenico (Argenta):  $\approx 1.4$  Hz;
- Madonna del Rosario (Boccaleone):  $\approx 1.4$  Hz;
- S. Zeno (Consandolo):  $\approx 1.8$  Hz.

Essendo strutture a pianta quadrata, le frequenze del primo modo flessionale in direzione trasversale e longitudinale coincidono per tutti i campanili ad eccezione di San Giacomo, che ha pianta rettangolare.

Il confronto delle frequenze delle strutture e dei relativi suoli di fondazione, mostra che per quasi tutti i campanili (ad eccezione di San Giacomo) la frequenza fondamentale ha valore di poco superiore rispetto alla frequenza di risonanza del terreno di fondazione. Considerando che un eventuale primo danneggiamento strutturale durante un evento sismico porta ad una diminuzione delle frequenze proprie, i campanili sono da ritenersi a rischio di doppia risonanza col suolo in caso di terremoti prolungati. Le funzioni di trasferimento accelerazione in superficie/ accelerazione al *bedrock* per ciascuno dei modelli di sottosuolo ottenuti per i vari siti hanno permesso di stimare fattori di amplificazione massimi pari a 1.7 per il sito Argenta e 2.3 per i siti Boccaleone e Consandolo in corrispondenza della frequenza principale di risonanza del terreno. I valori massimi di accelerazione attesi per i campanili studiati sono compresi tra circa 0.2-0.4 g, con valori medi pari a 0.23 g per S. Nicolò, 0.42 g per S. Giacomo, 0.29 g per S. Domenico, 0.30 g per Boccaleone e 0.32 g per Consandolo.

## 7. CONCLUSIONI

Con la sismica passiva a stazione singola è stato possibile stimare le frequenze principali di vibrazione dei terreni di fondazione (0.9 Hz in tutti i siti) e delle strutture dei campanili (comprese tra 1.3 – 3.2 Hz), permettendo di verificare che i campanili (ad eccezione di S. Giacomo) sono da ritenersi a rischio di doppia risonanza.

La stessa tecnica ha anche permesso di ottenere i modelli dei sottosuoli di fondazione sino alla profondità del riflettore sismico (pari a circa 80 m) che genera la risonanza di interesse per le strutture in esame. Tale profondità non si è potuta raggiungere con le altre indagini (sismica in *array* e C.P.T.), con le quali sono però state ottenute informazioni fino a 30 m di profondità, necessarie a vincolare i modelli H/V.

Pur nei non trascurabili limiti di un metodo semplificato basato su un numero considerevole di assunzioni e di variabili, la modellazione con il codice EERA ha permesso di stimare i fattori di amplificazione e le accelerazioni massime attese per le strutture e per i terreni in esame. La misura diretta delle frequenze costituisce, comunque, un vincolo per i risultati ottenuti con la modellazione.

Il metodo semplificato (secondo le NTC 2008), nei siti di studio è risultato essere iper- cautelativo. Si è infatti verificato con la modellazione numerica come i terreni di studio (categoria di suolo di fondazione D) risultino classificabili con sufficiente cautela anche in categoria C. Questo non stupisce se si considera peraltro che la categoria semplificata di normativa D deve fornire valori ‘ragionevoli’ per una ampia gamma di suoli con  $V_{s30} < 180$  m/s (quindi anche molto minore di questo valore) mentre nel caso di studio il valore di  $V_{s30}$  era molto prossimo al limite superiore della classe D ( $V_{s30} \approx 170$  m/s). L’adozione di un profilo di velocità estrapolato fino a  $V_s = 800$  m/s, come concesso dagli Atti di Indirizzo in materia di microzonazione sismica della Regione Emilia-Romagna

nel caso in cui il *bedrock* sismico non sia riscontrato nei primi 30 m, può condurre a naturali ed attese distorsioni della realtà, ben individuate per i casi in esame. Si rileva che in questi casi l’utilizzo della tecnica H/V permette di ovviare al problema del “posizionamento” del *bedrock* sismico nei termini delle frequenze di risonanza che questo genera.

Il lavoro di cui si sono brevemente presentati i risultati ha rivolto la propria attenzione ad edifici rilevanti dal punto di vista dell’importanza storica e documentale (alcune di queste torri campanarie, come le relative chiese, hanno infatti valenza architettonica non trascurabile). Alla luce delle motivazioni su esposte, si auspica che la caratterizzazione sismica del territorio superi i limiti di un approccio semplificato, divenendo funzionale alla progettazione degli interventi edificatori e/o della pianificazione urbanistica e territoriale.

## BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell’art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica” 112/2007.
- BARDET J.P., Ichii K. & Lin C.H. (2000) – EERA – A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits. University of California. <http://gees.usc.edu/GEES/Software/EERA2000/Default.htm>.
- CASTELLARO S. e MULARGIA F. (2009) -  $V_{s30}$  Estimates Using Constrained H/V Measurements. Bull. Seism. Soc. Am., 99, 2, 761-773.
- CASTELLARO S. e MULARGIA F. (2010) – How far from a building does the ground-motion free-field start? The case of three famous towers and of a modern building. Bull. Seism. Soc. Am., 100, 5, 2080-2094.
- D.M. 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le costruzioni”.
- LOUIE J.N. (2001) - Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bull. Seism. Soc. Am., 91, 2, 347-364.
- PARK C. B., MILLER R. D. and XIA J. (1999) – Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64, n. 3, 800-808.