



“Monitoraggio dinamico per la valutazione della sicurezza sismica dei ponti”, Udine, 18 Aprile 2008



Limiti e potenzialità dell'uso del rumore ambientale per la valutazione della risposta di sito e l'analisi strutturale

Dario Albarello



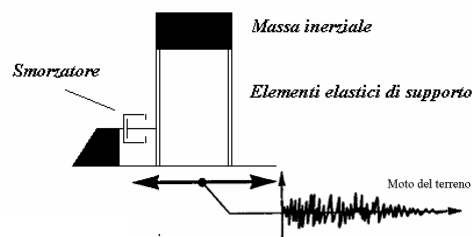
Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

L'obiettivo è quello di **“prevedere”** il comportamento dinamico di una struttura come effetto dello scuotimento indotto da un evento sismico

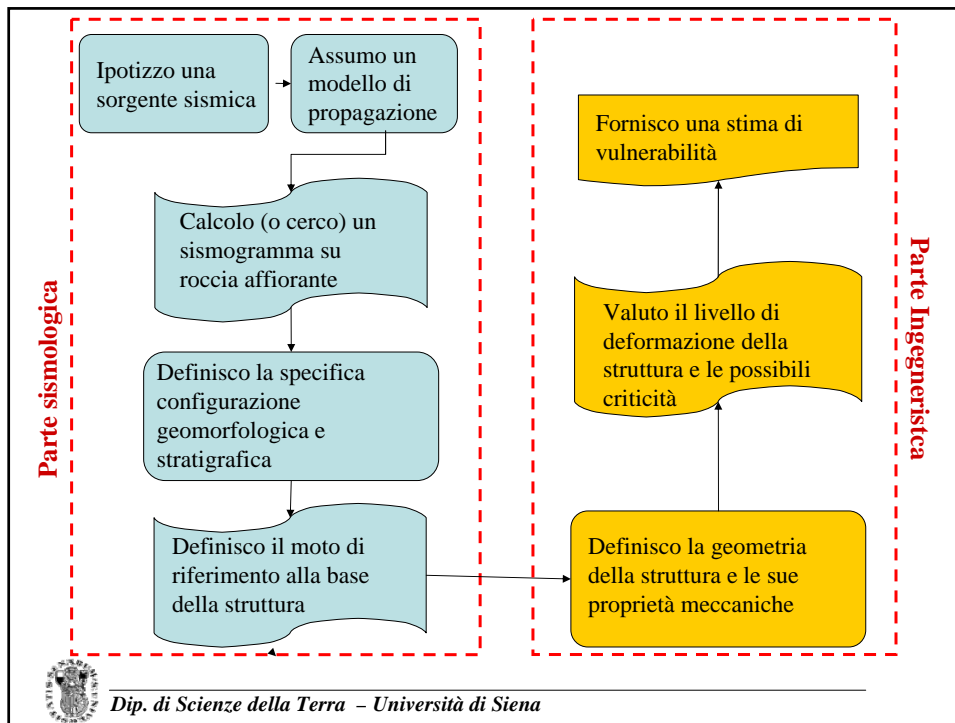
Il meccanismo atteso è quello del trasferimento di energia dal suolo al manufatto attraverso le fondazioni

Il problema viene solitamente affrontato secondo uno sviluppo lineare che va dalla definizione del moto sismico al suolo (parte sismologica) alla stima della risposta del manufatto sottoposto alla sollecitazione (parte ingegneristica)

Il modello elementare è quello di un oscillatore più o meno complesso sollecitato alla sua base da uno scuotimento di andamento noto



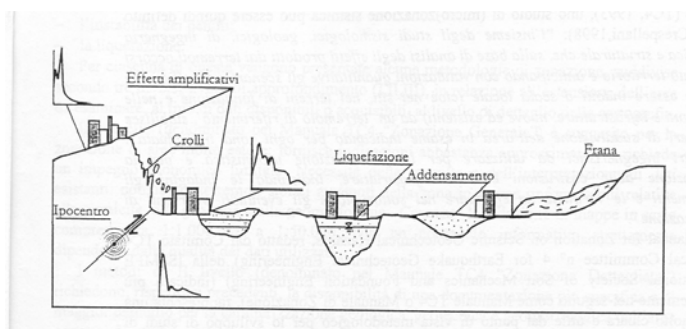
Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena



La visione sismologica

Le caratteristiche geomorfologiche e strutturali locali modificano il moto del suolo indotto dall'evento sismico, la stabilità e la capacità portante del suolo di fondazione

Scopo delle analisi è quello di valutare questi effetti (ed in particolare il moto del terreno di fondazione) **in assenza di strutture** a partire da informazioni sulla sorgente sismica (o sul moto sismico atteso su un terreno roccioso equivalente a quello di interesse) e caratteristiche meccaniche dei terreni

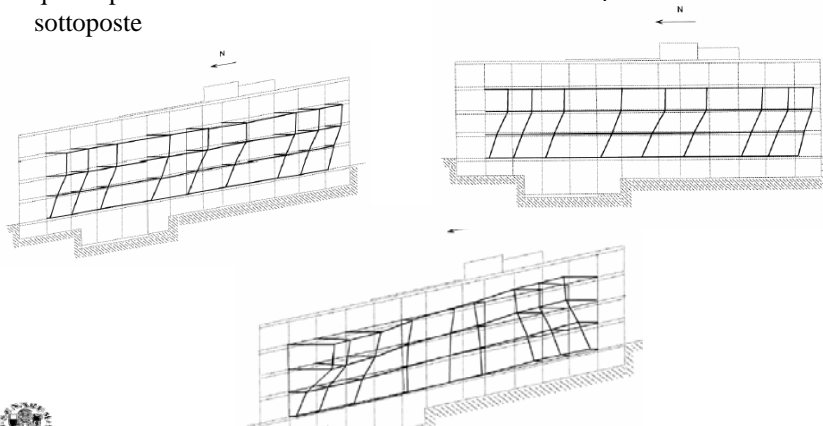


Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

La visione ingegneristica

La struttura viene immaginata come vincolata ad un suolo di fondazione rigido il cui unico ruolo è quello fornire una sollecitazione (nota) alla struttura

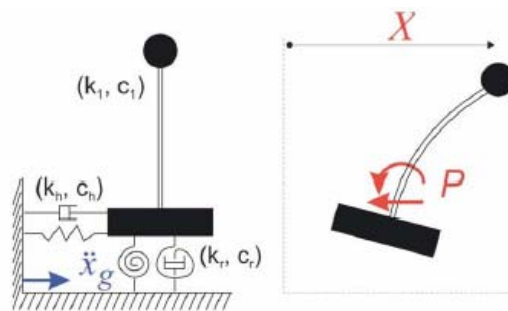
A partire da informazioni sulle caratteristiche strutturali del manufatto è quindi possibile valutare le sollecitazioni cui le varie parti della struttura sono sottoposte



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

In realtà, il problema dinamico è più complesso

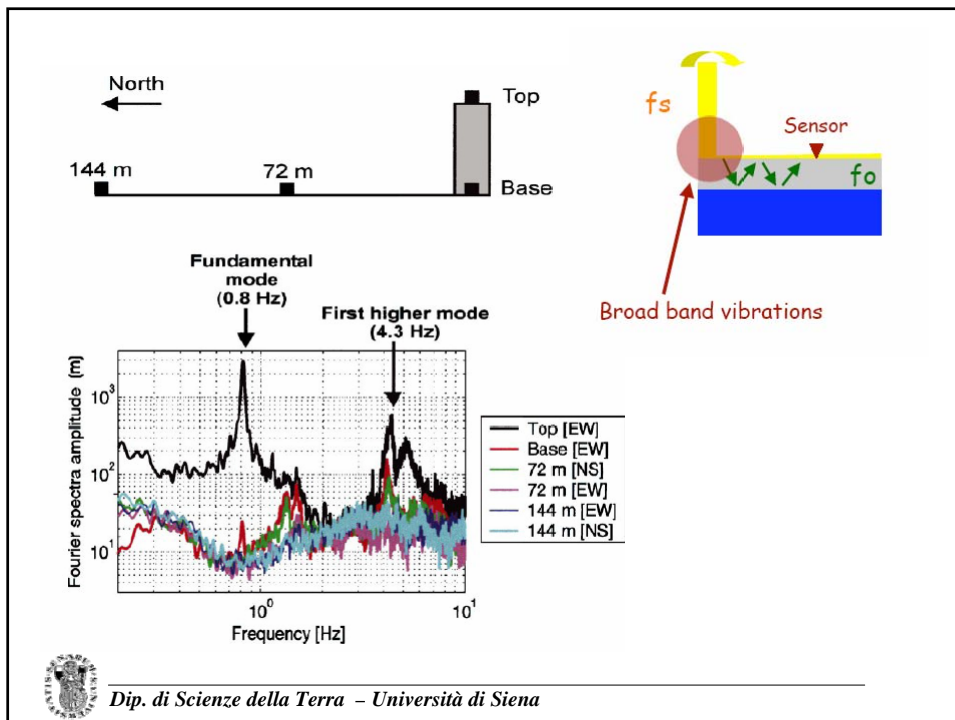
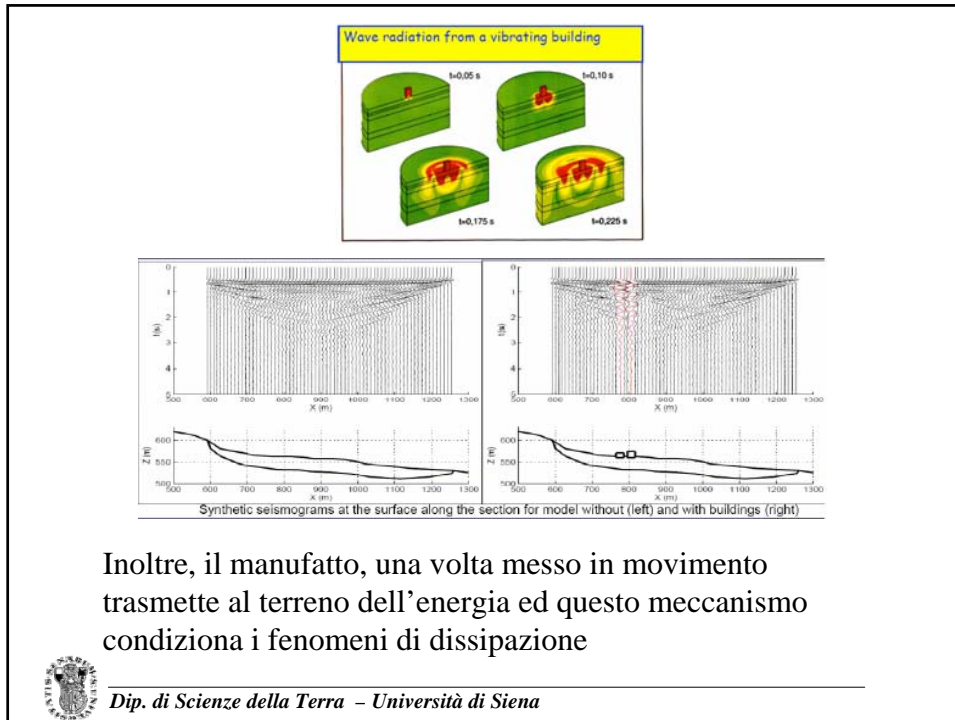
Innanzitutto esiste un problema di **interazione suolo-struttura**



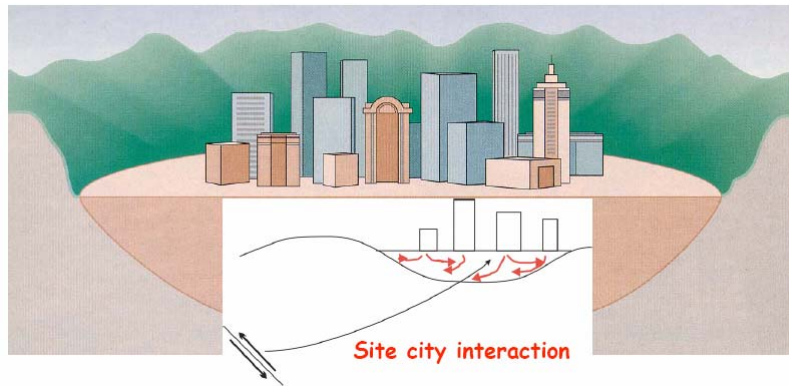
In qualche misura (dipendente dalle caratteristiche del terreno e delle fondazioni) il terreno partecipa al moto della struttura



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena



Infine i manufatti possono interagire dinamicamente fra loro condizionando l'effetto complessivo del terremoto

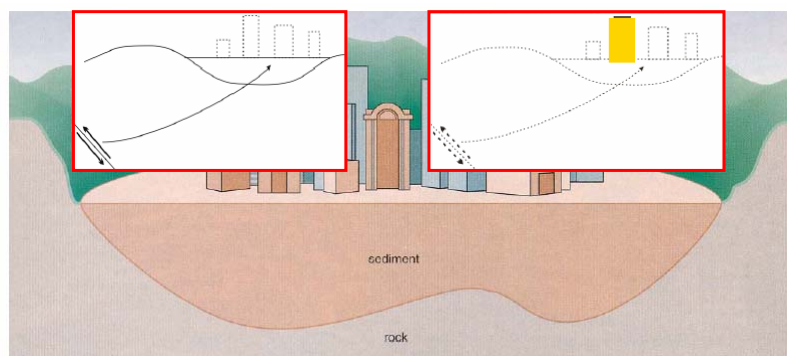


Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Quindi una stima realistica della vulnerabilità deve considerare nel suo complesso un “sistema” costituito da elementi che interagiscono dinamicamente nel corso dell’evento sismico. Questo implica il superamento di un “dualismo” disciplinare che produce due visioni del fenomeno sismico complementari e indipendenti: quella “sismologica” e quella “ingegneristica”

Visione “sismologica”

Visione “ingegneristica”



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Come conseguenza di queste considerazioni si ha che la dinamica di una struttura va studiata nel suo specifico contesto geomorfologico e stratigrafico

In particolare, la stima della **vulnerabilità sismica** va affrontata con un approccio integrato che tenga conto del complesso delle interazioni dinamiche presenti nello specifico contesto

Questo complica molto il problema, rendendo discutibili i risultati di qualunque approccio unilaterale

Inoltre pone il problema: **vale la pena di produrre risultati numerici estremamente dettagliati a partire da modelli incompleti?**



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Esiste inoltre un ulteriore aspetto da tenere in considerazione

Il terremoto “vede” la struttura con i suoi “occhi”

Immaginiamo di prendere in esame l’effetto delle vibrazioni del suolo alla frequenza di 3 Hz.

La velocità delle onde S nei terreni delle coperture è dell’ordine di 300-400 m/sec. Questo implica che la lunghezza d’onda tipica delle vibrazioni a 3 Hz è dell’ordine dei 100 m.

E’ questa la “risoluzione” necessaria al problema ed è questa la scala giusta alla quale vanno definite le caratteristiche geometriche, morfologiche e meccaniche del sottosuolo e della struttura



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Una caratterizzazione dinamica completa del sistema richiede quindi la definizione :

1. del moto sismico di riferimento nell'intero campo di frequenze rilevanti per la struttura
2. la situazione morfologica e stratigrafica alla scala di interesse
3. il comportamento dinamico dei terreni di fondazione nell'intervallo di deformazione atteso
4. la risposta dinamica della struttura nell'intervallo di deformazione atteso
5. il complesso delle interazioni suolo/struttura



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Accanto a questi aspetti ne esiste un altro di non minore importanza

Nelle analisi di tipo ingegneristico (e anche nella normativa tecnica), l'accento è posto sulla **singola struttura** e sulla sua vulnerabilità

In realtà, il terremoto colpisce il **sistema delle strutture** e delle infrastrutture a scala “territoriale” (comuni, province, regioni)

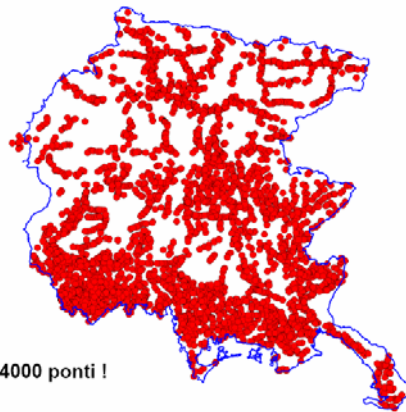
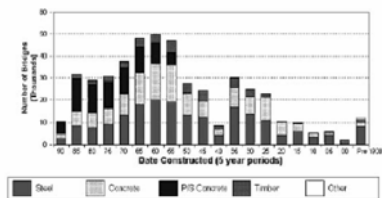
Le politiche di prevenzione e di gestione dell'emergenza, le politiche di pianificazione dell'uso del territorio per essere efficaci devono quindi operare a questa più ampia scala

A questo scopo l'ottima conoscenza del livello di vulnerabilità di **poche strutture** è del tutto insufficiente all'impostazione di politiche di intervento efficaci



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Il problema diventa quello di valutare la vulnerabilità complessiva del sistema strutturale e infrastrutturale, un sistema caratterizzato da un'estrema eterogeneità



Friuli – più di 4000 ponti !



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Il problema è duplice

Da un lato si vede che una completa caratterizzazione dinamica ed una puntuale determinazione di vulnerabilità richiedono una estrema ricchezza di informazioni riguardanti sia le strutture che il terreno che li ospitano (oltre che del terremoto atteso)

Dall'altro esiste una forte richiesta di tecniche utilizzabili estensivamente su numeri assai rilevanti di manufatti al fine di garantire una politica di prevenzione consapevole ed efficace

La risposta a questo genere di esigenza va cercata nella messa a punto di tecniche di indagine a basso costo, capaci di fornire risultati adeguati anche se non esaustivi, utili almeno ad individuare le situazioni più critiche sulle quali indirizzare gli interventi più urgenti



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Un problema del tutto analogo si pone nello studio del livello di vulnerabilità dell'edificato di tipo ordinario

1. Grande complessità del fenomeno fisico (si pensi al ruolo delle tamponature o al comportamento dinamico delle strutture in muratura, così diffuse sul territorio)
2. Numero assai esteso di edifici da sottoporre a valutazioni di vulnerabilità anche in presenza di informazioni assai scarse sulle condizioni del manufatto e del suolo di fondazione



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Per rispondere a questo tipo di esigenze è stato proposto e finanziato un progetto di ricerca volto a definire e validare una procedura per la caratterizzazione dinamica sismica degli edifici e dei suoli di fondazione applicabile per valutazioni estensive di vulnerabilità

The poster features the NATO Science Programme and Science for Peace logos at the top. The main title is 'Assessment of Seismic Site Amplification and Seismic Building Vulnerability in the FYR Macedonia, Croatia and Slovenia'. Below the title is the project number 'Project SFP 980857' and the URL '(http://nato.gfz.hr/)'. A map on the right shows the geographical distribution of project partners, highlighting the Balkan region.



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Gli obiettivi sono stati:

1. Valutazione delle proprietà dinamiche dei terreni in posto in termini di frequenze proprie di risonanza e smorzamento su un intervallo di frequenze di interesse ingegneristico (0.1-10 Hz)
2. Determinazione delle frequenze proprie fondamentali di vibrazione degli edifici e del relativo smorzamento
3. Individuazione delle situazioni di maggiore criticità confrontando le frequenze di risonanza proprie e utilizzando schemi di calcolo semplificato

Lo strumento base per questo genere di analisi è stata la misura a stazione singola della risposta dinamica dei terreni e delle strutture al rumore sismico ambientale



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Ci si può chiedere quali siano gli elementi di novità del progetto dato che da molti anni il rumore sismico ambientale viene utilizzato per l'analisi della risposta dinamica dei terreni e degli edifici

Questi elementi sono due:

1. Si tratta di misure **asincrone a stazione singola**
2. Vengono misurate congiuntamente le **proprietà del suolo** di fondazione e **della struttura** separando gli effetti delle une e delle altre



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Le idee di base sono molto semplici

1. Per bassi livelli di deformazione si può assumere che sia il suolo che la struttura mostrino un comportamento di tipo lineare
2. Le ampiezze spettrali $U(\omega)$ del moto della struttura possono essere espresse dalla forma

$$U(\omega) = F(\omega)R(\omega)$$

dove F è una sollecitazione che proviene dalle fondazioni e R è la **funzione di risposta** della struttura che dipende dalle sue proprietà meccaniche

Misurando separatamente U e F è quindi possibile risalire alla forma di R semplicemente calcolando i rapporti spettrali U/F (Metodo **SSR** ovvero dello **Standard Spectral Ratio**)



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

La cosa è persino ovvia se la forzante è nota (es. VIBRODINA)

Lo è meno quando viene considerato come forzante il moto naturale del suolo (tremore sismico ambientale) generato da sorgenti antropiche (traffico veicolare, attività industriale) o naturale (vento, onde marine, ecc.)

La molteplicità delle possibili sorgenti suggerisce la natura **essenzialmente stocastica** di questo campo

Gli strumenti da utilizzare devono quindi avere una **natura statistica**

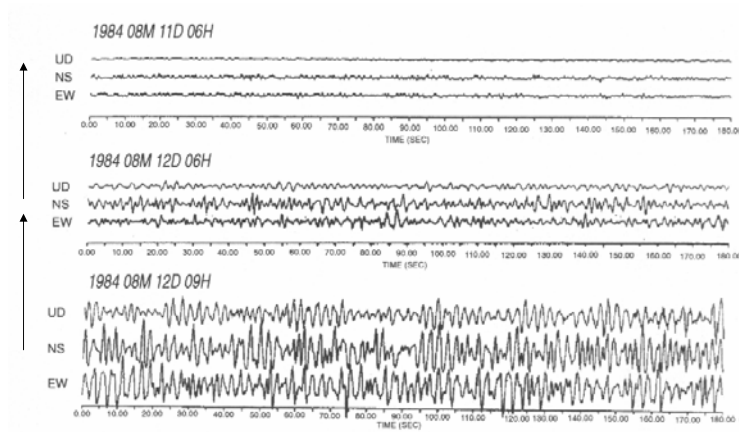


Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Ha una struttura **molto irregolare** ed esibisce quindi una natura essenzialmente stocastica

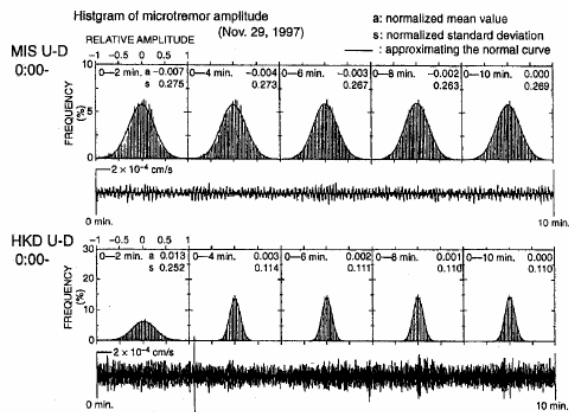
1 giorno

3 ore



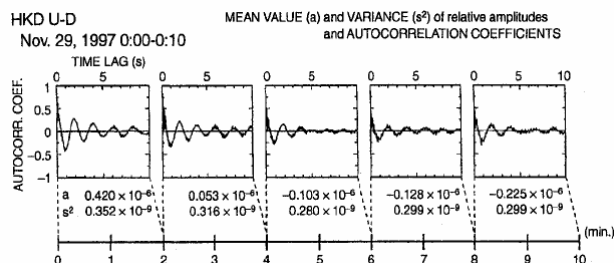
Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Tuttavia, esaminato sul piano statistico mostra valori di ampiezza **mediamente** costanti sulla scala delle decine di minuti fino all'ora



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Questa forma di stazionarietà del segnale si riflette
nella forma spettrale

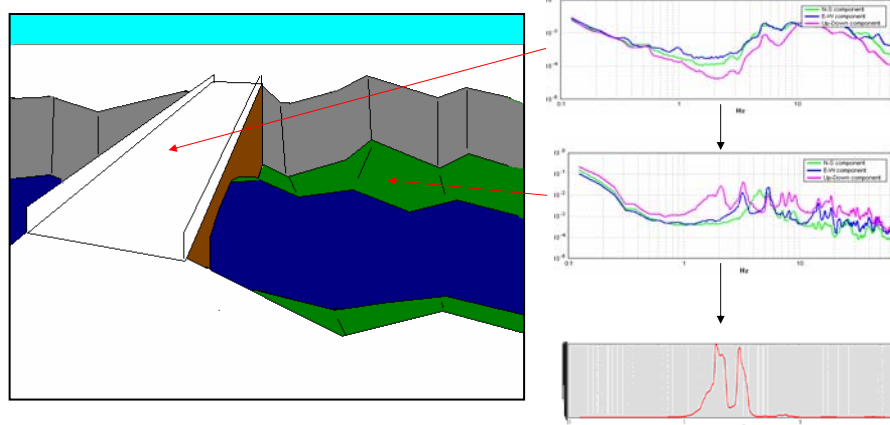


Se le proprietà spettrali del rumore medie sono le stesse se
misurate a distanza di poche decine di minuti, allora è possibile
misurare sia la funzione di risposta R che la forzante F con lo
stesso unico strumento



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

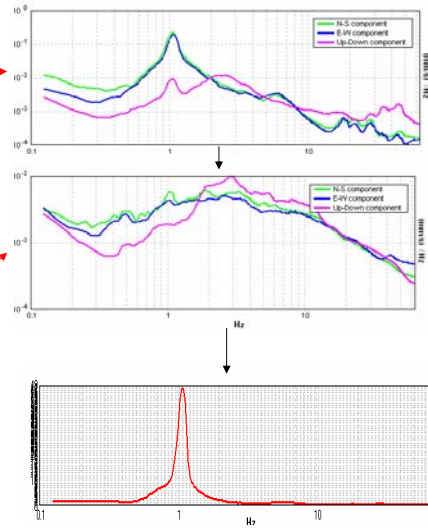
Basta infatti ripetere la misura del rumore ambientale nelle tre
componenti del moto sullo struttura e sul terreno libero (free
field)



e valutare R a partire dai rapporti degli spettri ottenuti



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

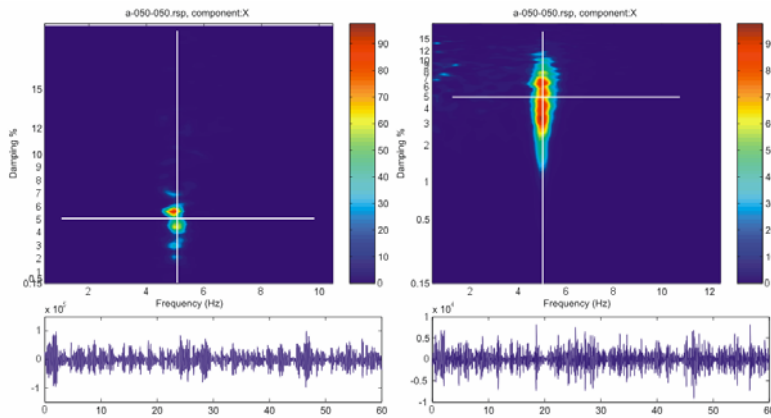


SSR



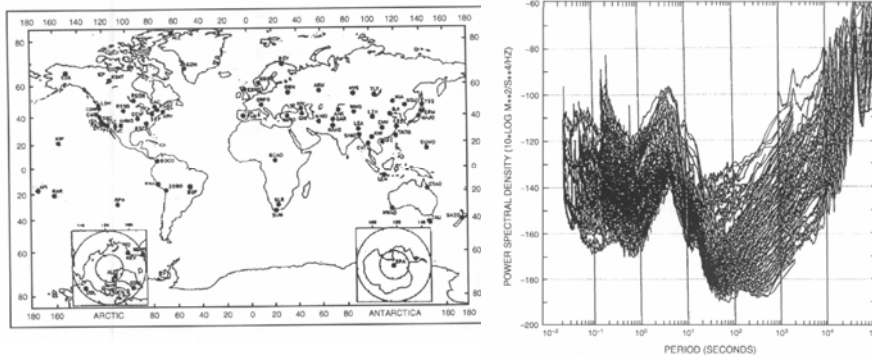
Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Analizzando opportunamente le misure di rumore è anche possibile risalire all'entità dello smorzamento delle strutture esaminate



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Esistono altre regolarità del campo di rumore che risultano potenzialmente utilizzabili



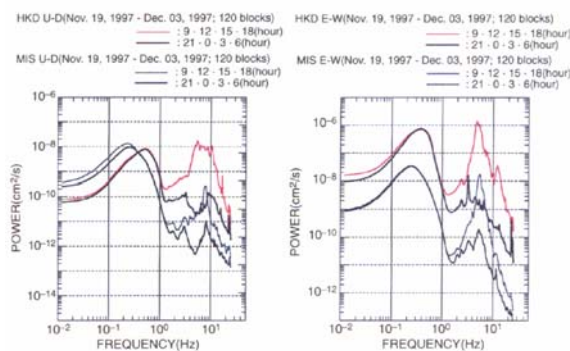
La **forma** dello spettro di rumore **medio** su roccia non varia sensibilmente con la posizione geografica

Inoltre lo spettro di rumore non è bianco



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

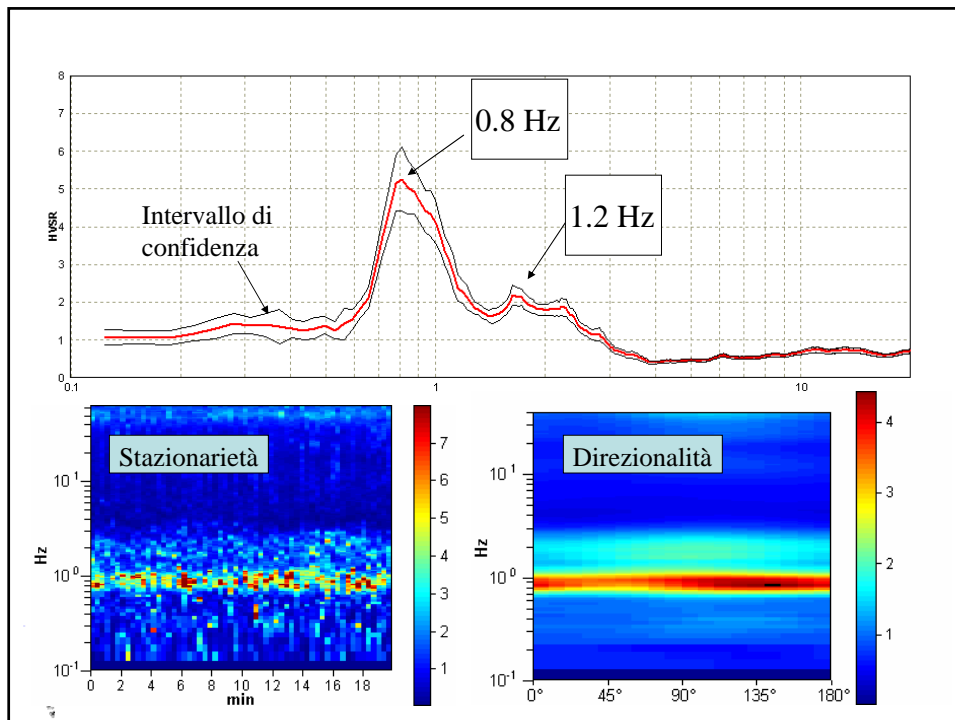
Lo spettro medio cambia invece sensibilmente in funzione delle ore del giorno e del tipo di sottosuolo



Tuttavia si osserva che i rapporti fra le componenti spettrali medie del rumore ambientale relative alle componenti orizzontali e verticali del moto (HVSR) dipende in larga parte **solo dalla struttura del sottosuolo**



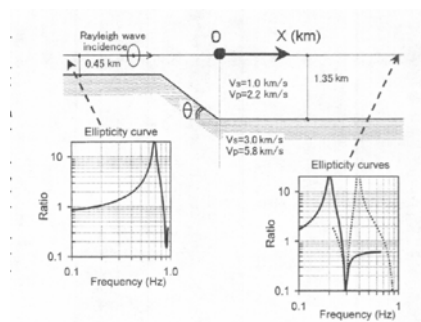
Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena



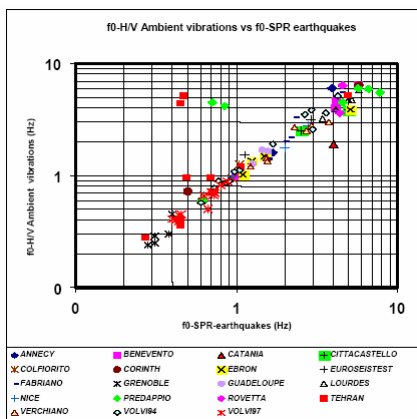
In particolare, si vede che, almeno in prima approssimazione, i massimi significativi della funzione H/V identificano la presenza di possibili fenomeni di risonanza per le onde S del corpo sedimentario e permettono di identificare le frequenze di vibrazione interessate

Il periodo fondamentale di risonanza del sedimento dipende dallo spessore H del sedimento e dalla velocità “media” \bar{v}_s delle onde S nel sedimento

$$v_1 = \frac{\bar{v}_s}{4H}$$



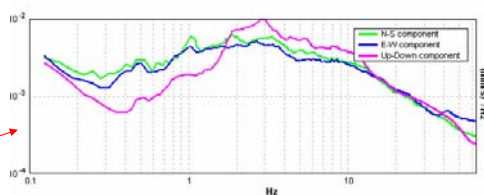
La qualità di queste stime delle frequenze di risonanza del suolo è supportata da numerose evidenze sperimentali anche se non esiste una interpretazione fisica del fenomeno largamente condivisa



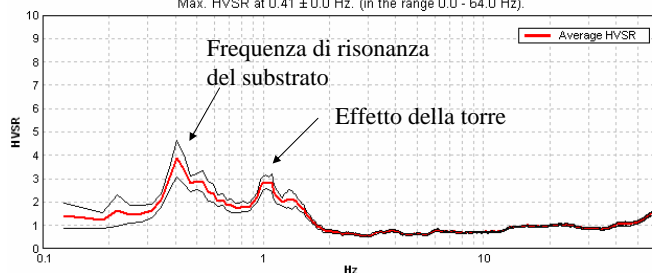
Allo stesso modo è largamente diffusa l'opinione che la curva HVSR **non** rappresenti la **funzione di risposta** del suolo



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena



Max. HVSR at 0.41 ± 0.0 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz).



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

I maggiori **vantaggi** dell'approccio descritto sono:

1. Bassi costi della misura (si tratta di sue sole misure condotte in successione con lo stesso strumento)
2. Bassa occupazione (la misura è puntuale e viene effettuata in condizioni di esercizio della struttura)
3. Fornisce informazioni dirette sulle principali modalità di vibrazione del manufatto
4. Fornisce indicazioni dirette sulle principali modalità di vibrazione del suolo



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

I **limiti** principali sono:

1. La precisione della misura dipende dalle ipotesi di stazionarietà del campo di rumore
2. Non tutti i modi di vibrazione possono essere identificati
3. Si tratta di sollecitazioni relativamente piccole e quindi il comportamento meccanico della struttura è potenzialmente differente da quello che si realizza in presenza di scuotimenti intensi



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Pur tenendo conto di queste limitazioni, che uso fare di queste misure?

1. Stime di primo livello del livello di vulnerabilità

Il massimo trasferimento di energia dal suolo alla struttura avviene in corrispondenza delle frequenze di risonanza di quest'ultima

Inoltre, in presenza di fenomeni di risonanza del suolo, saranno le frequenze corrispondenti ai modi di vibrazioni propri quelle maggiormente eccitate in caso di terremoto

Confrontando quindi le modalità di vibrazione del suolo e della struttura è quindi possibile individuare le situazioni più pericolose almeno nella fase iniziale del danneggiamento

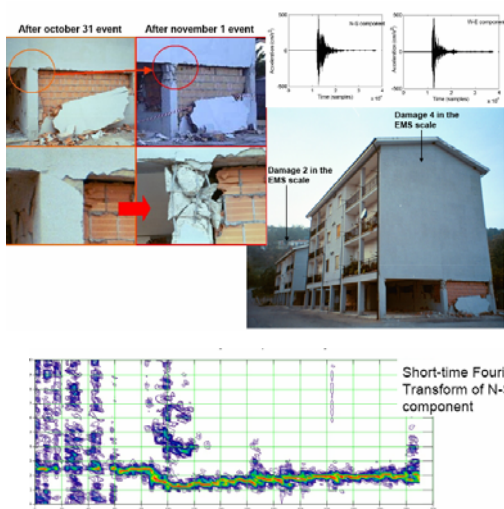
Dynamic amplification (D)
as a function of soil frequency
(Fs), building frequency (Fe)
and building damping (S)

$$D = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{F_e}{F_s}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{S * F_e}{F_s}\right)^2}}$$



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

2. Valutare lo stato di conservazione di un manufatto



Ci si può aspettare infatti che le variazioni delle proprietà meccaniche della struttura si riflettano sulle frequenze di vibrazione modali

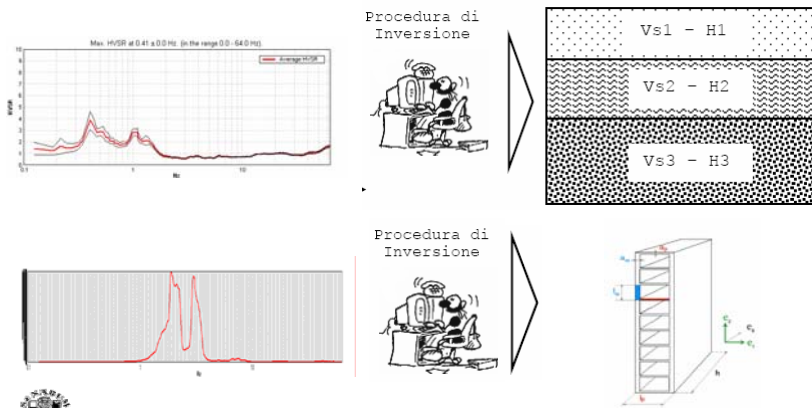
Confrontando quindi le misure di risonanza condotte in tempi diversi (a distanza di mesi o anni per valutare lo stato di conservazione o dopo un eventuale evento potenzialmente dannoso) è possibile rivelare eventuali danneggiamenti non altrimenti identificabili



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

2. Inferire le caratteristiche meccaniche del sottosuolo e del manufatto

Il confronto fra i risultati di una modellazione numerica e le osservazioni possono fornire indicazioni sui principali parametri di interesse (Inversione)



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Il problema della valutazione della vulnerabilità delle strutture a per la definizione di attività di prevenzione è caratterizzato da due aspetti contrastanti

1. Il problema è assai difficile dal punto di vista concettuale, data la presenza di complesse interazioni fra le varie parti del sistema meccanico da prendere in considerazione
2. D'altro canto una politica di prevenzione efficace deve agire a scala territoriale ed interessarsi anche a situazioni meno importanti dal punto di vista ingegneristico ma essenziali nelle fasi di gestione dell'emergenza o per la riduzione dei danni

Il problema si presenta come intrinsecamente interdisciplinare e richiede il superamento delle usuali partizioni di competenza



Dip. di Scienze della Terra – Università di Siena

Mentre il primo aspetto implica l'impiego di robuste risorse intellettuali e materiali per la caratterizzazione anche di una sola struttura

il secondo rende necessari approcci speditivi a basso costo che forniscano informazioni magari imprecise ma attendibili e che sia applicabili per forme di monitoraggio estensivo

Quella illustrata nella relazione è una soluzione di compromesso basata sullo studio del rumore sismico ambientale

I vantaggi sono quelli di permettere con costi contenuti una stima diretta e in sito delle principali caratteristiche dinamiche del sistema struttura/terreno in condizioni di esercizio per bassi livelli di deformazione

Sulla effettiva utilità di questo tipo di approccio e sui suoi limiti è utile aprire un confronto

