

3 Teoria e Normativa.

3.1.Tecnica di misurazione e strumentazione

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) consiste nel misurare direttamente, sfruttando il rumore di fondo ambientale (microtremori), le frequenze di risonanza degli edifici e dei terreni costituenti il sottosuolo, allo scopo di stimare gli effetti di sito e la vulnerabilità sismica dell'opera. Per rumore ambientale di fondo s'intende l'insieme delle vibrazioni che si propagano nel terreno dovute sia a fenomeni naturali, moto ondoso, perturbazioni atmosferiche, ecc., sia all'azione antropica, traffico veicolare, macchinari, ecc.. Si è riconosciuto, a partire dagli anni settanta, che i microtremori tendono a eccitare le frequenze naturali di oscillazione dei terreni, permettendone l'individuazione. In pratica ciò che viene misurato sono, in certo intervallo di frequenze, solitamente 0.1-100 Hz, le velocità dei microtremori lungo il piano orizzontale e verticale (H e V) e il rapporto fra le due componenti (H/V). I valori di massimo locale (picchi positivi) di H/V ai quali corrispondono minimi locali di V individuano le frequenze di risonanza degli strati di terreno lungo la verticale di misura. Più elevato è il valore del rapporto H/V maggiore è il contrasto di impedenza sismica e quindi la variazione di velocità delle onde S fra livelli stratigrafici contigui.

La tecnica HVSR richiede l'utilizzo di un velocimetro triassiale, cioè di un sismometro a stazione singola in grado di registrare i microtremori lungo le due direzioni orizzontali (X, Y) e lungo quella verticale (Z), in un ampio intervallo di frequenze (0.1-100 Hz) e per una durata sufficientemente lunga (mediamente 10-20 minuti). Il moto indotto nel terreno viene misurato in termini di velocità attraverso tre velocimetri, uno per ogni direzione di misura (X, Y e Z), secondo il passo di campionamento impostato dall'operatore. Le misure registrate vengono poi elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V (rapporto H/V in funzione della frequenza, dove H è la media delle misure lungo X e Y) e spettri V (componente verticale del moto in funzione della frequenza).

Attraverso la tecnica HVSR è possibile:

- valutare in maniera quantitativa gli effetti di sito (risposta sismica locale e suscettibilità alla liquefazione del terreno);

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

- ricavare il profilo delle velocità delle onde S con la profondità e calcolare il parametro V_{s30} ;
- analizzare la vulnerabilità sismica degli edifici, esistenti o in progetto.

3.2. Effetti di sito.

3.2.1. Risposta sismica locale.

Le onde di taglio (S) sono le principali responsabili delle lesioni che subiscono gli edifici durante un evento sismico. Infatti, mentre le onde di compressione (P) agiscono sulle sovrastrutture in direzione prevalentemente verticale (moto sussultorio), le onde S sollecitano le stesse con forze di taglio lungo il piano orizzontale (moto ondulatorio), dove gli elementi strutturali sono più vulnerabili. Nelle analisi di pericolosità sismica è quindi fondamentale esaminare in dettaglio in che modo le onde S si propagano. E' infatti ampiamente dimostrato che questo tipo di oscillazione durante il percorso verso la superficie può subire un'azione di filtraggio che tende a ridistribuire l'energia associata al treno d'onda, concentrandola in determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione dei terreni attraversati. L'effetto finale è quello di amplificare le onde S che andranno a sollecitare l'opera. Questo fenomeno può essere dovuto sia a particolarità topografiche del sito (amplificazione topografica), come valli sepolte o zone di cresta o di versante in pendii naturali o artificiali, sia a variazioni brusche nelle caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati lungo la verticale (amplificazione stratigrafica).

Lermo e Chavez-Garcia (1993), basandosi sul lavoro di Nakamura (1989), suggeriscono che lo spettro H/V possa essere visto, a tutti gli effetti, come rappresentativo della funzione di trasferimento del moto sismico dal bedrock alla superficie. Secondo questi Autori quindi le ampiezze dei picchi stratigrafici nello spettro H/V possono essere interpretate direttamente come fattori di amplificazione del moto sismico, almeno per quanto riguarda la componente stratigrafica. Va tenuto presente però che gli Autori citati parlando di microtremiti intendono essenzialmente microsismi, cioè eventi sismici di bassa energia, in cui le sorgenti sono ubicate in profondità nella crosta. In questo contesto lo spettro H/V può essere interpretato come

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

prodotto essenzialmente da onde di volume (P e S). Nella tecnica HVSR comunemente impiegata nella geologia applicata i microtremori registrati derivano da sorgenti superficiali e sono composti essenzialmente da onde di superficie (Rayleigh e Love). In questo caso, mentre è ancora possibile riconoscere le frequenze in cui ricadono i picchi H/V come frequenze di risonanza del terreno, le ampiezze dei massimi non possono essere più considerate come rappresentative dell'amplificazione sismica. Per valutare la funzione di trasferimento del moto sismico in superficie bisogna operare allora partendo dal profilo delle Vs, ricavato dall'inversione dello spettro H/V, e calcolare la curva teorica secondo la procedura descritta nel paragrafo successivo.

3.2.2. Propagazione in direzione verticale di un'onda di taglio in un modello stratigrafico monodimensionale.

Un'onda di taglio di frequenza angolare ω che si propaga verso l'alto causa spostamenti orizzontali nel terreno $u(z,t)$ che devono soddisfare l'equazione differenziale:

$$(1) \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}$$

dove ρ è la densità di massa del terreno (peso di volume diviso l'accelerazione di gravità g), G il modulo dinamico di taglio e η la viscosità del mezzo.

Lo spostamento u , indotto dalla sollecitazione armonica di frequenza ω , può anche essere espresso nella forma:

$$(2) u(z,t) = U(z)e^{i\omega t}$$

Sostituendo la (2) nella (1) si ottiene:

$$(3) (G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \rho\omega^2 U$$

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

L'equazione (3) ha la seguente soluzione generale :

$$(4) U(z) = Ee^{ikz} + Fe^{-ikz}$$

in cui:

$$k = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G^*}}$$

G^* è il modulo di taglio complesso dato dalla relazione:

$$G^* = G(1 + 2i\beta)$$

e β è il fattore di smorzamento critico del terreno, così definito:

$$\beta = \frac{\omega\eta}{2G}$$

Nella relazione (4) E rappresenta l'ampiezza dell'onda incidente, cioè diretta verso l'alto, e F l'ampiezza dell'onda riflessa dall'interfaccia dello strato, e quindi diretta verso il basso.

Combinando la (2) e la (4) si ricava:

$$(5) u(z,t) = (Ee^{ikz} + Fe^{-ikz})e^{i\omega t}$$

In un terreno composto da più strati, al tetto dello strato n-esimo di spessore h si ha:

$$(6) u_n(z=0) = (E_n + F_n)e^{i\omega t}$$

mentre alla base:

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

$$(7) u_n(z=h) = (E_n e^{ik_n h_n} + F_n e^{-ik_n h_n}) e^{i\alpha t}$$

Lo sforzo di taglio agente sul piano orizzontale all'interfaccia dello strato è dato dalla relazione:

$$\tau(z,t) = G^* \frac{\partial u}{\partial t}$$

Quindi in corrispondenza della faccia superiore dello strato n-esimo si ha:

$$(8) \tau_n(z=0) = ik_n G_n^* (E_n + F_n) e^{i\alpha t}$$

e in quella inferiore:

$$(9) \tau_n(z=h) = ik_n G_n^* (E_n e^{ik_n h_n} + F_n e^{-ik_n h_n}) e^{i\alpha t}$$

La deformazione tangenziale ($\gamma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial t}$) è invece ricavabile come segue:

$$\begin{aligned} \gamma_n(z=0) &= ik_n (E_n + F_n) e^{i\alpha t} \\ \gamma_n(z=h) &= ik_n (E_n e^{ik_n h_n} + F_n e^{-ik_n h_n}) e^{i\alpha t} \end{aligned}$$

In un terreno multistrato, in generale, i parametri ρ , G e β variano da strato a strato. Di conseguenza anche i valori di E e F tendono ad assumere valori differenti. Le ampiezze E e F dell'onda incidente e riflessa all'interfaccia dello strato $n+1$ rispetto allo strato n , posto ad una quota superiore, si possono ricavare dalle relazioni:

$$(10) E_{n+1} = \frac{1}{2} E_n (1 + \alpha_n) e^{ik_n h_n} + \frac{1}{2} F_n (1 - \alpha_n) e^{-ik_n h_n}$$

$$(11) F_{n+1} = \frac{1}{2} E_n (1 - \alpha_n) e^{ik_n h_n} + \frac{1}{2} F_n (1 + \alpha_n) e^{-ik_n h_n}$$

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

in cui:

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\rho_n G_n^*}{\rho_{n+1} G_{n+1}^*}}$$

è il rapporto d'impedenza complesso fra gli strati n e n+1.

In superficie lo sforzo di taglio deve essere uguale a zero. Dalla relazione (8) si ricava quindi che al piano campagna $E_1=F_1$.

Ponendo per semplicità $E_1=F_1=1$ è possibile, utilizzando le relazioni (10) e (11) calcolare i valori di E e F per tutti gli strati di copertura, partendo dalla superficie fino al bedrock.

La funzione di trasferimento fra gli spostamenti dello strato n e lo strato n+1, più profondo, è definita come segue:

$$(12) A_{n+1,n}(\omega) = \frac{u_n}{u_{n+1}} = \frac{E_n + F_n}{E_{n+1} + F_{n+1}}$$

In corrispondenza dell'interfaccia superiore del bedrock $E'=F'$ (sforzo di taglio nullo). Di conseguenza la relazione che fornisce la funzione di trasferimento dell'onda di taglio in superficie rispetto al substrato roccioso (fattore di amplificazione dinamica) è data dalla relazione:

$$(13) A_{bedrock,1}(\omega) = \frac{1}{E_{bedrock}}$$

3.2.3. Liquefazione dei terreni.

Per liquefazione s'intende il totale annullamento della resistenza al taglio del terreno con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi.

Se si esprime la resistenza al taglio attraverso la relazione di Coulomb:

$$\tau = c + (\sigma_{v0} - u) \tan \varphi$$

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

con:

c = coesione del terreno

σ_{v0} = pressione litostatica totale agente alla profondità d'indagine

u = pressione interstiziale dell'acqua

φ = angolo di resistenza al taglio del terreno,

È evidente che la grandezza $\langle \tau \rangle$ si può annullare solo nel caso in cui siano verificate le condizioni:

a) $c = 0$;

b) $(\sigma_{v0} - u) = 0$;

(il caso $\varphi = 0$ non ha importanza pratica, perché può verificarsi solo in terreni coesivi in condizioni non drenate, dove però la condizione $\langle c=0 \rangle$ non può ovviamente verificarsi).

La condizione a) vieta che il fenomeno della liquefazione possa verificarsi in terreni coesivi o incoerenti ma con una significativa frazione argillosa o limosa plastica.

La condizione b) si verifica, quando la pressione interstiziale uguaglia la pressione totale esercitata ad una data profondità dalla colonna di terreno sovrastante e dagli eventuali sovraccarichi presenti in superficie ($\sigma_{v0} = u$). In definitiva il fenomeno della liquefazione si può manifestare preferibilmente in depositi sciolti non coesivi posti sotto falda, in seguito ad eventi che producano un forte aumento della pressione interstiziale dell'acqua.

Nakamura (1996) propone di utilizzare il parametro K_g , ricavato con la tecnica HVSr, per quantificare la vulnerabilità sismica del sito, in riferimento soprattutto al fenomeno della liquefazione. K_g , detto indice di vulnerabilità del sito, si ottiene con la seguente relazione:

$$K_g = \frac{A_g^2}{F_g}$$

dove A_g è l'ampiezza del picco più importante dello spettro H/V e F_g la corrispondente frequenza. I siti con valore di $K_g > 10$ sono da considerarsi a elevata vulnerabilità e quindi a rischio liquefazione, naturalmente partendo dal presupposto che ci siano le condizioni geologiche perché il fenomeno possa avvenire. In base alle considerazioni fatte nel paragrafo 3.2.1, le ampiezze dei massimi H/V derivanti da onde di superficie non possono essere considerate rappresentative del moto sismico, quindi il calcolo di K_g

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

andrebbe eseguito non direttamente sullo spettro H/V ma piuttosto sulla funzione di trasferimento calcolata con la procedura vista nel paragrafo 3.2.2.

3.3. Profilo velocità delle onde S e classificazione del sottosuolo secondo il d.m. 14.01.2008

Il D.M. 14.01.2008 propone come riferimento di calcolo dell'amplificazione sismica locale, in particolare della componente stratigrafica, il metodo di Borchardt (1994) basato sulla stima del parametro V_{s30} . Per V_{s30} s'intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati fino a 30 metri di profondità dal piano di posa della fondazione, calcolata secondo la relazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Sulla base del valore calcolato di V_{s30} vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E alle quali corrispondono un differente spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

CATEGORIE DI SOTTOSUOLO					
Categoria sottosuolo	Descrizione	Spessore (m)	Vs (m/s)	Nspt	Cu (kPa)
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m.	Qualsiasi	≥ 800		
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} , compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt,30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).	> 30 m	≥ 360 ≤ 800	>50	>250
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi fra 180 e 360 m/s ($15 < N_{spt,30} < 50$ nei terreni a grana grossa, $70 < cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).	> 30 m	≥ 180 ≤ 360	>15 <50	>50 <250
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati oppure di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30} < 180$ m/s ($N_{spt,30} < 15$ nei terreni a grana grossa, $cu_{30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).	> 30 m	< 180	<15	>70
E	Terreni di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, giacenti su un substrato di riferimento ($V_{s30} > 800$ m/s).	Fino a 20 m	$\approx C$ e D	$\approx C$ e D	$\approx C$ e D
CATEGORIE AGGIUNTIVE DI SOTTOSUOLO					
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < cu_{,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.				
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.				

Una valutazione del parametro V_{s30} può essere condotta attraverso l'inversione vincolata dello spettro H/V ricavata con il velocimetro triassiale. In pratica viene utilizzata la relazione che lega la frequenza di risonanza del terreno (f) alla velocità delle onde S nel terreno stesso (Vs):

$$f(Hz) = \frac{Vs}{4h}$$

dove h è la profondità della base dello strato. Nota la profondità di un singolo livello stratigrafico, solitamente il primo, è possibile procedere all'inversione dello spettro H/V, modellando la curva sintetica in modo da ottenere la sovrapposizione con quella misurata.

La procedura d'inversione comporta la definizione di un modello stratigrafico iniziale e dal successivo calcolo dello spettro H/V che ne deriva. La curva H/V teorica viene confrontata con quella sperimentale e, attraverso un procedimento per tentativi, si modifica il modello iniziale fino

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

a ottenere una soddisfacente sovrapposizione delle due curve. Comunemente lo spettro teorico viene calcolato con la procedura suggerita da Arai e Tokimatsu (2004):

$$(H/V)(f) = \sqrt{\frac{P_{HR} + P_{HL}}{P_{VR}}}$$

dove:

P_{HR} = ampiezza spettrale della componente orizzontale delle onde di Rayleigh;

P_{HL} = ampiezza spettrale della componente orizzontale delle onde di Love;

P_{VR} = ampiezza spettrale della componente verticale delle onde di Rayleigh.

Si ricorda che l' ampiezza spettrale della componente verticale delle onde di Love è nulla.

Le tre grandezze P_{HR} , P_{HL} e P_{VR} vengono valutate con il metodo della matrice del propagatore, messo a punto, dal punto di vista teorico, da Thomson (1950) e Haskell (1953) e riformulato da Dunkin (1965) e Watson (1970). Per tener conto di un comportamento debolmente dissipativo del terreno, i valori di velocità delle onde P e S inseriti nel modello vengono corretti inserendo un fattore di smorzamento. Nel programma viene preimpostato un fattore di smorzamento uguale a 0,05 per le onde S e uguale a 0,017 per le onde P.

Normalmente i picchi alle alte frequenze (>10 Hz) segnalano la presenza di passaggi stratigrafici molto superficiali, quelli alle basse frequenze (<1 Hz) variazioni stratigrafiche molto profonde. Poiché le inversioni di velocità, cioè il passaggio andando in profondità da livelli veloci a livelli meno veloci, non da origine a picchi nello spettro H/V, queste non possono essere rilevate direttamente. Un indizio della presenza di inversioni di velocità può essere fornito però, indirettamente, dall'andamento dello spettro H/V: ampi intervalli di frequenza in cui costantemente il rapporto H/V si mantiene minore di uno sono spesso associabili a variazioni negative delle velocità con la profondità. È possibile inserire nel modello teorico le inversioni di velocità purchè la variazione di V_s non sia troppo brusca.

3.4. Vulnerabilità sismica dell'opera.

Per vulnerabilità sismica s'intende la suscettibilità di un'opera a subire lesioni in seguito alle sollecitazioni indotte dal sisma. E' stato dimostrato che la vulnerabilità agli eventi sismici di un edificio di edificazione relativamente recente è solo marginalmente collegabile alle modalità costruttive dello stesso. Molto più gravoso è l'effetto dell'amplificazione sismica locale, che tende a aumentare in maniera importante l'intensità delle forze sismiche agenti sulla struttura. In particolare se la frequenza di risonanza dell'edificio è confrontabile con quella dei terreni di fondazione si verifica il fenomeno della risonanza accoppiata che comporta un'amplificazione delle sollecitazioni sismiche sull'opera.

Nel caso di edifici in fase di progettazione o di realizzazione la frequenza di risonanza fondamentale dell'opera può essere valutata con formule semplificate, quale quella indicata nel D.M. 14.01.2008:

$$f_s = \frac{1}{C_1 Z^{\frac{3}{4}}}$$

in cui C_1 è un fattore che dipende dalla tipologia costruttiva.

Tipologia	C_1
Costruzioni con struttura a telaio in acciaio	0,085
Costruzioni con struttura a telaio in calcestruzzo armato	0,075
Costruzioni con qualsiasi altro tipo di struttura	0,050

La relazione è valida per edifici con Z non superiore ai 40 metri e massa distribuita, approssimativamente, in maniera uniforme lungo l'altezza.

Negli edifici esistenti il valore della frequenza fondamentale di risonanza può essere invece misurato direttamente con il velocimetro triassiale. In questo caso è necessario misurare il rapporto H_i/H_0 , dove H_0 è lo spettro della componente orizzontale, lungo X o Y, riferita al piano terra e H_i la stessa componente misurata al piano i -esimo. Nella pratica spesso si eseguono solo due misure, ubicate lungo la stessa verticale, una al piano terra e una all'ultimo piano dell'edificio. Il picco positivo massimo dello spettro H_i/H_0 indica direttamente la frequenza di risonanza fondamentale della struttura.

3.5 Parametri geotecnici del terreno.

Stimata la velocità delle onde P e S lungo la verticale d'indagine, è possibile ricavare, attraverso alcune correlazioni analitiche, non empiriche, i parametri geotecnici dinamici del terreno.

MODULO DI DEFORMAZIONE AL TAGLIO.

$$G(kPa) = \rho V_s^2$$

dove:

ρ (kNs²/m⁴) = densità del mezzo, data dal rapporto fra il peso di volume del terreno (saturato nel caso sia immerso in falda) e l'accelerazione di gravità (9,81 m/s²);

V_s (m/s) = velocità delle onde S.

MODULO DI COMPRESSIBILITA' VOLUMETRICA.

$$M(kPa) = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

dove:

V_p (m/s) = velocità delle onde P.

MODULO EDOMETRICO.

$$E_{ed}(kPa) = \rho V_p^2$$

MODULO DI YOUNG

$$E(kPa) = 2\rho V_s^2(1+\nu)$$

dove:

PROGRAM GEO –GeoHVSr ver.1.2 per Windows

ν = coefficiente di Poisson, dato dalla relazione analitica:

$$\nu = \frac{\left[0.5 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

Si ricorda che i parametri geotecnici ricavati si riferiscono a condizioni di bassa deformazione e quindi possono risultare superiori di circa un ordine di grandezza rispetto a quelli ottenibili, per lo stesso tipo di terreno, in situazione di grandi deformazioni.