

Geometri Comitato Modenese
Federgeometri Modena

ELEMENTI DI SISMICA

RIFERIMENTI NORMATIVI
AZIONE SISMICA E INDAGINE SISMICA

Relatori: Dr.Geol.Cesare Sandoni
Dr.Geol.Silvio Paganelli

Sala riunioni Del Mammut Club
Via Ghiaroni 189 Modena

13 febbraio 2006 ore 18,00-20,30

1

ELEMENTI DI SISMICA

RIFERIMENTI NORMATIVI AZIONE SISMICA E INDAGINE SISMICA

INDICE

- Primi elementi normativi in materia di sismica

- Definizione di onda e parametri caratteristici

- Azione sismica e spettro di risposta

- Prospezioni sismiche - Metodi di indagine

- Allegati

*Strumentazione sismica: applicazioni e funzionamento

PRIMI ELEMENTI NORMATIVI IN MATERIA DI SISMICA

In riferimento alla materia sismica i principali riferimenti normativi risultano i seguenti:

"Vecchia" normativa:

- Legge 02.02.1974 n.64 Procedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche
- L.R. 19.06.1984 n. 35 Norme per lo snellimento delle procedure per le costruzioni in zone sismiche e per la riduzione del rischio sismico
- D.M. 11.03.1988 Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione (legge fondamentale per l'applicazione degli aspetti tecnico-geologici)
- D.M. 16.01.1996 Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche (trattasi degli ultimi aggiornamenti normativi in riferimento agli aspetti tecnici a cui si riferisce la Legge 64/1974)
- Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 10.04.1997 Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al DM. 16.01.1996

In base agli aspetti normativi sopra riportati, il territorio nazionale comprendeva numero 3 fasce di sismicità definite da un grado di sismicità (S):

- S=12 per le zone ad alta sismicità
- S=9 per le zone a media sismicità
- S=6 per le zone a bassa sismicità

In provincia di Modena erano considerati sismici i territori dei comuni di Frassinoro e Pievepelago con un grado di sismicità 9; i restanti comuni non erano classificati sismici.

La normativa, che segue una procedura tecnica semplificata, non tiene conto degli effetti notevoli che le condizioni geologiche locali hanno sull'intensità dell'accelerazione sismica in superficie; infatti uno stesso sisma può produrre effetti sensibilmente diversi all'interno di uno stesso comprensorio, per via dei diversi aspetti litostratigrafici e litomeccanici presenti.

"Nuova" Normativa

OPCM 3274 del 20.03.2003

Primi elementi in materia dei criteri generali per la classificazione sismica e per la riduzione del rischio sismico

(conta di n.4 allegati di cui all'allegato 1 riporta una riclassificazione sismica di prima applicazione e i restanti allegati risultano tecnici sugli edifici, sui ponti e sulle fondazioni)

D.M. 14.09.2005

Norme tecniche per le costruzioni
(entrata in vigore dal 23.10.2005)

(fra gli elementi tecnici applicativi di dettaglio comprende gli allegati 2 e 3 dell'OPCM 3274/2003)

La nuova normativa introduce quattro fasce di sismicità definite in zone:

zona 1	zona ad alta sismicità
zona 2	zona a media sismicità
zona 3 e zona 4	zona a bassa sismicità

A ciascuna zona è attribuita un'accelerazione di picco orizzontale del suolo a_g , espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g ; i valori corrispondenti risultano:

zona 1	$a_g=0,35g$
zona 2	$a_g=0,25g$
zona 3	$a_g=0,15g$
zona 4	$a_g=0,05g$

Secondo la riclassificazione sismica di prima applicazione introdotta dall'OPCM 3274/2003 tutti i comuni della provincia di Modena sono considerati sismici con questa specifica distinzione in zone sismiche:

zona 2	Pievepelago, Frassinoro, Formigine, Sassuolo, Fiorano, Maranello e Castelvetro
zona 3	i restanti comuni della provincia di Modena

Dato che per un periodo transitorio di 18 mesi a partire dal 23.10.2005 è facoltativo da parte del progettista utilizzare gli aspetti tecnici della "vecchia" normativa o in alternativa quelli di nuova introduzione, con l'obbligo di considerare la nuova classificazione sismica introdotta dall'OPCM 3274/2003, ne consegue la necessità di procedere ad un'interpretazione che consenta di utilizzare la nuova classificazione sismica assegnando una corrispondenza con i gradi di sismicità definiti dai precedenti lineamenti normativi.

Tale allineamento fra gradi di sismicità e zone di sismicità ha avuto una prima proposta nella Delibera Giunta Regionale 2329/2004 confermata nella recente Delibera Giunta Regionale 1677/2005:

Precedente normativa		Attuale normativa
S=12	>>	Zona 1
S=9	>>	Zona 2
S=6	>>	Zona 3 e Zona 4

Ulteriore elemento di introduzione nella recente normativa, anticipata nell'OPCM 3274/2003 e confermata con alcune piccole modifiche nel D.M. 14.09.2005, è la distinzione dei suoli da un punto di vista sismico.

Al capo 3.2.1. (Categorie di suolo di fondazione) del D.M. 14.09.2005, se si seguono gli aspetti tecnici di nuova introduzione, è necessario classificare da un punto di vista sismico il tipo di terreno di progetto.

Vengono distinti complessivamente n.7 tipi differenti di suolo denominati, a procedere da quello con caratteristiche meccaniche migliori, nel modo seguente:

- suolo di categoria A
- suolo di categoria B
- suolo di categoria C
- suolo di categoria D
- suolo di categoria E
- suolo di categoria S1
- suolo di categoria S2

(per i suoli S1 e S2 andranno svolti studi speciali per la definizione dell'azione sismica)

Si riporta integralmente il testo delle diverse categorie di suolo.

Per suolo di fondazione di categoria A si intendono *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi*, con valori di $V_{s_{30}} > 800$ m/sec, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a mt.5.

Per suolo di fondazione di categoria B si intendono *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti* con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s_{30}}$ compresi fra 360 m/sec e 800 m/sec (valori medi di $N_{SPT} > 50$ o coesione non drenata media $C_u > 250$ KPa).

Per suolo di fondazione di categoria C si intendono *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine di metri fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di $V_{s_{30}}$ compresi fra 180 m/sec e 360 m/sec ($15 < N_{SPT} < 50$, $70 < C_u < 250$ KPa).

Per suolo di fondazione di categoria **D** si intendono *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di $V_{s30} < 180$ m/sec ($N_{SPT} < 15$, $C_u < 70$ KPa).

Per suolo di fondazione di categoria **E** si intendono *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di V_{s30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 mt., giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{s30} > 800$ m/sec.

Per suolo di fondazione di categoria **S1** si intendono terreni che includono uno strato di almeno 10 mt. di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto d'acqua, con $10 < C_u < 20$ Kpa e caratterizzati da valori di $V_{s30} < 100$ m/sec.

Per suolo di fondazione di categoria **S2** si intendono depositi di terreni soggetti a liquefazione, argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

La distinzione deve essere fatta quindi principalmente attraverso il parametro delle velocità media di propagazione delle onde di taglio entro mt.30 metri di profondità (V_{s30}).

Si utilizza tale parametro poichè un'opera ingegneristica a seguito di un sisma riceve l'arrivo di diverse onde sismiche di cui le più temute sono le onde di taglio o dette anche onde S, in quanto provocano variazioni di forma e quindi delle distorsioni.

Le onde S sono anche di maggiore intensità rispetto alle onde P, per cui gli studi di amplificazione locale del suolo si riferiscono generalmente alla trasmissione delle onde S in direzione verticale verso la superficie, con moto orizzontale delle particelle di terreno.

In alternativa si possono utilizzare:

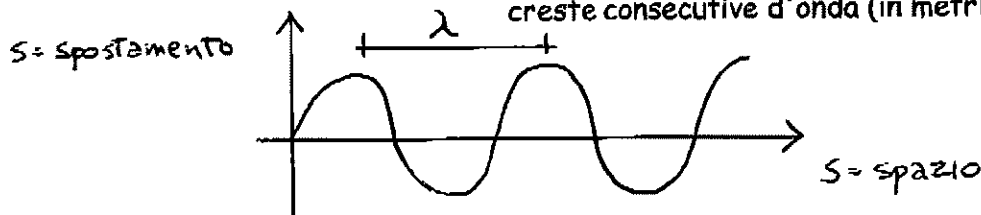
- N_{SPT} il valore medio del numero colpi della prova SPT (Standard Penetration Test)
parametro significativo in terreni incoerenti (sabbie e ghiaie)

- C_u valore medio della coesione non drenata
unicamente in terreni coesivi (a forte contenuto di argilla e limo)

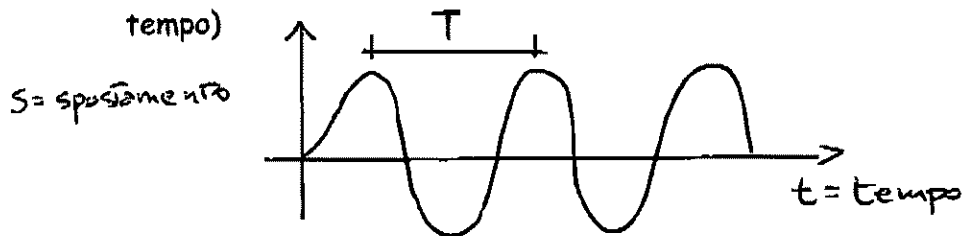
DEFINIZIONE DI ONDA E PARAMETRI CARATTERISTICI

Onda >> Perturbazione che si propaga in un mezzo con una velocità definita
 Modifica lo stato di quiete del mezzo che attraversa

Lunghezza d'onda (λ) >> distanza, lungo la direzione di propagazione, di due creste consecutive d'onda (in metri)



Periodo d'onda (T) >> In un determinato punto dello spazio, nel diagramma spostamento in funzione del tempo, è l'intervallo di tempo fra l'arrivo di due creste d'onda (unità di misura è il tempo)



$T = \lambda / V_0 = \text{Lunghezza d'onda} / \text{Velocità d'onda}$

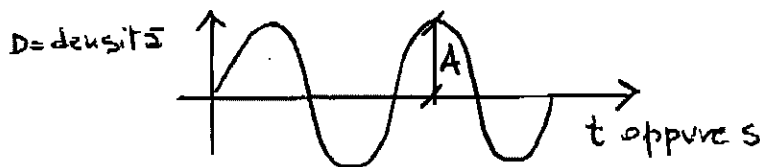
$T = 2\pi / \omega$ $\omega = \text{pulsazione onda}$

La frequenza d'onda (f) >> L'inverso del periodo

$f = 1 / T = V_0 / \lambda$ (in Hertz oppure sec^{-1})

La velocità è quindi >> $V_0 = \lambda / T = f \times \lambda = \omega \cdot \lambda / 2\pi$

Ampiezza d'onda (A) >> La massima escursione lungo l'asse delle y
 Nei mezzi solidi l'ampiezza sarà la massima deviazione della densità rispetto allo stato di quiete



A = densità max - densità normale

A = la massima deformazione elastica

>> Modulo di Young

$V_0 = (\text{modulo di Young} / \text{densità})^{0.5}$ >>

Costante per ogni mezzo

>> Relazione che vale per onde elastiche (acustiche) nei mezzi solidi

- Intensità d'onda >> $V_0 \times P_e$
>> Energia che passa per unità di tempo attraverso un'area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda
>> dove P_e è la densità di energia ossia l'energia per unità di volume
>> $P_e = b \times A^2$ con b dipendente da λ e da f

Le modalità con cui un determinato sisma si manifesta in un determinato sito, dipende principalmente:

- dall'intensità del sisma
- dalla distanza dall'epicentro
- dalle caratteristiche delle rocce attraversate per raggiungere il sito
- dalle caratteristiche fisiche e meccaniche dello strato superficiale caratterizzante il sito

Si possono quindi avere sismi caratterizzati da movimenti oscillatori rapidi o ad alta frequenza (basso periodo d'onda, sismi di breve durata, tipico dei terreni rocciosi) e sismi caratterizzati da movimenti oscillatori lenti o a bassa frequenza (lungo periodo d'onda, sismi di lunga durata, tipico dei terreni costituiti da notevoli spessori di terreni sciolti); in generale aumentando la distanza dall'epicentro, maggiore risulterà la durata del sisma e minore la sua intensità.

In un terreno soffice le onde sismiche rallentano di velocità, mentre aumentano di ampiezza; infatti l'amplificazione del suolo avviene nel campo delle basse frequenze (periodi lunghi), tipico pertanto dei materiali litologici soffici, dove l'attenuazione delle frequenze è dovuto all'effetto dissipativo del suolo.

Il passaggio delle onde sismiche dal bedrock agli strati superficiali sciolti produce un'amplificazione dell'impulso sismico che corrisponde ad un incremento di ampiezza delle onde sismiche.

In generale si può affermare che un terreno sciolto amplifica l'accelerazione massima in superficie rispetto a quella che riceve alla sua base; ampliando la sua accelerazione si ha un incremento di intensità sismica (l'incremento di intensità è in riferimento all'interazione dinamica con la struttura).

Esistono varie relazioni che consentono di determinare, attraverso l'intensità sismica e la sua amplificazione sempre in termini di intensità, l'accelerazione sismica al suolo considerando il suo incremento.

Questa amplificazione del moto sismico non si manifesta in maniera identica in tutto lo spettro delle frequenze, ma tende a concentrarsi in intervalli ben delimitati. E' stato evidenziato inoltre che l'amplificazione maggiore cade spesso nell'intervallo di periodo 0-1 sec.

Il fattore di amplificazione diminuisce al crescere dell'intensità del sisma.

Detto questo un deposito di terreno sciolto agisce da filtro del moto sismico, diminuendo l'energia per effetto da una maggiore dissipazione di tipo viscoso e anelastico; le onde sismiche quindi rallentano di velocità, mentre aumentano di ampiezza.

Nel suo propagarsi dall'ipocentro verso la superficie il fronte d'onda per via di successive rifrazioni, passando a strati con velocità via via inferiori, tende a verticalizzare il suo vettore di propagazione; in definitiva raggiunto il bedrock si proietta verticalmente fino alla superficie.

Tale concetto vale per le onde S e le onde P; essendo le onde S quelle a maggiore intensità, gli studi di amplificazione locale del suolo si riferiscono generalmente alla trasmissione delle onde di taglio in direzione verticale, con moto quindi orizzontale delle particelle di terreno.

Nei terreni rigidi le massime risposte si hanno per periodi nel campo di 0,3-0,5 sec. e sono quindi le strutture rigide ad essere maggiormente impegnate; in terreni soffici i periodi prevalenti del sisma sono di circa 1,4-2,5 sec e saranno i palazzi alti e le strutture flessibili quelli che si troveranno nelle condizioni più difficili.

Inoltre se il sisma in arrivo possiede frequenze importanti nel campo delle frequenze risonanti del deposito, queste appariranno in superficie esaltate nel moto; se invece le frequenze del sisma e del deposito sono molto diverse, il deposito agirà da filtro ed il moto in superficie manterrà le caratteristiche di quelle in arrivo sul bedrock.

Su roccia lapidea i pericoli di un sisma possono derivare da situazioni di degradazione, fratturazione, piani di discontinuità, faglie geologiche e cavità sotterranee.

Nei terreni sciolti il comportamento all'azione sismica dipende principalmente dal grado di compattezza; la presenza dell'acqua può aggravare la condizione di stabilità, soprattutto nei terreni incoerenti.

L'azione di un sisma può determinare le seguenti reazioni in un terreno soffice, con possibili danni gravosi sulle strutture sopraggiacenti:

- fenomeni di densificazione (abbassamenti del terreno in superficie)
- fenomeni di liquefazione (spostamenti delle particelle dovute al moto dell'acqua in terreni saturi, con forte diminuzione della resistenza al taglio del terreno tendente all'annullamento. Si ha annullamento della resistenza al taglio in un terreno incoerente quando la pressione interstiziale diviene paritaria alla

pressione litostatica (fenomeno di sospensione).
Sono maggiormente suscettibili alla liquefazione i
terreni nel campo delle sabbie medio fini e delle
sabbie limose (contenuto in limo sino al 25%)
monogranulari ossia con un campo di variazione
granulometrica basso e una densità relativa $< 75\%$.

In generale su terreni rigidi sono meglio predisposti al sisma fabbricati flessibili
multipiano, mentre su terreni soffici, piccoli fabbricati rigidi.

Nei criteri di progettazione, in riferimento all'interazione struttura-terreno è sempre
conveniente dotare gli edifici di fondazioni del tipo rigido.

In terreni rigidi i cedimenti differenziali legati ad un sisma sono ostacolati, con
reazione rigida del complesso struttura, mentre su terreni soffici, dove la formazione
di assestamenti sensibili è favorita, la fondazione rigida consente di assorbirne una
certa aliquota reagendo strutturalmente.

La roccia lapidea consente di produrre una buona fondazione del tipo rigido, limitando
notevolmente gli assestamenti differenziali, ma risulta sfavorevole per gli elementi di
sovrastruttura, alla quale porta la scossa sismica sussultoria e soprattutto ondulatoria,
con minimi smorzamenti.

Con i terreni sciolti è importante avere fondazioni rigide, poiché i maggiori dissesti
sono provocati da cedimenti differenziali.

AZIONE SISMICA E SPETTRO DI RISPOSTA

Definizioni di:

Stato limite ultimo (SLU) >> stato al superamento del quale si ha il collasso strutturale, crolli, dissesti gravi irreversibili

Stato limite di esercizio (SLE) >> stato al superamento del quale si ha perdita di una particolare funzionalità che limita la prestazione di esercizio

Stato limite di danno (SLD) >> stato che supera lo SLE con carattere di danneggiamento irreversibile

Le opere devono essere verificate per >> SLU - SLE

Nel caso di costruzioni in zone sismiche per >> SLU - SLE - SLD (ove necessario)

Azione sismica >> può essere descritta attraverso >> accelerogrammi
>> spettri di risposta

Definizione dell'azione sismica di progetto:

-studi specifici di risposta sismica locale

-classificazione dei terreni da un punto di vista sismico >> Vs30 - Nspt - Cu

categorie di suolo A - B - C - D - E

S1 - S2 (andranno svolti studi speciali per la definizione dell'azione sismica)

I parametri fondamentali che caratterizzano il moto sismico sono:

-ampiezza massima dello spostamento orizzontale

-la frequenza del moto sismico per cui il periodo dell'onda sismica

-la durata

Calcolo dell'AZIONE SISMICA

In un moto sismico un edificio è soggetto ad oscillazioni sul piano verticale e su quello orizzontale; le oscillazioni verticali possono contribuire al crollo di una struttura, ma sono le oscillazioni orizzontali quelle che più interessano, in quanto determinano i maggiori danni strutturali.

In riferimento a questa considerazione assume notevole importanza il massimo movimento orizzontale del terreno al quale è legato il valore massimo dell'accelerazione prodotta dal moto sismico detta accelerazione di picco al suolo del terremoto (ag).

Quattro zone sismiche sul territorio nazionale contrassegnate da un diverso:
 ag =accelerazione orizzontale massima convenzionale su suolo di categoria A
=una frazione dell'accelerazione di gravità

zona 1 - $ag = 0,35 g$

zona 2 - $ag = 0,25 g$

zona 3 - $ag = 0,15 g$

zona 4 - $ag = 0,05 g$ dove g accelerazione di gravità = $9,81 \text{ m/sec}^2$

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO

Lo spettro di risposta elastico può essere visto come la fotografia della vibrazione sismica in un dato sito. Pertanto è funzione delle caratteristiche geologiche e litostutturali del sito.

Lo spettro di risposta elastico di un terremoto rappresenta il coefficiente di incremento dell'accelerazione di picco al suolo ag in funzione del periodo di oscillazione; è rappresentato da un diagramma che fornisce in ordinate la risposta massima di un oscillatore semplice sottoposto ad un accelerogramma assegnato, in funzione del suo periodo proprio.

Lo spettro di risposta relativo ad un particolare evento sismico si ottiene affidando all'elaboratore la soluzione numerica dell'equazione del moto dell'oscillatore elementare smorzato:

$$m\ddot{x}_1 + b\dot{x}_2 + kx_3 = -mu$$

dove: m =massa elemento

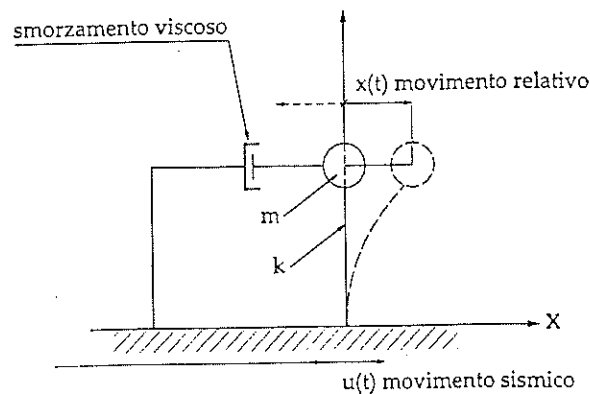
x_1 =accelerazione massa rispetto al sistema di riferimento al piede oscillatore

u =accelerazione al suolo (rispetto al sistema riferimento assoluto)

$b\dot{x}_2$ =reazione, proporzionale alla velocità della massa relativa al piede dell'oscillatore esercitata dall'elemento smorzante (con b =costante che descrive il grado di smorzamento e \dot{x}_2 =velocità della massa)

kx_3 =reazione elastica dell'asta (con K =costante elastica e x_3 =spostamento)

K =rigidezza alla traslazione dell'asta



In Figura un oscillatore elementare sottoposto ad azione sismica

Sapendo che:

$$b = v \cdot 2 m \omega \quad \text{con } \omega = \text{pulsazione propria dell'oscillatore (in assenza di smorzamento)}$$

$v = \text{smorzamento relativo riferito allo smorzamento critico}$

$$k = \omega^2 m$$

Sostituendo e dividendo per m si ottiene:

$$x_1 + 2 v \omega^2 x_2 + \omega^2 x_3 = -u$$

Di questa funzione risulta di interesse il valore dello spostamento massimo x_3 al quale corrisponde la forza:

$$F_{\max} = k x_{3\max} \quad \text{azione che per un dato sisma provoca la massima oscillazione}$$

sapendo che: $\omega = 2\pi/T$ (T=periodo)

$$F_{\max} = (2\pi/T)^2 m x_{3\max}$$

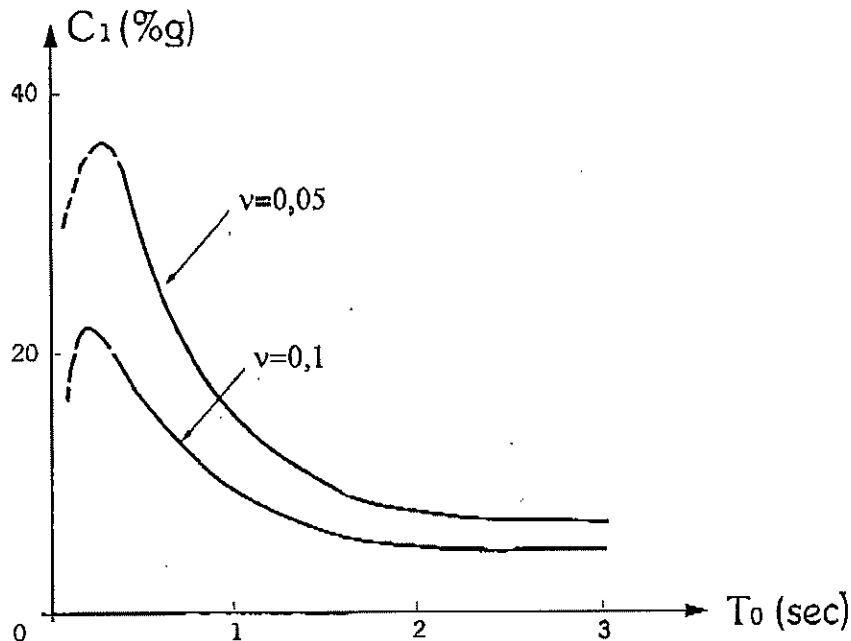
Riferendo F_{\max} alla forza peso agente sulla massa dell'oscillatore si può definire un coefficiente sismico adimensionale C_1 :

$$C_1 = k x_{3\max} / m g \quad m g = W \text{ (peso oscillatore)}$$

$$C_1 = (2\pi/T)^2 m x_{3\max} / m g$$

$$C_1 = (2\pi/T)^2 x_{3\max} / g \quad \text{(percentuale di } g \text{)}$$

Per ogni valore di smorzamento relativo v e per ogni accelerogramma u è quindi possibile costruire un diagramma di C_1 in funzione di T : tale diagramma viene denominato spettro di risposta elastica del terremoto.



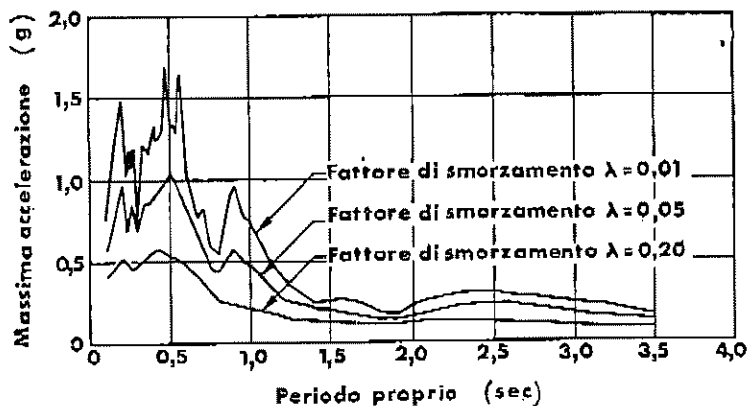
In figura spettro di risposta di un terremoto per due valori dello smorzamento

Essendo lo spettro di risposta funzione di m , v e T , si può aggiungere che l'effetto perturbante dell'azione sismica su un dato elemento tende:

- ad aumentare al crescere della massa dell'elemento;
- ad aumentare al diminuire del periodo proprio di oscillazione dell'elemento;
- ad aumentare al decrescere di v , cioè della capacità della struttura di dissipare energia

Dato che nel caso di un sisma che investe un fabbricato l'accelerazione impressa è il rapporto fra la Forza e la massa dell'edificio (peso/acceleraz.gravità), lo spettro può anche essere visto come l'incremento di forza orizzontale sino ad un massimo che il sisma trasmette all'edificio.

Nella costruzione di uno spettro occorre considerare anche l'effetto smorzante legato alla capacità della struttura di dissipare energia.



In figura un esempio di spettro di risposta

Attraverso uno spettro di risposta elastico è quindi possibile determinare l'azione sismica che investe un fabbricato e quindi le massime sollecitazioni indotte, che saranno funzione della massa, del periodo di vibrazione fondamentale della struttura, della capacità di smorzamento della struttura stessa e delle caratteristiche geologiche e litostrutturali del sito di progetto.

Su quest'ultimo punto occorre specificare che generalmente nei terreni soffici il valore di picco dell'accelerazione tende ad essere minore rispetto che nei terreni duri e compatti (per il maggiore potere di assorbimento dell'energia sismica).

Dato che è impossibile possedere per ogni sito, avente determinate caratteristiche di forma e geologia, il suo tipico spettro di risposta del terreno ad un determinato evento sismico, sono stati proposti Spettri di Risposta Semplificati (o Normalizzati) per uno smorzamento critico standard pari al 5%.

Questo spettro varia il suo andamento a seconda del tipo di suolo sismico considerato, quest'ultimo classificato, come detto, in base a V_{530} , N_{SPT} o C_u .

Spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali
(per strutture con periodo fondamentale inferiore a 4,0 sec)

Supponiamo Zona 2, strutture in Classe 1, suolo tipo A:

S_e =accelerazione spettrale

T =periodo di vibrazione

S =fattore dipendente da categoria di suolo (può assumere valori + elevati x tenere conto della morfologia)

T_b, T_c, T_d = periodi che separano i diversi rami dello spettro (dipendenti da categoria di suolo)

n =fattore per smorzamento viscoso= $(10/5+\zeta)^{0,5}$

dove ζ coeff. smorzam. viscoso convenzionale diverso dal 5% (espresso in %)

rappresenta lo smorzamento relativo rispetto allo smorzamento critico b/b_{crit}

con $b_{crit} = 2 \times \text{massa} \times \text{pulsazione} = 2 \times \text{massa} \times (K/\text{massa})^{0,5}$ con K =cost. elastica.

n può variare da circa 1,30 a circa 0,30

per $\zeta=5$ (tipico per strutture in cemento armato) si ha $n=1$; in questo caso si ha:

$$S_e(T) = ag \times S \times n \times 2,5 [T/T_b + 0,4/n(1 - T/T_b)] \gg 0 \leq T < T_b$$

per $T=0,02$	\gg	$S_e=0,30$ g
per $T=0,04$	\gg	$S_e=0,35$ g
per $T=0,06$	\gg	$S_e=0,40$ g
per $T=0,08$	\gg	$S_e=0,45$ g
per $T=0,10$	\gg	$S_e=0,50$ g
per $T=0,12$	\gg	$S_e=0,55$ g
per $T=0,14$	\gg	$S_e=0,60$ g

$$S_e(T) = ag \times S \times n \times 2,5 \gg T_b \leq T < T_c$$

per T variabile da $T=T_b$ a valori di $T < T_c$ \gg $S_e=0,625$ g (costante)

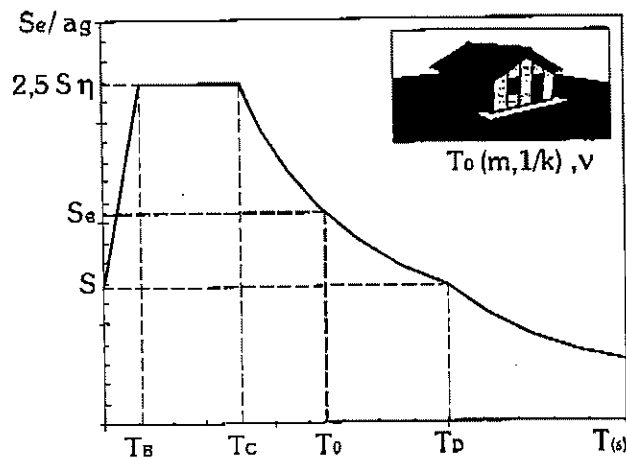
$$Se(T) = ag \times S_n \times 2,5(T_c/T) \gg T_c \leq T < T_d$$

per $T = T_c = 0,40$	\gg	$Se = 0,625 \text{ g}$
per $T = 0,60$	\gg	$Se = 0,417 \text{ g}$
per $T = 0,80$	\gg	$Se = 0,312 \text{ g}$
per $T = 1,00$	\gg	$Se = 0,250 \text{ g}$
per $T = 1,20$	\gg	$Se = 0,208 \text{ g}$
per $T = 1,40$	\gg	$Se = 0,178 \text{ g}$
per $T = 1,60$	\gg	$Se = 0,156 \text{ g}$
per $T = 1,80$	\gg	$Se = 0,139 \text{ g}$

$$Se(T) = ag \times S_n \times 2,5(T_c \times T_d / T^2) \gg T_d \leq T$$

per $T = T_d = 2,0$	\gg	$Se = 0,125 \text{ g}$
per $T = 2,50$	\gg	$Se = 0,080 \text{ g}$
per $T = 3,00$	\gg	$Se = 0,055 \text{ g}$
per $T = 3,50$	\gg	$Se = 0,041 \text{ g}$
per $T = 4,00$	\gg	$Se = 0,031 \text{ g}$

In sostanza se rappresentiamo su di un grafico l'andamento dello spettro otteniamo il seguente sviluppo di funzione:



In figura un esempio di spettro di risposta normalizzato

Spettro di risposta elastico delle componenti verticali

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S_n \times 3 [T/T_b + 1/3n(1 - T/T_b)] \gg 0 \leq T < T_b$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S_n \times 3 \gg T_b \leq T < T_c$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S_n \times 3(T_c/T) \gg T_c \leq T < T_d$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S_n \times 3(T_c \times T_d / T^2) \gg T_d \leq T$$

Spettri di progetto per lo SLU

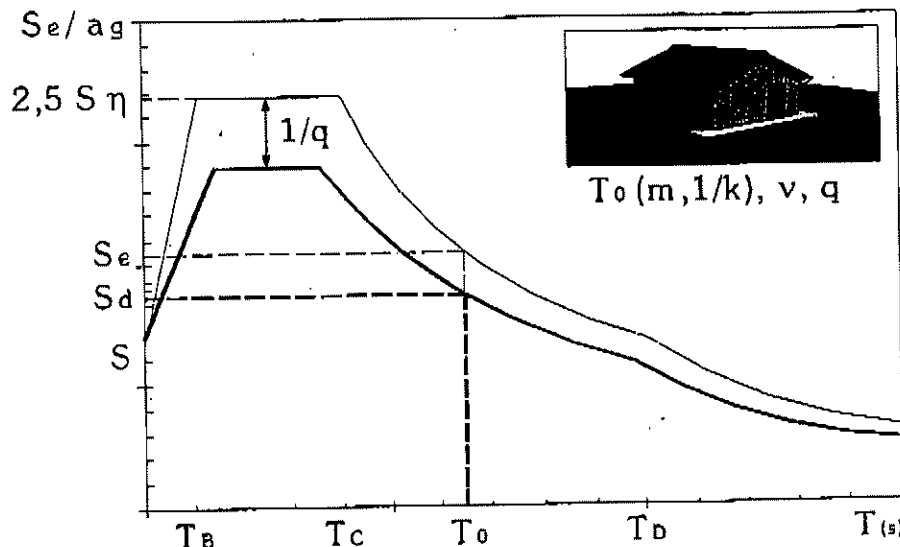
Le capacità dissipative delle strutture possono essere messe in conto attraverso un fattore riduttivo delle forze elastiche, denominato **FATTORE DI STRUTTURA** q che tiene conto della capacità dissipativa anelastica della struttura.

Maggiore sarà la capacità di dissipare energia, mediante le deformazioni post-elastiche (sviluppo di deformazioni plastiche negli elementi strutturali e nei giunti) dei suoi elementi strutturali, minore sarà la resistenza richiesta dalla struttura poichè minore sarà la sensibilità della costruzione nei confronti dell'azione sismica.

In questo caso le ordinate dello spettro saranno ridotte utilizzando il fattore q . In altri termini il fattore di struttura consente di ridurre lo spettro di risposta per ottenere lo spettro di progetto da utilizzare nell'analisi lineare.

Una struttura non dissipativa avrà un fattore di struttura uguale a 1, mentre all'aumentare della duttilità globale, ossia della capacità di dissipare l'energia sismica, il fattore q tenderà ad aumentare.

Il fattore q dipende principalmente dal tipo di materiale e dalle tipologie strutturali.



In figura spettro di risposta normalizzato e spettro di risposta di progetto considerando q .

Lo spettro di progetto per le componenti orizzontali è definito dalle seguenti espressioni:

$$S_d(T) = ag \times S \times 2,5 / q [T/T_b + 0,4 \times q (1 - T/T_b)] \gg 0 \leq T < T_b$$

$$S_d(T) = ag \times S \times 2,5 / q \gg T_b \leq T < T_c$$

$$S_d(T) = ag \times S \times 2,5 / q (T_c/T) \gg T_c \leq T < T_d$$

$$S_d(T) = ag \times S \times 2,5 / q (T_c \times T_d / T^2) \gg T_d \leq T$$

Si assumerà comunque $S_d(T) \geq 0,2ag$

Lo spettro di progetto della componente verticale è definito dalle seguenti espressioni:

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times 3 / q [T/T_b + q/3 (1 - T/T_b)] \gg 0 \leq T < T_b$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times 3 / q \gg T_b \leq T < T_c$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times 3 / q (T_c/T) \gg T_c \leq T < T_d$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times 3 / q (T_c \times T_d / T^2) \gg T_d \leq T$$

assumendo $q=1,5$ per qualunque tipo di materiale e tipologia strutturale.

Si assumerà comunque $S_{vd}(T) \geq 0,2ag$

Spettri di progetto per lo SLD

Per la componente orizzontale si ha:

$$S_e(T) = ag \times S \times n [T/T_b + 1/n (1 - T/T_b)] \gg 0 \leq T < T_b$$

$$S_e(T) = ag \times S \times n \gg T_b \leq T < T_c$$

$$S_e(T) = ag \times S \times n (T_c/T) \gg T_c \leq T < T_d$$

$$S_e(T) = ag \times S \times n (T_c \times T_d / T^2) \gg T_d \leq T$$

Per la componente verticale si ha:

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times n \times 1,2 [T/T_b + 1/1,2n (1 - T/T_b)] \gg 0 \leq T < T_b$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times n \times 1,2 \gg T_b \leq T < T_c$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times n \times 1,2 (T_c/T) \gg T_c \leq T < T_d$$

$$S_{vd}(T) = 0,9 \times ag \times S \times n \times 1,2 (T_c \times T_d / T^2) \gg T_d \leq T$$

Nello sviluppo della funzione dello spettro è quindi importante porre il periodo fondamentale T .

Un edificio sottoposto a sollecitazione sismica entra in oscillazione con un periodo che dipende dalle sue caratteristiche strutturali e geometriche.

Se durante un evento sismico il terreno al di sotto del fabbricato vibra con un periodo che corrisponde al periodo di oscillazione dell'edificio soggetto a vibrazione a seguito dell'impulso sismico, l'edificio stesso entra in risonanza e le sollecitazioni dinamiche vengono amplificate.

La risonanza è quindi quel fenomeno per il quale si ha aumento di ampiezza ed energia risultante qualora la pulsazione della forza eccitatrice sismica (pulsazione di un'onda $\omega=2\pi/T=2\pi \times V_0 / \lambda$) è prossima alla pulsazione del moto vibratorio indotto sull'elemento (costruzione in questo caso).

Pertanto per il calcolo dell'ordinata dello spettro di risposta che deve intendersi nel rapporto S_e/ag come un coefficiente di amplificazione del valore di accelerazione di picco al suolo (i termini di picco fissati dal D.M. 14.09.2005 per zone sismiche), occorre considerare un periodo fondamentale paritario al periodo proprio di vibrazione della struttura.

Si ricorda quindi che S_e/ag dipende >> dalla categoria di suolo A, B, C, D, E, S1, S2
>> periodo vibrazione edificio T

Dalla formula del periodo $T=2\pi/\omega$ con $\omega=(K_s/m)^{0,5}$
 K_s = coefficiente di elasticità
 m =massa

Per cui $T= 2\pi \times (m/K_s)^{0,5}$

Quindi strutture dotate di una piccola massa e di elevata elasticità (flessibilità) tendono ad avere valori più elevati del periodo proprio di vibrazione e quindi a ricadere nella zona dello spettro in cui le accelerazioni vengono attenuate ($T > T_D$).

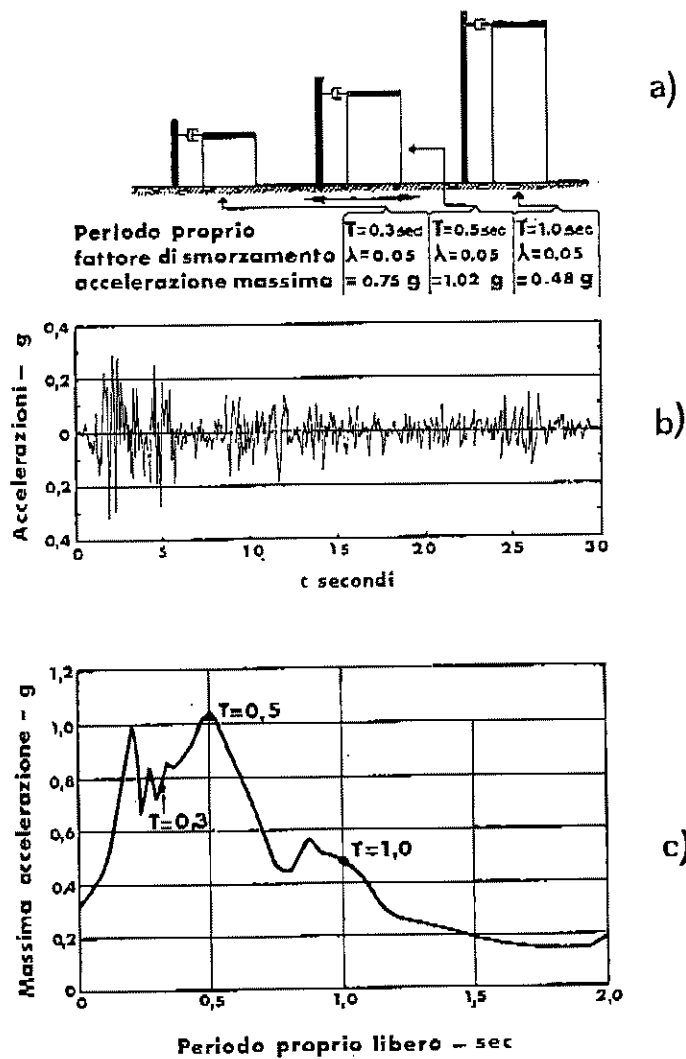
Per esempio nella figura che segue si sono riportati tre oscillatori aventi un fattore di smorzamento del 5% e periodo T di 0,3, 0,5, 1,0 sec.

Lo spettro di risposta sottostante fornisce i valori massimi delle accelerazioni che risultano circa di 0,75 g, 1,02 g, 0,48 g.

L'accelerazione massima del sisma è stata circa pari a 0,3 g; quindi in tutti i casi la struttura ha amplificato l'accelerazione al suolo con un fattore massimo di circa 3 per la struttura con periodo $T=0,5$.

Dallo spettro sottoriportato, si nota come per il sisma preso in esame, l'amplificazione si verifica sino ad un valore del periodo proprio di poco superiore al secondo.

L'esame degli spettri di numerosi terremoti indica che il campo di amplificazione è compreso generalmente tra 0,1 e 1,0-1,5 sec.



In figura oscillatori con diverso periodo (a), accelerogramma (b), spettro di risposta (c)

Per calcolare il periodo proprio di vibrazione dell'edificio, L'OPCM 3274 nello sviluppo dell'analisi statica offre la seguente formula per il calcolo di T

$$T_1 = C_1 \times H^{3/4}$$

H=altezza edificio in mt. dal piano di fondazione C1

0,085	struttura in acciaio
0,075	struttura in cls
0,050	per altre strutture

La formula è valida per

- costruzioni regolari in altezza
- periodo di vibrazione non superiore a 2,5 Tc
- per edifici che non superano mt.40 di altezza

Altre formulazioni sono le seguenti:

Negli edifici in muratura: $T=0,06 \times (H / B^{0,5}) \times [H / (2B + H)^{0,5}]$

H=altezza edificio in metri

B=larghezza edificio in metri

Negli edifici intelaiati in c.a. $T=0,06 \times H / B^{0,5}$

ANALISI

Quattro metodi di analisi sulle costruzioni:

- 1) Statica lineare
- 2) Dinamica modale
- 3) Statica non lineare
- 4) Dinamica non lineare

Statica lineare

Condizioni: -per costruzioni regolari in altezza
-periodo di vibrazione non superiori 2,5Tc
-per edifici che non superano mt.40 di altezza T1 può essere determinato con:

$$T1=C1 \times H^{3/4}$$

H=altezza edificio in mt. dal piano di fondazione C1

0,085	struttura in acciaio
0,075	struttura in cls
0,050	per altre strutture

Per esempio, considerando un edificio in muratura alto mt.12 si ha:

$$T1=0,050 \times 12^{3/4}=0,32 \text{ sec}$$

L'analisi statica consiste nell'applicazione di un sistema di forze distribuite lungo l'altezza dell'edificio assumendo una distribuzione lineare degli spostamenti: per ciascun piano la forza orizzontale da applicare risulta:

$F_i = F_h (z_i \times W_i) / \sum (z_j \times W_j)$ forza da applicare al piano i

$F_h = S_d (T1) \times W \times I / g$

Sd (T1)=ordinata dello spettro di progetto

W=peso complessivo della costruzione

I=coefficiente di 0,85 se l'edificio ha almeno 3 piani e se

T1 < 2Tc - di 1,0 per gli altri casi

g=accelerazione di gravità

Wi e Wj=peso delle masse ai piani i e j

zi e zj= altezze dell'edificio ai piani i e j dal p. fondazione

PROSPEZIONI SISMICHE - METODI DI INDAGINE

I metodi di indagine sismica sfruttano la propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo per definirne il modello litostratigrafico.

Il metodo geognostico della prospezione sismica consiste essenzialmente nel generare onde elastiche in un punto in un determinato istante noto e nel misurare il tempo impiegato dalle onde per raggiungere stazioni di misura poste a distanze note dalla sorgente.

La prospezione sismica è fondata sulla diversa velocità di propagazione delle onde sismiche nei differenti strati di sottosuolo; il sistema consente quindi di interpretare i dati definendo la natura degli strati litologici attraversati e gli spessori degli stessi.

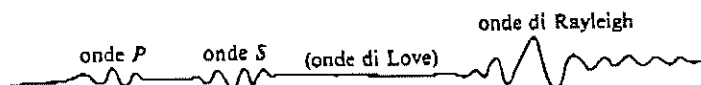
Il modulo di elasticità differisce molto nei vari litotipi, mentre la densità tende a variare in un campo molto ridotto; la propagazione delle onde elastiche consente quindi, coadiuvata dal modello geologico di riferimento, di distinguere le velocità delle onde elastiche che dipendono appunto dalle proprietà elastiche dei terreni.

Le proprietà elastiche dei terreni derivano a loro volta dalla densità e dallo stato di compattezza e quindi dalla rigidità di ogni singolo strato di terreno.

Si distinguono quattro tipi di onde elastiche nel sottosuolo e seguito di una perturbazione che modifica lo stato di quiete:

- 1) Onde longitudinali o onde P o di compressione >> onde di volume
- 2) Onde trasversali o onde S o di taglio >> onde di volume
- 3) Onde di Love >> onde superficiali
- 4) Onde di Rayleigh >> onde superficiali

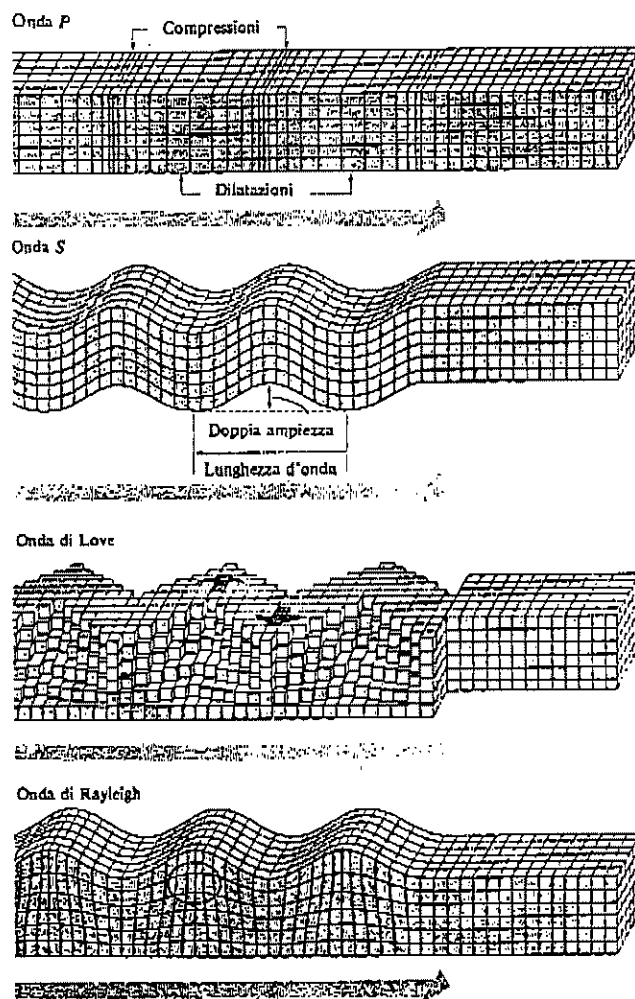
Le onde principali risultano le onde P e S, così definite in quanto sono rispettivamente le prime e le seconde ad arrivare al punto di rilevazione; sono definite anche onde di volume o spaziali e sono quelle utilizzate a livello geognostico nei sistemi di rilevamento sismico:



In figura si riporta l'inizio di un sismogramma (schematizzato) di un terremoto

Onde di compressione o onde longitudinali (P): si propagano per compressione e dilatazione con spostamenti lungo la direzione di propagazione

Onde trasversali o di taglio (S): si propagano senza variazioni di volume e con movimenti trasversali rispetto alla direzione di propagazione. Sono fortemente attenuate nei mezzi poco rigidi, fino a scomparire totalmente nei fluidi, dove il modulo di rigidità è nullo.



In figura si riportano i principali movimenti dei quattro tipi di onde sismiche

La velocità di propagazione delle onde sismiche dipende da molti fattori, quali ad esempio:

- la compattezza
- la porosità
- la tessitura
- il grado di alterazione

Essa inoltre in genere aumenta con la profondità e con l'età geologica delle formazioni rocciose.

I primi metri di sottosuolo nell'ambito geologico alluvionale hanno valori di velocità delle onde P (V_p) variabili mediamente da 200 - 900 m/sec.

Nell'ambito montano un terreno di substrato roccioso in condizioni di scarsa alterazione ha valori di V_p superiori a 2000 m/sec.; se alterato e fortemente fratturato generalmente presenta valori di V_p fra 1000 e 2000 m/sec.

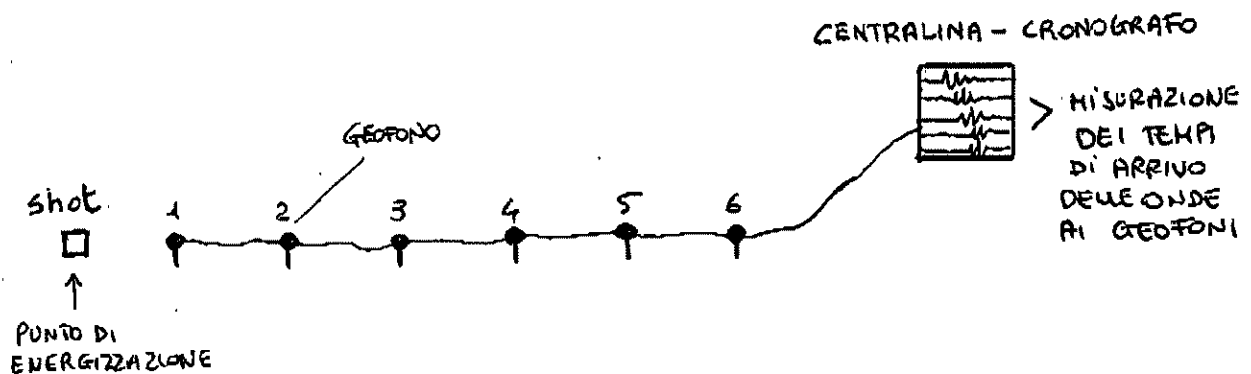
A seguire si riportano indicativamente alcuni valori di V_p in mezzi caratteristici:

<i>Strato aerato superficiale</i>	300- 800 m/s
<i>Sabbia asciutta</i>	500-1000 m/s
<i>sabbia umida</i>	600-1800 m/s
<i>acqua (valore medio)</i>	1500 m/s
<i>calcare</i>	3500-5000 m/s
<i>arenaria</i>	2500-4500 m/s
<i>granito</i>	4000-6000 m/s
<i>sale (duomo salino)</i>	4500-6500 m/s
<i>dolomia</i>	5000-6000 m/s
<i>rocce metamorfiche</i>	3000-7000 m/s

Per eseguire le indagini si utilizzano dei sismografi costituiti da una centralina di rilevamento collegata attraverso dei cavi elettrici ad una batteria di geofoni convenientemente spaziatati lungo un allineamento di misura detto stendimento.

I geofoni, detti anche ricevitori, sono apparecchi che segnalano i movimenti del terreno, trasformando l'energia sismica in energia elettrica.

L'attrezzatura è inoltre composta da un sistema di energizzazione costituito solitamente, per brevi stendimenti e per finalità geognostiche negli studi ordinari di ingegneria civile, da una mazza di 8-12 kg, la quale è azionata manualmente da un battitore per colpire un piattello di alluminio posto a terra.



In figura si riporta la strumentazione e lo schema generale per eseguire uno stendimento sismico

In questo modo si produce una perturbazione elastica nel sottosuolo che viene rilevata dai geofoni e quindi registrata sulla centralina (o anche cronografo) come tempi di arrivo.

Le prime onde che vengono registrate sulla centralina risultano quelle dirette e quelle rifratte, come onde P che risultano le più veloci; in seconda battuta arrivano le onde di taglio e quelle riflesse.

Esistono altri sistemi di energizzazione e fra i più usati si citano:

- massa battente per caduta
- gli esploditori

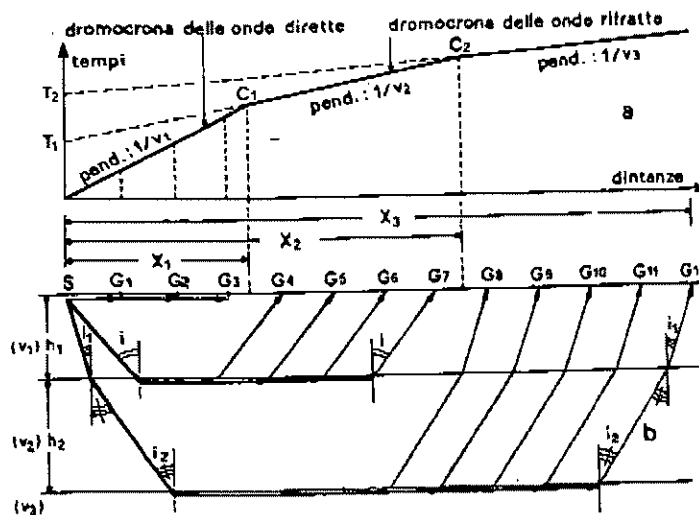
Esistono due metodi di indagine sismica a seconda che vengano analizzate la diffusione nel sottosuolo delle onde di riflessione o delle onde di rifrazione

- metodo a riflessione
- metodo a rifrazione

Il metodo sismico più utilizzato nell'ingegneria civile è quello a rifrazione.

Sulla centralina si misurano i tempi di arrivo dell'onda sismica registrati nei vari punti di misurazione, ossia nei geofoni; sapendo le distanze dal punto di scoppio dei vari ricevitori, si immettono i dati registrati su un sistema cartesiano con in X le distanze e in Y i tempi.

Si ottengono una serie di involuipi rettilinei, che a loro volta determinano una spezzata detta dromocrona; quest'ultima è caratteristica delle condizioni geologiche locali e tiene conto unicamente delle onde dirette e di quelle rifratte.



In figura si riporta la dromocrona e i percorsi sismici a rifrazione di tre strati separati da piani orizzontali.

Ogni tratto rettilineo della spezzata rappresenta uno spessore di terreno caratterizzato da un valore di velocità medio (V) corrispondente all'inverso della pendenza del tratto rettilineo (oppure inverso della tangente dell'angolo che il tratto rettilineo forma con l'orizzontale).

ossia si ha : $V = \text{spazio}/\text{tempo}$

Con i sistemi di energizzazione sopra descritti si producono onde elastiche di tipo P dalle quali si possono avere ragguagli sulla litologia e sulla profondità degli strati.

Per completezza di indagine, gli esiti della sismica a rifrazione con rilievo delle onde P andrebbero integrati dalla sismica a rifrazione per onde S.

Infatti le onde di taglio non sono influenzate dal grado di saturazione e perciò forniscono una correlazione migliore tra la velocità e la natura litologica del terreno.

La velocità delle onde P viene invece influenzata dalla presenza o meno di acqua nel sottosuolo; un terreno in falda presenta una velocità di propagazione delle onde P di circa 400-500 m/sec superiore rispetto alla velocità nello stesso terreno privo di acqua; tale considerazione vale generalmente per terreni con $V_p < 1.500$ m/sec.

Le onde S invece non vengono influenzate da questa condizione, pertanto le V_s dipendono unicamente dai parametri elastici del terreno e dal grado di addensamento.

Inoltre le onde S dimostrano più bassa frequenza e minore lunghezza d'onda, oltre ad un maggiore potere risolutivo sugli strati di piccolo spessore. Possiedono anche una maggiore penetrazione nei sedimenti rispetto alle onde P.

Eseguendo quindi su una stessa linea sismica misure con onde P ed onde S si possono ottenere informazioni più dettagliate e un quadro di sottosuolo più preciso; attraverso i valori di V_p e V_s si ottengono, attraverso formulazioni empiriche, diversi parametri litologici, fra cui:

- il modulo di elasticità (rapporto stress/variazione di volume per pressione idrostatica)
- il modulo dinamico di taglio G (inclinazione media della linea sforzo-deformazione)
- coefficiente di Poisson (numero puro ed è una misura della deformazione geometrica subita da un corpo sotto stress e generalmente varia da 0 sino a 0,5 nei fluidi; per le rocce generalmente è pari a 0,25)
- numero colpi prova SPT (funzione di V_s)

Il rapporto V_p/V_s , sempre maggiore di 1, dipende essenzialmente dal coefficiente di Poisson; esiste una relazione attraverso la quale è possibile determinare le V_s conoscendo le V_p e il coefficiente di Poisson.

In generale per le rocce si ha che:

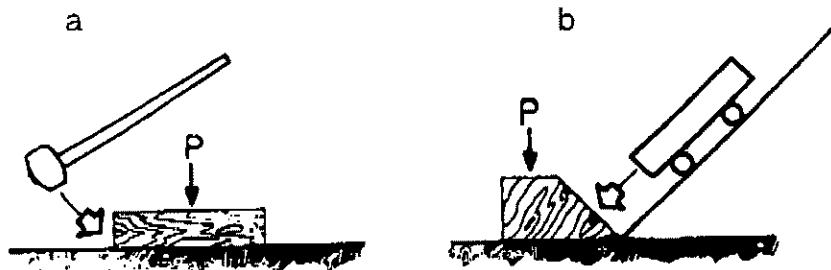
$$V_p = 3^{0.5} \times V_s$$

ossia per uno stesso mezzo litologico le V_p sono circa il doppio delle V_s

Per gli stendimenti sismici a rifrazione con rilevamento di onde S è fondamentale il sistema di battuta per energizzare il terreno.

Il piattello va colpito con la mazza sul suo fianco e perpendicolarmente alla linea sismica (tecnica francese).

Oppure si colpisce un punto di battuta resistente provvisto di un piano inclinato, sempre perpendicolarmente alla linea sismica (tecnica canadese).



In figura si riportano i sistemi di energizzazione per la produzione di onde S con la tecnica francese (a) e la tecnica canadese (b).

Inoltre per rilevare le onde S occorrono geofoni orizzontali, ossia geofoni che rispondono ad impulsi su di un piano orizzontale con frequenza di 8-10 Hz.

Il sistema per un rilievo sismico a rifrazione con onde S è quello dell'*inversione di polarità*.

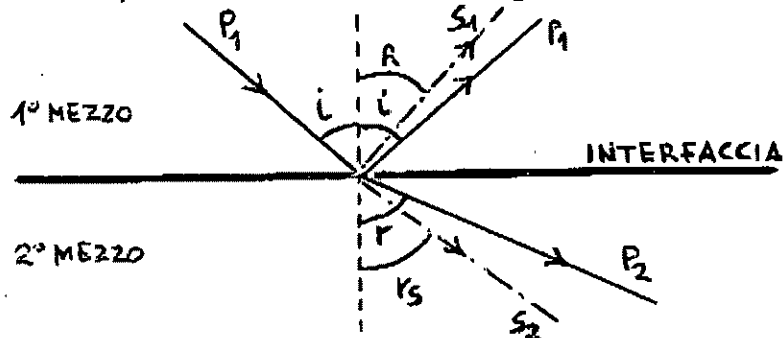
In pratica sistemato lo stendimento, si esegue la battuta energizzante colpendo il piattello lateralmente in direzione perpendicolare alla linea sismica, sommando vari impulsi con più battute; quindi si inverte la polarità del sismografo e si esegue lo stesso procedimento battendo nello stesso punto, ma dalla parte opposta del piattello e sempre perpendicolarmente alla linea sismica.

In questo modo le onde P si annulleranno e resteranno evidenziate unicamente solo le onde S .

METODO SISMICO A RIFRAZIONE

Condizione essenziale per la sismica a rifrazione è che le caratteristiche meccaniche del sottosuolo migliorino con la profondità ossia che sia abbia una sequenza di strati aventi velocità sismiche crescenti a partire dallo strato più superficiale (la velocità sismica dello strato superiore deve essere inferiore a quella dello strato sottostante).

Quando un'onda sismica arriva sull'interfaccia fra due mezzi aventi velocità differenti si originano quattro onde, due riflettenti e due rifrangenti:



In figura si riporta la riflessione e la rifrazione di un'onda longitudinale

Per la legge di Snell si ha che:

$$\sin i / V_{P1} = \sin R / V_{S1} = \sin r / V_{P2} = \sin rs / V_{S2}$$

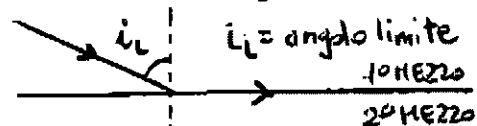
Raggio rifratto >> Rapporto fra il seno dell'angolo incidente e quello dell'angolo rifratto è costante ed è uguale al rapporto fra V_1/V_2

$$\sin i_1 / \sin i_2 = V_1 / V_2$$



Se la linea di propagazione intercetta un secondo strato, il tempo che impiega l'onda per andare dalla sorgente al geofono è il più breve possibile quando l'angolo di incidenza è uguale all'angolo limite oltre il quale si ha riflessione, ossia l'angolo rifratto è un angolo retto; si avrà quindi:

$$\sin i_1 = V_1 / V_2 \quad (1) \quad \text{per } \sin i_2 = 90 \text{ gradi}$$



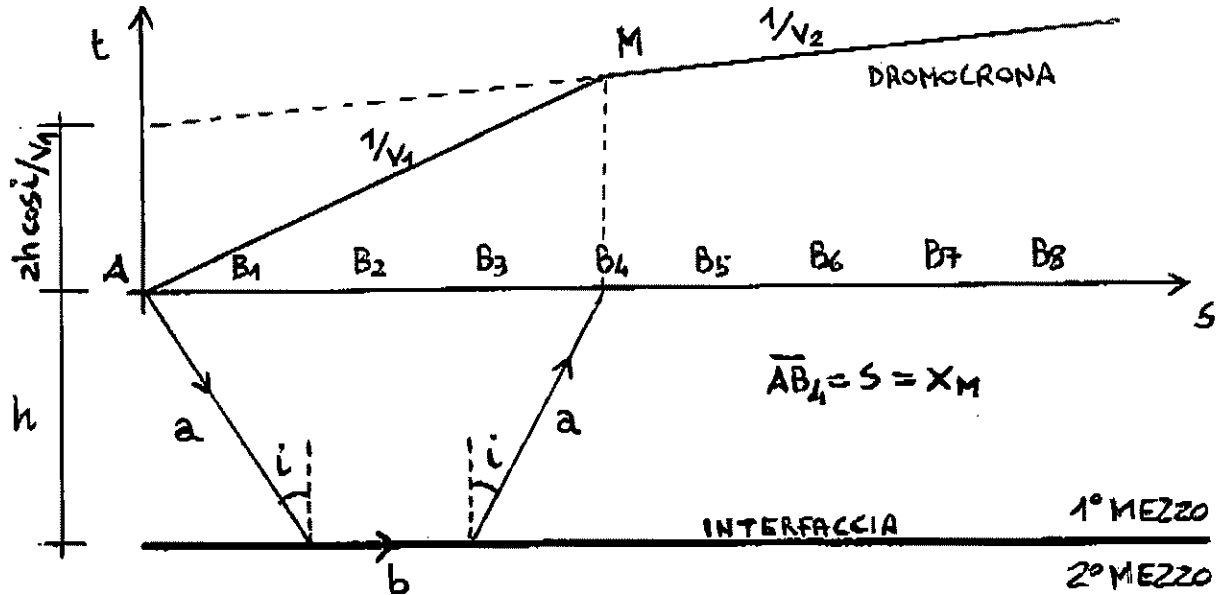
Per geofoni prossimi al punto di energizzazione rispetto alla profondità del secondo strato si ha la registrazione delle sole onde dirette, la cui velocità sarà data dal rapporto spazio/tempo.

$$T = X / V_1 \quad (2)$$

Esisterà poi un punto geofono a partire dal quale il percorso più rapido dell'onda di arrivo seguirà la via del secondo strato secondo la rifrazione dell'onda per cui l'angolo di rifrazione risulterà retto.

Nel diaframma sismico alla prima linea di inviluppo passante per l'origine e riferibile alle onde dirette, ne seguirà una seconda che piegherà di inclinazione verso l'asse delle x a partire dal punto in cui il percorso seguirà la via del secondo strato.

Il tempo minimo impiegato lungo il cammino di rifrazione sarà dato da:



$$T = a/V_1 + b/V_2 + a/V_1 \quad (3)$$

Per la legge del minimo cammino si ha che: $\text{sen } i_1 = V_1 / V_2$

Dalla figura si ha inoltre che: $h = a \cos i$ per cui $a = h / \cos i$
 $b = s - (2 a \text{ sen } i)$

Sostituendo nella (3) si ha:

$$T = (2 h / V_1 \cos i) + (s / V_2) - (2 h \text{ sen } i / V_2 \cos i) \quad \text{raccolgo } 2 h / \cos i$$

$$T = 2 h / \cos i (1 / V_1 - \text{sen } i / V_2) + s / V_2 \quad \text{introducendo la (1)}$$

$$T = (2 h / V_1 \cos i) (1 - \text{sen}^2 i) + s / V_2 \quad \text{quindi:}$$

$$T = 2 h \cos i / V_1 + s / V_2 \quad (4) \quad \text{retta di propagazione per le onde che arrivano al geofono passando per il secondo strato}$$

- Per calcolare lo spessore si può utilizzare >> metodo del Critical Distance (con la distanza critica)
- >> metodo dell'Intercept Time (con il tempo intercetto)

La retta che passa per l'origine e la seconda retta si intersecano in un punto denominato M (detto anche punto ginocchio).

La determinazione del punto M permette di calcolare la profondità dell'interfaccia fra il primo e il secondo strato o meglio lo spessore del primo strato.

Il punto M ha un valore caratteristico in ascissa che rappresenta la distanza dal punto di energizzazione denominata X_m ; su tale distanza i tempi di arrivo delle onde dirette risultano uguali ai tempi di arrivo delle onde che seguono il percorso della rifrazione.

Ponendo pertanto T di (2) uguale a T di (4) per la distanza pari a X_m si avrà:

$X_m / V_1 = 2 h \cos i / V_1 + X_m / V_2$ dalla quale si calcola lo spessore h:

$$2 h \cos i / V_1 = (X_m / V_1) - (X_m / V_2)$$

$h = V_1 X_m / 2 \cos i (1 / V_1 - 1 / V_2)$ inserendo la (1) e sviluppando si ottiene in definitiva:

$h = X_m / 2 (V_2 - V_1 / V_2 + V_1)^{0.5}$ (5) spessore del primo strato con il metodo del Critical Distance

Procedendo con lo stesso metodo si può quindi ottenere la potenza del secondo strato nel caso si intercettasse con le onde sismiche l'interfaccia fra il secondo e il terzo strato, avendo già calcolato con la (5) la potenza del primo strato.

Con il metodo dell'Intercept Time si prolunga l'involuppo rettilineo relativo al secondo strato sino ad intercettare l'asse delle Y.

Nella funzione:

$T = 2 h \cos i / V_1 + s / V_2$ (4) retta di propagazione per le onde che arrivano al geofono passando per il secondo strato

il valore $2 h \cos i / V_1$ rappresenta il valore del tempo riferito al prolungamento dell'involuppo rettilineo del secondo tratto della dromocrona sull'asse delle Y ed è denominato tempo intercetto T_c .

Tale valore è facilmente misurabile graficamente sul diagramma; conoscendo T_c e ponendo:

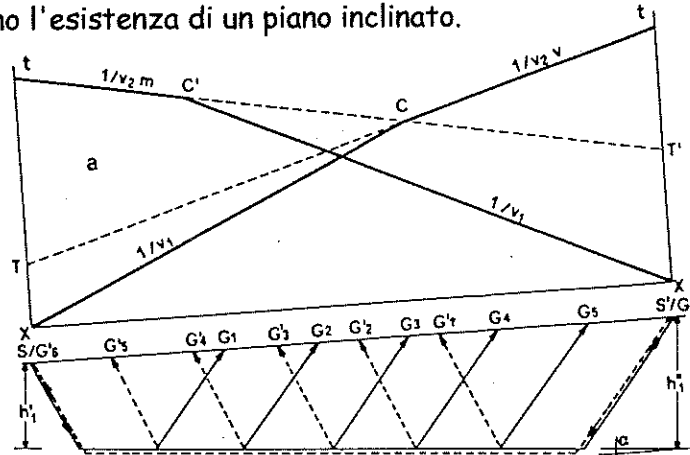
$$T_c = 2 h \cos i / V_1$$

si può ottenere lo spessore h:

$h = T_c V_1 / 2 \cos i$ >> spessore del primo strato con il metodo dell'Intercept Time

Per conoscere l'eventuale inclinazione della superficie di separazione degli strati a diversa velocità è necessario eseguire lungo la stessa direttrice di allineamento sismico doppi tiri di velocità o profili coniugati (o anche stendimento in and/rit).

Si pongono i punti di scoppio agli estremi dello stendimento mantenendo fissi i punti di rilevazione; si ottengono così due dromocrone che non sviluppandosi in maniera specchiata indicano l'esistenza di un piano inclinato.

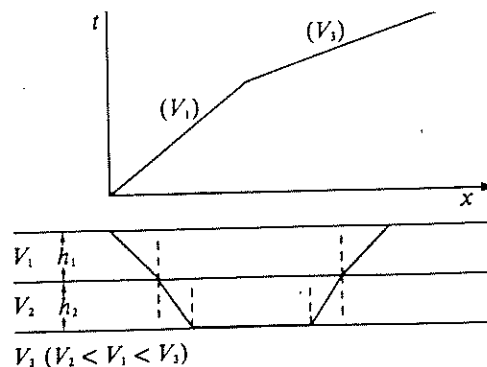


In figura si riportano le dromocrone di un profilo coniugato indicanti due strati a diversa velocità separati da un piano inclinato.

La condizione essenziale della sismica a rifrazione per cui la velocità dello strato superiore debba essere sempre inferiore alla velocità dello strato sottostante, può a volte non verificarsi; in questo caso si ha l'effetto dello strato nascosto qualora la velocità dello strato sottostante risulti minore di quella dello strato sopragiacente.

In queste condizioni infatti l'angolo limite e l'angolo critico non può essere raggiunto, per cui l'energia non si trasmette lungo l'interfaccia e non si hanno raggi rifratti da questa; sulle dromocrone non ha alcuna indicazione della presenza di tale strato, che per questo motivo è chiamato appunto strato nascosto.

Tale strato ha l'effetto di aumentare i tempi di arrivo ai geofoni delle onde rifratte all'interfaccia del terzo strato; attribuendo al secondo strato la velocità sismica del primo, maggiore del reale risulta la profondità del rifrattore più profondo.



In figura si riporta l'effetto dello strato nascosto

ALLEGATI

FATTORE DI STRUTTURA

(estratto da all.2 OPCM 3274/2003)

1. Per edifici con struttura in cemento armato

Il fattore di struttura da utilizzare per ciascuna direzione della azione sismica è dato dalla seguente espressione:

$$q = q_0 \text{ KD KR (5.1)}$$

nella quale: q_0 è legato alla tipologia strutturale

KD è un fattore che dipende dalla classe di duttilità

KR è un fattore che dipende dalle caratteristiche di regolarità dell'edificio

I valori di q_0 sono contenuti nella tabella seguente:

Tipologia	Valori q_0
Strutture a telaio	4,5 α_u / α_1
Strutture a pareti	4,0 α_u / α_1
Strutture miste telaio-pareti	4,0 α_u / α_1
Strutture a nucleo	3,0

Il fattore KD vale: CD "A" (capacità dissipativa alta) KD = 1,0
CD "B" (capacità dissipativa bassa tipo travi, pilastri, pareti) KD = 0,7

Il fattore KR vale: Edifici regolari in altezza (punto 4.3 all.2 OPCM 3274) KR = 1,0
Edifici non regolari in altezza (punto 4.3 all.2 OPCM 3274) KR = 0,8

α_1 è il moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la sua resistenza flessionale

α_u è il moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile.

Il valore di α_u / α_1 può essere calcolato per mezzo di un'analisi statica non lineare (punto 4.5.4 all.2 OPCM 3274) e non può in ogni caso essere assunto superiore a 1,5.

Qualora non si proceda ad una analisi non lineare per la valutazione di α_u / α_1 , i seguenti valori possono essere adottati:

edifici a telaio di un piano	$\alpha_u / \alpha_1 = 1,1$
edifici a telaio a più piani, con una sola campata	$\alpha_u / \alpha_1 = 1,2$
edifici a telaio con più piani e più campate	$\alpha_u / \alpha_1 = 1,3$
edifici a pareti non accoppiate	$\alpha_u / \alpha_1 = 1,1$
edifici a pareti accoppiate o miste telaio-pareti	$\alpha_u / \alpha_1 = 1,2$

Quando risultasse $q < 1,5$, può essere adottato $q = 1,5$.

Per tipologie strutturali diverse da quelle definite in 5.3.1, ove si intenda adottare un valore $q > 1,5$, il valore adottato dovrà essere adeguatamente giustificato dal progettista.

Strutture aventi i telai resistenti all'azione sismica composti con travi a spessore, anche in una sola delle direzioni principali, devono essere progettate per la Classe di Duttilità CD "B".

2. Per edifici con struttura prefabbricata in cemento armato

Si distinguono due categorie di sistemi strutturali:

- strutture multipiano intelaiate, definite tali quando tutti gli elementi strutturali: travi, pilastri e solai, sono collegati tra loro da vincoli di continuità:

- strutture monopiano, con elementi di copertura sostenuti da pilastri isostatici.

La distinzione ha rilevanza per quanto riguarda le verifiche dei collegamenti ed il valore da assumere per il fattore di struttura q .

Il fattore di struttura da utilizzare per ciascuna direzione della azione sismica è calcolato secondo quanto indicato al punto precedente (espressione $q = q_0 K_D K_R$), con i valori di q_0 contenuti nella tabella seguente:

Valori di q_0 per strutture prefabbricate

Tipologia	q_0
Strutture a telaio	5
Strutture a pilastri isostatici	3,5

3. Edifici con struttura in acciaio

Il fattore di struttura q introdotto per tener conto della capacità di dissipazione dell'energia sismica, dipende dalla tipologia strutturale, dai criteri di dimensionamento, dalla duttilità locale delle membrature e dal grado di regolarità della configurazione strutturale. Pertanto, esso viene espresso per ciascuna tipologia strutturale nella forma seguente:

$$q = \Psi_R q_0 \quad (6.1)$$

dove:

- q_0 è il valore di riferimento del fattore di struttura dipendente dalla tipologia strutturale e dai criteri di dimensionamento adottati (classe di duttilità);
- Ψ_R è un coefficiente di riduzione che tiene conto delle risorse di duttilità locale delle membrature impiegate. I valori di Ψ_R per le diverse categorie di appartenenza delle membrature sono dati in 6.5.3.1.

- duttili $\Psi_R = 1,0$
- plastiche $\Psi_R = 0,75$
- snelle $\Psi_R = 0,5$

Per ciascuna tipologia strutturale il valore di riferimento q_0 del fattore di struttura è dato in tabella per le due classi di duttilità, bassa e alta.

Tabella 6.1 - Valori di q_0 per le diverse tipologie strutturali e le diverse classi di duttilità.

TIPOLOGIA STRUTTURALE	CLASSE DI DUTTILITÀ	
	BASSA	ALTA
Strutture intelaiate	4	$5\alpha_u/\alpha_y$
Controventi reticolari concentrici	2	4
Controventi eccentrici	4	$5\alpha_u/\alpha_y$
Strutture a mensola o a pendolo invertito	2	

Tali valori di q_0 sono da intendersi validi a patto che vengano rispettate le regole di progettazione fornite al punto 6.5. In particolare, essi richiedono collegamenti a completo ripristino di resistenza progettati con un margine di sovrarresistenza tale da consentire il completo sviluppo delle risorse di duttilità locale delle membrature collegate. Tale requisito richiede che siano soddisfatte le regole di progettazione di cui al punto 6.5.3.2.

Nella tabella 6.1

α_1 è il moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la sua resistenza flessionale

α_u è il moltiplicatore della forza sismica orizzontale per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile o avere instabilità globale.

Il valore di α_u/α_1 può essere calcolato per mezzo di un'analisi statica non lineare (punto 4.5.4) e non può in ogni caso essere assunto superiore a 1,5.

Qualora non si proceda ad una analisi non lineare per la valutazione di α_u/α_1 , i seguenti valori possono essere adottati:

edifici a telaio di un piano	$\alpha_u/\alpha_1 = 1,1$
edifici a telaio a più piani, con una sola campata	$\alpha_u/\alpha_1 = 1,2$
edifici a telaio con più piani e più campate	$\alpha_u/\alpha_1 = 1,3$
edifici con controventi eccentrici	$\alpha_u/\alpha_1 = 1,2$

Nel caso di strutture costituite da membrature appartenenti a diverse categorie di duttilità (punto 6.5.3.1), il valore di Ψ_R deve essere assunto pari a quello della categoria inferiore.

4. Edifici con struttura composta da acciaio-calcestruzzo

Si applicano le prescrizioni degli edifici con struttura in acciaio.

5. Edifici con struttura in muratura

In funzione del tipo di tecnica costruttiva utilizzata, l'edificio potrà essere considerato in muratura ordinaria o in muratura armata. Il fattore di struttura q da utilizzare per la definizione dello spettro di progetto è indicato nel seguito. Nel caso della muratura armata, il valore inferiore potrà essere applicato senza verificare quale sia il meccanismo di collasso dell'edificio, il valore superiore potrà essere utilizzato solo applicando i principi di gerarchia delle resistenze descritti ai punti 8.1.7 e 8.3.2:

- edifici in muratura ordinaria $q = 1,5$
- edifici in muratura armata $q = 2,0 - 3,0$

Bibliografia

- Ceccotti A., Follesa M, Lauriola M.P., *Le strutture in legno in zona sismica. Criteri e regole per la progettazione*
Edizioni Clut
- Celico P. (1986)- *Prospezioni Idrogeologiche*, *Liguori Editore, Napoli.*
- Cestelli Guidi C. (1984). *Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni*, *Editore Ulrico Hoepli, Milano.*
- Cosentino Pietro L. , Fradella Pasquale (1984). *Geofisica 1°*, *Libreria Datio Flaccovio Editrice, Palermo.*
- Di Bernardo Aldo, Dal Corso Mara. *Formula Geo Formulario di Geologia Tecnica*
- D.M. 14.09.2005, *Norme Tecniche per le Costruzioni*, pubblicato su S.O. n.159 della Gazzetta Ufficiale 23.09.2005 n.222, Roma.
- Gasparini P, Mantovani M. (1981). *Fisica della terra solida*, *Liguori Editore, Napoli.*
- Lobkowicz F., Melissinos A.C. (1978). *Fisica per scienze e ingegneria vol.2*, Piccin Editore, Padova.
- Marsan P., Romeo R. (1992). *La Relazione Geologica e Geotecnica*, *La Nuova Italia Scientifica, Roma.*
- Norinelli A. (1982). *Elementi di Geofisica Applicata*, *Patron Editore, Bologna.*
- OPCM 20.03.2002 n.3274. *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica* Gazzetta Ufficiale 08.05.2003 n.105, Roma.
- Peli G. (1995). *Geotecnica Pratica delle Fondazioni Dirette*, *Casa Editrice Nuove Ricerche, Ancona.*
- Pellegrini M. (1982). *Geologia Applicata*, *Pitagora Editrice, Bologna.*