Spoleto, 6-7 aprile 2018

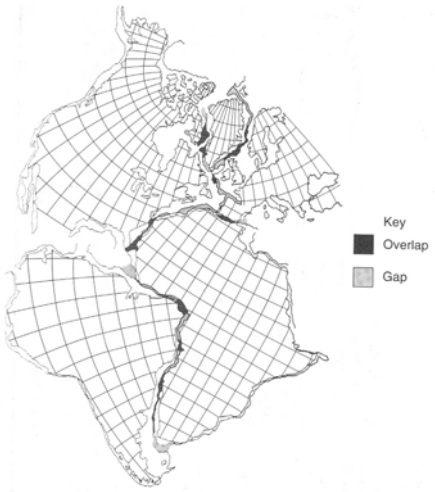
RISPOSTA SISMICA LOCALE

Luigi Callisto

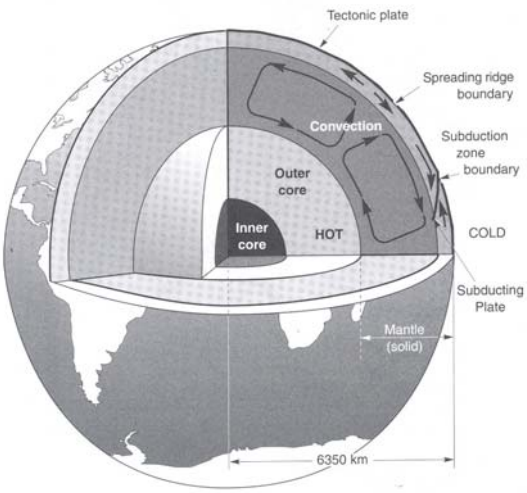
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

nozioni introduttive
- elementi di sismologia

tettonica a zolle



- moti convettivi nel mantello
- azioni di trascinamento
- zone di distensione
- zone di subduzione



- spostamenti graduali → condizioni asismiche
- spostamenti repentini → eventi sismici

epicentri concentrati in prossimità delle discontinuità tra le zolle

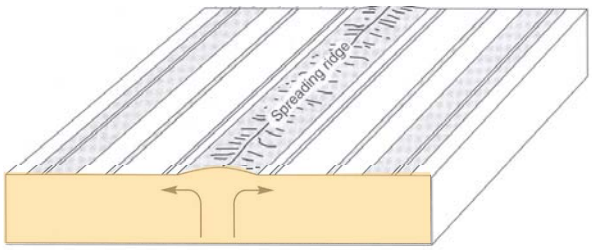
momento sismico

$M_0 = G \cdot A \cdot \Delta s$ [F · L]

A = area superficie di rottura
Δs = spostamento relativo medio

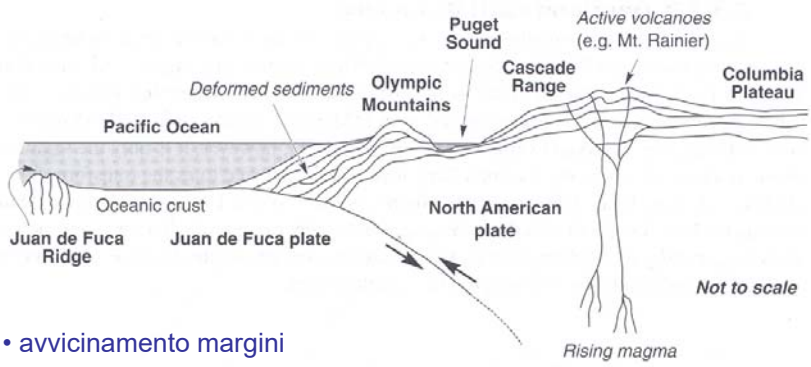
(misura del lavoro compiuto dall'evento sismico)

esempio di zona di distensione (dorsale)

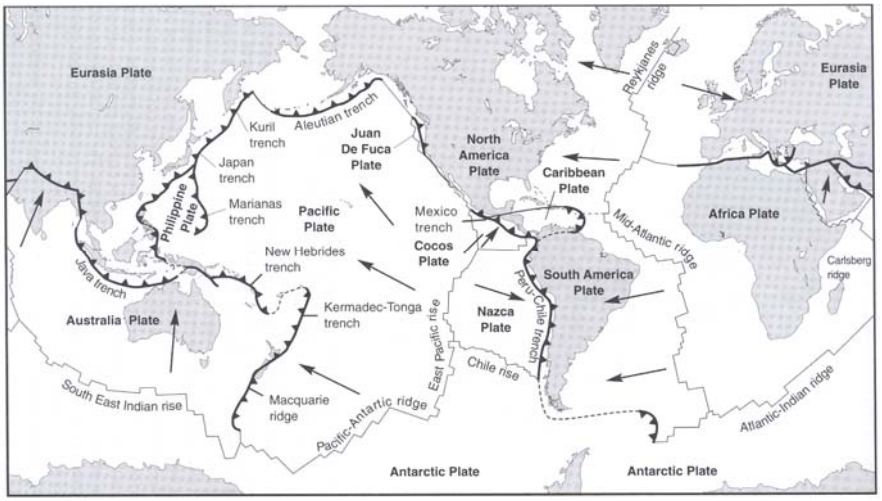


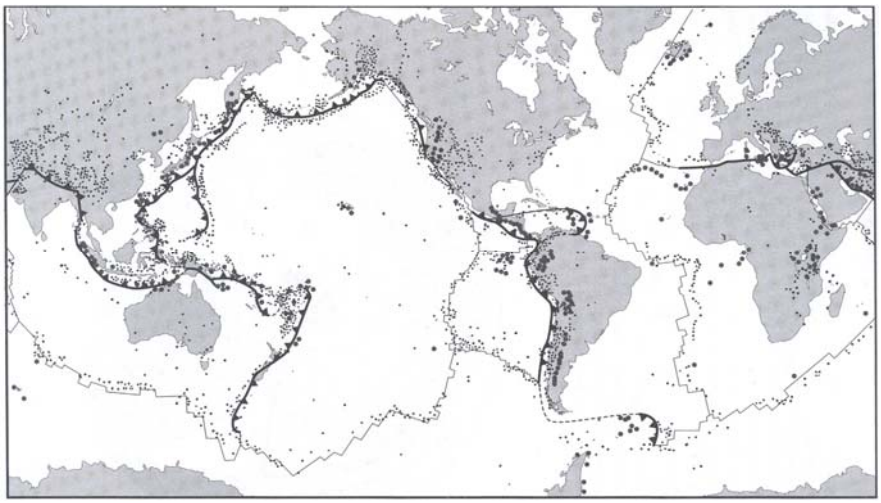
- allontanamento margini
- fuoriuscita e raffreddamento materiale magmatico
- apporto di nuova crosta terrestre, spessore limitato

esempio di zona di subduzione



- avvicinamento margini
- immersione crosta terrestre → aumento T e diminuzione viscosità → nuovo mantello
- massima profondità focale = 700 km (zona di Benioff)

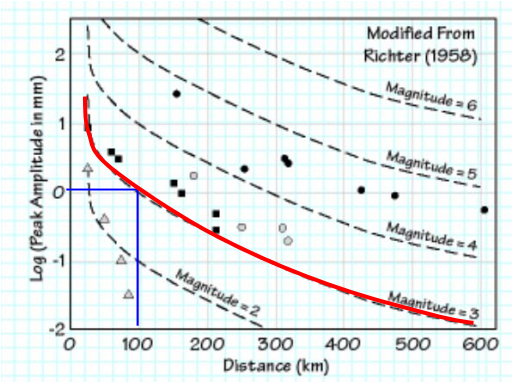

Eurasia Plate
Kuril trench
Aleutian trench
Juan De Fuca Plate
North America Plate
Reykjanes ridge
Eurasia Plate
Japan trench
Caribbean Plate
Philippine Plate
Marianas trench
Pacific Plate
Mexico trench
Africa Plate
Mid-Atlantic ridge
Cocos Plate
New Hebrides trench
Java trench
South America Plate
Carlsberg ridge
Australia Plate
Kermadec-Tonga trench
Nazca Plate
Peru-Chile trench
East Pacific rise
Chile rise
South East Indian rise
Macquarie ridge
Pacific-Antartic ridge
Atlantic-Indian ridge
Antarctic Plate
Antarctic Plate



Grado	Danno
I	Grado impercettibile: rilevata soltanto da sismografi.
II	Grado molto leggero: recepito soltanto da rari soggetti nervosi oppure estremamente sensibili se in perfetta quiete e quasi sempre nei piani superiori dei caseggiati.
III	Grado leggero: anche in zone densamente abitate viene percepito come tremolio soltanto da una piccola parte degli abitanti nell'interno delle case, come nel caso del passaggio di un'automobile a velocita' elevata, da alcuni viene riconosciuto quale fenomeno sismico soltanto dopo averne ragionato.
IV	Grado moderato: delle persone che si trovano all'esterno degli abitati ben poche percepiscono il terremoto. All'interno viene identificato da molte, ma non da tutte le persone in seguito al tremare oppure a oscillazioni leggere di mobili. Cristalleria e vasellame, posti a breve distanza, urtano come al passaggio di un pesante autocarro su pavimentazione irregolare. Finestre tintinnano, porte, travi e assi scricchiolano, cricchiano i soffitti. In recipienti aperti liquidi vengono leggermente mossi. Si ha la sensazione che, in casa, un oggetto pesante (sacco, mobili) si rovesci, oppure di oscillare con tutta la sedia o il letto come su una nave con mare mosso. In generale questi movimenti non provocano paure a meno che le persone non si siano innervosite o spaventate a causa di terremoti precedenti. In rari casi i dormienti si svegliano.
V	Grado abbastanza forte: perfino nel pieno dell'attivita' giornaliere, il sisma viene percepito da numerose persone sulle strade e se sensibili anche in campo aperto. Nell'appartamento si avverte in seguito allo scuotere dell'intero edificio. Piante e rami deboli di cespugli ed alberi si muovono con evidenza, come se ci fosse un vento moderato. Oggetti pendenti entrano in oscillazione, per esempio: tendaggi, semafori e lampade pendenti, lampadari non troppo pesanti; campanelli suonano, orologi a pendolo si fermano od oscillano con maggior periodo dipendentemente dalla direzione della scossa se perpendicolare o normale al moto di oscillazione; a volte orologi a pendolo fermi possono rifunzionare; molle dell'orologio risuonano; la luce elettrica guizza o cade in seguito a movimenti della linea; quadri urtano battendo contro le pareti oppure si spostano; vengono versate piccole quantita' liquide da aperti recipienti colmi; ninnoli ed oggetti del genere possono rovesciare, eppure oggetti addossati alle pareti, arredi leggeri possono perfino essere spostati di poco; mobili ritronano; porte e imposte sbattono; i vetri delle finestre si infrangono. Quasi tutti i dormienti si svegliano. Sporadici gruppi di persone fuggono all'aperto.
VI	Grado forte: il terremoto viene notato da tutti con paura, molti rifuggono all'aperto, alcuni hanno la sensazione d'instabilita'. Liquidi si muovono fortemente; quadri, libri e cose simili cadono dalle pareti e dagli scaffali; porcellane si frantumano; suppellettili assai stabili, perfino isolati pezzi d'arredo vengono spostati se non rovesciati; campane minori in cappelle e chiese, orologi di campanili battono. Case isolate, solidamente costruite subiscono danni leggeri; spaccature nell'intonaco, caduta del rinzaffo di soffitti e di pareti. Danni piu' forti, ma non ancora perniciosi si hanno sugli edifici mal costruiti. Qualche tegola e pietra di camino cade.
VII	Grado molto forte: lesioni notevoli vengono provocate ad oggetti di arredamento anche di grande peso rovesciandoli e frantimandoli. Gradi campane rintoccano. Corsi d'acqua, stagni e laghi si agitano ed intorbidiscono a causa della melma mossa. Qua e la', consolidamenti delle sponde di sabbia e ghiaia scompaiono. Fontane variano il livello d'acqua. Danni moderati a numerosi edifici di forte struttura: piccole spaccature nei muri, cadono toppe piuttosto grandi dell'incalcinatura e dello stucco, a volte mattoni; le case vengono scoperchiate. Molti fumaioli vengono lesi da incrinature, da cadute di tegole, da fuoriuscita di pietre; camini gia' rovinati si rovesciano sopra il tetto danneggiandolo. Da torri e costruzioni alte cadono decorazioni mal fissate. Quando la case e' a pareti intelaiate, i danni all'incalcinatura e all'intelaiatura sono piu' gravi. case mal costruite oppure riattate a volte crollano.
VIII	Grado rovinoso: interi tronchi d'albero pendono inanimi, o perfino si staccano. Anche i mobili piu' pesanti vengono portati lontano dal proprio luogo d'origine e a volte rovesciati. Statue, pietre miliari, in chiese, cimiteri e parchi pubblici ruotano sul proprio piedistallo oppure si rovesciano. Solidi muri di cinta in pietra sono aperti ed atterrati. Un quarto circa delle case e' gravemente leso; alcune crollano; molte divengono inabitabili. Negli edifici ad intelaiatura. gran parte di queste cadono. Case in legno vengono schiacciate o rovesciate. Si sente spesso che campanili di chiese e di frabbriche con la loro caduta provocano purtroppo a edifici vicini spesso lesioni piu' gravi di quanto non avrebbe fatto da solo il terremoto. In pendii e terreni acquitrinosi si formano crepe. Dalle paludi si ha l'espulsione di sabbia e melma.
IX	Grado distruttivo: circa meta' di case di pietra sono distrutte; parecchie crollano; la maggior parte diviene inabitabile. Case ad intelaiatura sono divelte dalle proprie fondamenta e crollano; travi strappate dipendentemente dalle circostanze contribuiscono assai alla rovina.
X	Grado completamente distruttivo: gravissima distruzione di circa 3/4 degli edifici; la maggior parte crolla. Perfino cotruzioni solide di legno e ponti subiscono gravi lesioni, alcuni vengono distrutti. Argini e dighe, ecc., chi piu', chi meno, sono danneggiati notevolmente, binari leggermente piegati e tubature (gas-acqua e scarichi) vengono troncate, rotte e schiacciate. Nelle strade lastricate ed asfaltate si formano crepe e per pressione sporgono larghe pieghe ondose. In terre meno dense e piu' umide si creano spaccature fino alla larghezza di piu' decimetri; si notano parallelamente ai corsi d'acqua crepature che raggiungono larghezze fino a un metro. Non sotanto scivolano pezzi di terra dai pendii, ma incerti macigni rotolano a valle. Grossi massi si staccano dagli argini dei fiumi e di coste scoscese, riviere basse subiscono spostamenti di masse sabbiose e fangose; per cui il livello del terreno non viene notevolmente variato. le fontane variano di frequente il livello dell'acqua. Dai fiumi, canali e laghi, ecc., le acque vengono gettate contro le sponde.
XI	Grado catastrofico: crollo di tutti gli edifici in muratura, soltanto costruzioni e capanne di legno ad incastro di grande elasticita' ancora reggono. Anche i piu' grandi e piu' sicuri ponti crollano a causa della caduta di pilastri di pietra o del cedimento di quelli in ferro. Binari si piegano fortementee e si spezzano. Tubature vengono spaccate e rese irreparabili. Nel terreno si manifestano vari mutamenti di notevole estensione, dipendentemente dalla natura del suolo: grandi crepe e spaccature si aprono; e soprattutto in terreni morbidi e acquitrinosi il dissesto e' considerevole sia orrizzontalmente che verticalmente. Ne segue il traboccamento di sabbia e melma con diverse manifestazioni. Sfaldamento e caduta massi sono frequenti.
XII	Grado grandemente catastrofico: non regge alcuna opera d'uomo. Lo scombussolamento del paesaggio assume aspetti grandiosi. Flussi d'acqua sotterranei in superficie subiscono i mutamenti piu' vari: si formano cascate, laghi scompaiono, fiumi deviano.

Magnitudo : misura strumentale (oggettiva) dell'intensità

magnitudo locale M_L (Richter 1935):
misurata dall'ampiezza *A* delle vibrazioni (in μm) prodotte dall'evento sismico registrata da un sismografo standard posto alla distanza di 100 km



$M_L = \log A$

Magnitudo di momento sismico Mw

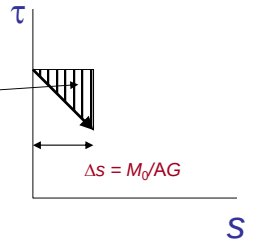
energia rilasciata dal sisma (Gutemberg e Richter 1956)

$\log E = 1.5\, M_S + 11.8 \quad (\text{erg})$

Kanamori (1977)

$E = M_0\, \Delta\tau / 2G$

$E \approx M_0 / 2 \times 10^4$



$M_W = \log M_0 / 1.5 - 10.7 \quad (M_0 \text{ in erg})$

$M_W = \log M_0 / 1.5 - 6 \quad (M_0 \text{ in Joule})$

magnitudo di momento sismico

Spoleto, 6-7 aprile 2018

RISPOSTA SISMICA LOCALE

Luigi Callisto
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

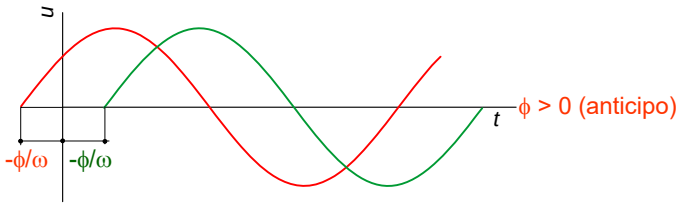
nozioni introduttive

- moto armonico

moto armonico
spostamento di un punto in funzione del tempo

$$u(t) = A \sin(\omega t + \Phi)$$

A = ampiezza	[L]
T = periodo	[T]
$f = 1/T$ = frequenza	[T^{-1}]
$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ = pulsazione	[T^{-1}] (rad/s)
ϕ = fase [-] (rad)	



moto armonico
spostamento di un punto in funzione del tempo

spostamento $u(t) = A \sin(\omega t + \Phi)$

velocità $v(t) = \omega A \cos(\omega t + \Phi)$

accelerazione $a(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t + \Phi) =$

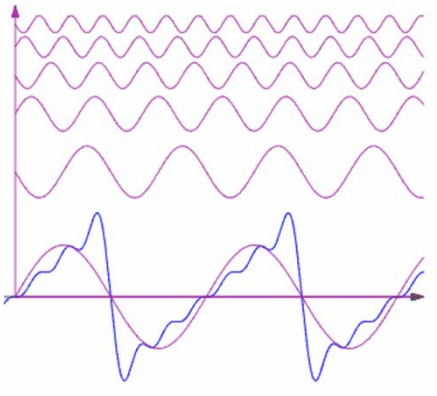
$-\omega^2 u(t)$

serie di Fourier

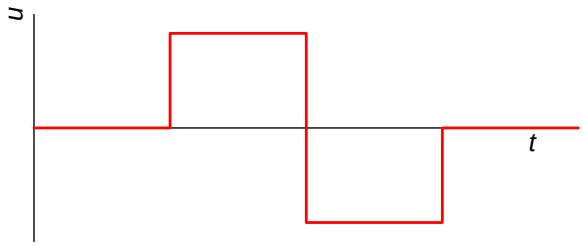
una funzione periodica di **periodo T_f** può essere espressa come **somma di armoniche** di frequenza crescente con diversa ampiezza e fase

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T_f}$$

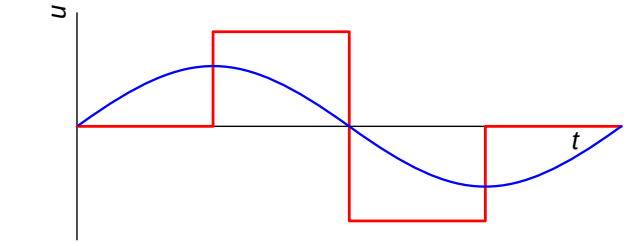
$$f_n = \frac{n}{T_f}$$



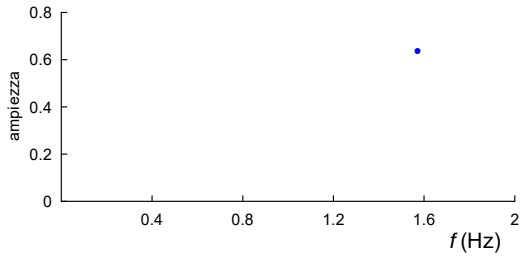
$$a_0 = \frac{1}{T_f}\int_0^{T_f} u(t)\cdot dt \qquad a_n = \frac{2}{T_f}\int_0^{T_f} u(t)\cos\omega_n t\cdot dt \qquad b_n = \frac{2}{T_f}\int_0^{T_f} u(t)\,\mathrm{sen}\,\omega_n t\cdot dt$$

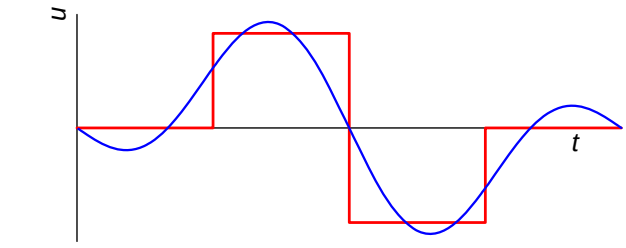


esempio: onda quadra

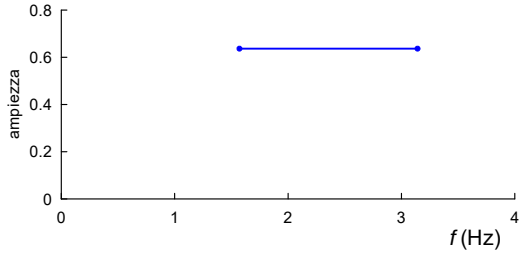


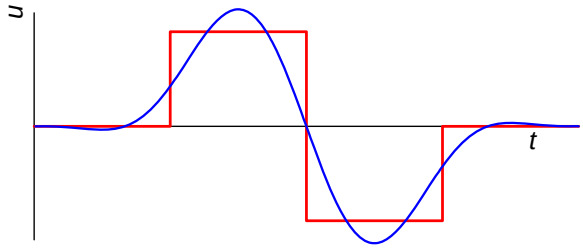
numero armoniche 1



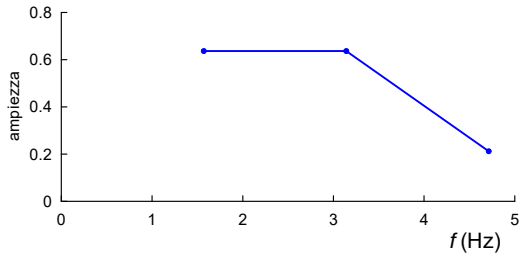


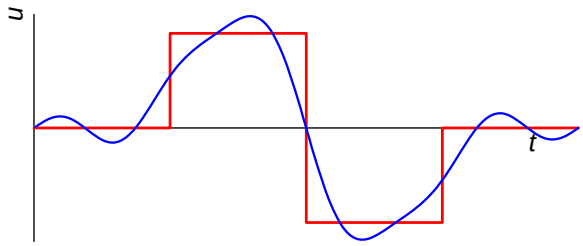
numero armoniche 2



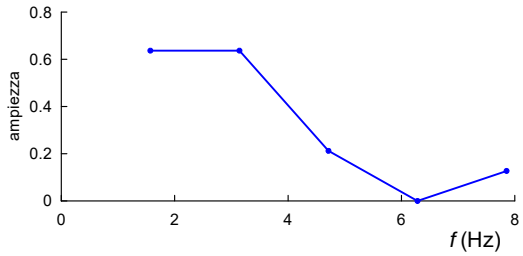


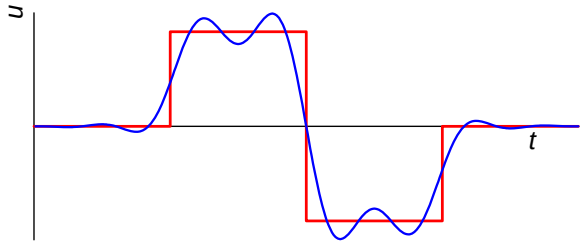
numero armoniche 3



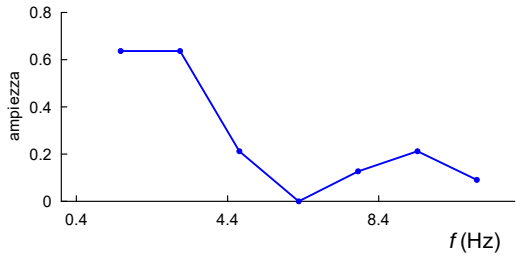


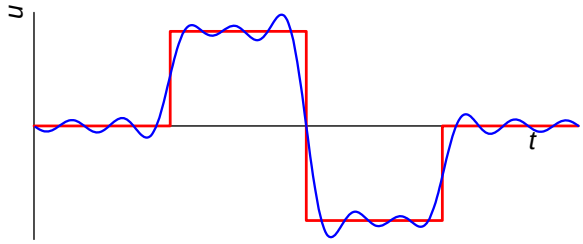
numero armoniche 5



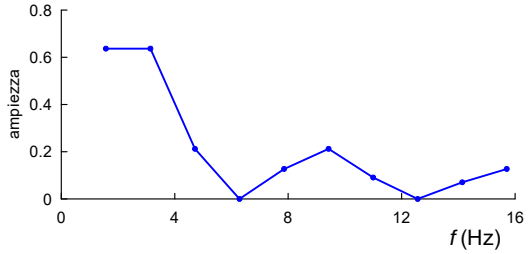


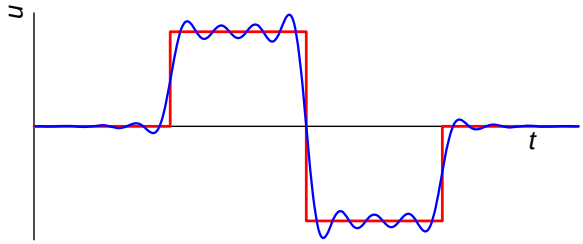
numero armoniche 7



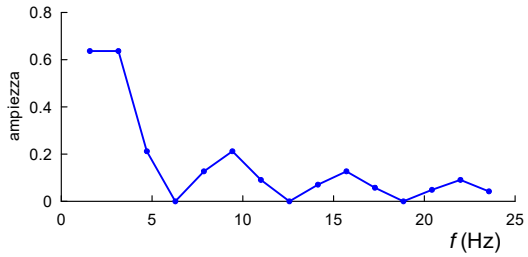


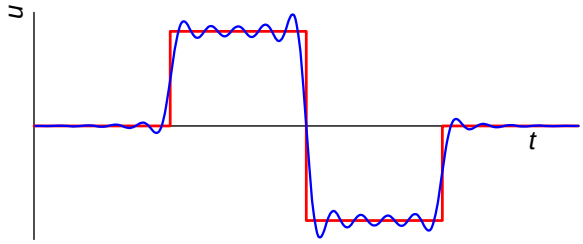
numero armoniche 10



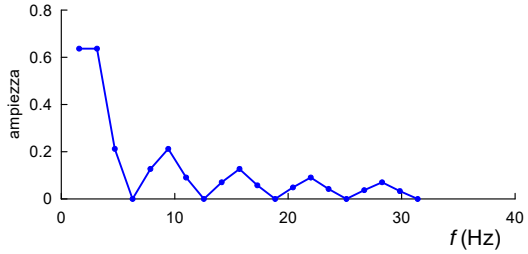


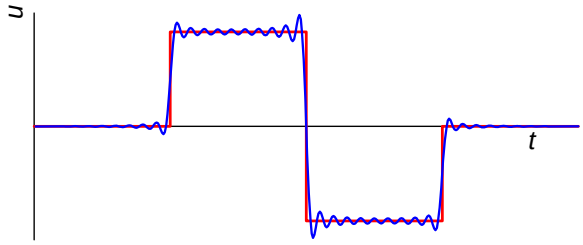
numero armoniche 15



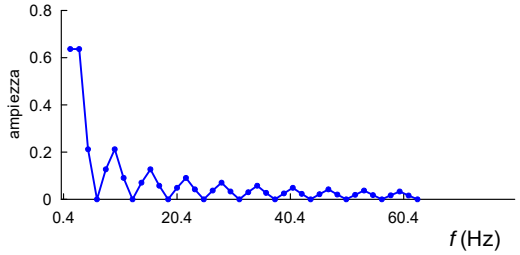


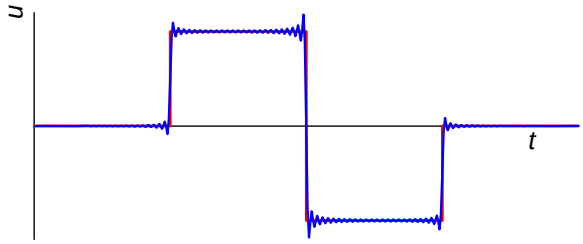
numero armoniche 20



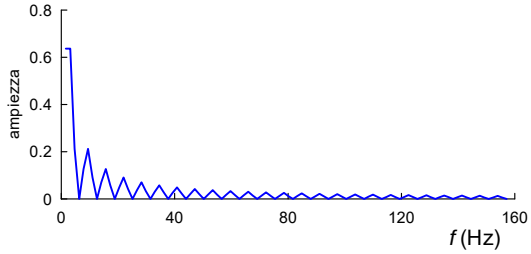


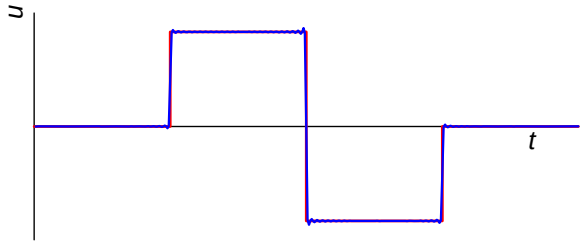
numero armoniche 40



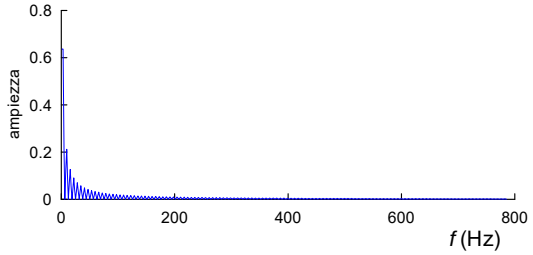


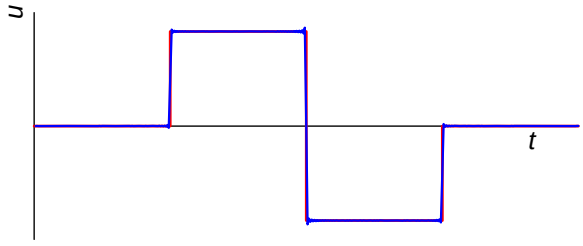
numero armoniche 100



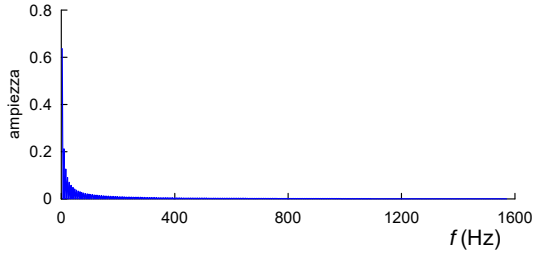


numero armoniche 500

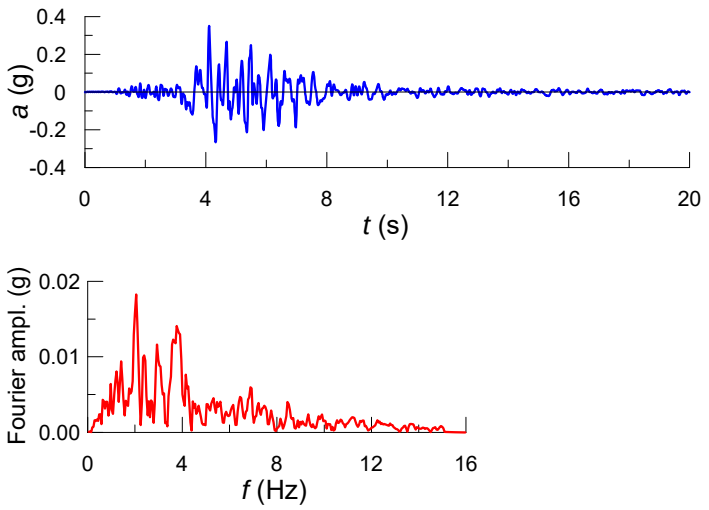




numero armoniche 1000



spettro di Fourier di una registrazione sismica



Spoleto, 6-7 aprile 2018

RISPOSTA SISMICA LOCALE

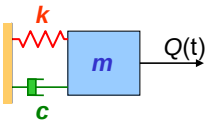
Luigi Callisto
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

nozioni introduttive

- sistemi a un grado di libertà

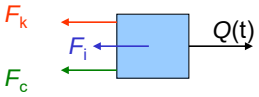
oscillatore elementare

sistema a un singolo grado di libertà, soggetto a una forzante Q(t)



equilibrio:

$$Q(t) = F_i(t) + F_c(t) + F_k(t)$$

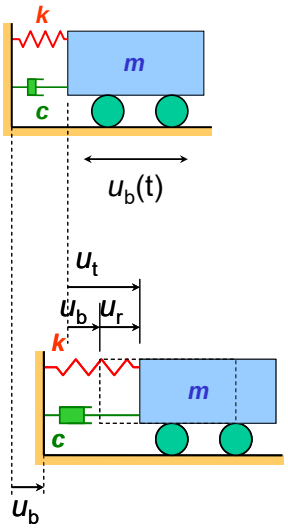


$$F_i(t) = m \cdot \ddot{u}(t)$$
$$F_c(t) = c \cdot \dot{u}(t)$$
$$F_k(t) = k \cdot u(t)$$

equazione del moto

$$m\,\ddot{u}(t) + c\,\dot{u}(t) + k\,u(t) = Q(t)$$

moto alla base



$u_t = u_b + u_r$

forze d'inerzia → accelerazione totale

$$F_i(t) = m \cdot \ddot{u}_t(t)$$

smorzatore → velocità relativa

$$F_c(t) = c \cdot \dot{u}_r(t)$$

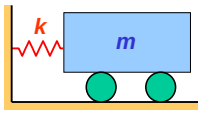
molla → spostamento relativo

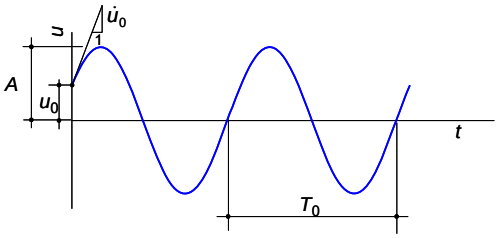
$$F_k(t) = k \cdot u_r(t)$$

$$m\left(\ddot{u}_b + \ddot{u}_r\right) + c\,\dot{u}_r + k\,u_r = 0$$

$$m\,\ddot{u}_r + c\,\dot{u}_r + k\,u_r = \underbrace{-m\,\ddot{u}_b}_{\text{forzante equivalente}}$$

vibrazione libera ($Q(t) = 0$)
smorzamento assente ($c = 0$)





$$m\,\ddot{u} + k\,u = 0$$

$$\ddot{u} + \frac{k}{m}u = 0$$

$$\ddot{u} + \omega_0^2\,u = 0$$

$$u(t) = A \cdot \mathrm{sen}(\omega_0 t + \phi)$$

$$A = \sqrt{u_0^2 + \frac{\dot{u}_0^2}{\omega_0^2}} \qquad \phi = \arctan\frac{u_0\,\omega_0}{\dot{u}_0}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$ pulsazione naturale

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$ frequenza naturale

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$ periodo naturale

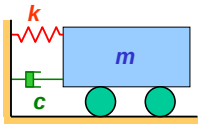
vibrazione libera ($Q(t) = 0$)
smorzamento presente ($c \neq 0$)

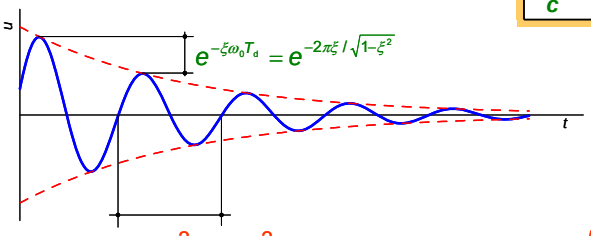
$$m\,\ddot{u} + c\,\dot{u} + k\,u = 0$$

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_0\,\dot{u} + \omega_0^2\,u = 0$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{k\,m}}$$ rapporto di smorzamento

$$u(t) = \underbrace{e^{-\xi\omega_0 t}}_{\text{esp. neg.}}\underbrace{\left(C_1\cos\omega_d t + C_2\,\mathrm{sen}\,\omega_d t\right)}_{\text{moto armonico}}$$



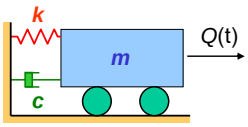


$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\omega_d = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$$

vibrazione forzata - forzante armonica

$$Q(t) = Q_0 \cdot \text{sen}\,\overline{\omega} t$$

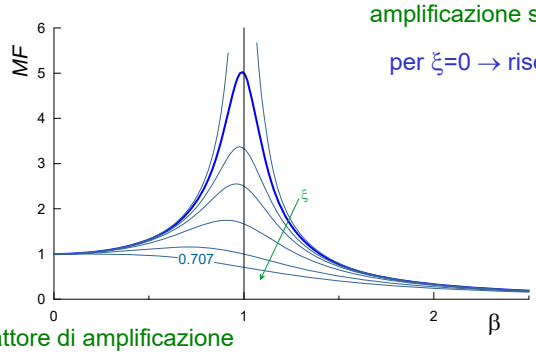


$$A = \frac{Q_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

$$MF = \frac{A}{Q_0/k} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

ampiezza:
amplificazione spostamenti

per ξ=0 → risonanza

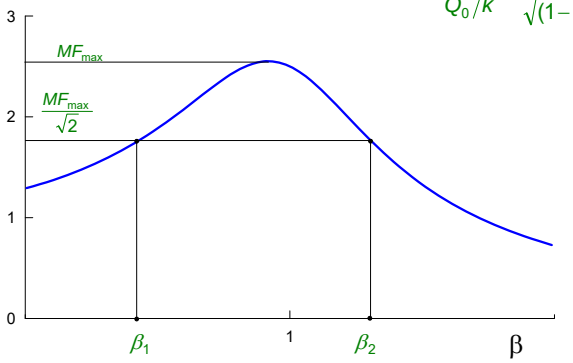


fattore di amplificazione

$$\beta = \frac{\overline{\omega}}{\omega_0}$$

determinazione dello smorzamento: larghezza di banda

$$MF = \frac{A}{Q_0/k} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

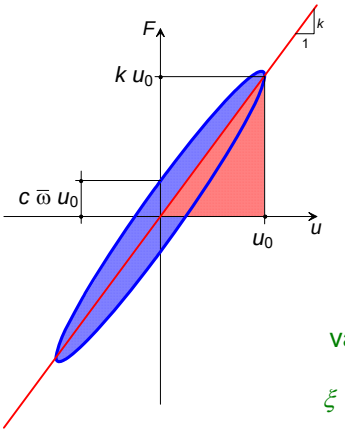


$$\left.\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\omega_1}{\omega_0} \approx 1 - \xi \\ \beta_2 &= \frac{\omega_2}{\omega_0} \approx 1 + \xi \end{aligned}\right\} \quad \xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2 + \omega_1}$$

determinazione dello smorzamento: ciclo d'isteresi

oscillatore soggetto a una forzante armonica $u(t) = u_0 \operatorname{sen} \bar{\omega} t$

$$F(t) = c\dot{u}(t) + ku(t) = c\bar{\omega}u_0 \cos\bar{\omega}t + ku_0 \operatorname{sen}\bar{\omega}t$$



energia elastica

$$W_E = \frac{ku_0^2}{2} \rightarrow k = \frac{2W_E}{u_0^2}$$

energia dissipata

$$W_D = \pi\, c\bar{\omega}u_0^2 \rightarrow c = \frac{W_D}{\pi\bar{\omega}u_0^2}$$

valutazione rapporto di smorzamento

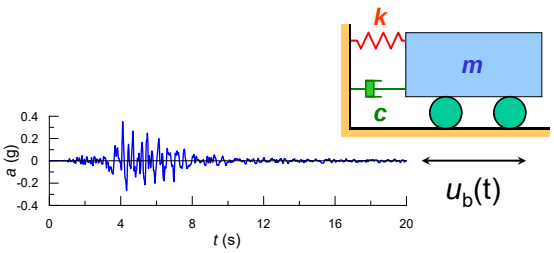
$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \ldots = \frac{W_D}{4\pi\, W_E}\frac{\omega_0}{\bar{\omega}}$$

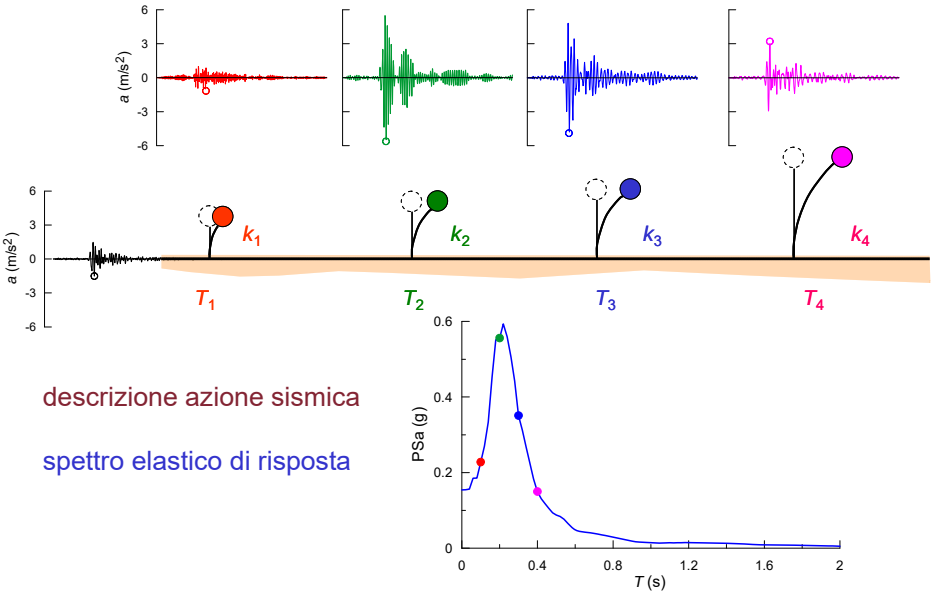
valori massimi della risposta di un oscillatore elementare di pulsazione naturale ω_0

$S_d = \max|u_r|$ spostamento spettrale

$S_a = \max|\ddot{u}_t|$ accelerazione spettrale

$$S_a \approx \omega_0^2\ S_d = PS_a$$



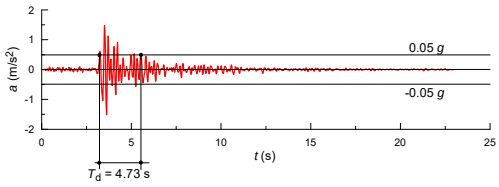


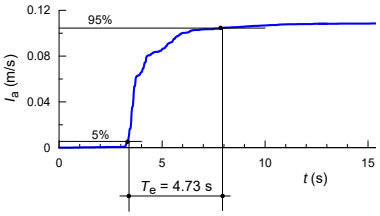
descrizione azione sismica

spettro elastico di risposta

parametri sintetici del moto – dominio del tempo

- valori massimi istantanei a_{max}, v_{max}, u_{max}
- quantità integrali
  intensità di Arias $I_a = \frac{\pi}{2g}\int_0^\infty [a(t)]^2 dt$
- durata
  bracketed (oltre 0.05 g)
  significativa (5-95 % di I_a)

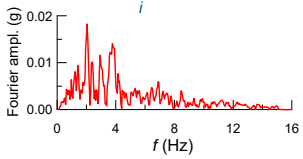




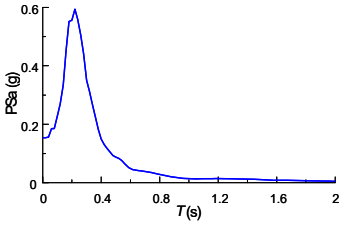
parametri sintetici del moto – dominio delle frequenze

- spettro di Fourier (ordinate C_i)
  periodo medio (fra 0.25 e 20 Hz)

$$T_m = \frac{\sum_i C_i^2 \frac{1}{f_i}}{\sum_i C_i^2}$$



- spettro elastico di risposta (ξ = 5%)
  periodo predominante T_p



Spoleto, 6-7 aprile 2018

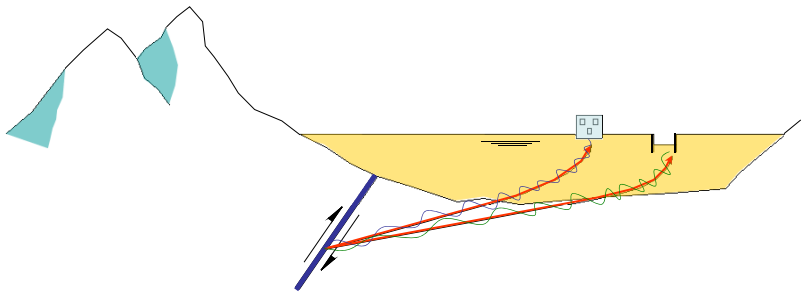
RISPOSTA SISMICA LOCALE

Luigi Callisto
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

nozioni introduttive
- pericolosità sismica

evento sismico

- rottura lungo una discontinuità (faglia)
- propagazione dell'energia rilasciata

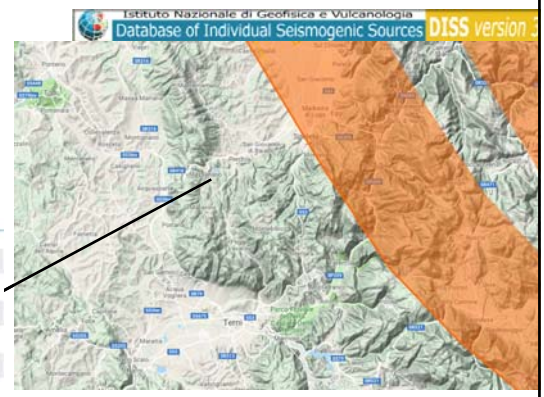


analisi della pericolosità sismica

stima delle caratteristiche del moto sismico

sulla base di:

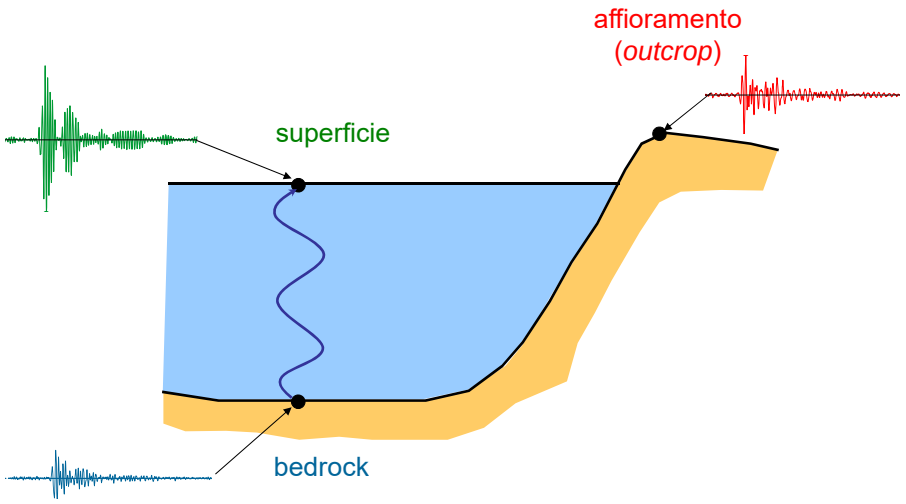
- eventi sismici pregressi
- sorgenti sismogenetiche
  - magnitudo *M*
  - distanza *D* dalla faglia



Parametric Information

Parameter		Quality	Evidence
Min depth [km]	0.5	EJ	Inferred from regional tectonic considerations.
Max depth [km]	8.0	EJ	Inferred from regional tectonic considerations.
Strike [deg] min.... max	280...330	EJ	Inferred from regional geological data.
Dip [deg] min.... max	25...40	EJ	Inferred from regional geological data.
Rake [deg] min.... max	260...280	EJ	Inferred from regional geological data.
Slip Rate [mm/y] min.... max	0.1...1.0	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Max Magnitude [Mw]	6.2	OD	Derived from maximum magnitude of associated individual source(s).

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement



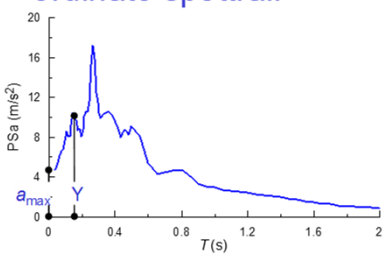
moto su affioramento → modifica (RSL) → azione di progetto

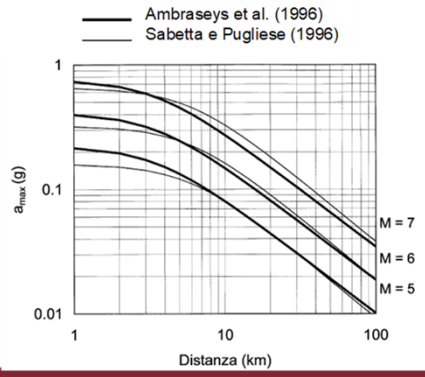
leggi di attenuazione

relazione fra parametri del moto (Y) e

- magnitudo
- distanza

parametri del moto:
- ordinate spettrali





legge di attenuazione di Ambraseys et al. (1996)

$$\ln Y = b_1 + b_2 \cdot M_s + b_4 \cdot \log d + b_A \cdot S_A + b_S \cdot S_S \pm \sigma \cdot P \qquad (g)$$

- Y = accelerazione per ogni periodo proprio T dell'oscillatore elementare
- $d = \sqrt{(r^2 + h_0^2)}$
- r = distanza sorgente – sito (minima rispetto al piano di faglia)
- S_A, S_S = 0 – 1 (in dipendenza dei valori di V_S nei primi 30 m)
- b_1, b_2, b_4, h_0, b_A, b_S, $\sigma = f(T)$

taratura:
- 157 eventi – Europa meridionale e Medio Oriente → 422 registrazioni
- M_S = 4 – 7.9 (valori predominanti ≈ 6)
- profondità focali < 30 km

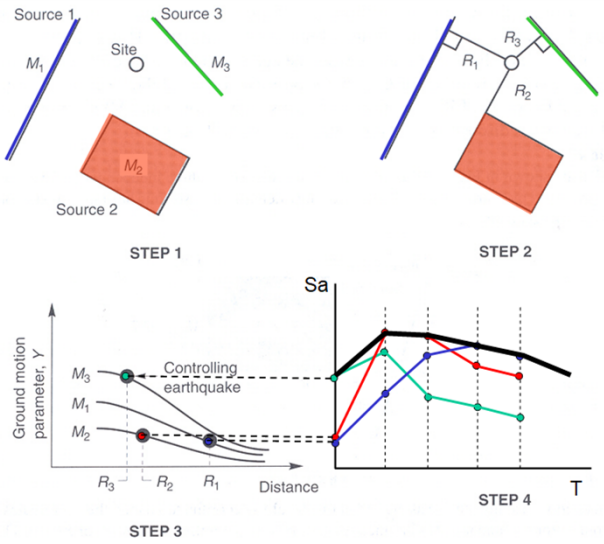
analisi deterministica

1. Identificazione e caratterizzazione delle sorgenti: geometria e magnitudo

2. Distanza sorgente-sito

3. Calcolo del parametro del moto sismico (es. PGA) secondo una legge di attenuazione

4. Scelta del massimo valore del parametro tra i diversi scenari ipotizzati generabili dalle varie sorgenti



analisi probabilistica

$P\,[y > \bar{y}]$ in un intervallo di tempo t

probabilità che il parametro del moto y
attinga un valore più svantaggioso di y_0

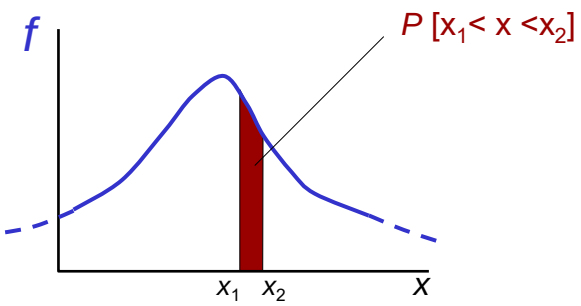
ricerca del valore $\bar{y}$ del parametro del moto y per il quale la probabilità $P\,[y > \bar{y}]$ in t sia minore di un valore prefissato

se $P\,[y > \bar{y}]$ è piccola, è poco probabile che $\bar{y}$ sia superato

$y = f\,(M, D)$ caratterizzazione probabilistica di magnitudo e distanza

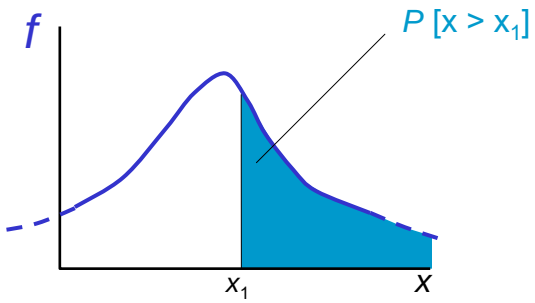
analisi probabilistica

funzione di densità di probabilità (pdf)



analisi probabilistica

funzione di densità di probabilità (pdf)



analisi probabilistica per ciascuna sorgente

$$P[y > \bar{y}] = \iint P[y > \bar{y} \mid m,d] \cdot f_D(d) \cdot f_M(m)\, \mathrm{d}m\, \mathrm{d}d$$

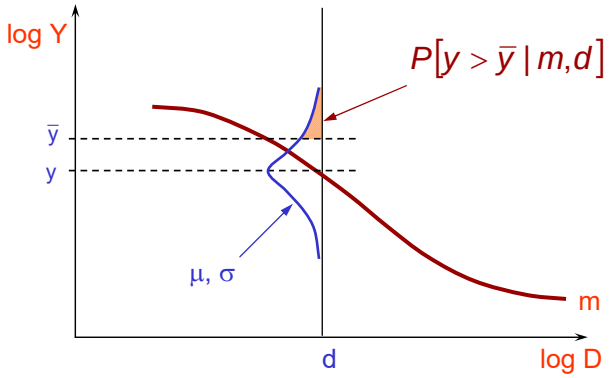
$P[y > \bar{y} \mid m,d]$ — probabilità condizionata → leggi di attenuazione

$f_D(d)$ — pdf distanza

$f_M(m)$ — pdf magnitudo

analisi probabilistica

$\ln Y = \ldots b_2 \cdot M_s + b_4 \cdot \log d \ldots \pm \sigma \cdot P$



impiego di una legge di attenuazione per la valutazione di *P*

analisi probabilistica

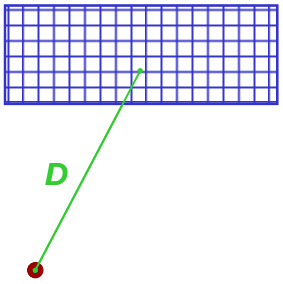
$$P[y > \bar{y}] = \iint P[y > \bar{y} \mid m,d] \cdot f_D(d) \cdot f_M(m)\, dm\, dd$$

$P[y > \bar{y} \mid m,d]$ — probabilità condizionata → leggi di attenuazione

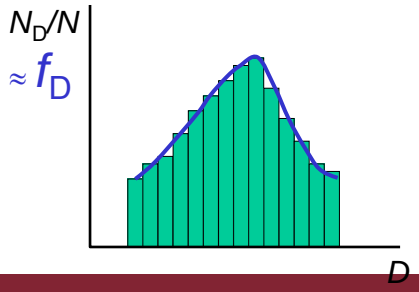
$f_D(d)$ — pdf distanza → istogrammi di frequenza

$f_M(m)$ — pdf magnitudo

analisi probabilistica



distanza:
probabilità uniforme in ogni cella



analisi probabilistica

$$P[y > \bar{y}] = \iint P[y > \bar{y} \mid m,d] \cdot f_D(d) \cdot f_M(m)\, dm\, dd$$

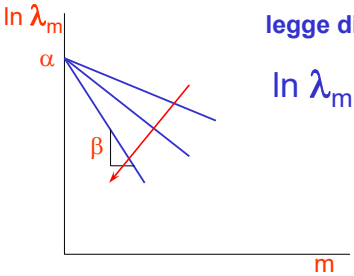
$P[y > \bar{y} \mid m,d]$	$f_D(d)$	$f_M(m)$
probabilità condizionata	pdf distanza	pdf magnitudo
↓	↓	↓
leggi di attenuazione	istogrammi di frequenza	leggi di ricorrenza

analisi probabilistica

magnitudo

λ_m : frequenza di superamento $\frac{\text{num. eventi con } M > m}{\text{intervallo temporale}}$

$T_R = 1/\lambda_m$: periodo di ritorno



legge di ricorrenza di Gutemberg e Richter (1944):

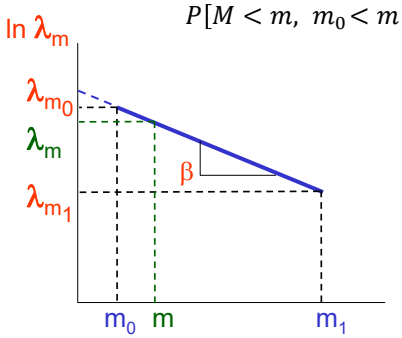
$$\ln \lambda_m = \alpha - \beta \cdot m$$

α e $\beta \rightarrow$ analisi di regressione di dati di sismicità regionale

analisi probabilistica

$$\text{Probabilità} = \frac{\text{frequenza eventi di interesse}}{\text{frequenza di tutti gli eventi}}$$

$$P[M < m,\ m_0 < m < m_1] = \frac{\lambda_{m_0} - \lambda_m}{\lambda_{m_1} - \lambda_{m_0}} = \frac{1 - e^{-\beta(m - m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1 - m_0)}}$$



$$f_M = \frac{dP}{dm} = \frac{\beta e^{-\beta(m - m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1 - m_0)}}$$

analisi probabilistica per ciascuna sorgente

$$P[y > \bar{y}] = \iint P[y > \bar{y} \mid m,d] \cdot f_D(d) \cdot f_M(m)\, \mathrm{d}m\, \mathrm{d}d$$

$P[y > \bar{y} \mid m,d]$	$f_D(d)$	$f_M(m)$
probabilità condizionata	pdf distanza	pdf magnitudo
leggi di attenuazione	istogrammi di frequenza	leggi di ricorrenza

analisi probabilistica

frequenza di superamento per tutte le sorgenti

$$\lambda_{\bar{y}} = \sum_{i=1}^{n} P_i[y > \bar{y}] \cdot \lambda_{i,m_0}$$

probabilità in un intervallo di tempo *t*

$$P[N > 1] = 1 - e^{(\lambda_{\bar{y}}\, t)}$$ (modello di Poisson)

$$P \leftrightarrow \bar{y}$$

$$P = 1 - e^{(\lambda_{\bar{y}} t)}$$

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

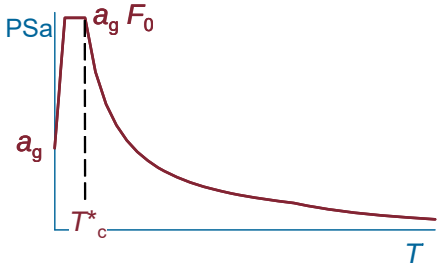
prescrizioni normative

vita di riferimento $V_R = V_N \times C_u$

stati limite → probabilità di superamento P_{VR}

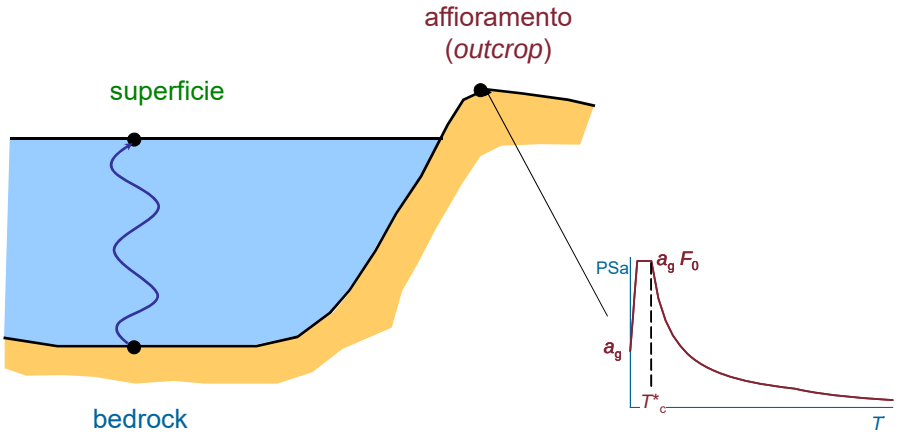
$$T_R = -\frac{1}{ln(1-P_{VR})} \times V_R$$
$$= K \times V_R$$

stati limite		P_{VR} (%)	K
ultimi	SLC	5	19.5
	SLV	10	9.5
di esercizio	SLD	63	1.0
	SLO	81	0.6

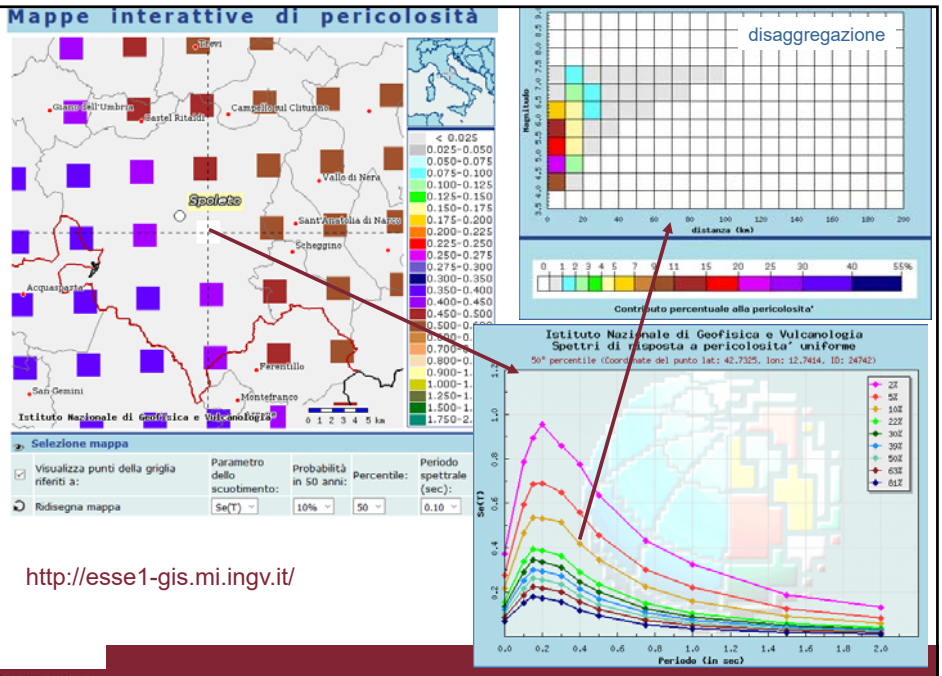


moto su affioramento rigido

a_g, F_0, T^*_C



moto su affioramento → modifica (RSL) → azione di progetto



http://esse1-gis.mi.ingv.it/