

Dinamica delle strutture e Progetto di costruzioni in zona sismica

Catania, 2018/19

03 – Pericolosità sismica

Aurelio Ghersi

I terremoti

Quali terremoti ci aspettiamo
in un determinato sito?

Terremoti previsti per un determinato sito

Per tutto il XX secolo la normativa sismica si è evoluta nel tempo, quasi sempre con nuove norme emesse subito dopo un forte evento sismico

Evento sismico



Nuova classificazione delle zone sismiche



Nuova norme sismiche

Prime norme sismiche in Italia

Fine '700 ed '800:

Norme che fornivano prescrizioni costruttive e limitazioni all'altezza degli edifici

Classificazione sismica e normativa 1909

Terremoto: Messina (1908)
80000 morti e 600 miliardi di lire (di allora) di danni

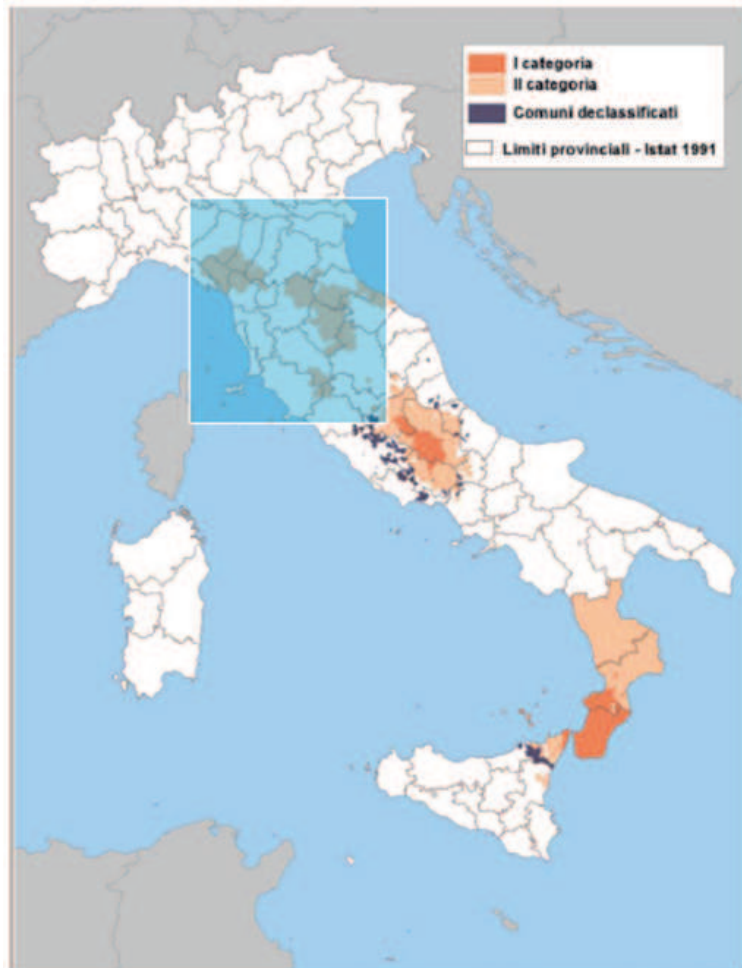


R.D. 18 aprile 1909, n.193

Impone di tener conto, nei calcoli di resistenza delle costruzioni, di “azioni dinamiche dovute al moto sismico ondulatorio, rappresentandole con accelerazioni applicate alle masse del fabbricato”

Classificazione sismica e normativa 1916-1927

Terremoti: Alto Adriatico, Riminese (1916), Val Tiberina (1917)
 Appennino Romagnolo (1918), Mugello, Toscana
 meridionale (1919), Garfagnana (1920)



Decreto Legge n. 1526/1916
Regio Decreto n. 2089/1924
Regio Decreto n. 431/1927

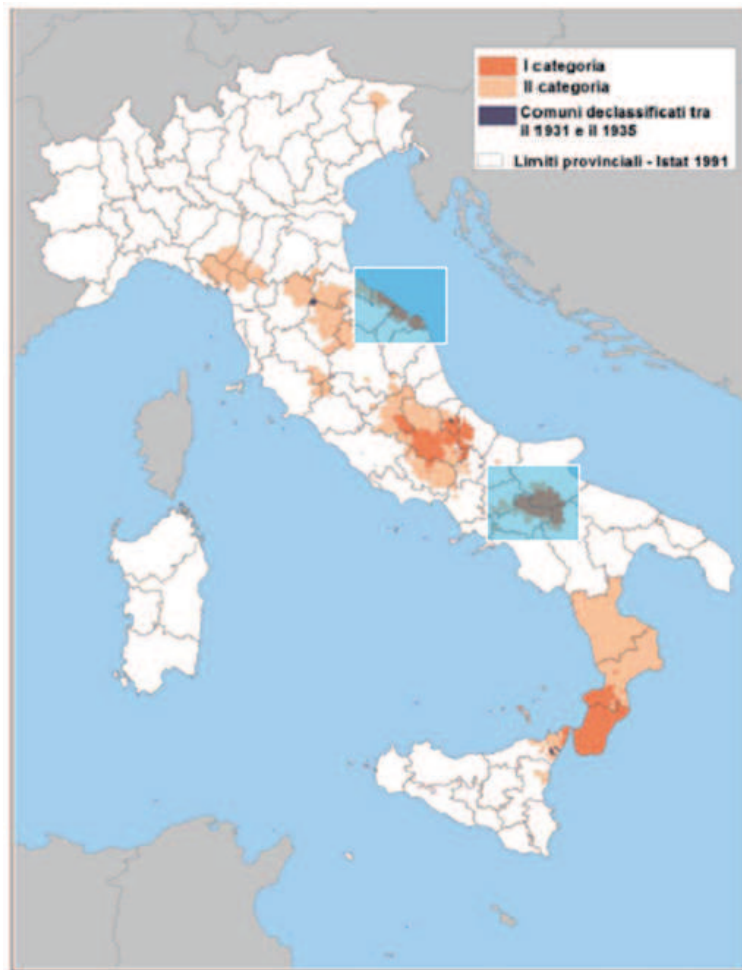


Viene introdotta la zona sismica di
seconda categoria

Classificazione sismica e normativa

1930-1935

Terremoti: Irpinia, Marche settentrionali (1930), Monte Baldo (1932), Maiella (1933)



R.D. 25 marzo 1935, n. 640

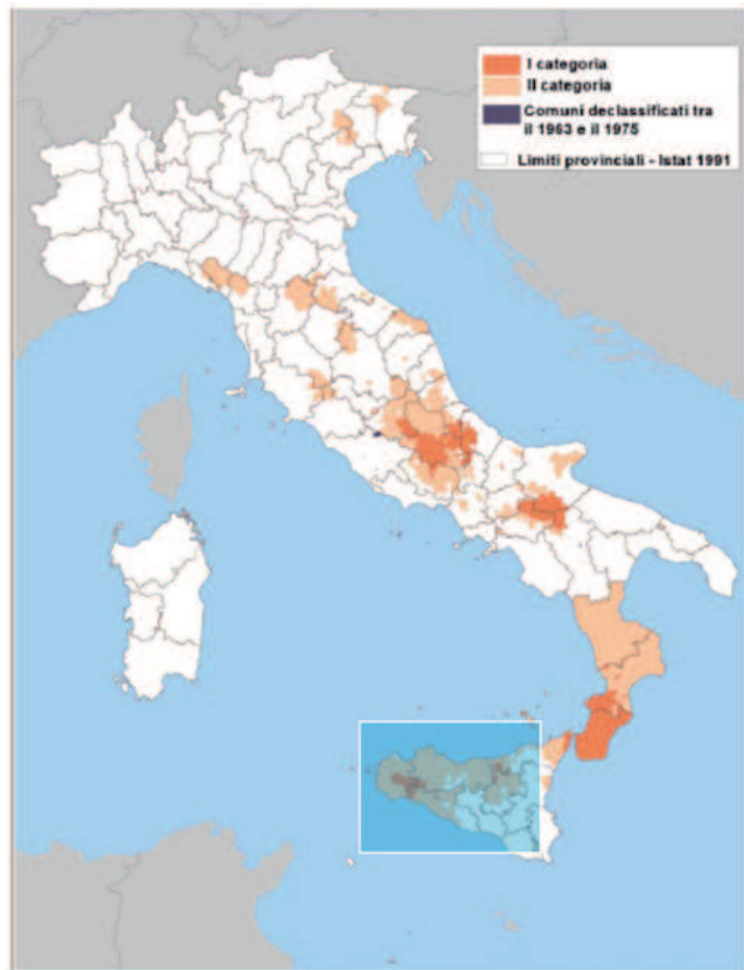
Impone azioni di entità analoga a quelle utilizzate fino a fine XX secolo (ma con accelerazione uguale a tutti i piani)

Impone l'uso di cordoli in c.a. per edifici in muratura

Classificazione sismica e normativa

1962-1975

Terremoti: Monti Nebrodi (1967), Valle del Belice (1968), Tuscania (1971)



Legge n. 64/1974

D.M. 3 marzo 1975

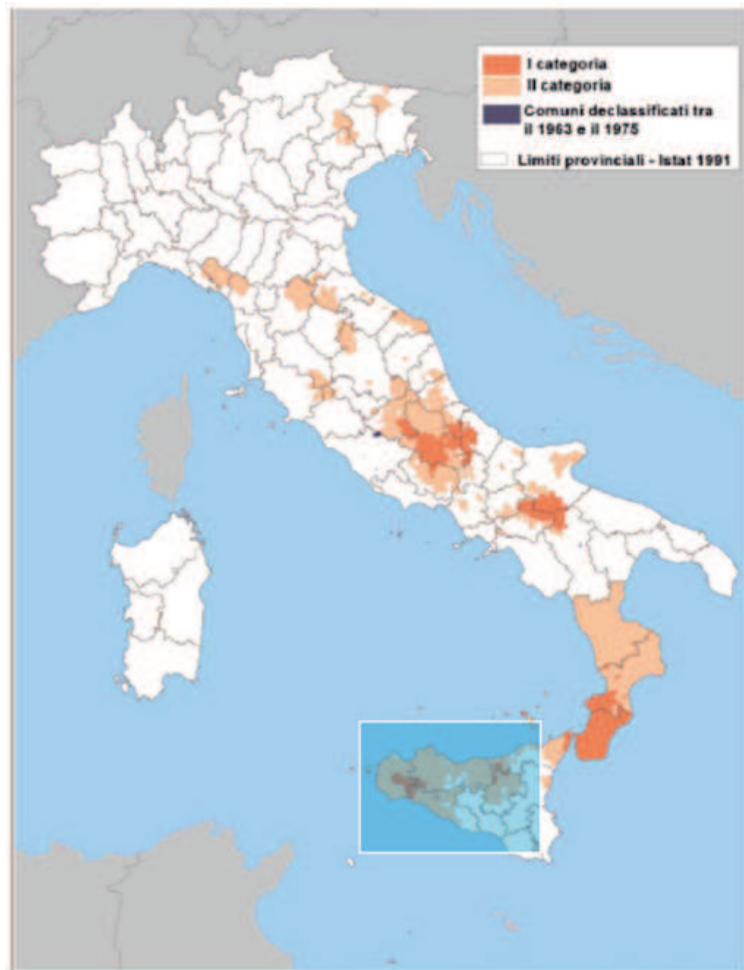
Le forze corrispondono ad una accelerazione crescente col piano
Introduce un “coefficiente di struttura”

Consente l'analisi dinamica (modale)

Classificazione sismica e normativa

1962-1975

Terremoti: Monti Nebrodi (1967), Valle del Belice (1968), Tuscania (1971)



Legge n. 64/1974

D.M. 3 marzo 1975

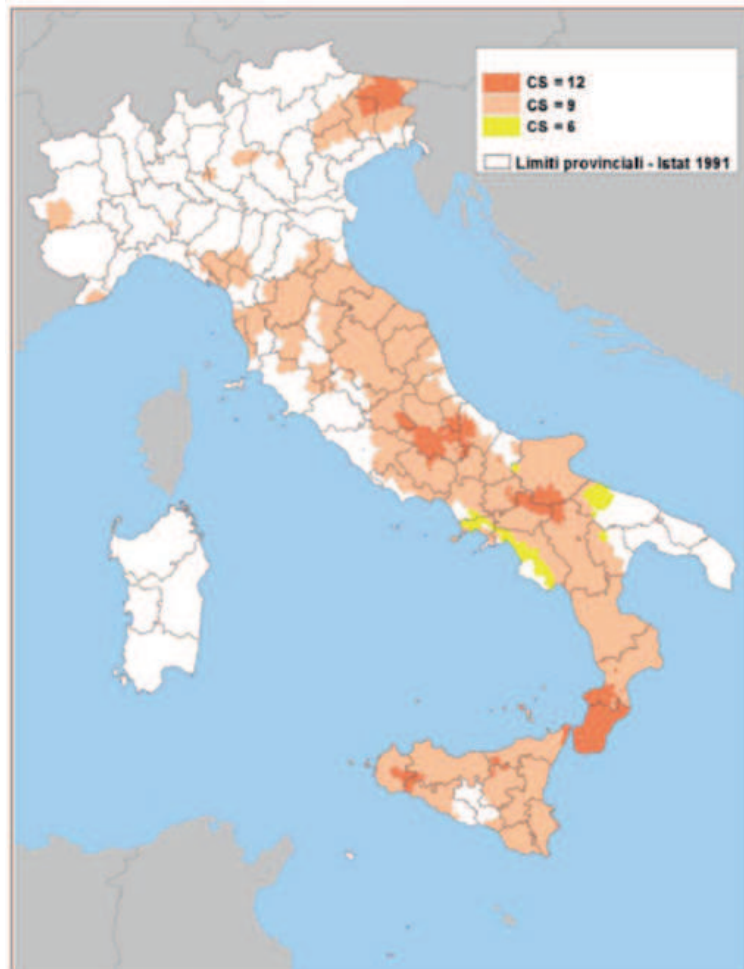
Le forze corrispondono ad una accelerazione crescente col piano
Introduce un “coefficiente di struttura”

Consente l'analisi dinamica (modale)

Classificazione sismica e normativa

1976-1996

Terremoti: Friuli (1976), Calabria meridionale, golfo di Patti (1978), Valnerina (1979), Irpinia-Basilicata (1980)



D.M. 3 giugno 1981 n. 515

Viene introdotta la zona sismica di terza categoria

D.M. 2 luglio 1981, n. 593

Fornisce indicazioni per riparazione e rafforzamento di edifici danneggiati dal sisma del 1980

Introduce il calcolo anche per gli edifici in muratura

Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto del
Friuli (1976) parte il
Progetto Finalizzato
Geodinamica (CNR)

Partendo dallo studio
geologico, dall'individuazione
delle faglie, dalla ricorrenza
degli eventi sismici e dalla
attenuazione delle onde
sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito

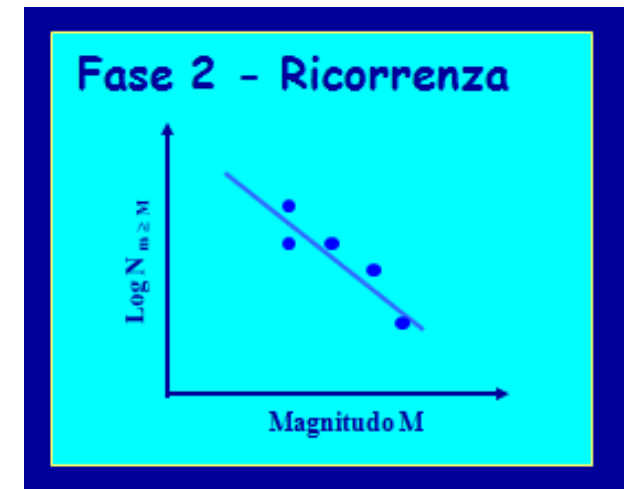


Individuazione delle faglie
nelle zone circostanti il
sito

Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto del
Friuli (1976) parte il
Progetto Finalizzato
Geodinamica (CNR)

Partendo dallo studio
geologico, dall'individuazione
delle faglie, dalla ricorrenza
degli eventi sismici e dalla
attenuazione delle onde
sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito



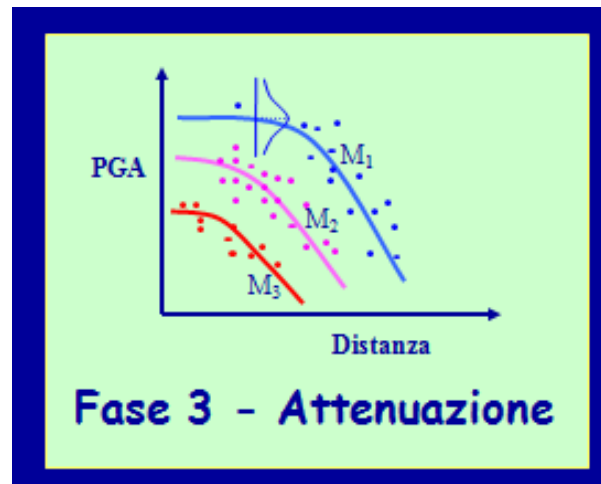
Individuazione degli
eventi sismici che tali
faglie possono provocare
e della loro ricorrenza

Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto del
Friuli (1976) parte il
Progetto Finalizzato
Geodinamica (CNR)

Valutazione della
trasmissione delle onde
sismiche e della loro
attenuazione arrivando
dalla faglia al sito in
esame

Partendo dallo studio
geologico, dall'individuazione
delle faglie, dalla ricorrenza
degli eventi sismici e dalla
attenuazione delle onde
sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito

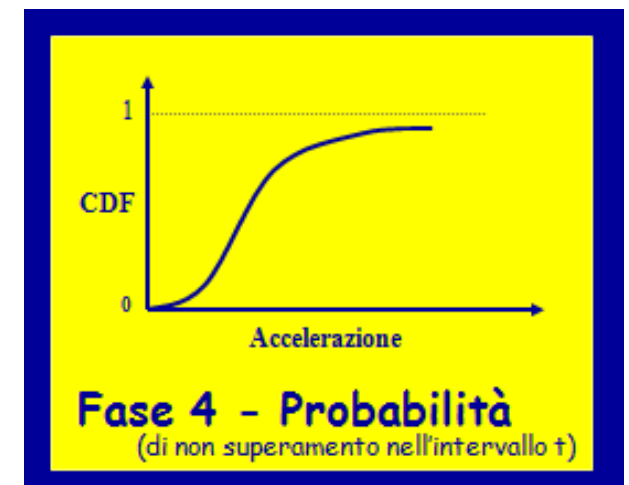


Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto del
Friuli (1976) parte il
Progetto Finalizzato
Geodinamica (CNR)

Valutazione della
probabilità di avere
assegnate accelerazioni
nel sito in esame

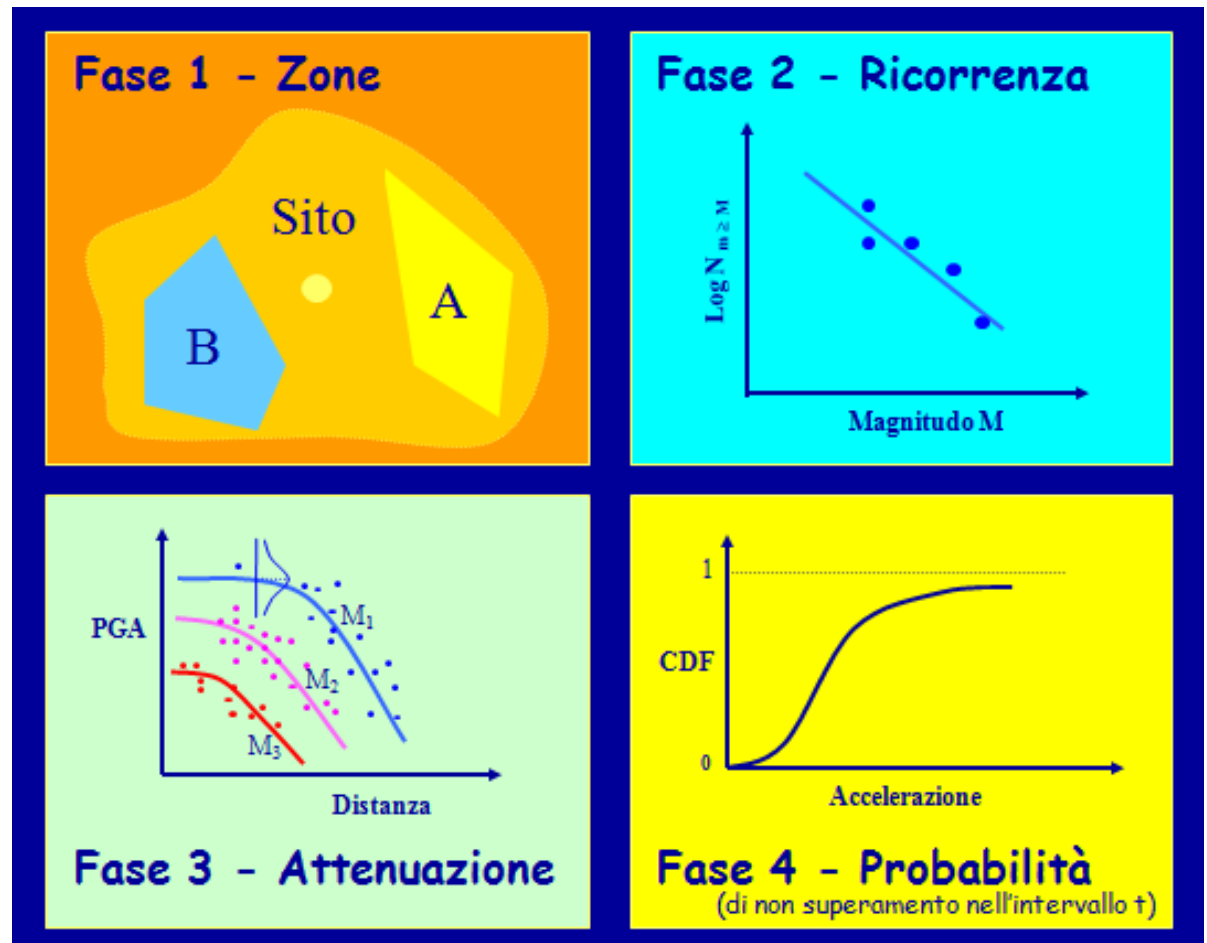
Partendo dallo studio
geologico, dall'individuazione
delle faglie, dalla ricorrenza
degli eventi sismici e dalla
attenuazione delle onde
sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito



Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto del
Friuli (1976) parte il
Progetto Finalizzato
Geodinamica (CNR)

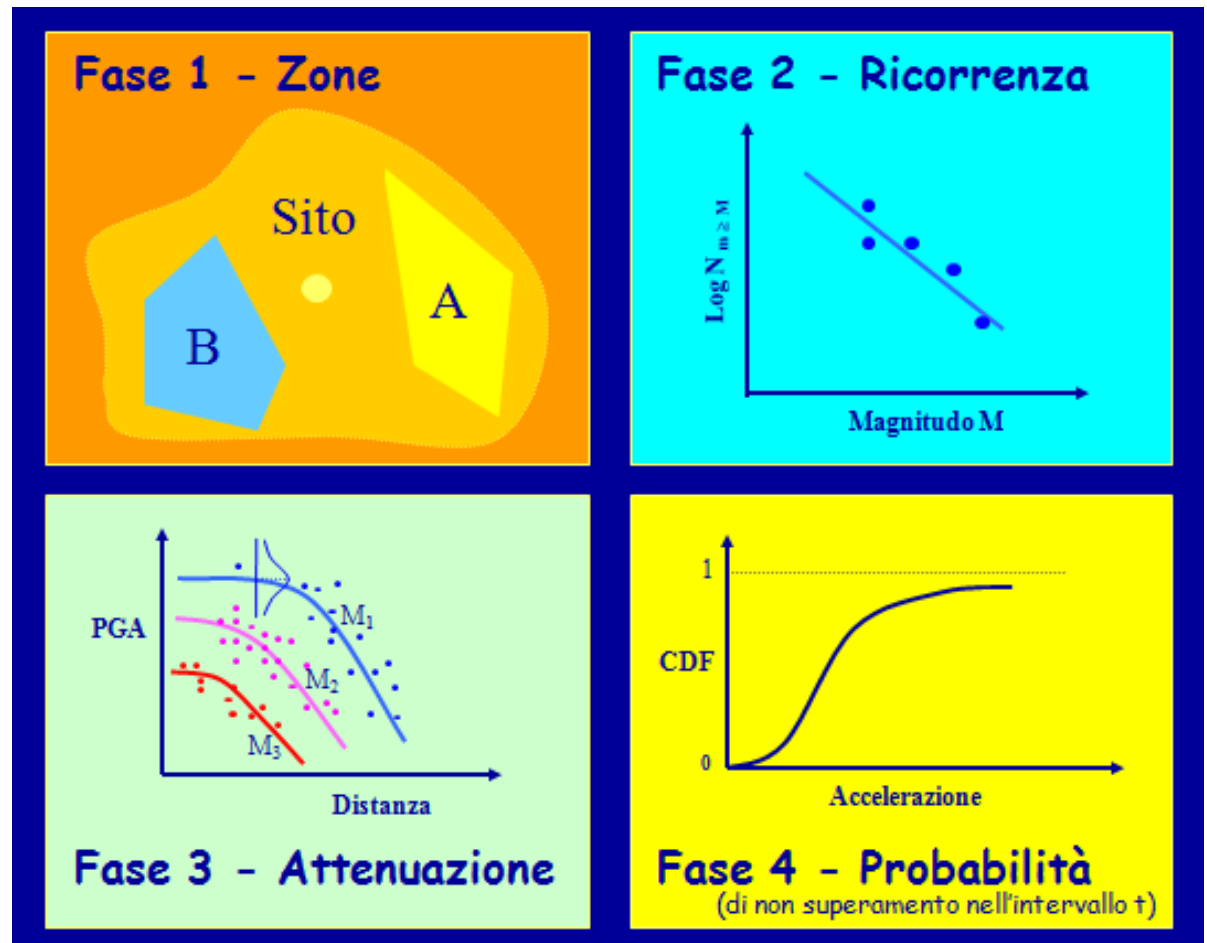
Partendo dallo studio
geologico, dall'individuazione
delle faglie, dalla ricorrenza
degli eventi sismici e dalla
attenuazione delle onde
sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito



Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto del
Friuli (1976) parte il
Progetto Finalizzato
Geodinamica (CNR)

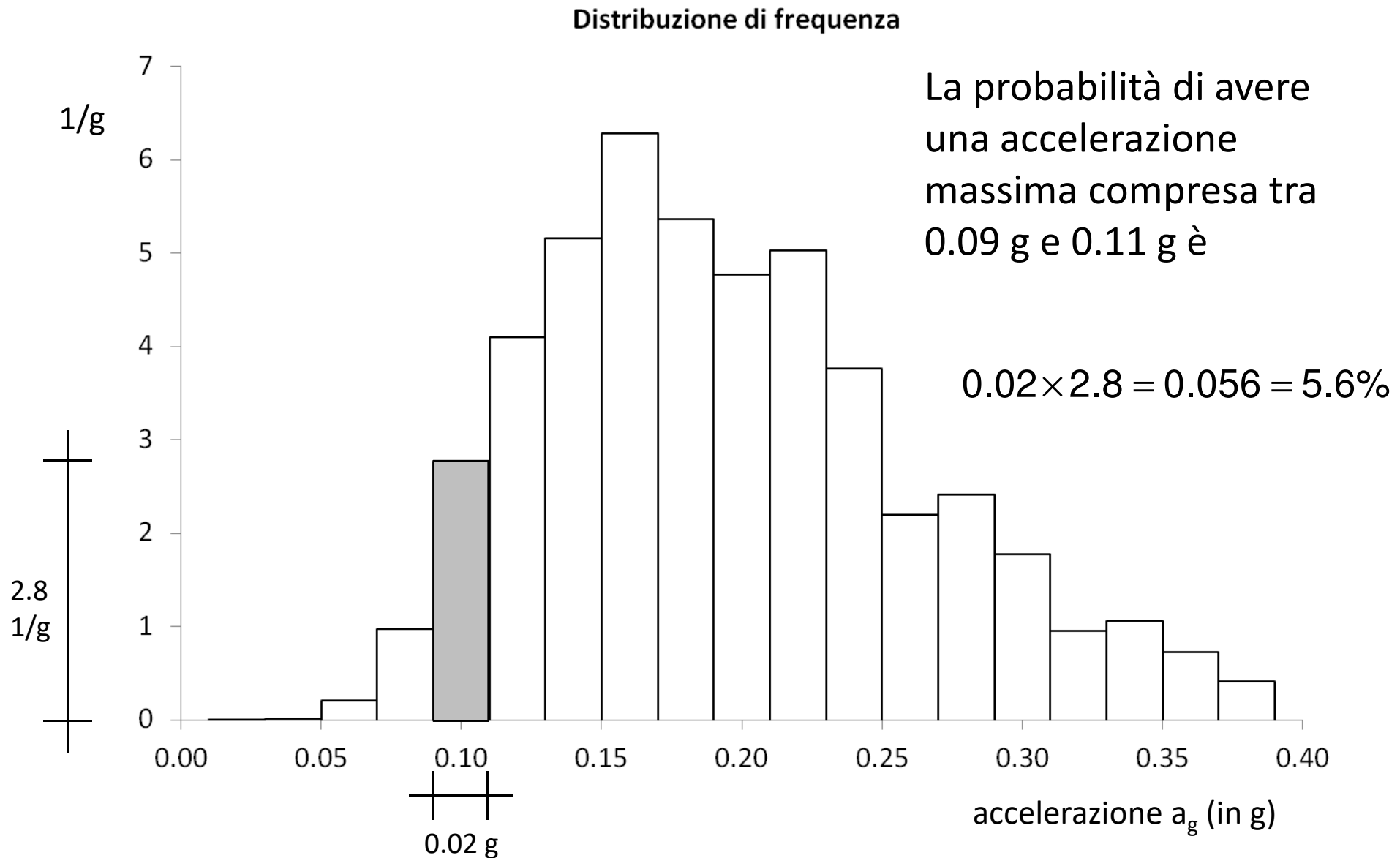
In anni più recenti si è
avviato in Europa il
Progetto SHARE
(Seismic Hazard
Harmonization in
Europe)



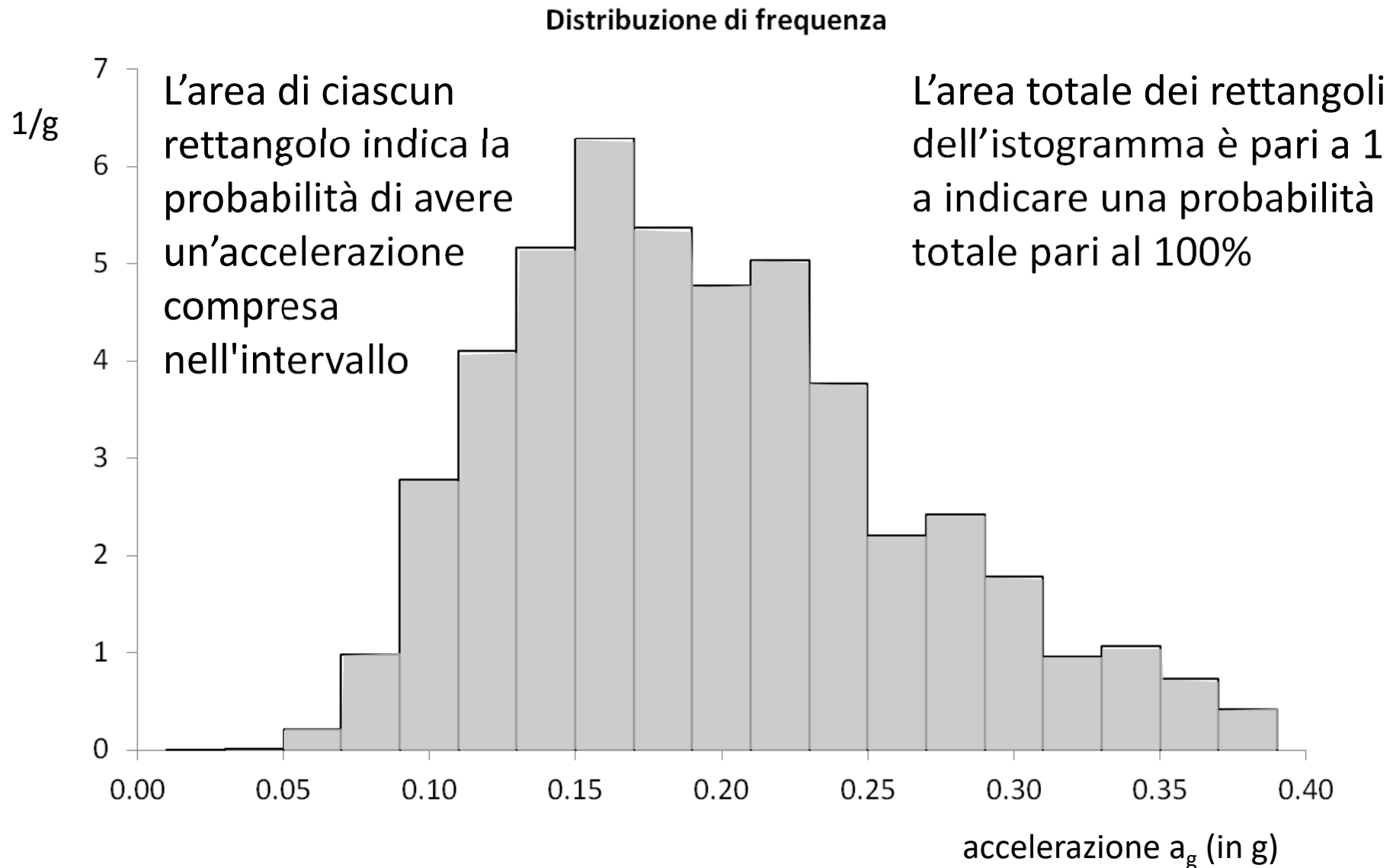
Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Gli studi svolti consentono di valutare quale sarà l'accelerazione massima che si può avere in un sito in un assegnato intervallo di tempo
 - Ad esempio in 100 anni
- I risultati non sono deterministici, ma devono essere analizzati in maniera probabilistica
 - Ad esempio si possono esaminare tanti intervalli e valutare qual è l'accelerazione massima a_g in ciascuno di essi
 - Questi valori, raggruppati in intervalli di a_g , possono essere rappresentati con un istogramma (**distribuzione di frequenza**)

Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?



Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

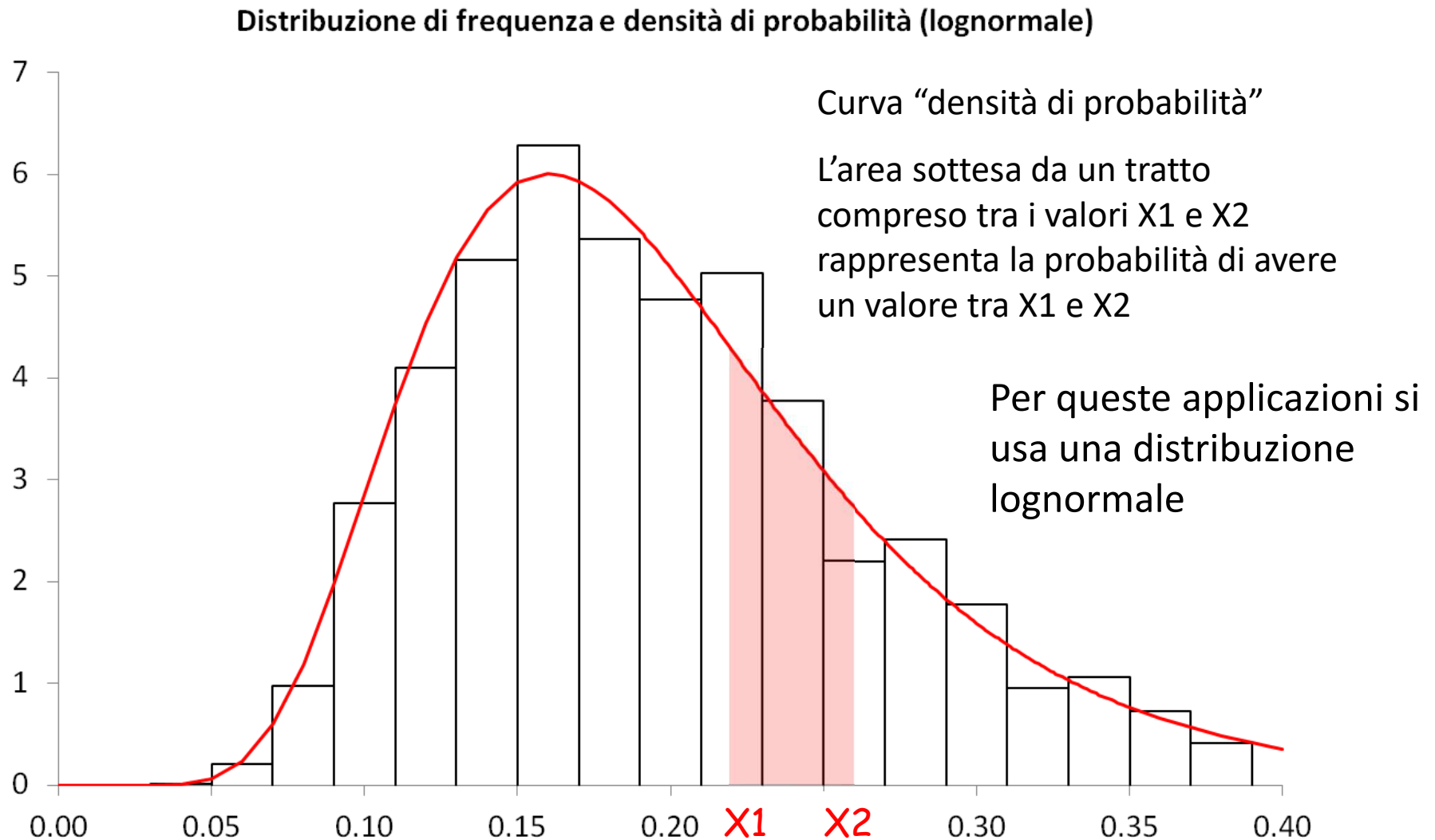


Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Quando il numero di valori aumenta si può ridurre l'ampiezza degli intervalli, fino ad avere una curva continua (**densità di probabilità**)
- In genere si approssima la curva di densità di probabilità con una curva di equazione nota
 - Distribuzione normale o Gaussiana
 - Distribuzione lognormale

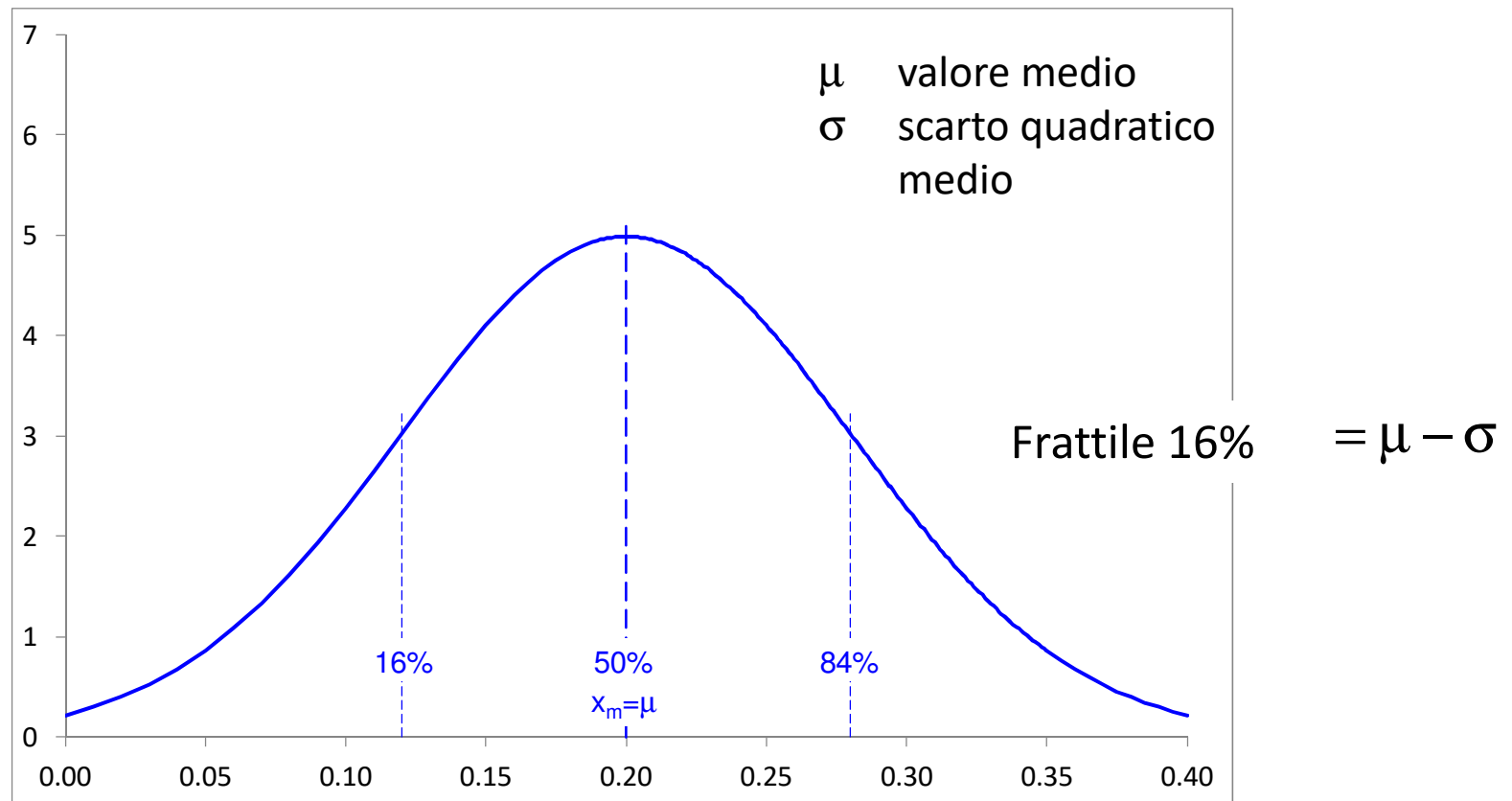
Bibliografia: Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang, Probability concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons

Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?



Distribuzione normale o Gaussiana

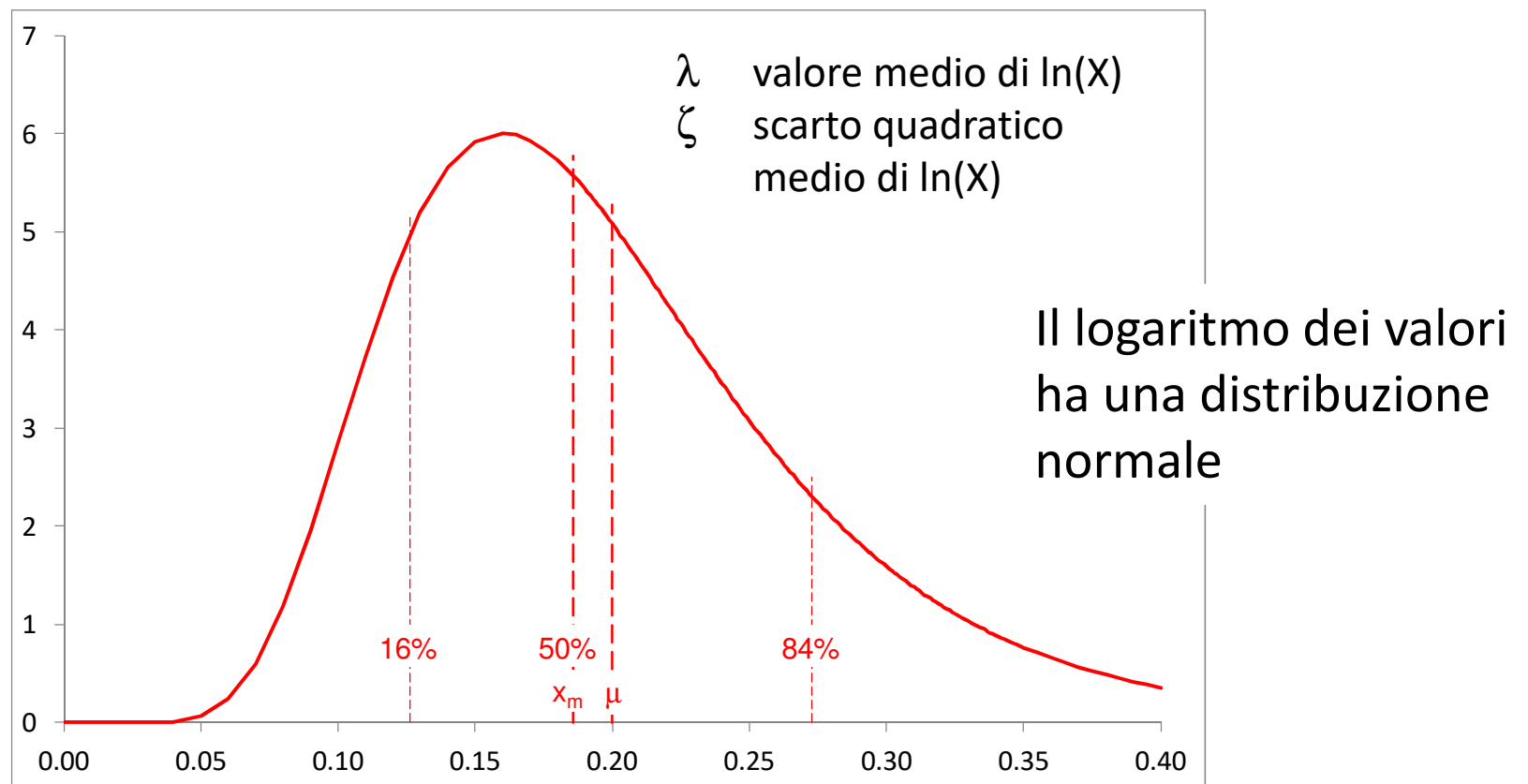
- Definita con l'equazione
$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$



Distribuzione simmetrica rispetto al valore medio $\mu = \text{mediano } x_m$

Distribuzione lognormale

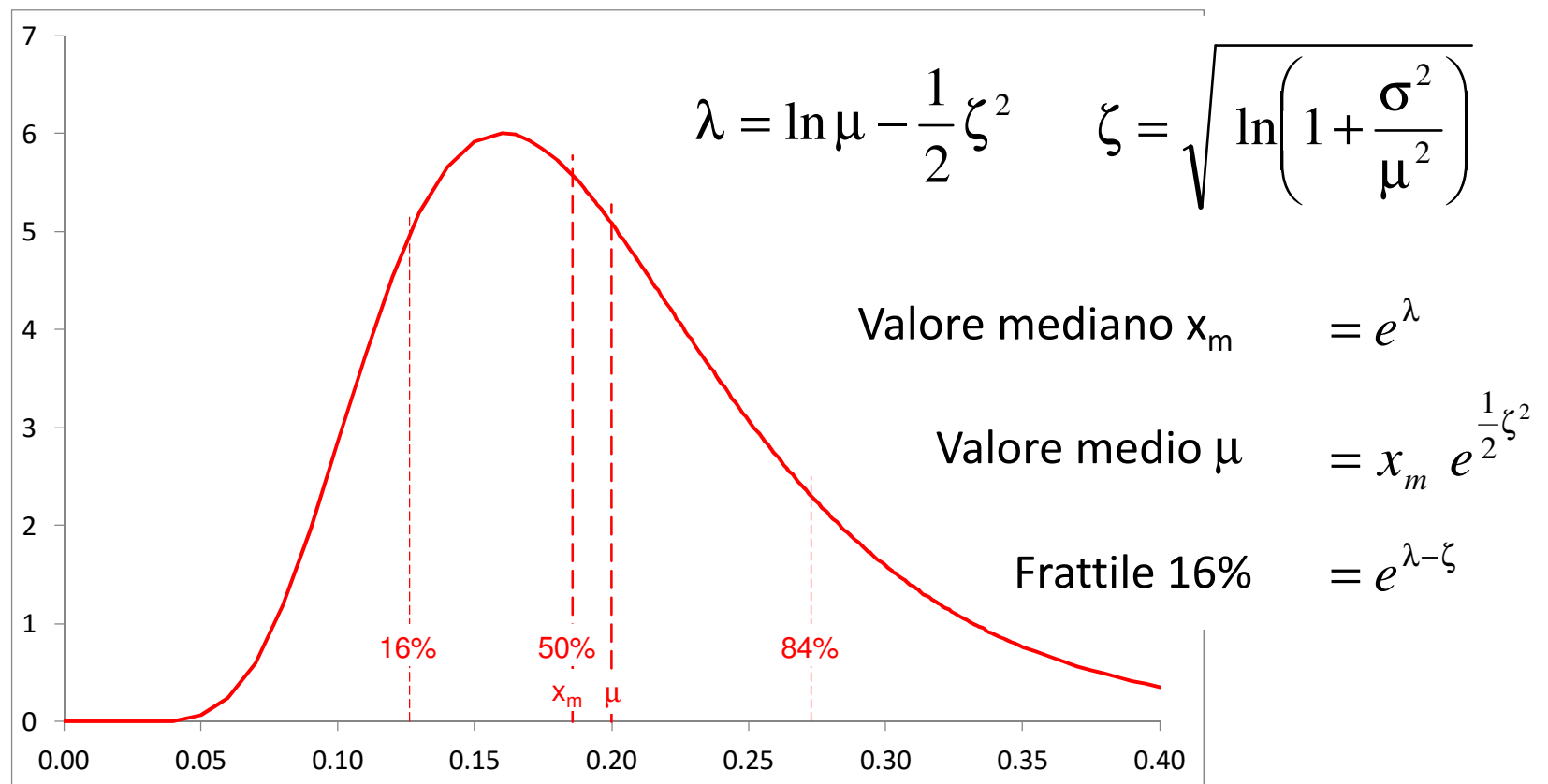
- Definita con l'equazione
$$f_X(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2}$$



Distribuzione non simmetrica; valore medio $\mu \neq$ mediano x_m

Distribuzione lognormale

- Definita con l'equazione
$$f_X(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2}$$



Distribuzione non simmetrica; valore medio $\mu \neq$ mediano x_m

Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- I valori sono stati ottenuti dal Progetto Finalizzato Geodinamica
- I risultati sono riportati nel sito INGV ed io li ho raccolti nel file Pericolosità e spettri
 - Sono riportati per oltre 10000 siti il valore mediano ed i frattili 16% e 84%, per 9 diversi intervalli di tempo
 - È possibile calcolare i valori per un qualsiasi sito, diverso da quelli studiati, mediante interpolazione

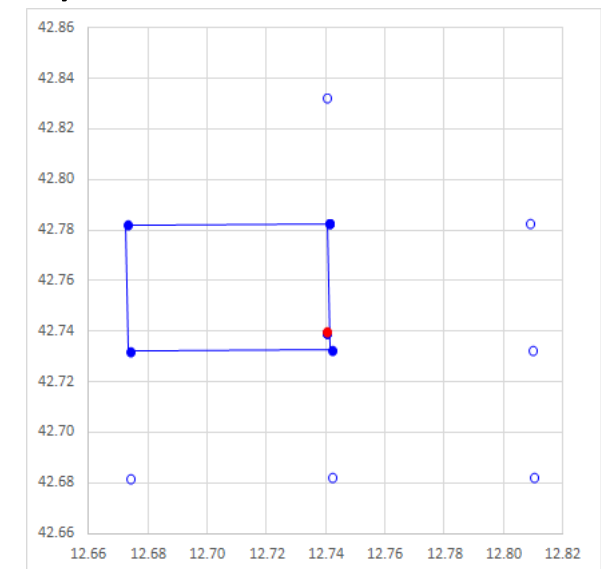
Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Ad esempio:
 - Per un sito noto (assegnare l'ID di riferimento, per Spoleto ID 24742)

	Tipo ricerca	Cerca ID		
	indicare ID			
	24742			

- Per un sito generico (assegnare latitudine e longitudine, per Spoleto Villa Redenta Lat. 42.74 Lon. 12.74)

	Tipo ricerca	Cerca Lat. Lon.		
		indicare		
		Lat.	Lon.	
		42.74	12.74	
		ID	peso	
		24520	0.129	
		24742	0.720	
		24741	0.082	
		24519	0.069	



Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

Nel sito INGV
i valori sono
raggruppati per Δt

$\Delta t = 475$ anni

Nel file Excel
vengono mostrati
per sito o ID

Δt	fratt. 50%	fratt. 16%	fratt. 84%
30	0.0691	0.0543	0.0729
50	0.0865	0.0727	0.0917
72	0.1026	0.0877	0.1072
101	0.1191	0.1032	0.1250
140	0.1361	0.1195	0.1435
201	0.1568	0.1391	0.1669
475	0.2156	0.1928	0.2344
975	0.2767	0.2445	0.3009
2475	0.3719	0.3210	0.4080

punto di
riferimento
(Spoleto)

id	lon	lat	ag	84perc	16perc
24735	12.2649	42.7284	0.1504	0.1734	0.1361
24736	12.3330	42.7291	0.1527	0.1761	0.1384
24737	12.4010	42.7298	0.1552	0.1769	0.1400
24738	12.4691	42.7304	0.1590	0.1777	0.1427
24739	12.5372	42.7310	0.1654	0.1790	0.1483
24740	12.6052	42.7315	0.1760	0.1882	0.1586
24741	12.6733	42.7320	0.1938	0.2060	0.1744
24742	12.7414	42.7325	0.2156	0.2344	0.1928
24743	12.8094	42.7329	0.2377	0.2547	0.2107
24744	12.8775	42.7333	0.2531	0.2743	0.2245
24745	12.9455	42.7336	0.2521	0.2792	0.2308
24746	13.0136	42.7339	0.2555	0.2820	0.2332
24747	13.0817	42.7342	0.2572	0.2835	0.2346
24748	13.1497	42.7344	0.2576	0.2838	0.2350
24749	13.2178	42.7346	0.2569	0.2831	0.2341
24750	13.2859	42.7348	0.2541	0.2797	0.2310
24751	13.3540	42.7349	0.2472	0.2698	0.2242

valore di a_g
mediano

frattili
84% e 16%

Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Ad esempio per Spoleto (ID 24742)
per un intervallo di tempo pari a 100 anni si ha
 - Valore mediano $a_g = 0.1191 \text{ g}$ (frattile 50%)
 - Valore medio $a_g = 0.1196 \text{ g}$
 - Frattile 16% $a_g = 0.1032 \text{ g}$
 - Frattile 84% $a_g = 0.1250 \text{ g}$
- o, per un intervallo di tempo pari a 475 anni
 - Valore mediano $a_g = 0.2156 \text{ g}$ (frattile 50%)
 - Valore medio $a_g = 0.2166 \text{ g}$
 - Frattile 16% $a_g = 0.1928 \text{ g}$
 - Frattile 84% $a_g = 0.2344 \text{ g}$

Come si ragiona in termini probabilistici?

- Abbiamo parlato di “accelerazione massima a_g in un assegnato intervallo di tempo” T
- Intendiamo quindi che, mediamente, quel valore di a_g verrà raggiunto (o superato) ogni T anni
- Si parla quindi di **periodo di ritorno** di quell'evento sismico
- L'intervallo di tempo per il quale mediamente si avrà un terremoto di intensità pari o superiore ad un valore assegnato a_g è indicato con il simbolo $T_R(a_g)$
 - Accelerazioni basse hanno periodi di ritorno brevi
 - Accelerazioni forti hanno periodi di ritorno lunghi

Trattazione matematica in termini probabilistici

- Si assume che:
 - Un evento possa accadere in maniera casuale in un qualsiasi istante
 - L'occorrenza di un evento in un determinato intervallo di tempo sia indipendente da quanto si ha in un qualsiasi altro intervallo
- La probabilità di occorrenza di un evento in un piccolo intervallo Δt è proporzionale a Δt e può essere espressa con $\lambda_s \Delta t$, dove λ_s è la **possibilità media di occorrenza** dell'evento (assunta costante)

Nota: in genere Δt è espresso in anni, λ_s è quindi espresso in anni^{-1}

Questa distribuzione probabilistica è detta distribuzione di Poisson

Trattazione matematica

in termini probabilistici

- Il valore Δt per il quale si ha
 $\lambda_s(a_g) \Delta t = 1$ (probabilità 1, cioè 100%)
rappresenta l'intervallo di tempo per il quale mediamente si
avrà un terremoto di intensità pari o superiore ad un valore
assegnato a_g cioè $T_R(a_g)$
- Si ha quindi

$$\lambda(a_g) = \frac{1}{T_R(a_g)}$$

$$T_R(a_g) = \frac{1}{\lambda(a_g)}$$

Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Per una distribuzione di Poisson:

la probabilità P di avere n eventi in un intervallo di tempo Δt , indicata con $P(X_i = n)$, è data da:

$$P(X_i = n) = \frac{(\lambda(a_g) \Delta t)^n}{n!} e^{-\lambda(a_g) \Delta t}$$

La probabilità $P(X_i=0)$ che non vi sia alcun evento sismico ($n=0$) in un intervallo di tempo V_R è

$$P(X_i = 0) = \frac{(\lambda(a_g) V_R)^0}{0!} e^{-\lambda(a_g) V_R} = e^{-V_R / T_R(a_g)}$$

La probabilità che vi sia almeno un evento in un intervallo di tempo V_R è

$$P_{VR} = 1 - P(X_i = 0) = 1 - e^{-V_R / T_R}$$

Trattazione probabilistica degli eventi sismici

La probabilità che vi sia almeno un evento sismico di intensità pari o superiore ad un valore assegnato a_g in un intervallo di tempo V_R è denominata “**probabilità di superamento**” P_{VR} e vale

$$P_{VR} = 1 - e^{-V_R/T_R}$$

E, viceversa, si ha la relazione tra T_R e P_{VR}

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

Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Relazione tra periodo di ritorno T_R
e probabilità di superamento P_{VR}

La probabilità di superamento è data dalla relazione:

$$P_{VR} = 1 - e^{-V_R/T_R}$$

Esempio:

Periodo di ritorno 475 anni

La probabilità di superamento in 50 anni è:

$$P_{VR} = 1 - e^{-50/475} = 0.10 = 10\%$$

Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Relazione tra periodo di ritorno T_R
e probabilità di superamento P_{VR}

Il periodo di ritorno è dato dalla relazione:

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

Esempio:

Probabilità di superamento del 10% in 50 anni

Il periodo di ritorno è:

$$T_R = -\frac{50}{\ln(1 - 0.10)} = 474.6 \cong 475 \text{ anni}$$

Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

Nell'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica si sono prese in considerazione le seguenti probabilità di superamento, con i periodi di ritorno corrispondenti:

$P(V_R=50 \text{ anni})$	T_R (esatto)	T_R (arrotondato)
81%	30.1	30
63%	50.3	50
50%	72.1	72
39%	101.2	101
30%	140.2	140
22%	201.2	201
10%	474.6	475
5%	974.8	975
2%	2474.9	2475

Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

- Nel sito INGV sono riportata in dettaglio il valore mediano ed i frattili 16% e 84% ottenuti dal Progetto Finalizzato Geodinamica, suddivisi in più fogli di calcolo Excel
- I valori mediani sono riportati anche nelle NTC08, Tabella 1 e 2

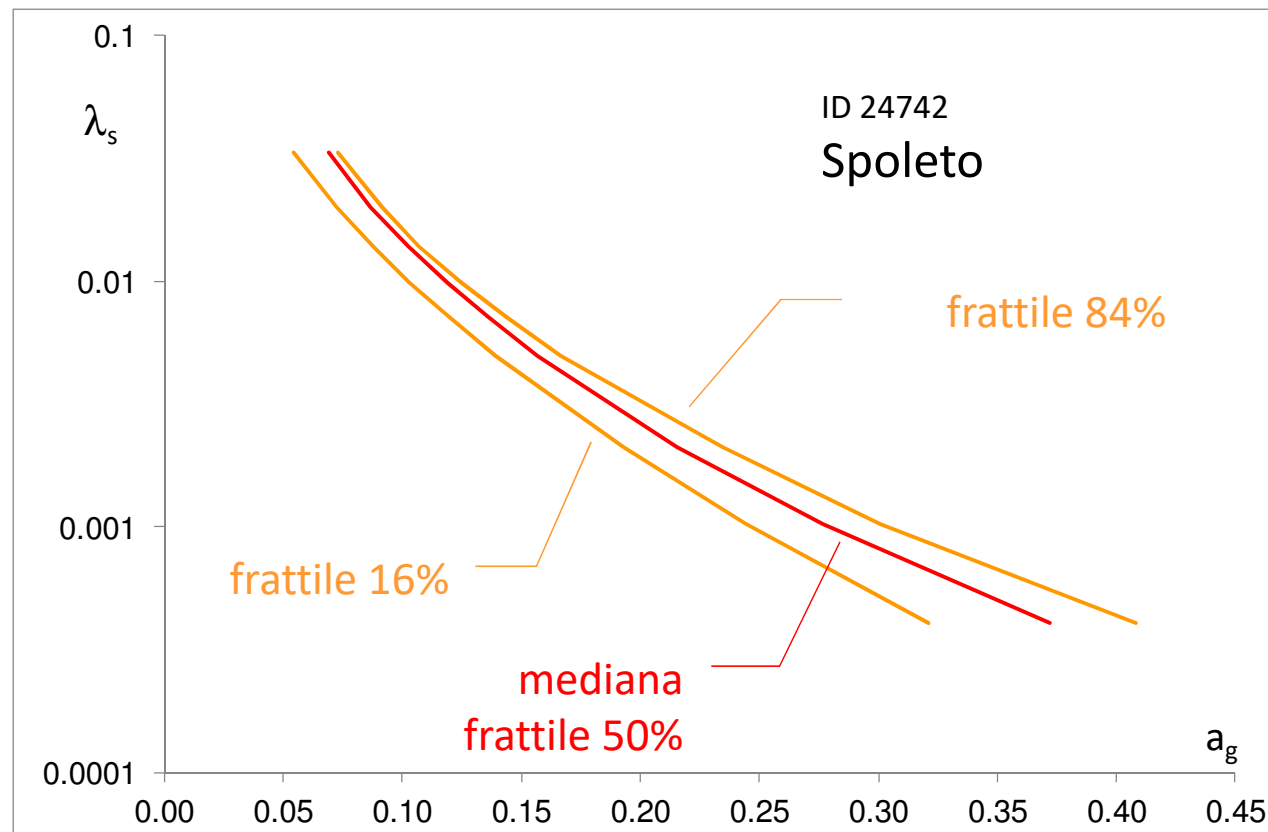
Nota: i valori sono riferiti al bedrock, cioè allo strato roccioso affiorante. Se al di sopra dello strato roccioso vi sono strati di terreno deformabile (sabbia, argilla) occorre valutare l'effetto della stratigrafia del sito

Curva di pericolosità

- I valori relativi ad un sito possono essere diagrammati nella cosiddetta **curva di pericolosità**, che mostra la relazione tra la possibilità media di occorrenza $\lambda_s = 1/T_R$ e l'accelerazione a_g

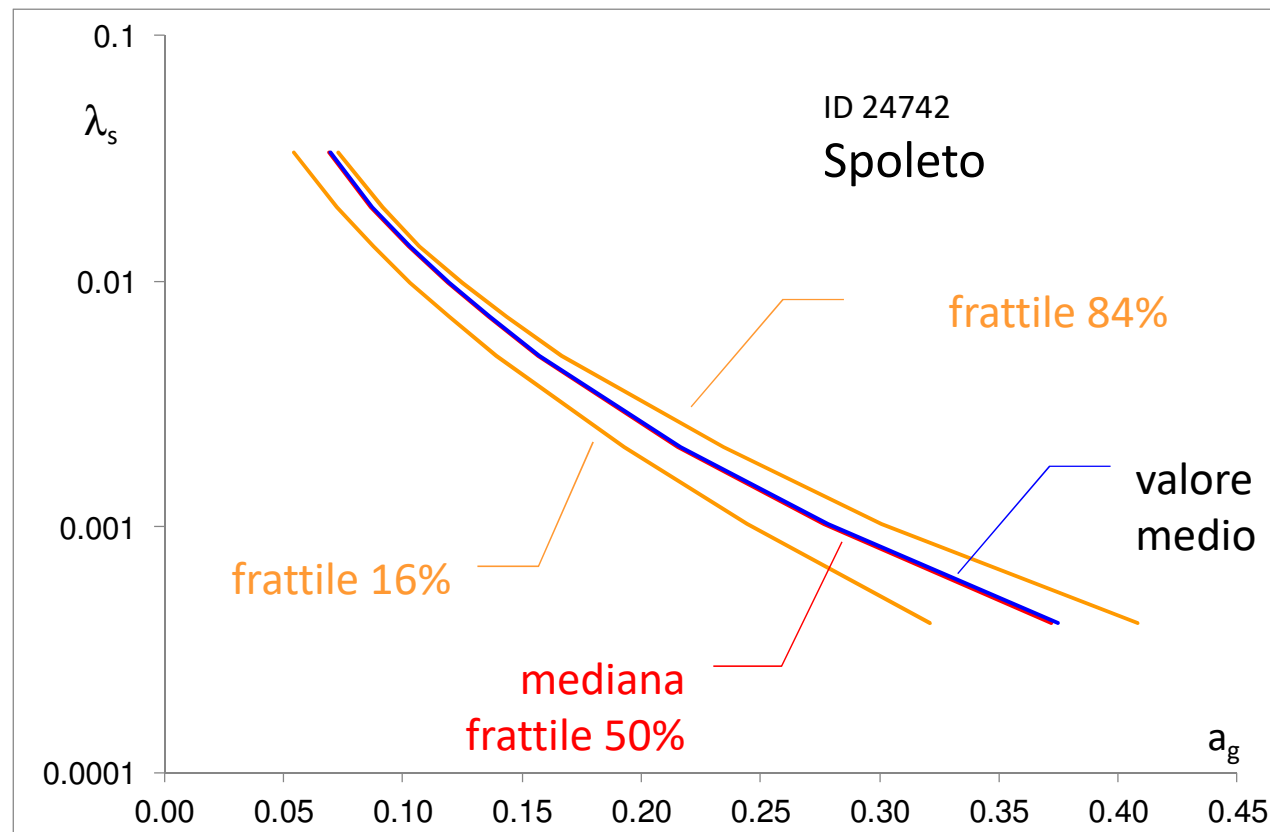
Curva di pericolosità

- La curva di pericolosità mostra la relazione tra la possibilità media di occorrenza $\lambda_s = 1/T_R$ e l'accelerazione a_g (mediana, frattili 16% e 84%)

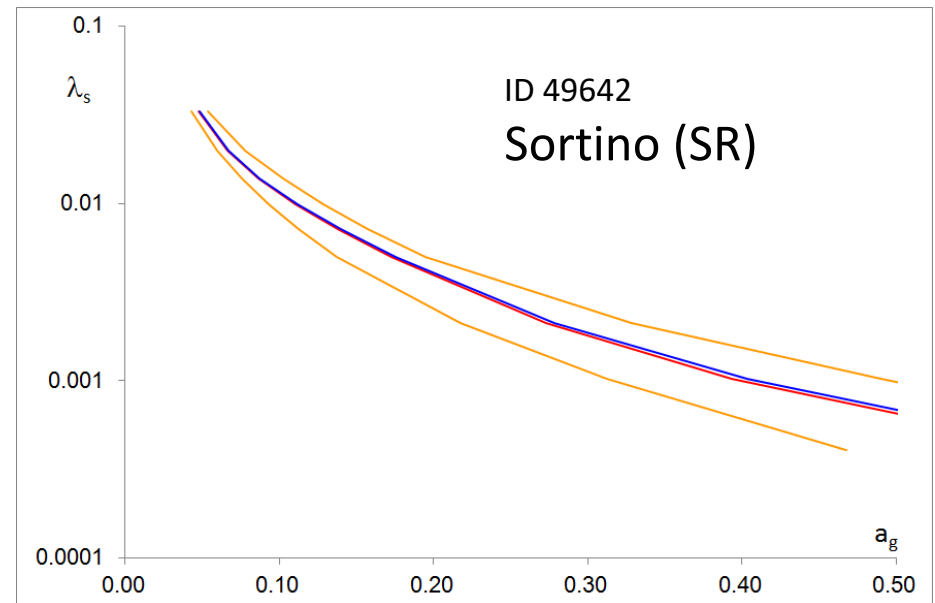
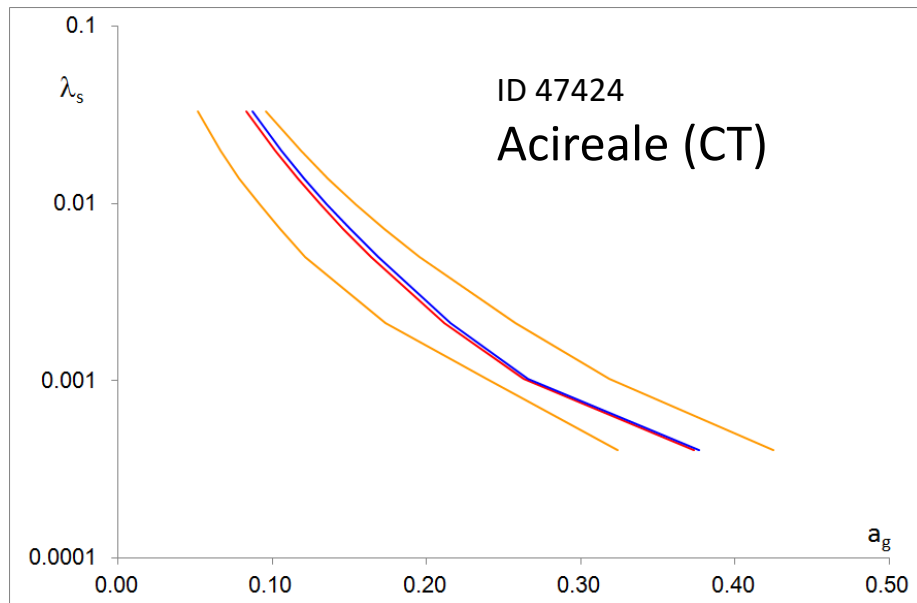
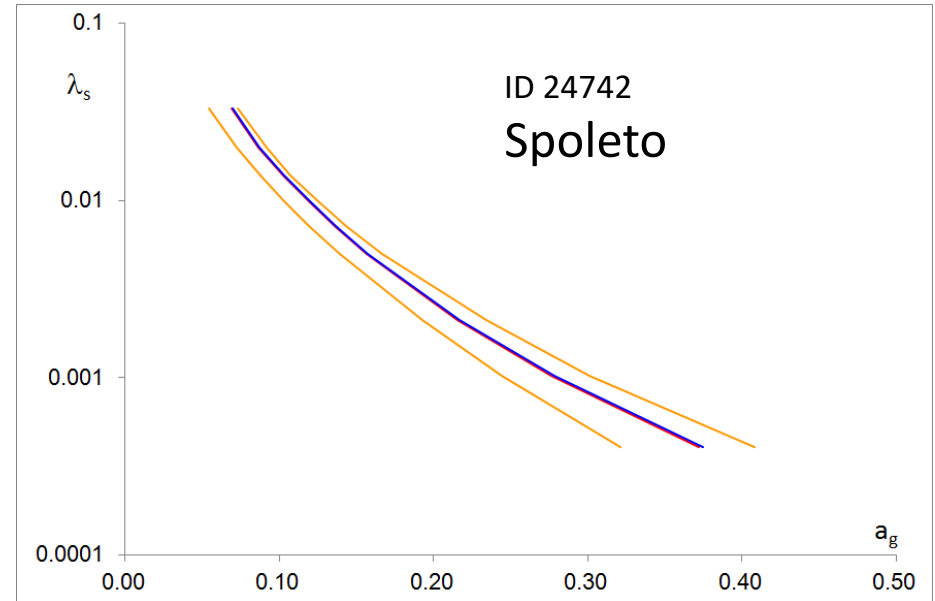
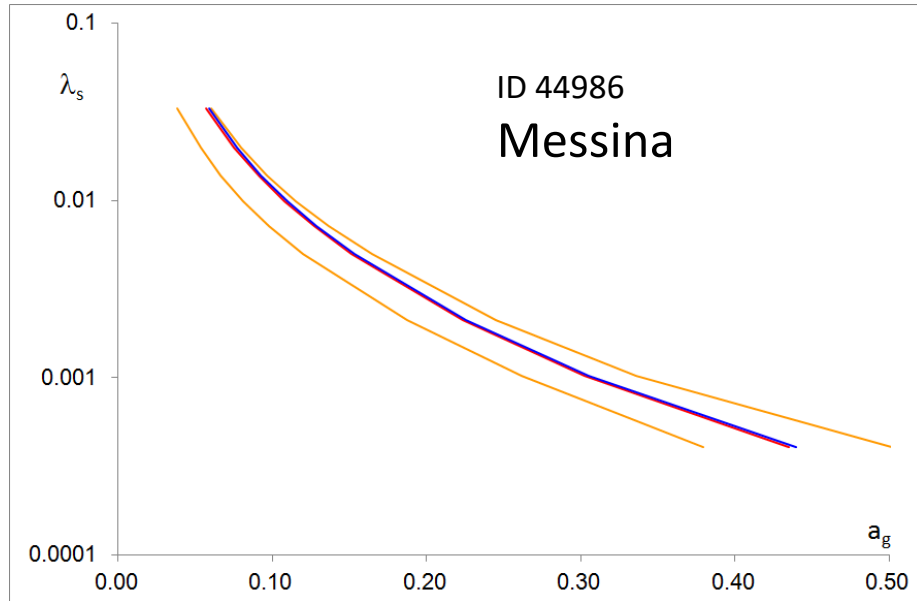


Curva di pericolosità

- È possibile calcolare e diagrammare anche il valore medio, ma questo non differisce in maniera rilevante dal valore mediano

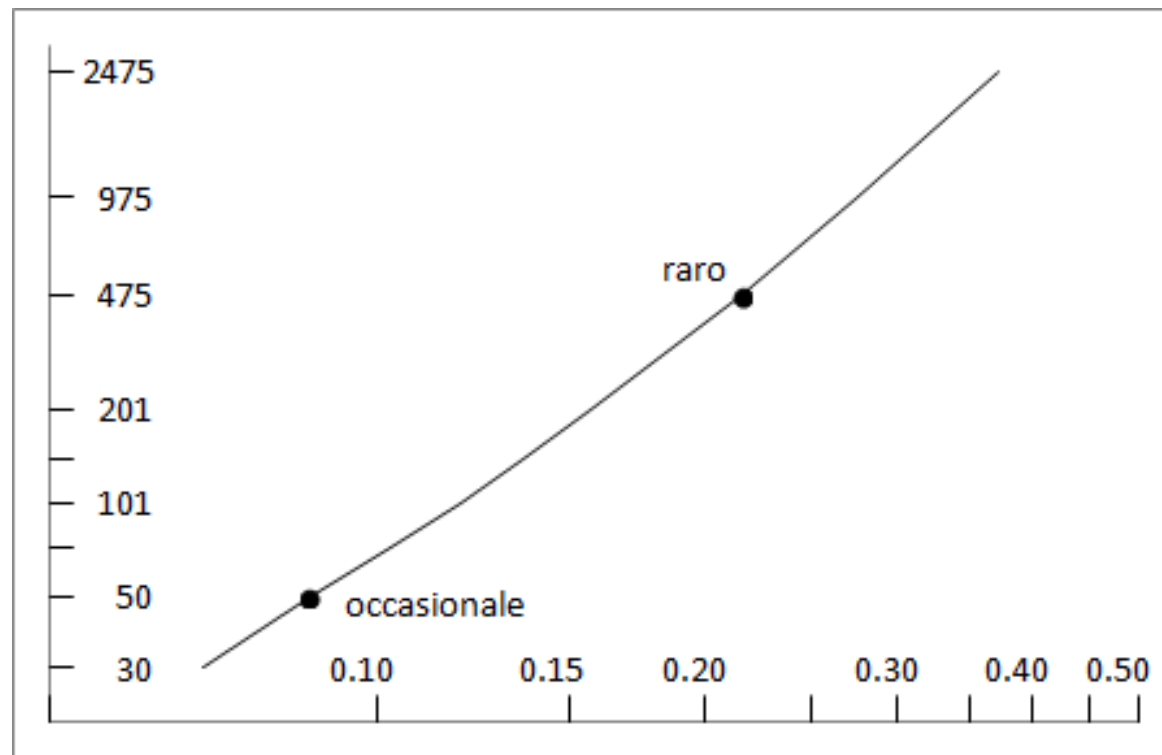


Curva di pericolosità esempi



Accelerazione e periodo di ritorno

- Gli stessi valori possono essere diagrammati riportando il periodo di ritorno in funzione dell'accelerazione, usando per entrambi una scala logaritmica

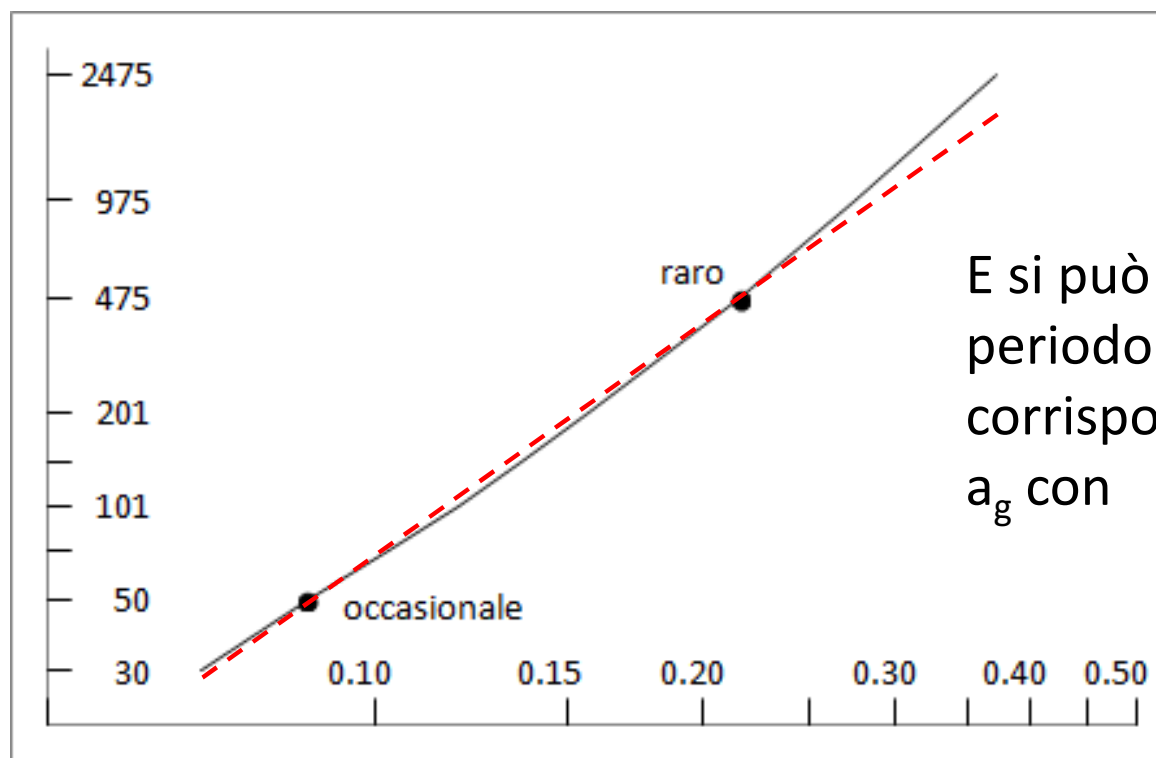


Accelerazione e periodo di ritorno

- L'andamento è quasi lineare. La pendenza η può essere calcolata come

$$\eta = \frac{\ln(T_{R,1} / T_{R,2})}{\ln(a_{g,1} / a_{g,2})}$$

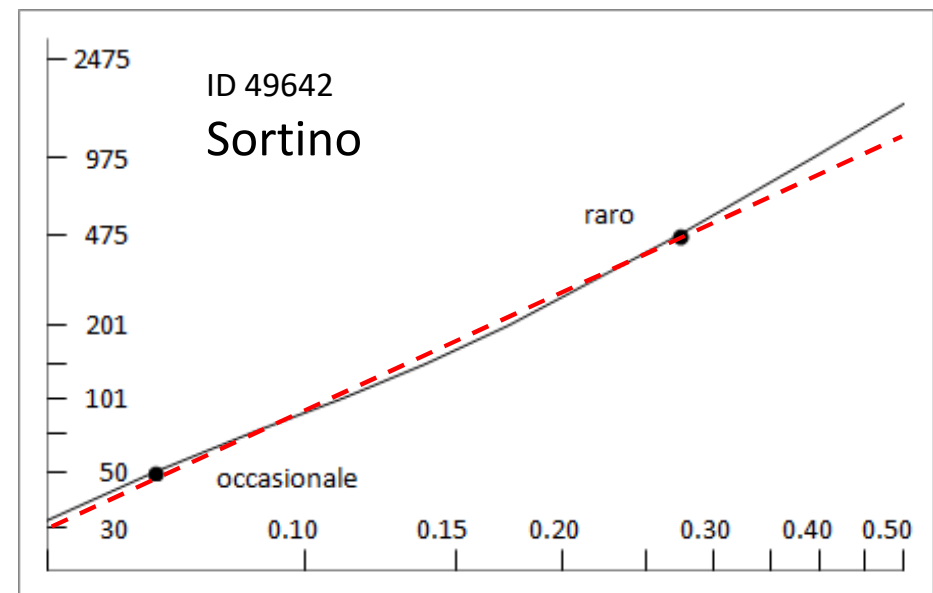
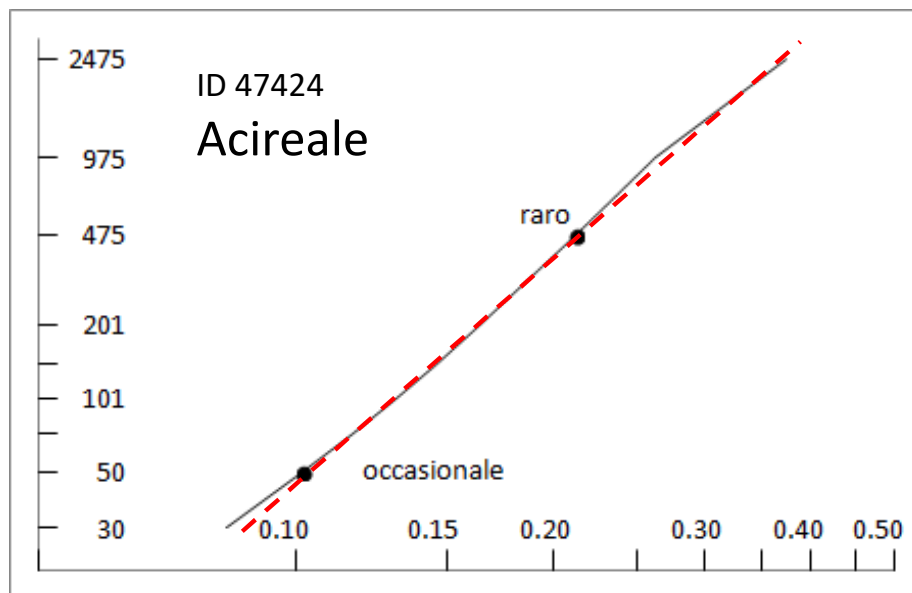
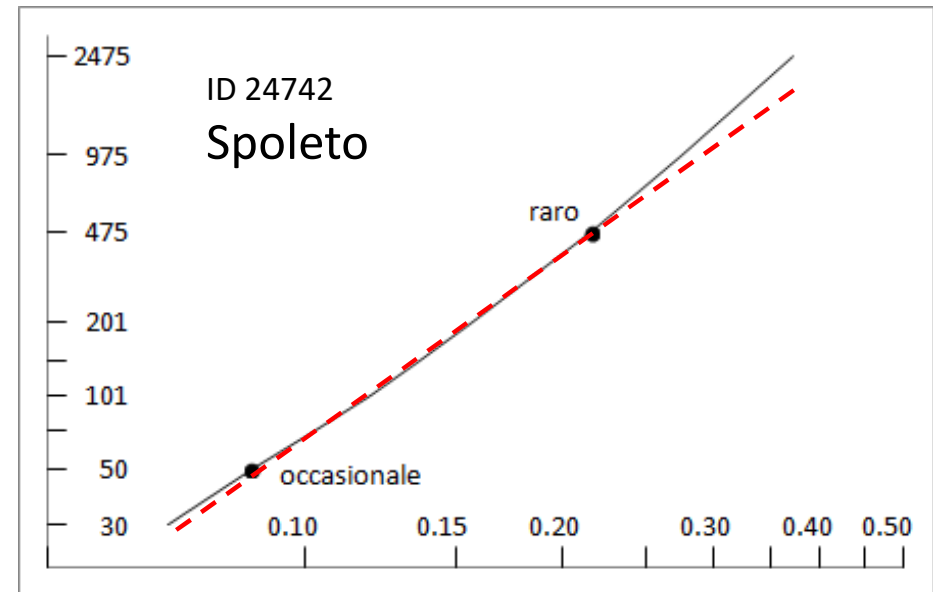
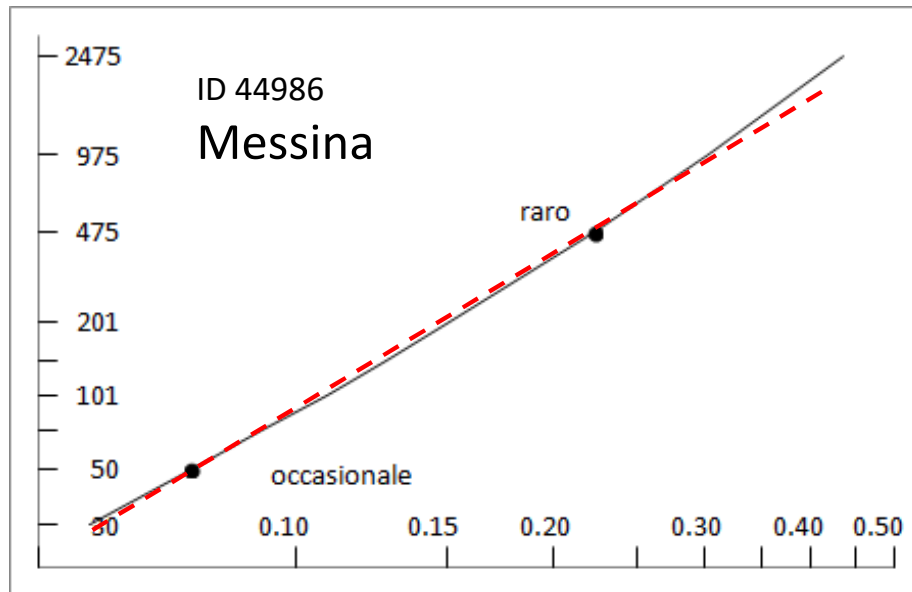
Avendo più punti si può calcolare la pendenza tratto per tratto, ottenendo esponenti leggermente diversi



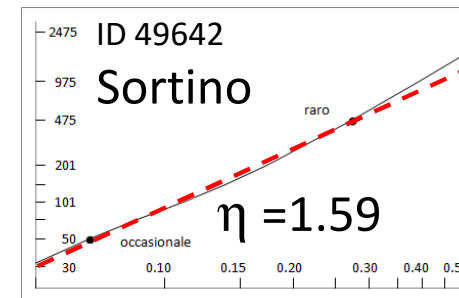
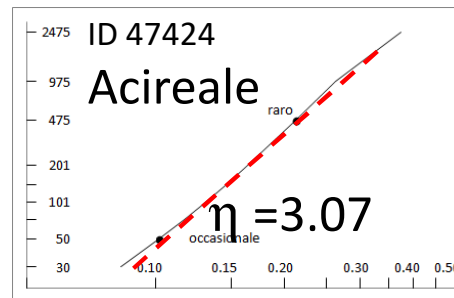
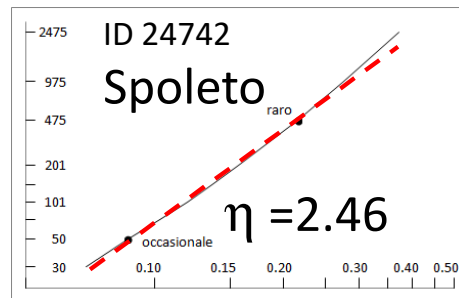
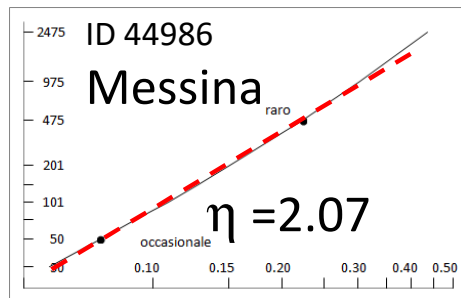
E si può calcolare il periodo di ritorno corrispondente ad un a_g con

$$T_R = T_{R,2} \left(\frac{a_g}{a_{g,2}} \right)^\eta$$

Accelerazione e periodo di ritorno esempi



Accelerazione e periodo di ritorno



- Una norma attuale (DM 28/2/17) suggerisce di usare sempre come esponente $\eta = 1/0.41 = 2.44$ oppure di differenziarlo in funzione di a_g
- Con questa differenziazione si avrebbe nei primi tre casi $\eta = 1/0.43 = 2.33$, nel quarto $\eta = 1/0.49 = 2.04$
- È evidente che l'unico modo corretto per scegliere l'esponente η consiste nel far riferimento ai dati del sito

Accelerazione

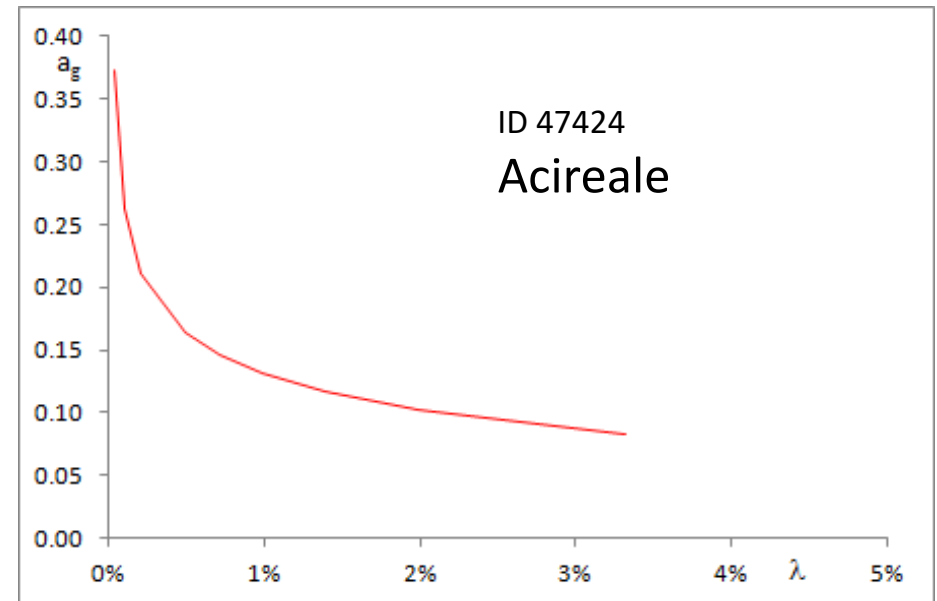
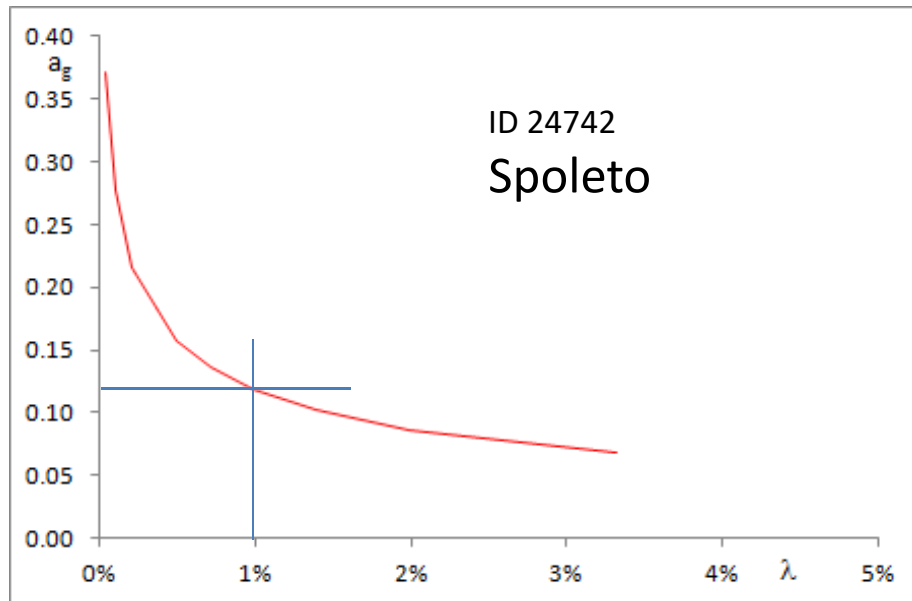
e possibilità media di occorrenza

- È possibile diagrammare l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza
- Questo consente di fare valutazioni sulla probabilità di avere determinati valori dell'accelerazione in assegnati intervalli di tempo

Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

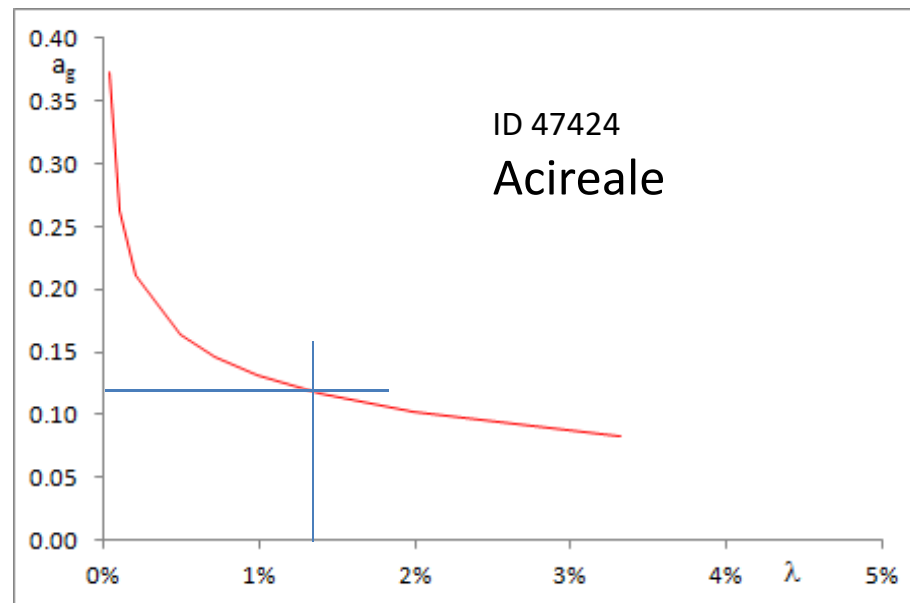
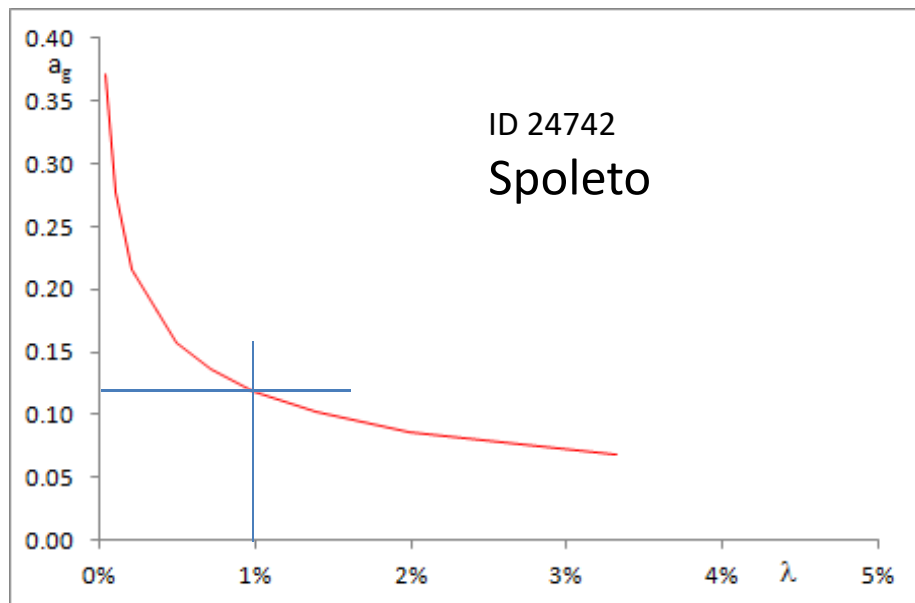
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - A Spoleto ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

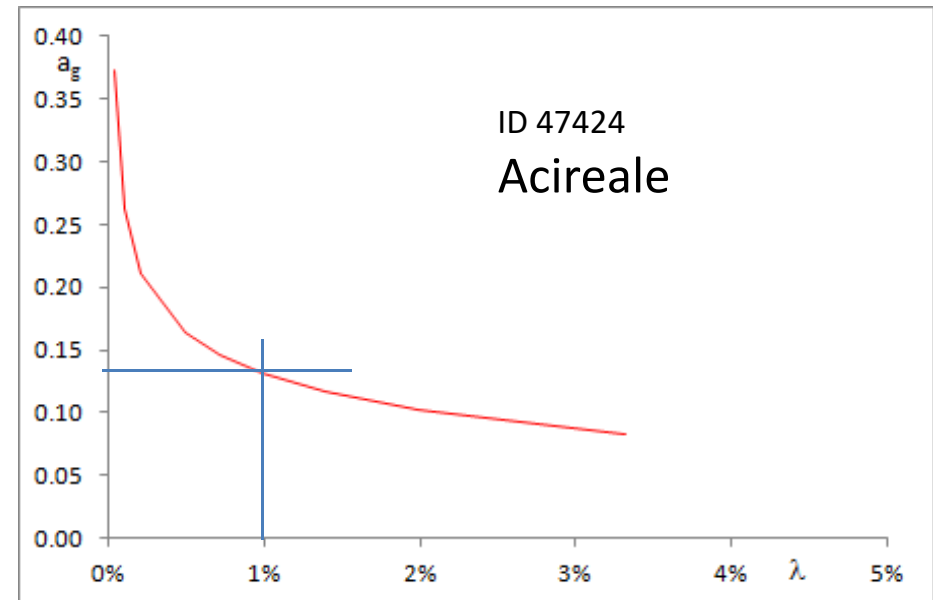
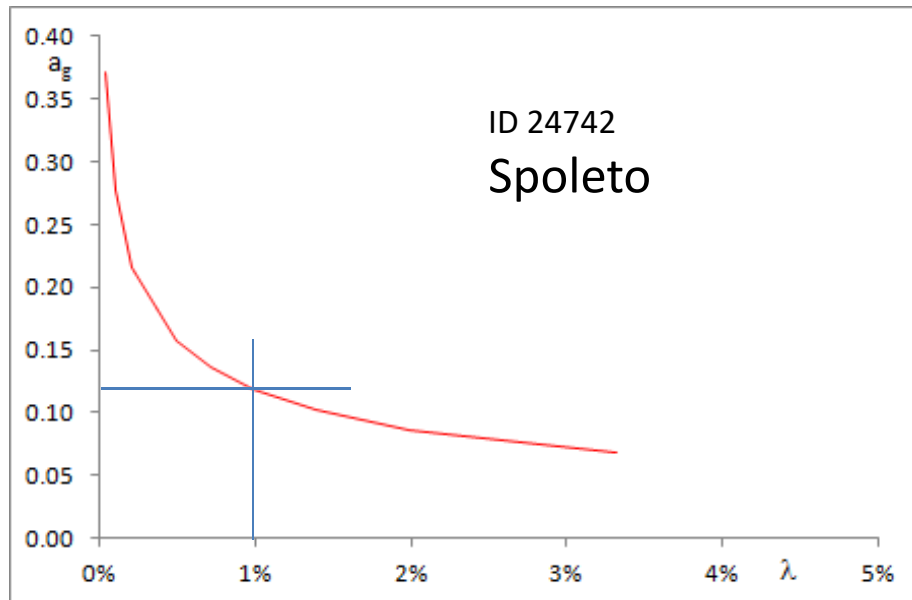
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - Ad Acireale ho 1.33 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

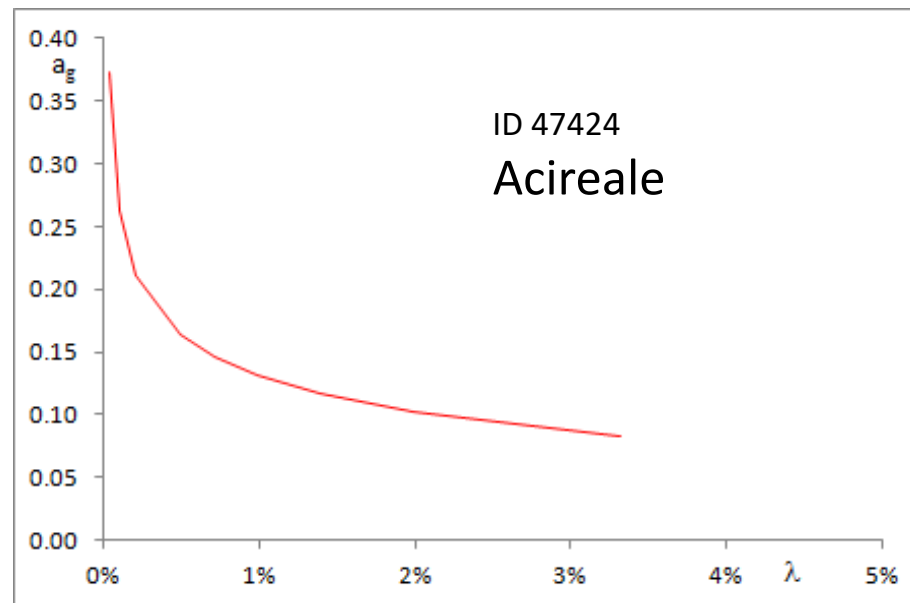
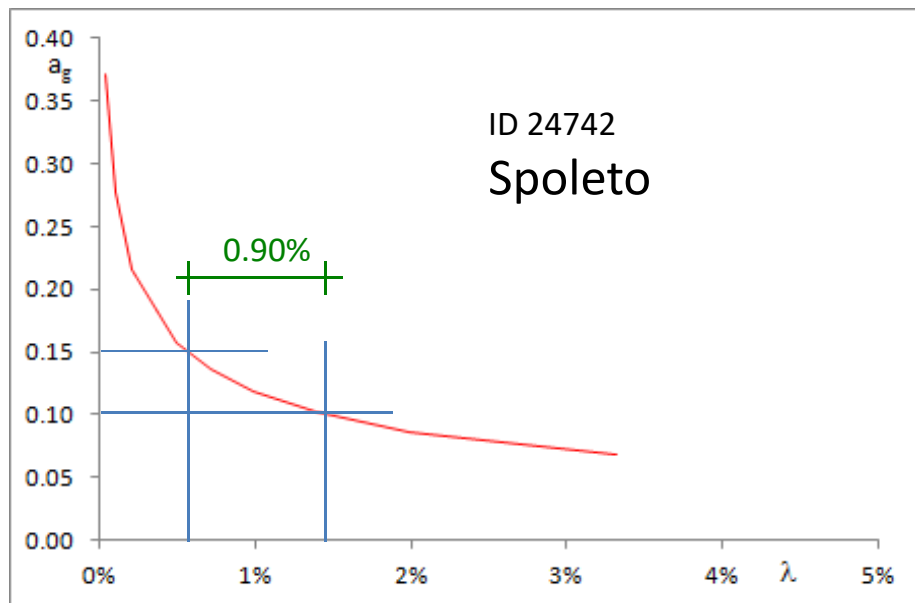
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - Ad Acireale ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.131 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

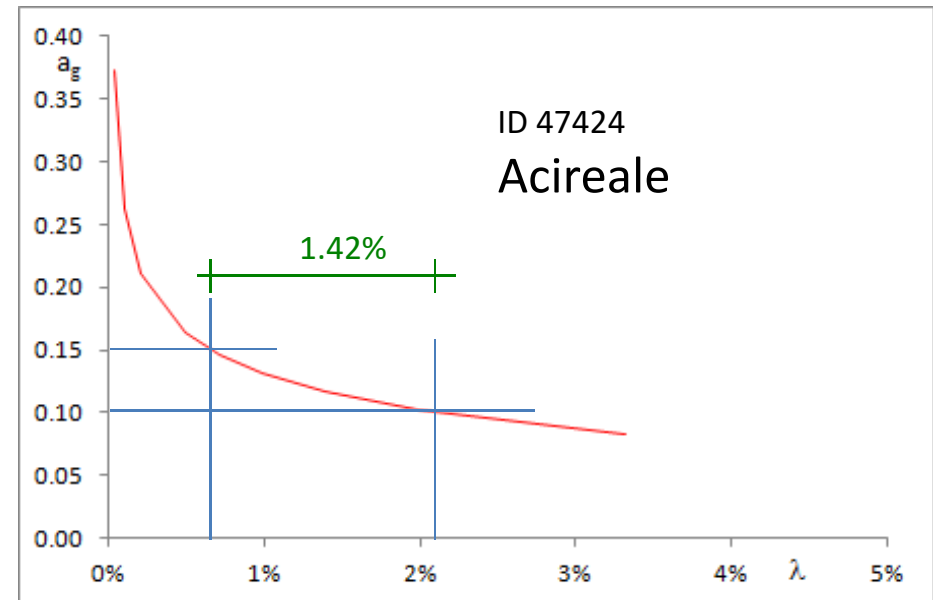
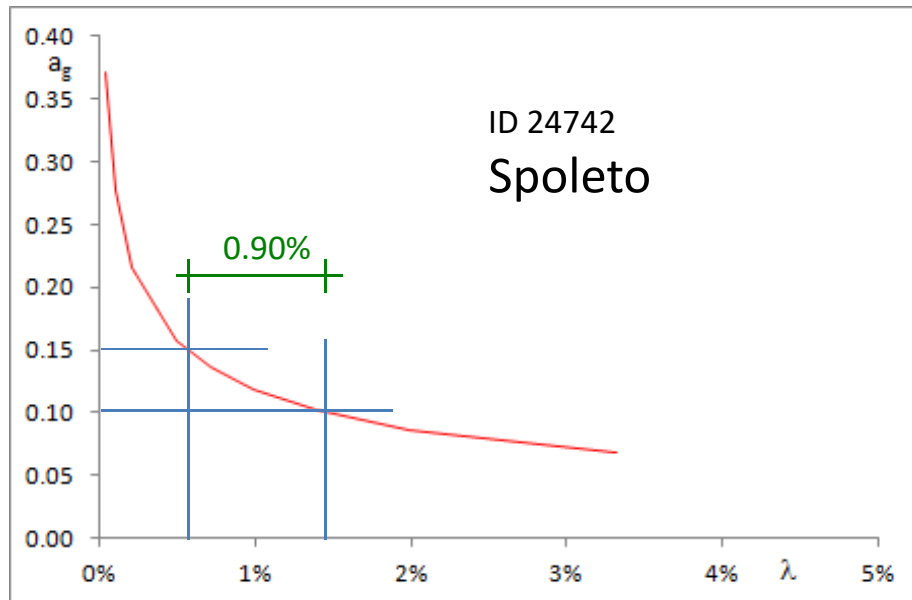
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - A Spoleto ho 0.90 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità tra 0.10 g e 0.15 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - Ad Acireale ho 1.42 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità tra 0.10 g e 0.15 g



Pericolosità sismica

considerazioni (1)

- La pericolosità sismica è un aspetto fondamentale per la valutazione del rischio sismico
- I dati relativi al bedrock sono forniti dalla normativa
 - Occorre però determinare i dati relativi alla effettiva stratigrafia del terreno su cui sorge la costruzione
 - Questo può essere fatto classificando il terreno in una delle categorie standard previste dalla normativa oppure mediante studi specifici sulla risposta locale dei terreni

Pericolosità sismica

considerazioni (2)

- La pericolosità sismica è un aspetto fondamentale per la valutazione del rischio sismico
- I dati relativi al bedrock sono forniti dalla normativa
- I dati di pericolosità sismica possono essere utilizzati:
 - Seguendo un approccio semiprobabilistico, cioè operando in maniera apparentemente deterministica, ma usando come riferimento valori corrispondenti ad opportuni frattili della distribuzione probabilistica
 - Seguendo un approccio probabilistico, cioè tenendo espressamente conto nel calcolo della possibile distribuzione probabilistica delle accelerazioni sismiche