

Corsi di aggiornamento
Progettazione strutturale
e Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni

9. Vulnerabilità e rischio sismico di edifici esistenti in c.a.

01 – Rischio sismico

Villa Redenta, Spoleto, 22-24 novembre 2018
Aurelio Gheresi

Rischio sismico

Un sistema (struttura, infrastruttura ...) ubicato in una zona sismica è soggetto alla possibilità di subire danni per effetto di un terremoto e quindi che questi danni inducano perdite alla collettività in termini economici, culturali e di vite umane

Rischio sismico:

relazione tra il verificarsi di un evento sismico e le perdite socio-economiche del sistema funzionale in esame

Rischio sismico

Rischio sismico:

relazione tra il verificarsi di un evento sismico e le perdite socio-economiche del sistema funzionale in esame

Il rischio sismico è determinato dalla contemporanea presenza di tre contributi:

1. Pericolosità sismica

È una misura della potenzialità distruttive del terremoto atteso in una data area

Rischio sismico

Rischio sismico:

relazione tra il verificarsi di un evento sismico e le perdite socio-economiche del sistema funzionale in esame

Il rischio sismico è determinato dalla contemporanea presenza di tre contributi:

1. Pericolosità sismica

2. Vulnerabilità sismica

È una misura della propensione al danneggiamento strutturale, a prescindere dalla sismicità dell'area

Rischio sismico

Rischio sismico:

relazione tra il verificarsi di un evento sismico e le perdite socio-economiche del sistema funzionale in esame

Il rischio sismico è determinato dalla contemporanea presenza di tre contributi:

1. Pericolosità sismica
2. Vulnerabilità sismica

3. Esposizione

È una misura della perdita (economica, di vite umane, ecc.) associata ad un livello di danno

1. Pericolosità sismica

Pericolosità sismica

quali terremoti ci aspettiamo in un determinato sito?

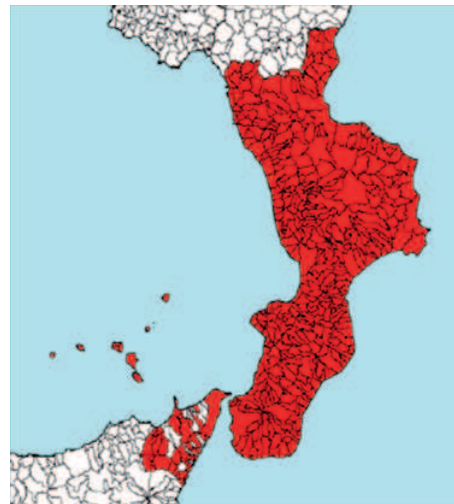
- Le indicazioni sono fornite dalla normativa
 - Solo modifiche modeste relative alla classificazione dei suoli
- Anche se i concetti non sono nuovi (a parte qualcosa) è importanti richiamarli per capire
 - In che modo garantire la sicurezza di un edificio rispetto alle azioni sismiche
 - In che modo limitare i danni prodotti da un terremoto
 - Come definire la classe di rischio sismico di un edificio (in particolare, di un edificio già realizzato)

Terremoti previsti per un determinato sito

- Nel passato, a partire dal terremoto di Messina (1908) e per tutto il XX secolo:
 - Classificazione della pericolosità sismica di un sito fatta dopo ogni terremoto importante



Terremoto di Messina 1908



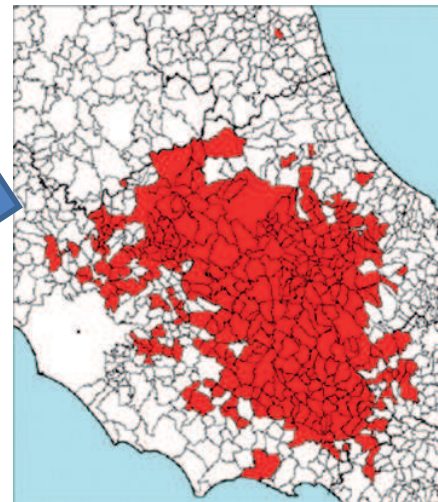
Regio Decreto n. 193/1909
Regio Decreto n. 542/1909

Terremoti previsti per un determinato sito

- Nel passato, a partire dal terremoto di Messina (1908) e per tutto il XX secolo:
 - Classificazione della pericolosità sismica di un sito fatta dopo ogni terremoto importante



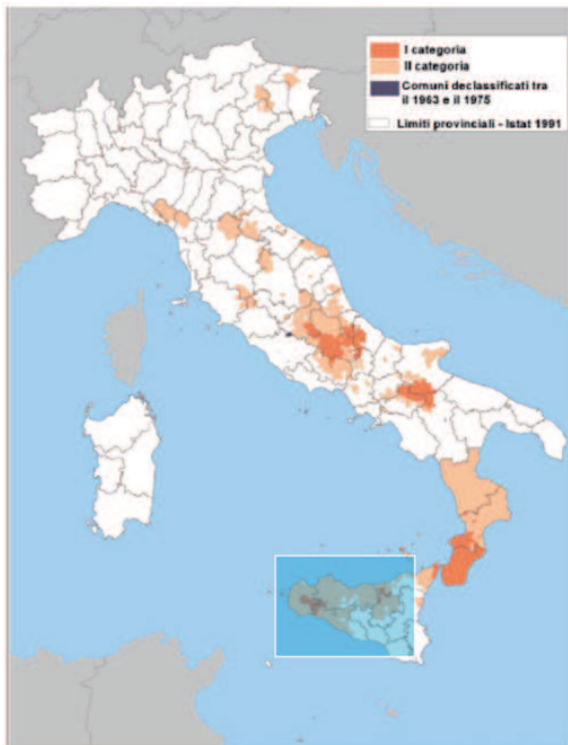
Terremoto di Avezzano
1915



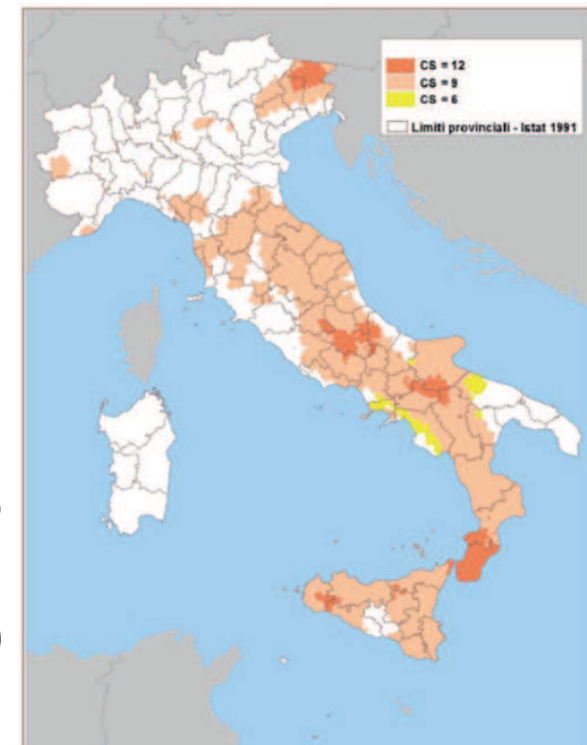
Regio Decreto n. 573/1915

Terremoti previsti per un determinato sito

- Nel passato, a partire dal terremoto di Messina (1908) e per tutto il XX secolo:
 - Classificazione della pericolosità sismica di un sito fatta dopo ogni terremoto importante



Valle del Belice
1968



Friuli
1976
Irpinia-Basilicata
1980

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

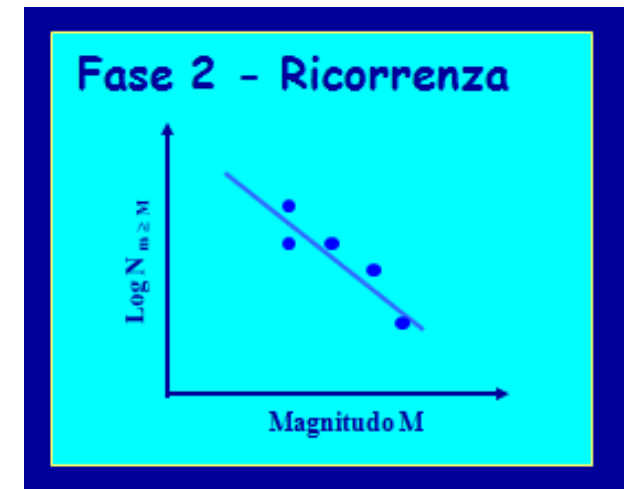


Individuazione delle faglie
nelle zone circostanti il
sito

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



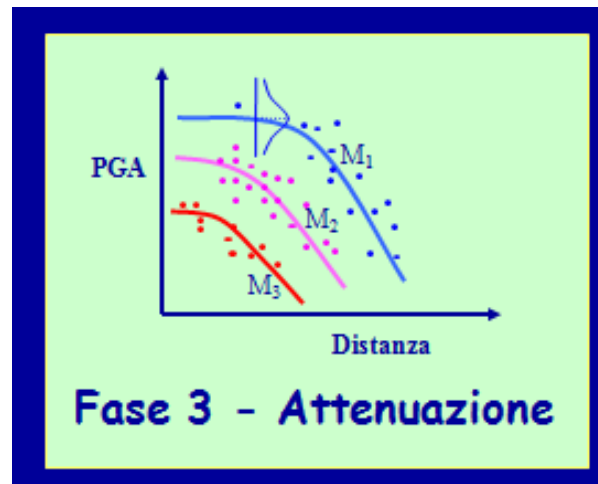
Individuazione degli
eventi sismici che tali
faglie possono provocare
e della loro ricorrenza

Terremoti previsti per un determinato sito

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

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

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

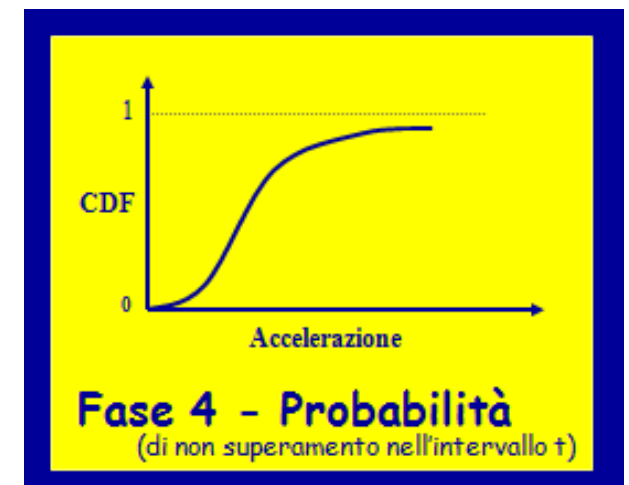


Terremoti previsti per un determinato sito

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

Valutazione della
probabilità di avere
assegnate accelerazioni
nel sito in esame

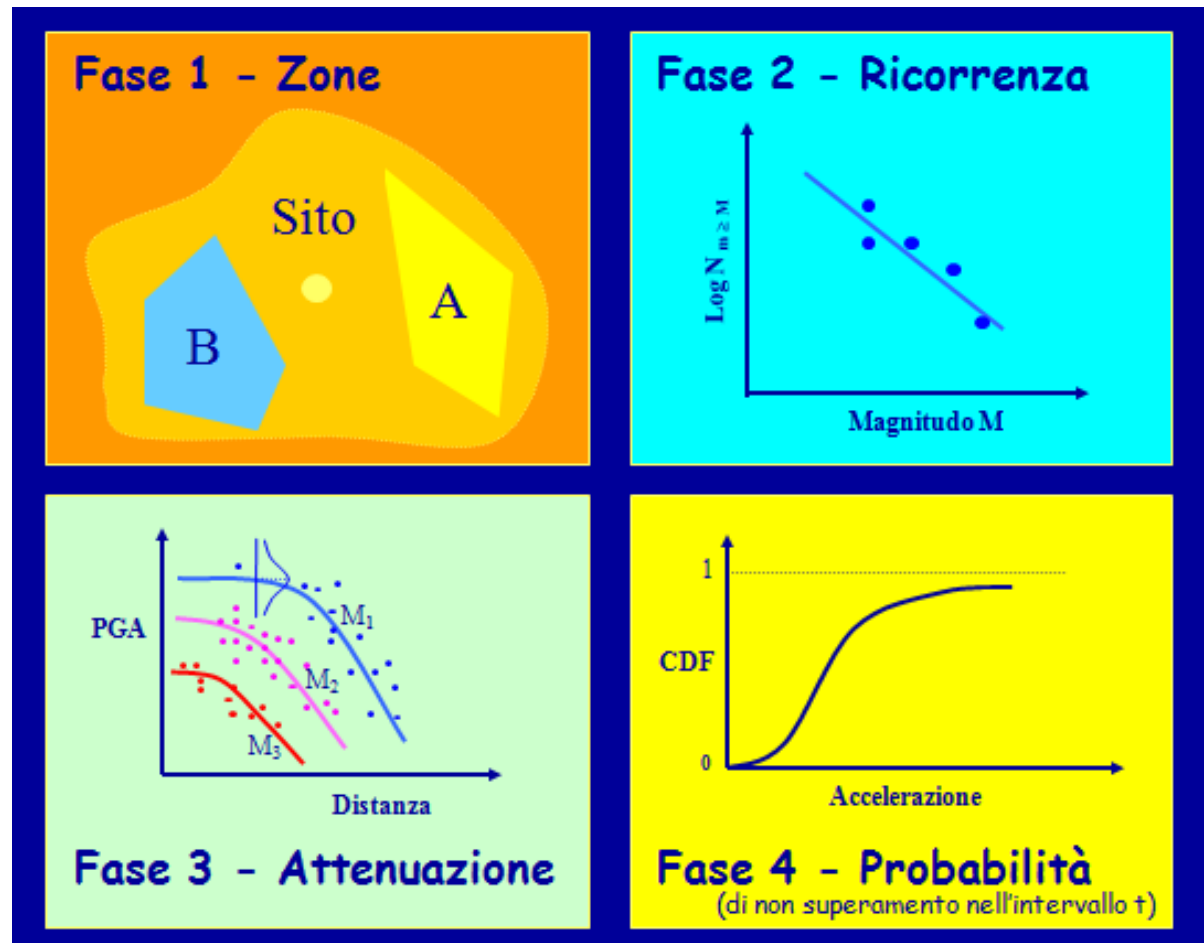
Partendo dallo studio geologico,
dall'individuazione delle faglie,
dalla ricorrenza degli eventi
sismici e dalla attenuazione delle
onde sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito



Terremoti previsti per un determinato sito

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

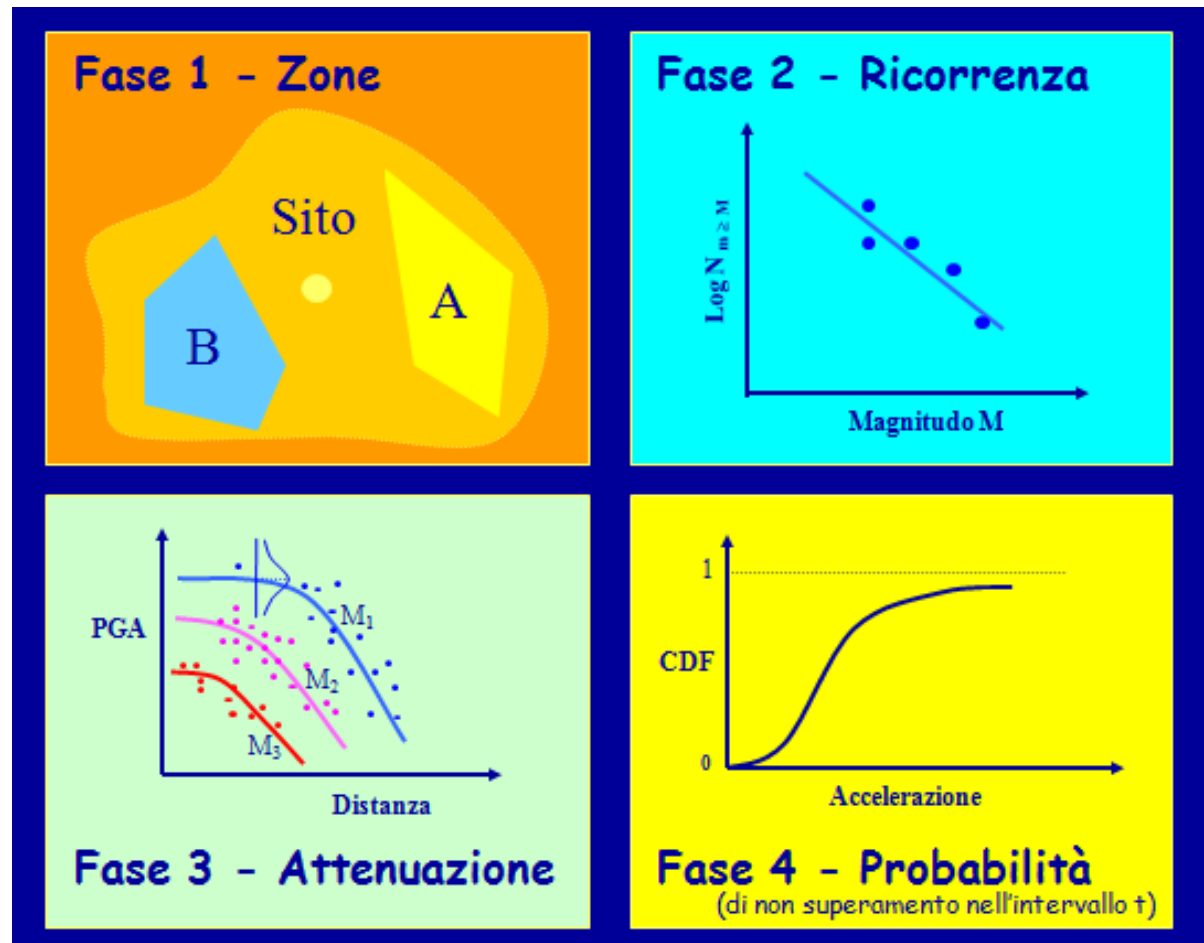
Partendo dallo studio geologico,
dall'individuazione delle faglie,
dalla ricorrenza degli eventi
sismici e dalla attenuazione delle
onde sismiche con la distanza si
valuta la probabilità di avere
assegnate accelerazioni in
ciascun sito



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?

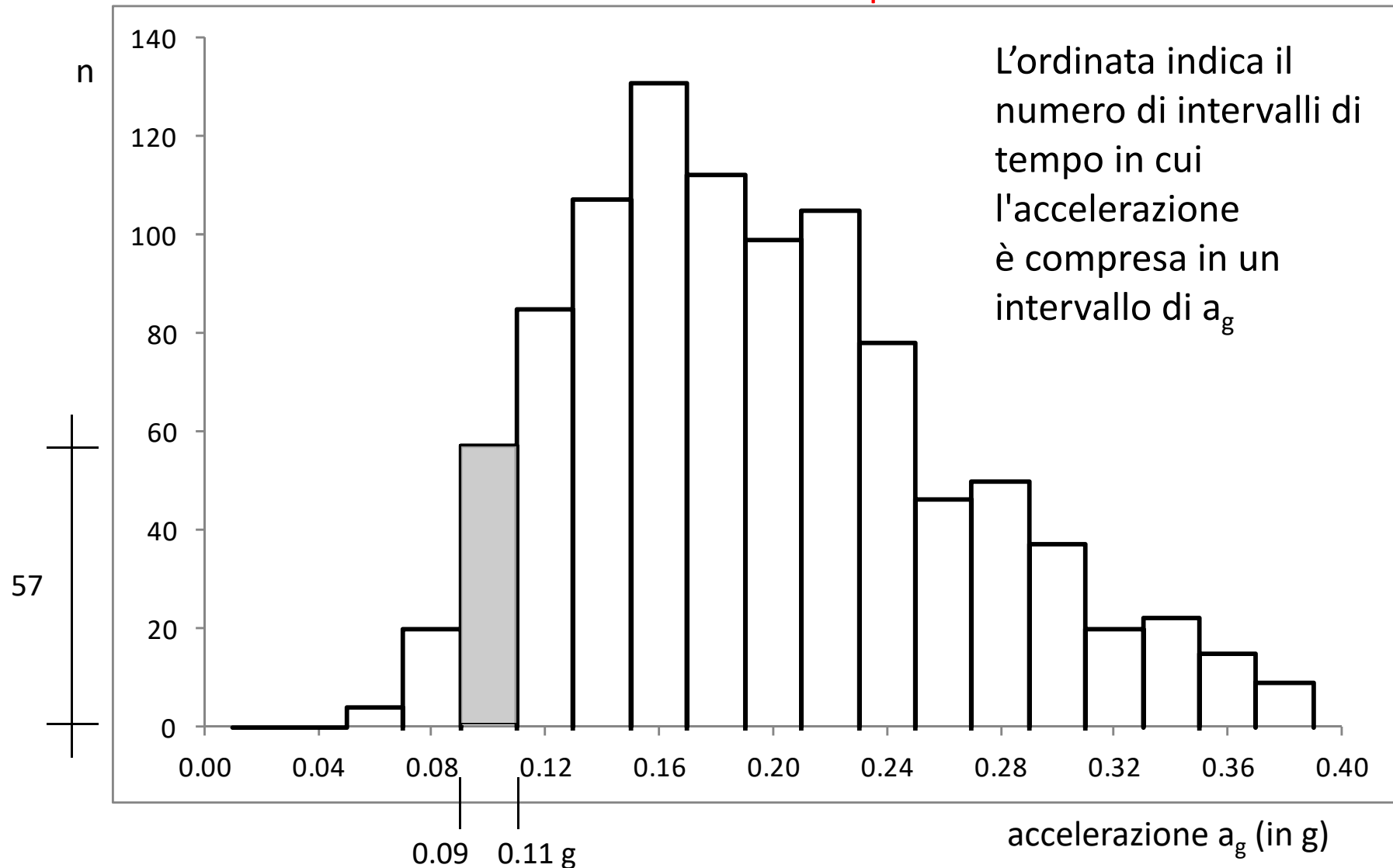
- Per rispondere a questa domanda, occorrerebbe avere registrazioni di accelerogrammi relative a periodi lunghissimi (migliaia di anni)
- In mancanza di questo, gli studi citati consentono prevedere (simulare) questi valori

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

- Si considera un intervallo di tempo
 - Ad esempio 100 anni
- Si dividono i dati secondo intervalli di tempo di questa ampiezza
- Si valuta quale è l'accelerazione massima registrata in ciascun intervallo
- Si conta in quanto intervalli di tempo si è registrato uno specifico valore dell'accelerazione
- Si riportano i valori in un istogramma (**distribuzione di frequenza**)
 - ad esempio, avendo valori per 100000 anni, si vede che in 57 intervalli si ha un'accelerazione tra 0.09 g e 0.11 g

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

Distribuzione di frequenza

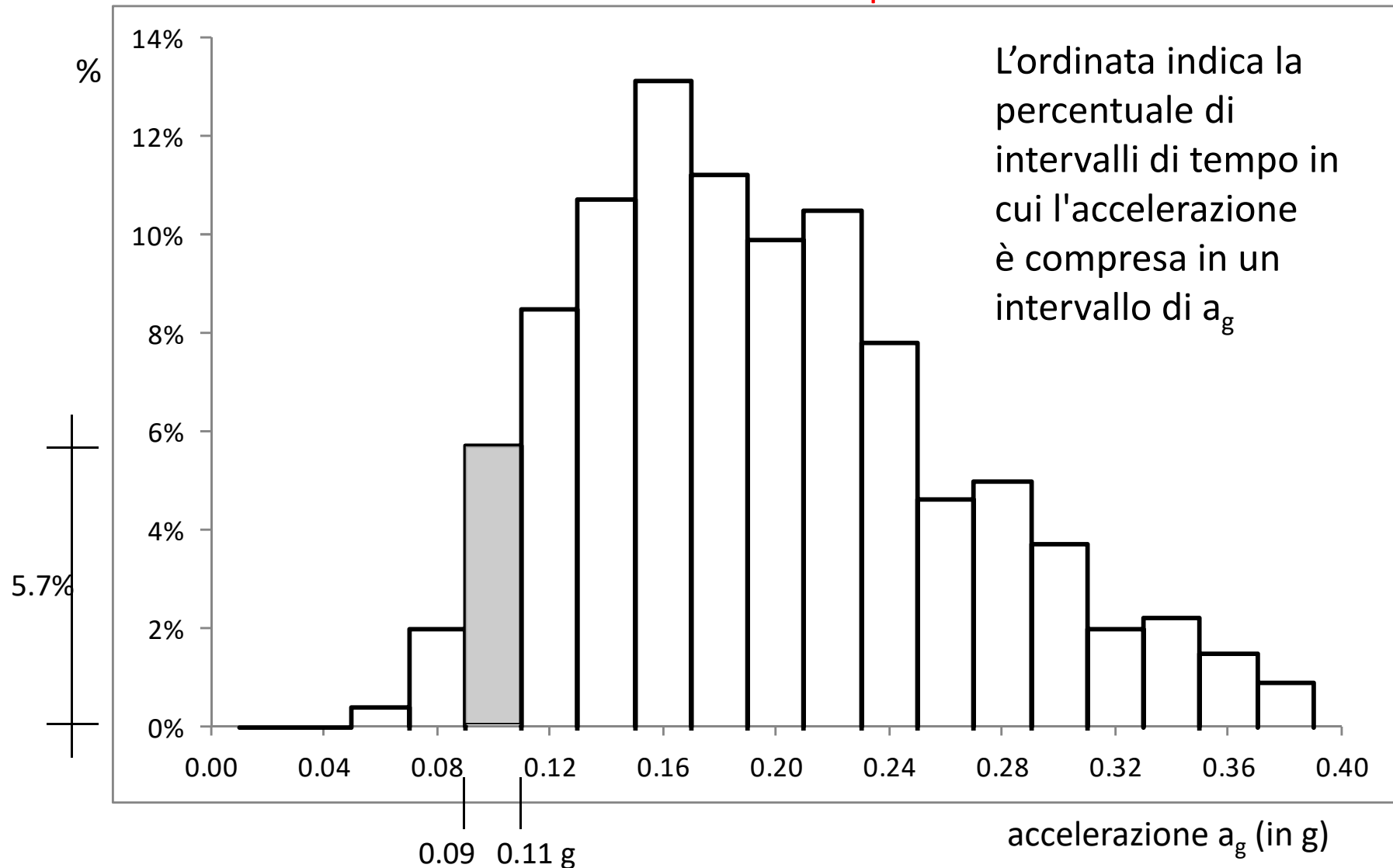


Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Se si divide ciascun valore per il numero totale di intervalli considerati si possono riportare gli stessi valori come percentuale
 - ad esempio, avendo 1000 intervalli di 100 anni, si vede che si ha un'accelerazione tra 0.09 g e 0.11 g nel 5.7% degli intervalli

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

Distribuzione di frequenza

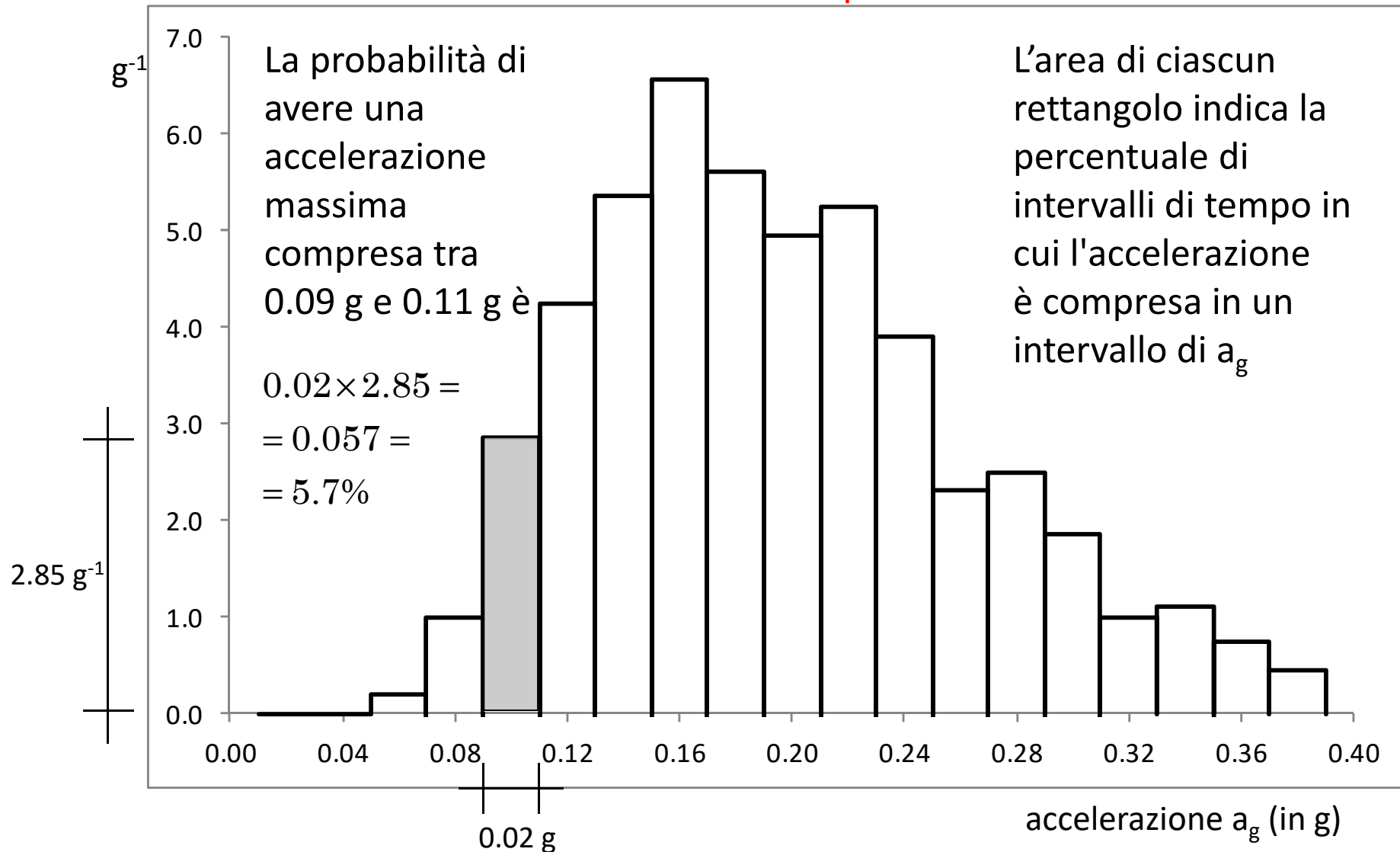


Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

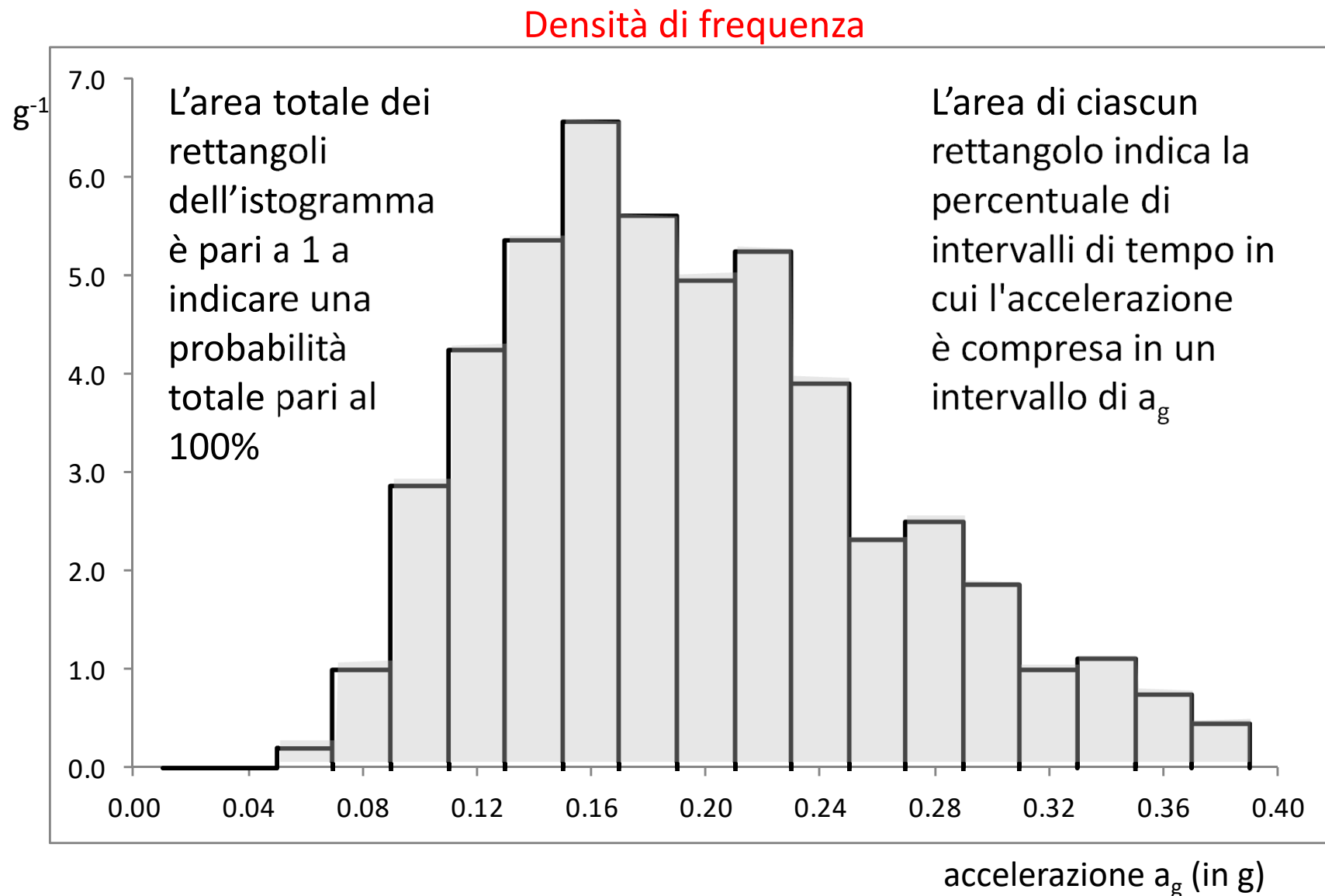
- Se si divide ulteriormente per l'ampiezza dell'intervallo di a_g , si ottiene la **densità di frequenza**:
l'area del rettangolo rappresenta la probabilità di avere quel valore di accelerazione
 - ad esempio, per l'intervallo di accelerazione tra 0.09 g e 0.11 g
l'ordinata è in questo caso $0.057 / 0.02 \text{ g} = 2.85 \text{ g}^{-1}$

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

Densità di frequenza



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



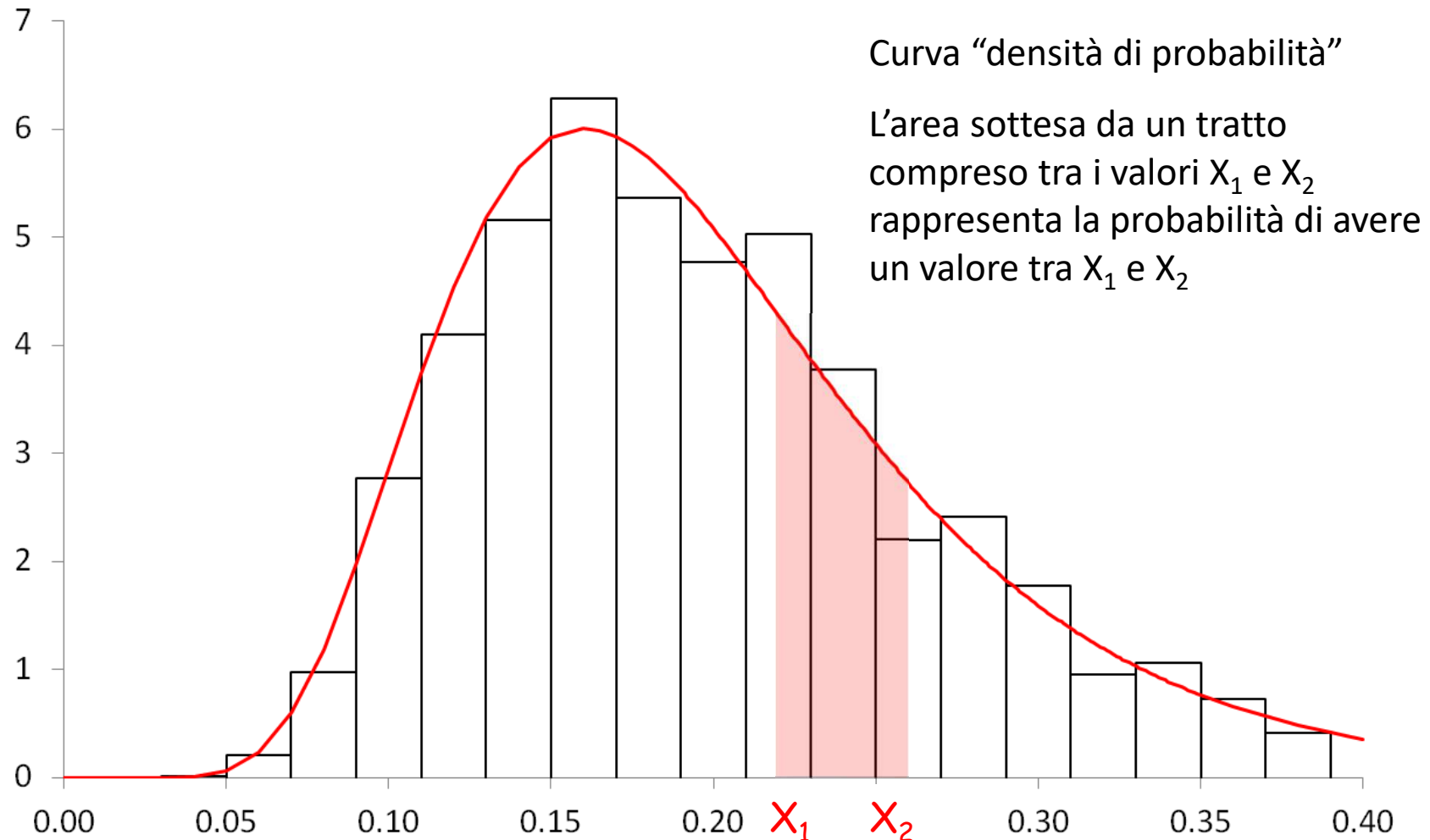
Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- 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
- Per queste applicazioni si usa una distribuzione lognormale

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

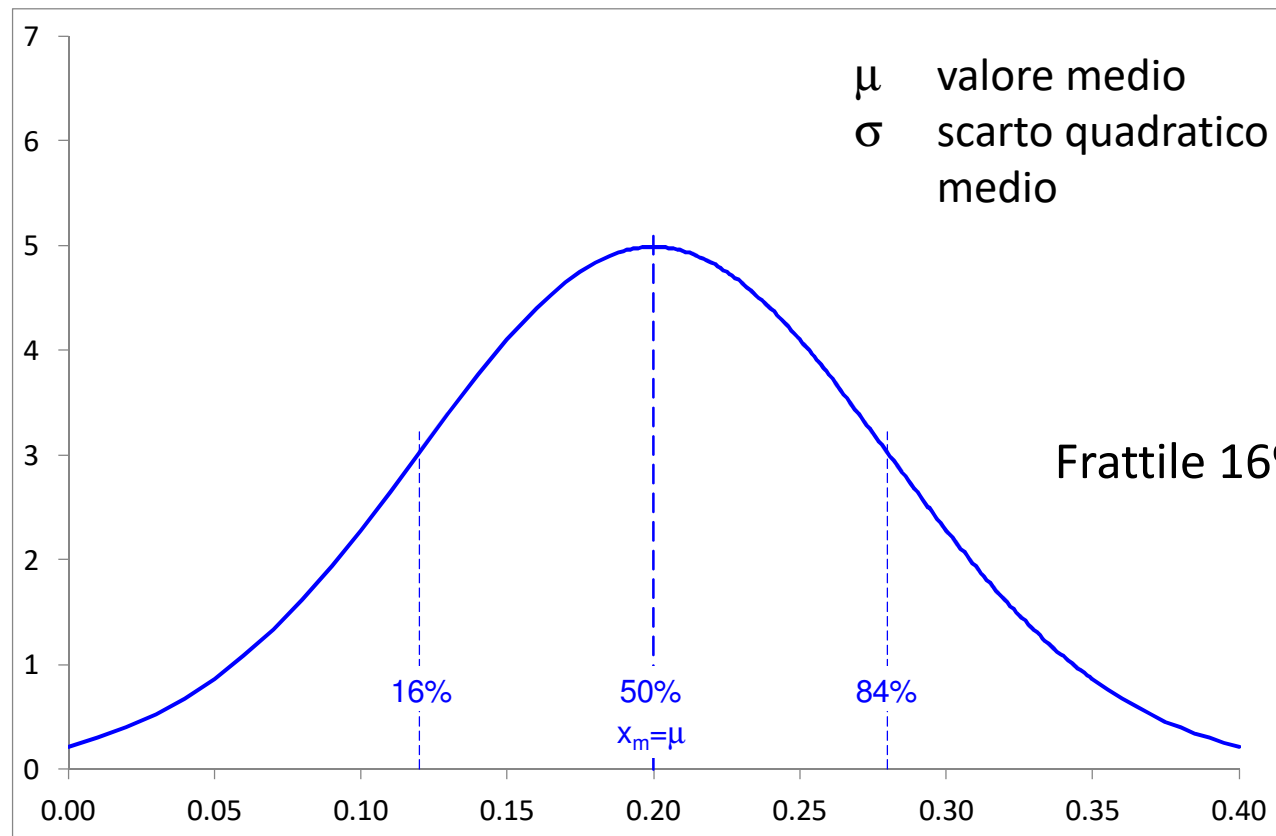
Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

Densità di frequenza e densità di probabilità



Distribuzione normale o Gaussiana

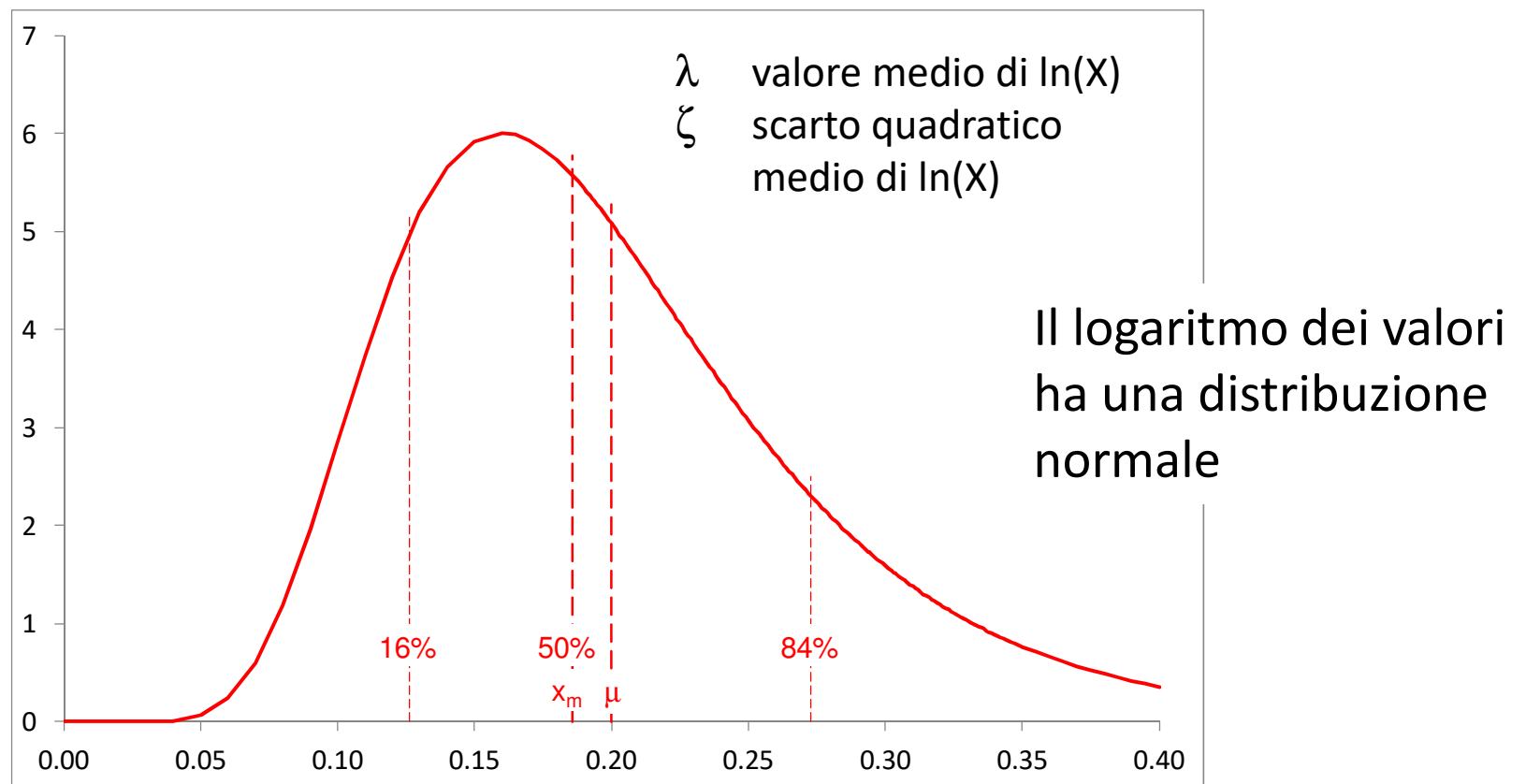
- Definita con l'equazione
$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$



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

Distribuzione lognormale

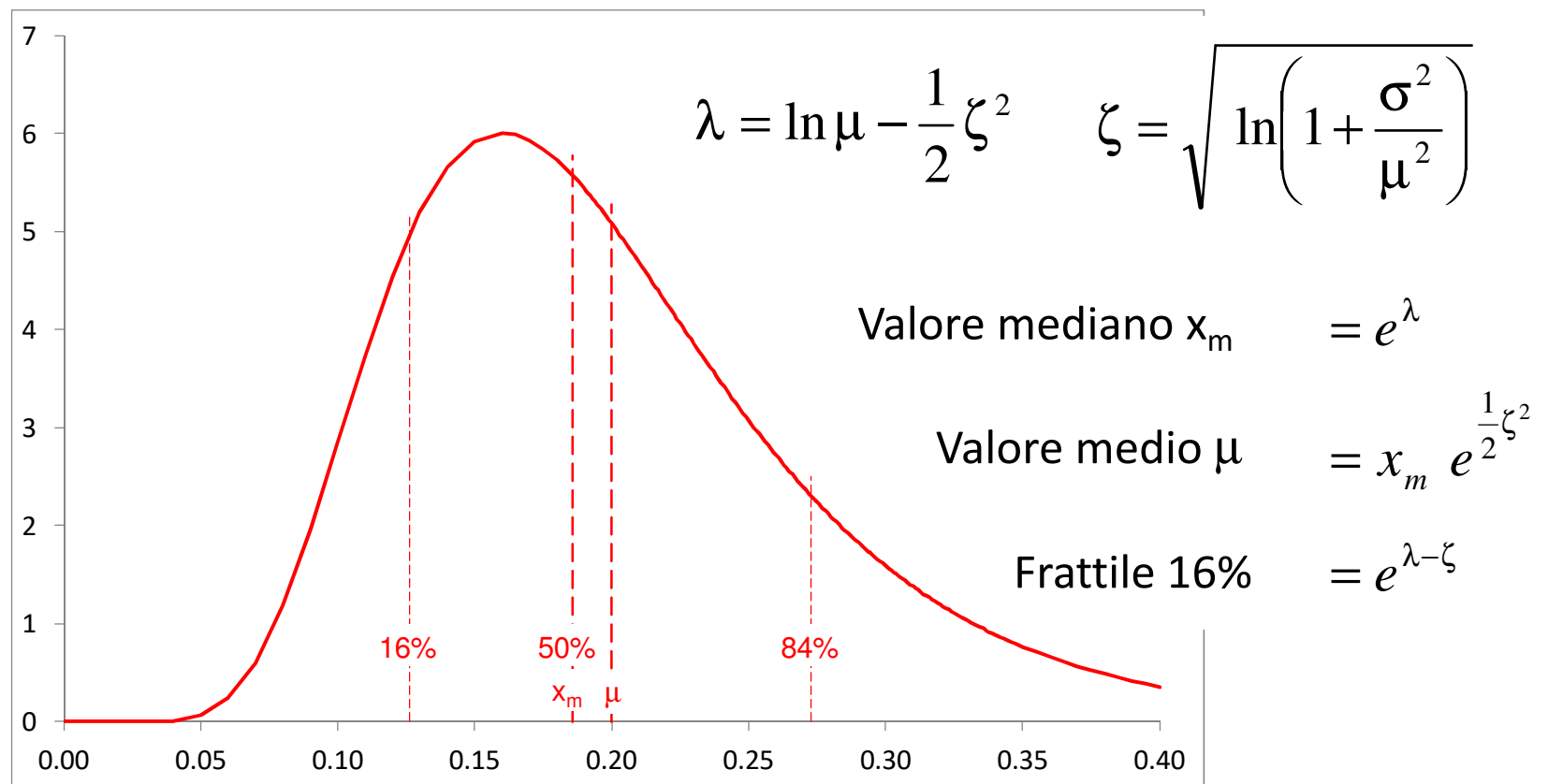
- Definita con l'equazione
$$f_X(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2}$$



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 in un file Excel 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

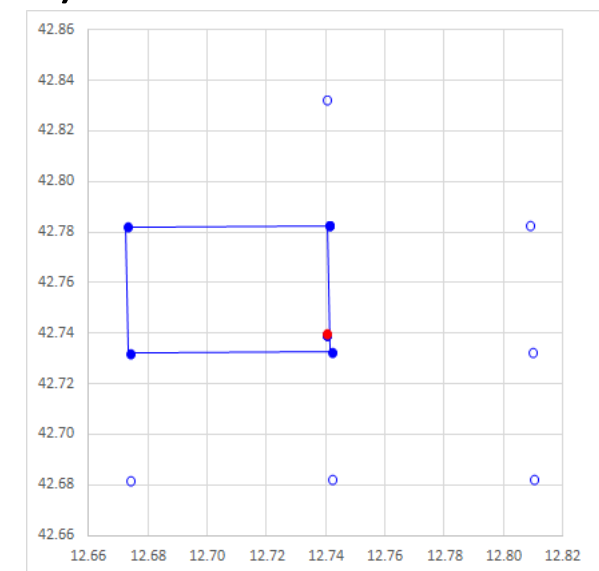
Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- 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

$T = 475$ 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%)
 - 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%)
 - 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 (arrotondato)
81%	30
63%	50
50%	72
39%	101
30%	140
22%	201
10%	475
5%	975
2%	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

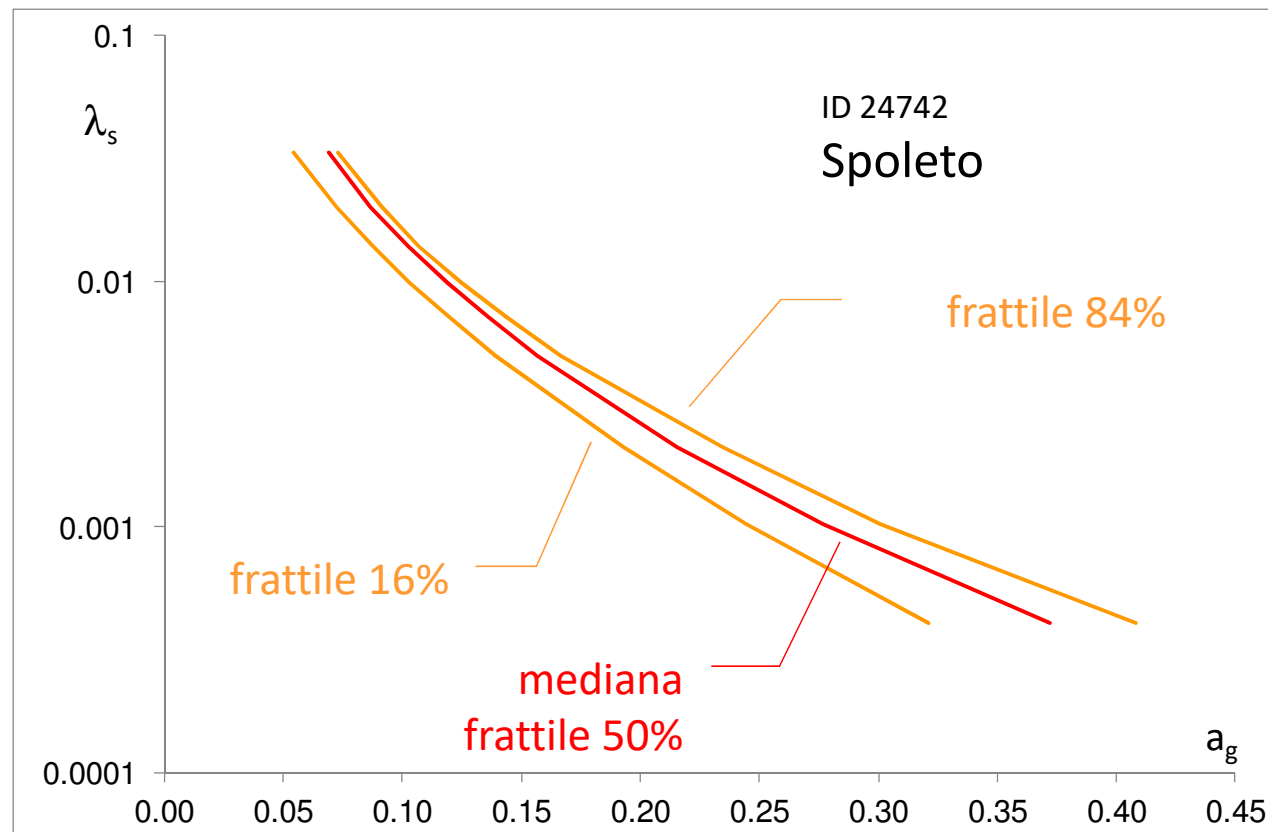
Nota: i valori sono riferiti al bedrock, cioè allo strato roccioso affiorante. Se al di sopra dello strato roccioso vi sono strati di terreno deformabile (sabbia, argilla) occorre valutare l'effetto della stratigrafia del sito

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

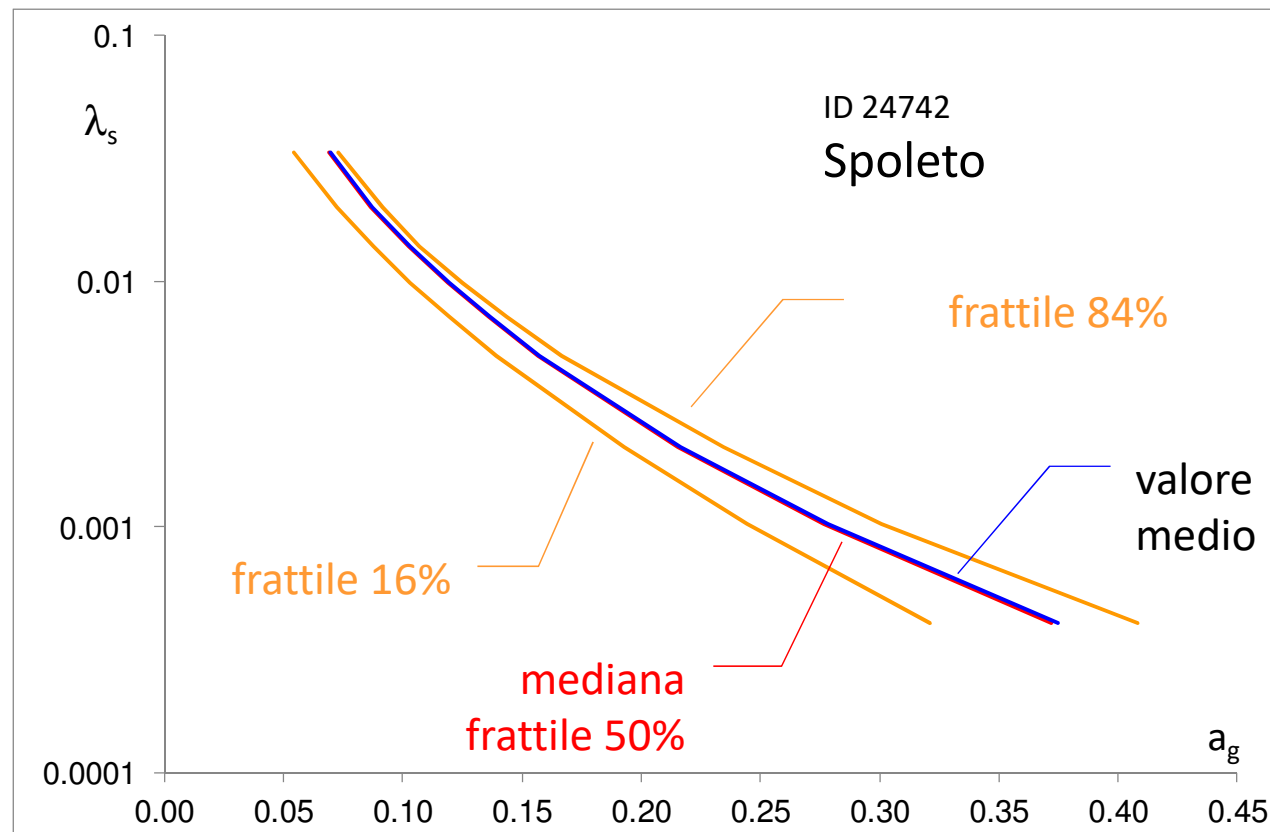
Curva di pericolosità

- 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%)

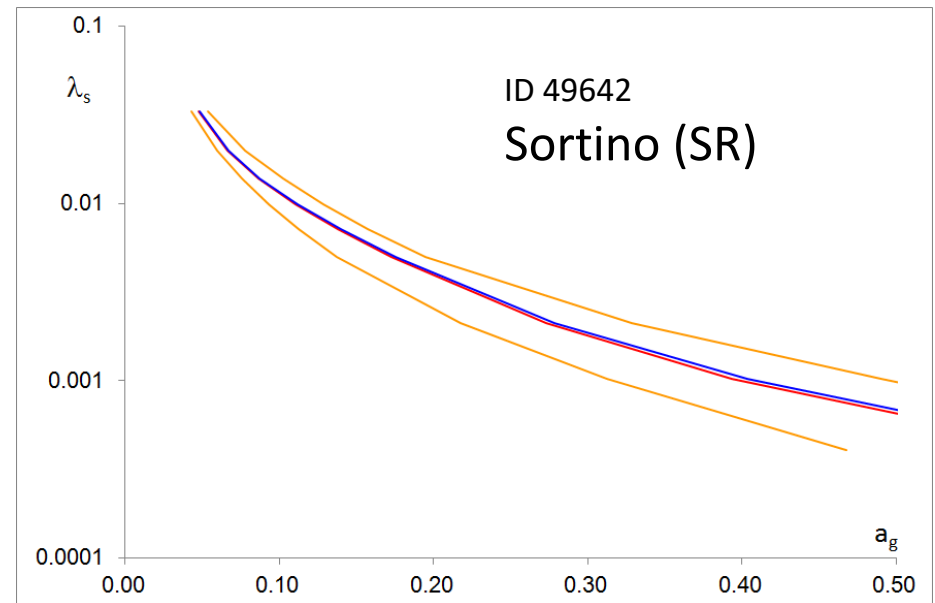
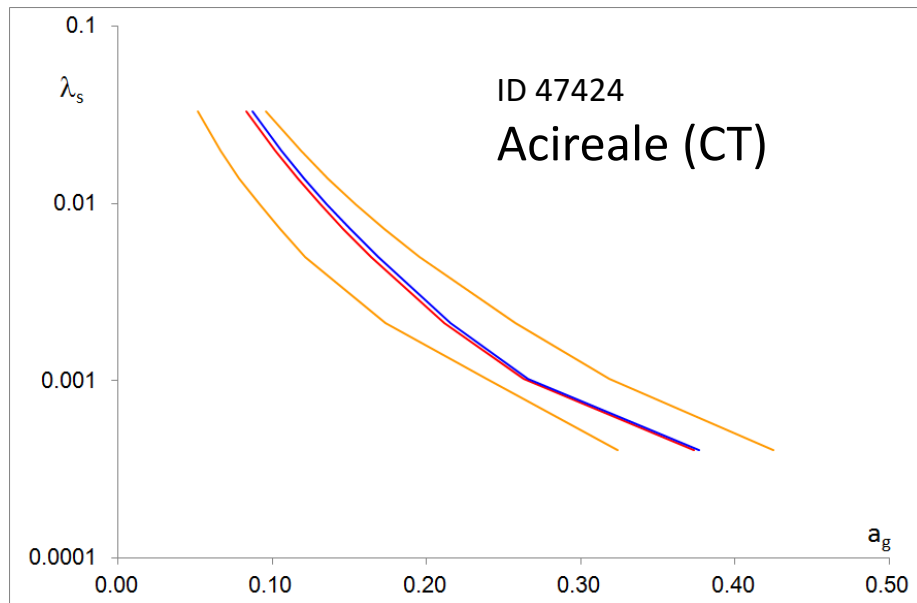
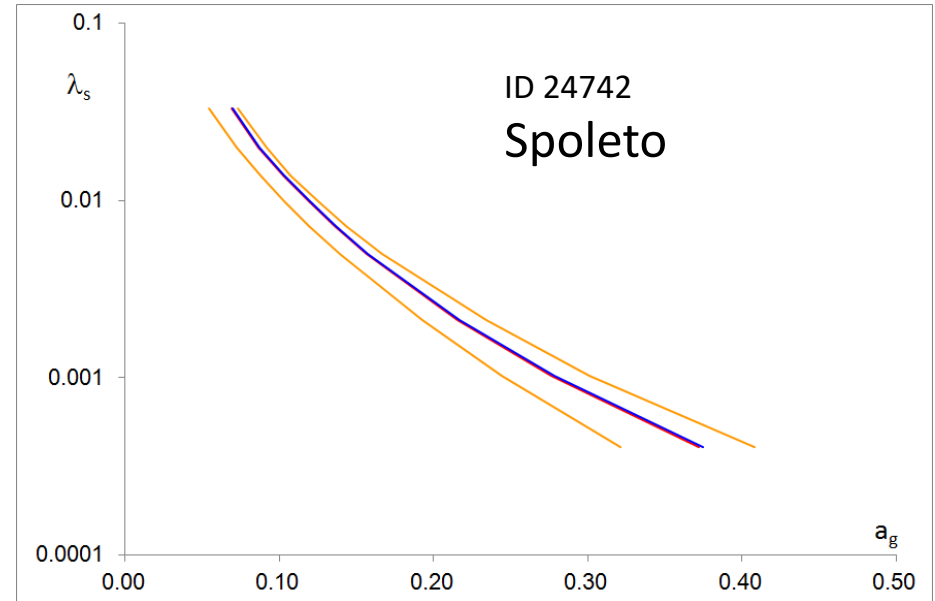
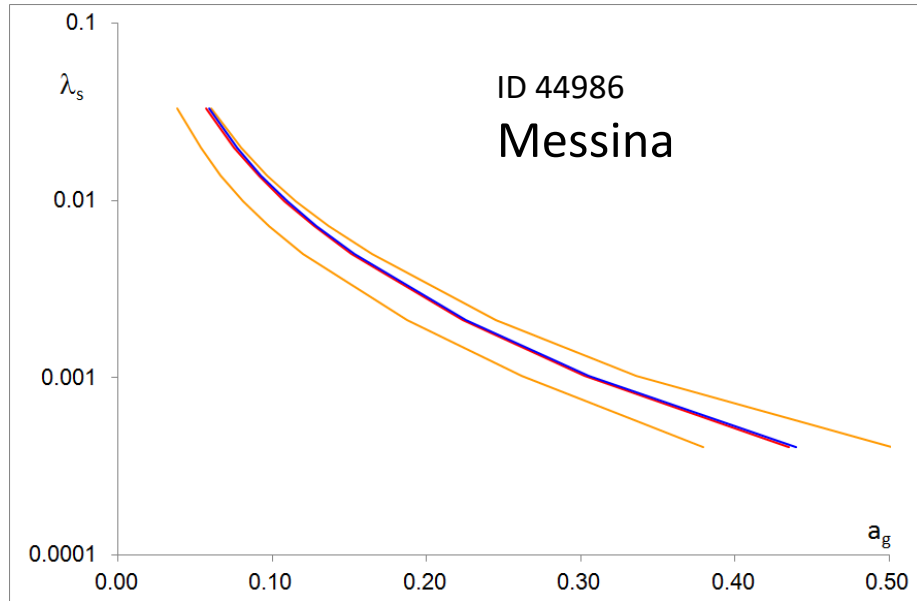


Curva di pericolosità

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

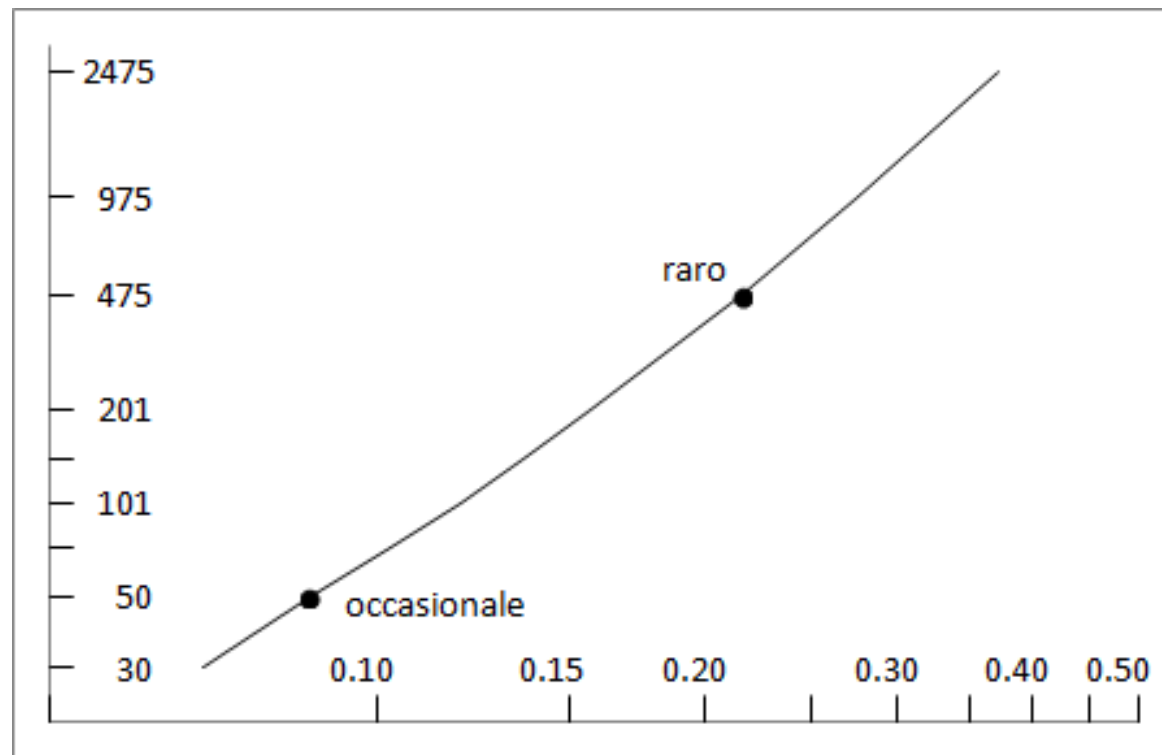


Curva di pericolosità esempi



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

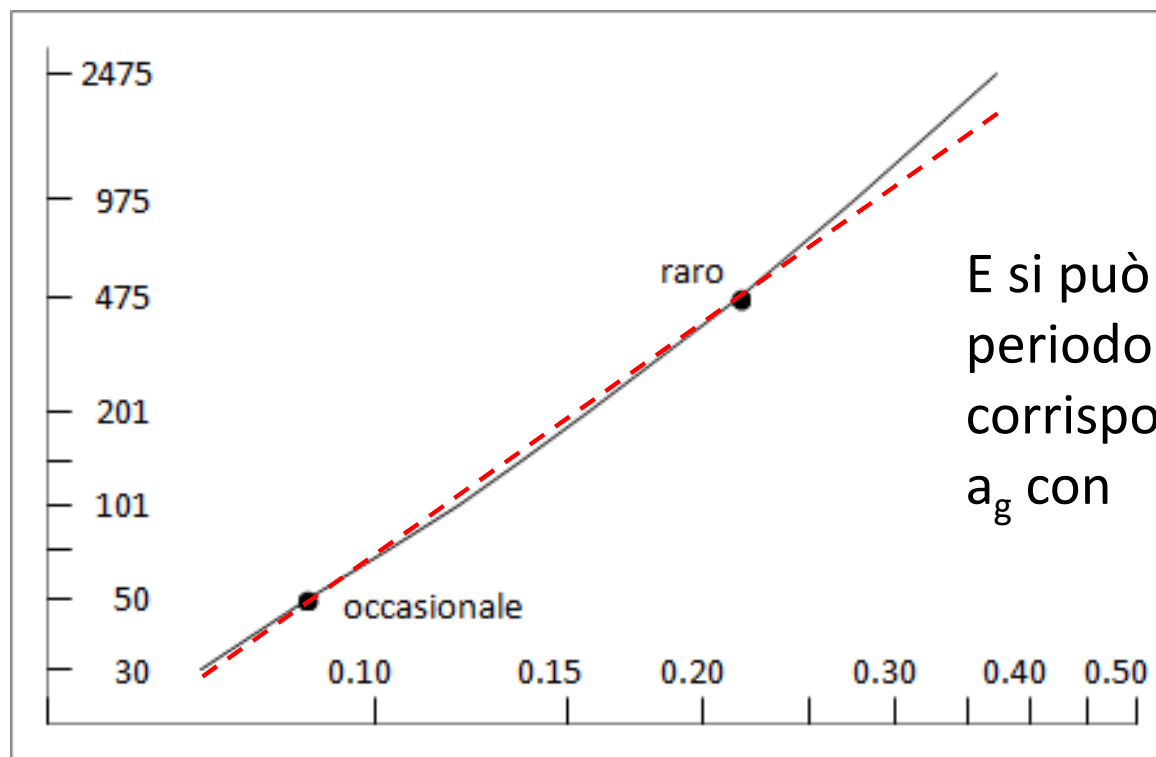


Accelerazione e periodo di ritorno

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

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

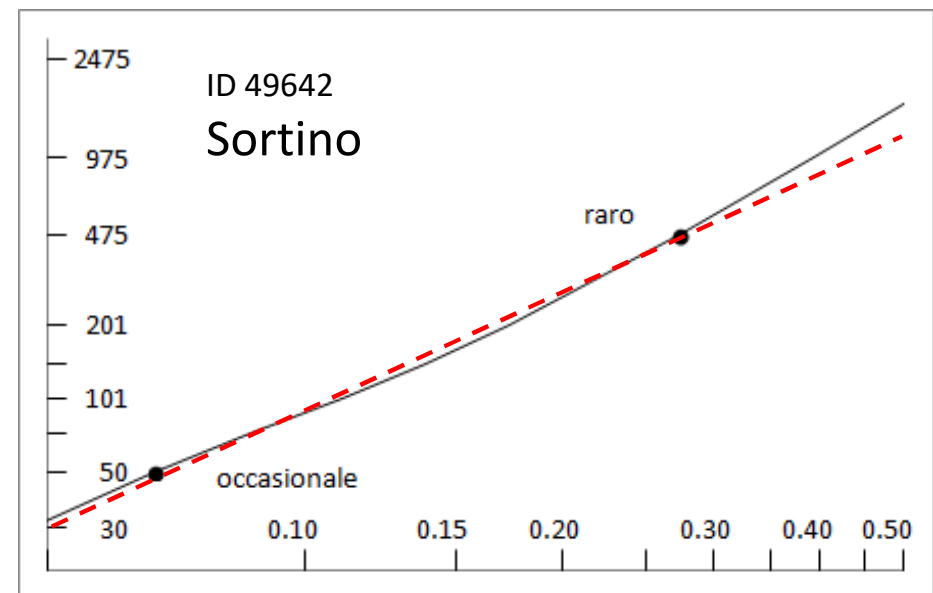
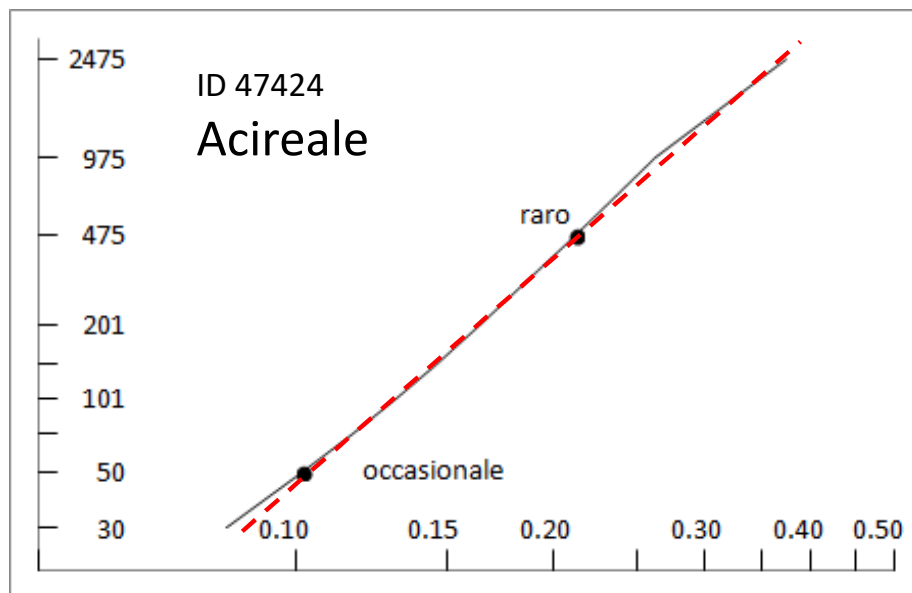
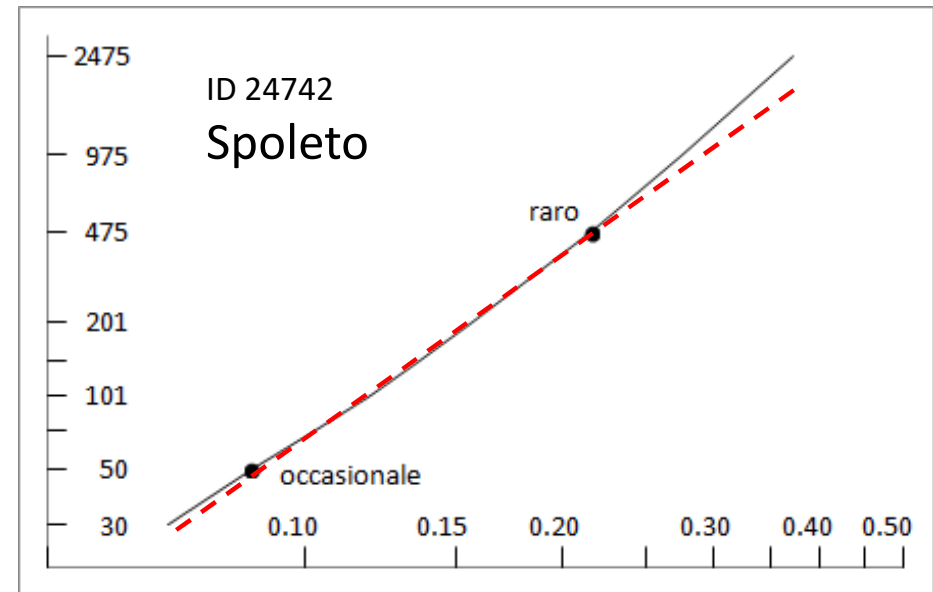
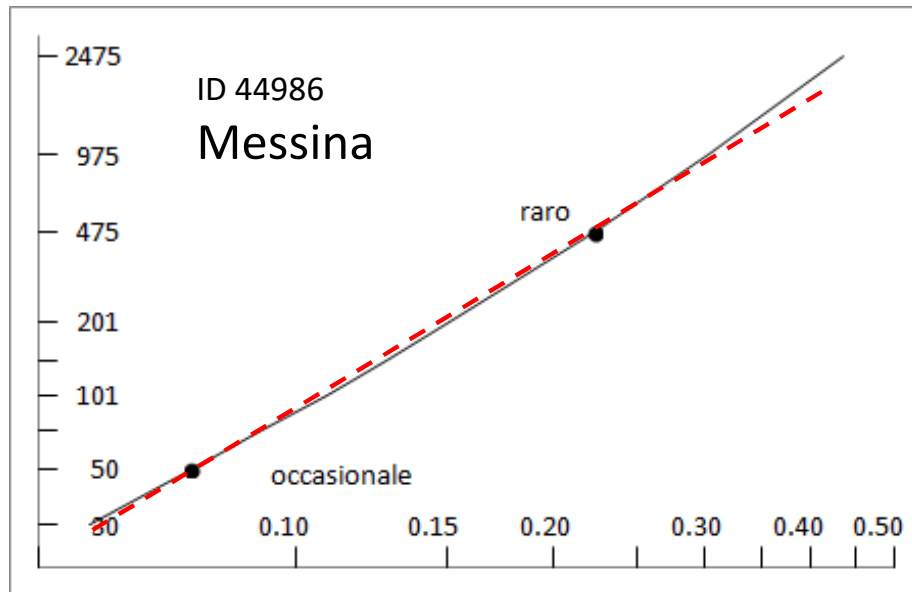
Avendo più punti si può calcolare la pendenza tratto per tratto, ottenendo esponenti leggermente diversi



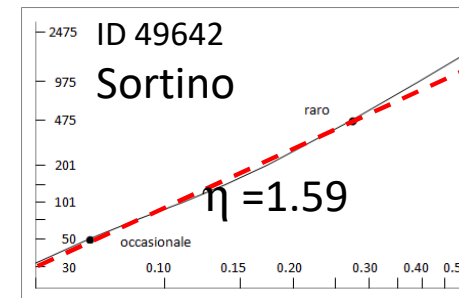
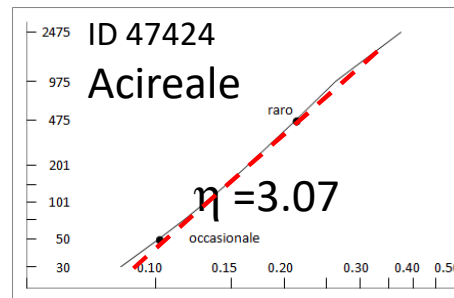
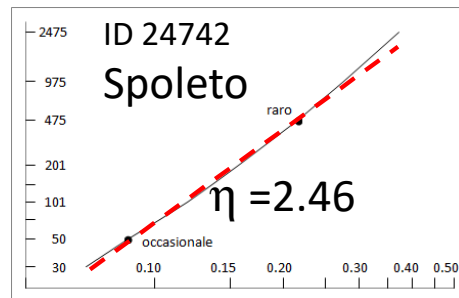
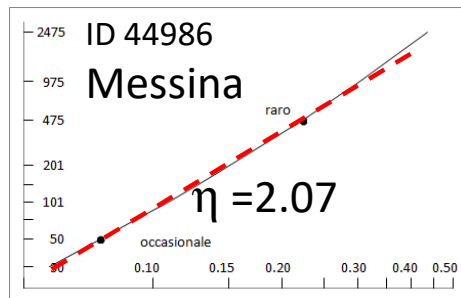
E si può calcolare il periodo di ritorno corrispondente ad un a_g con

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

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

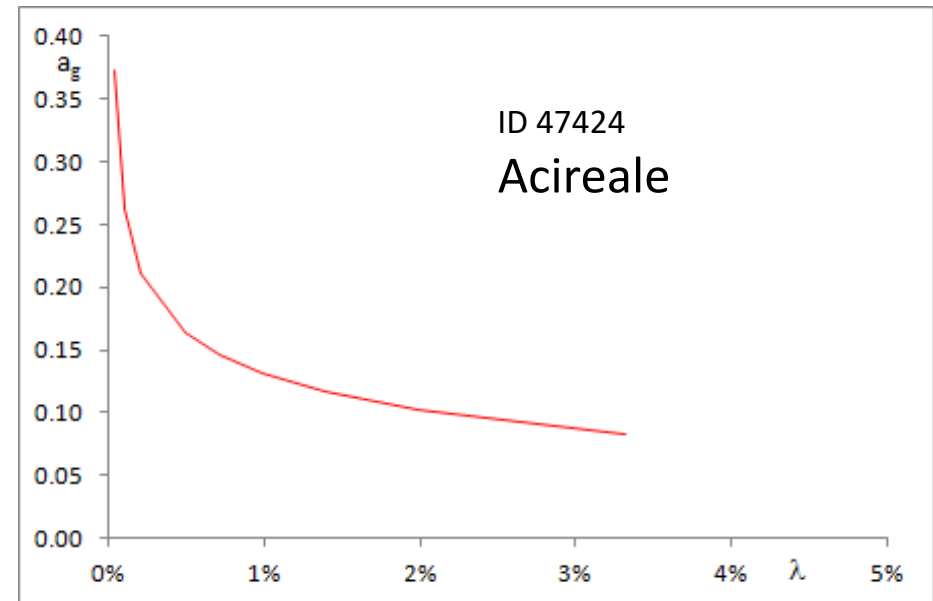
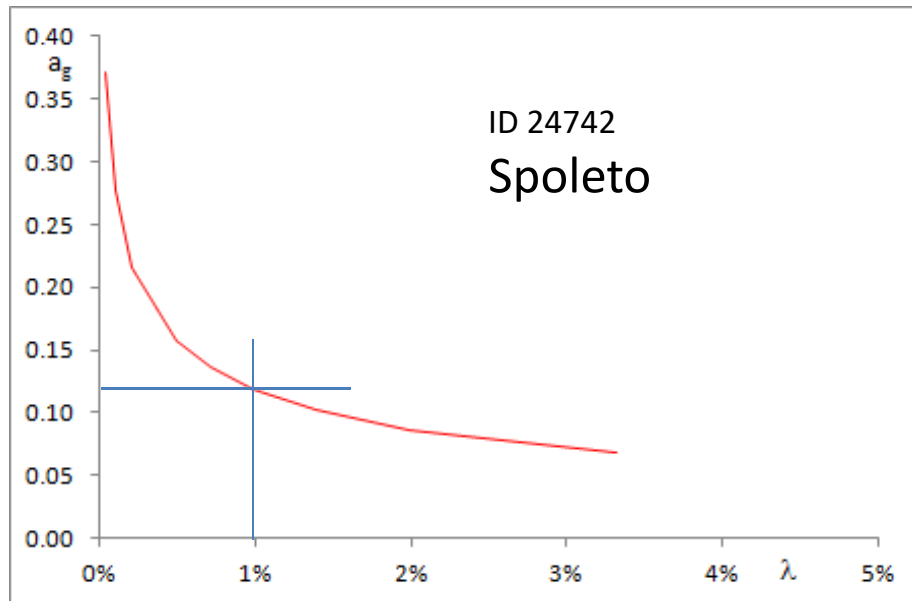
e possibilità media di occorrenza

- È anche 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

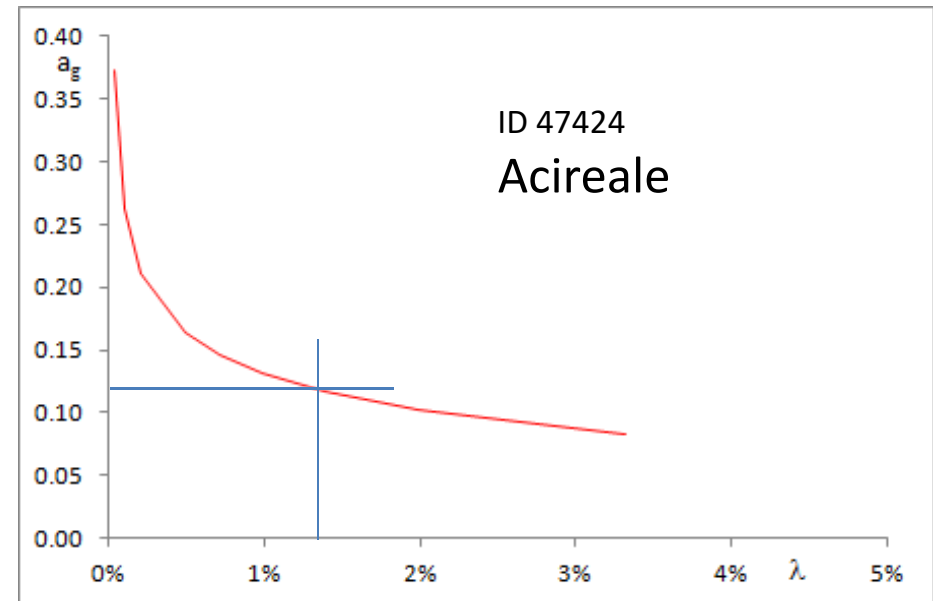
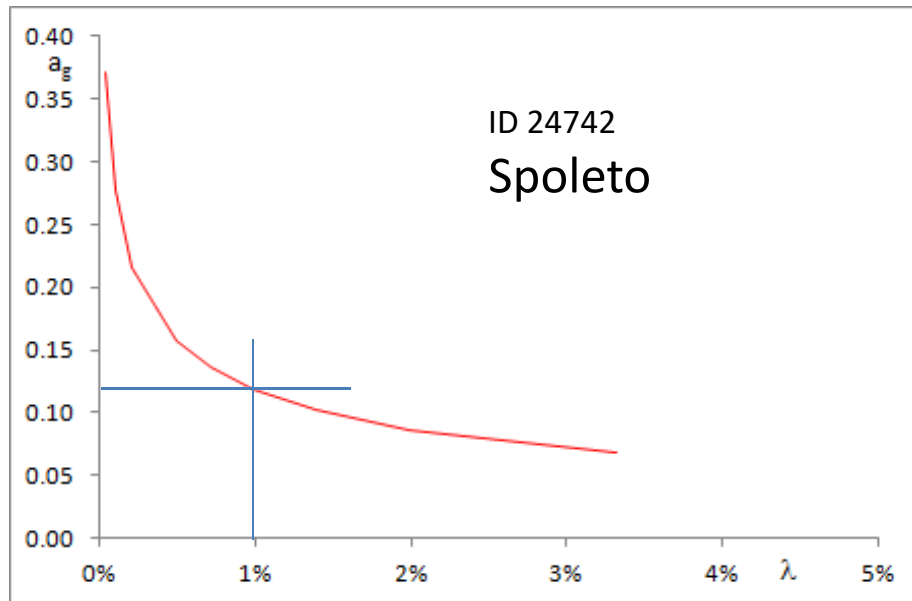
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - A Spoleto ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

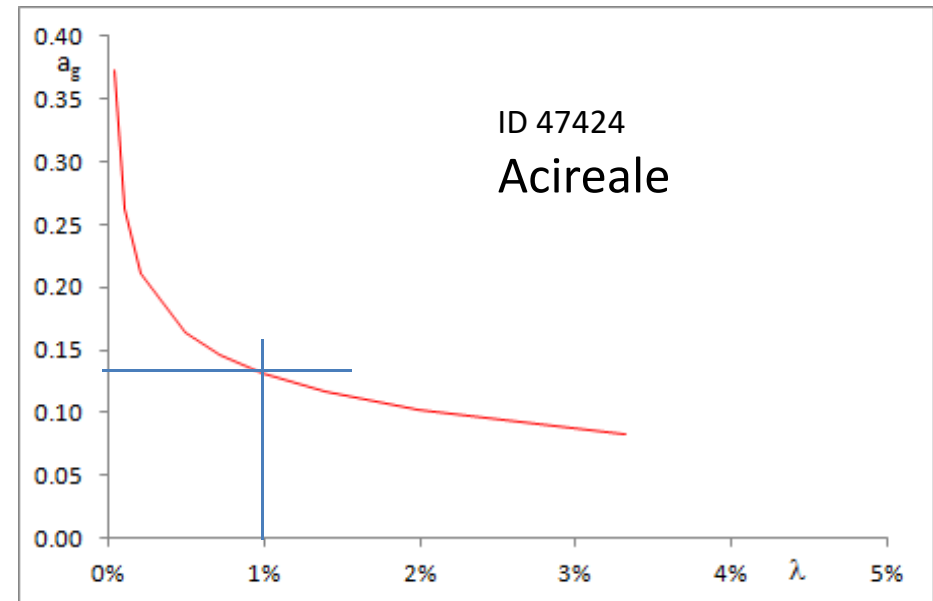
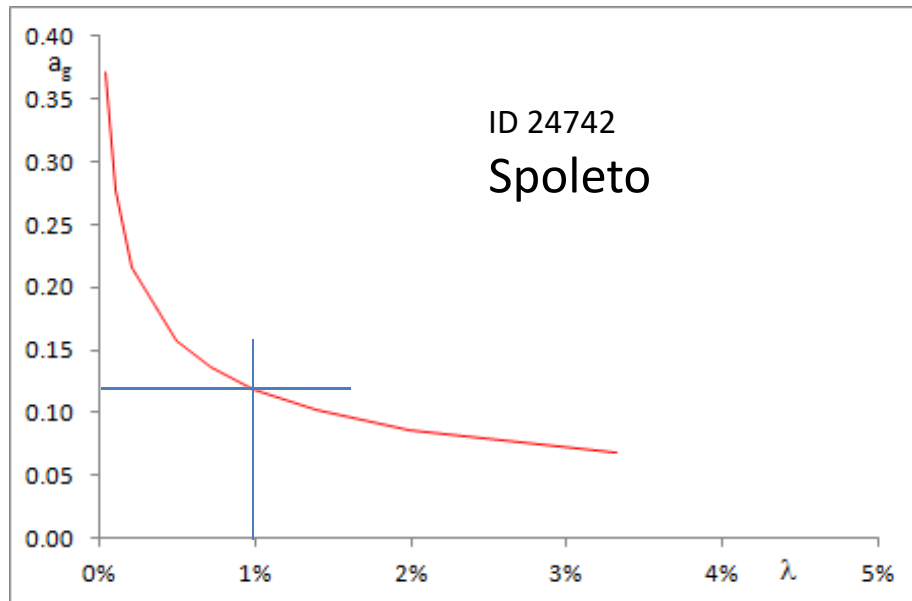
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - Ad Acireale ho 1.33 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

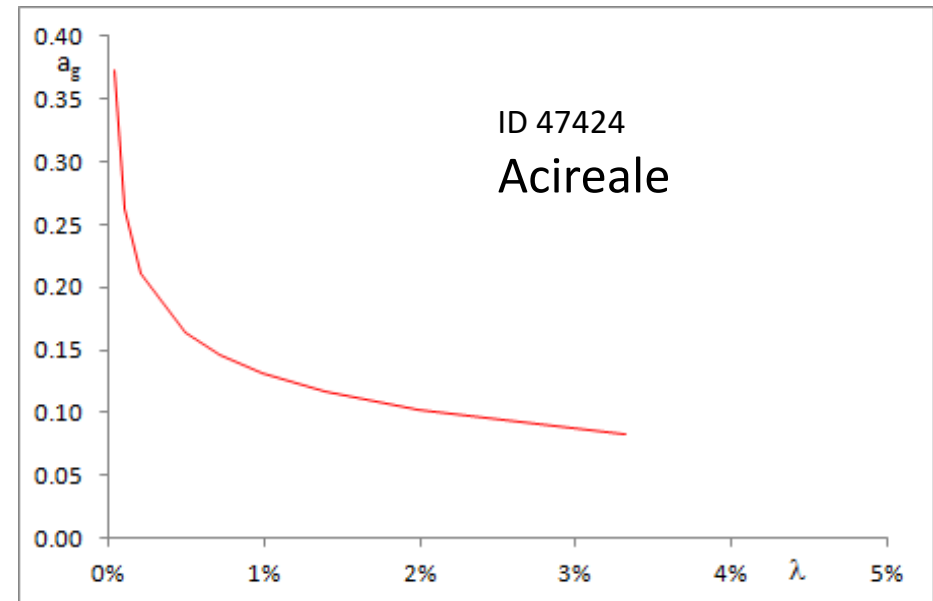
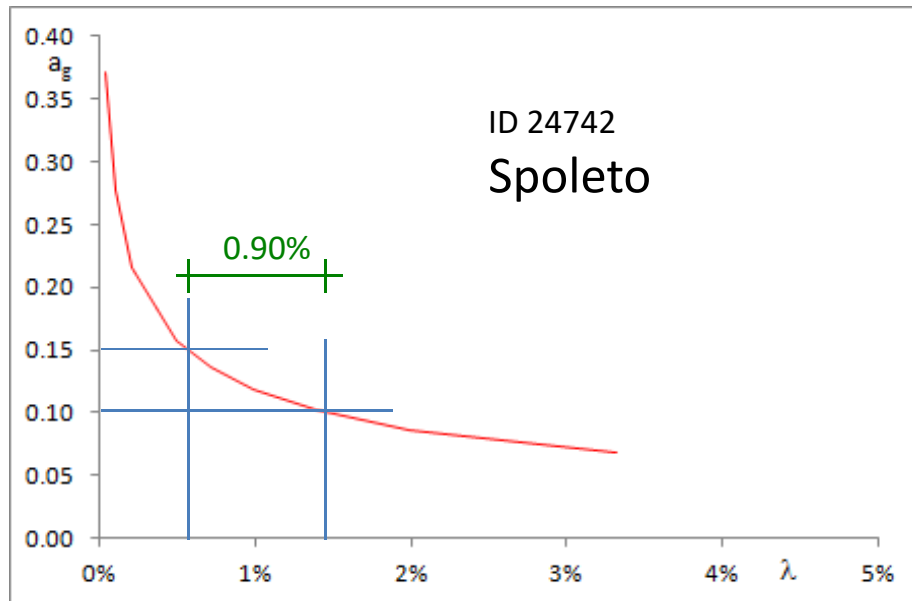
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - Ad Acireale ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.131 g



Accelerazione

e possibilità media di occorrenza

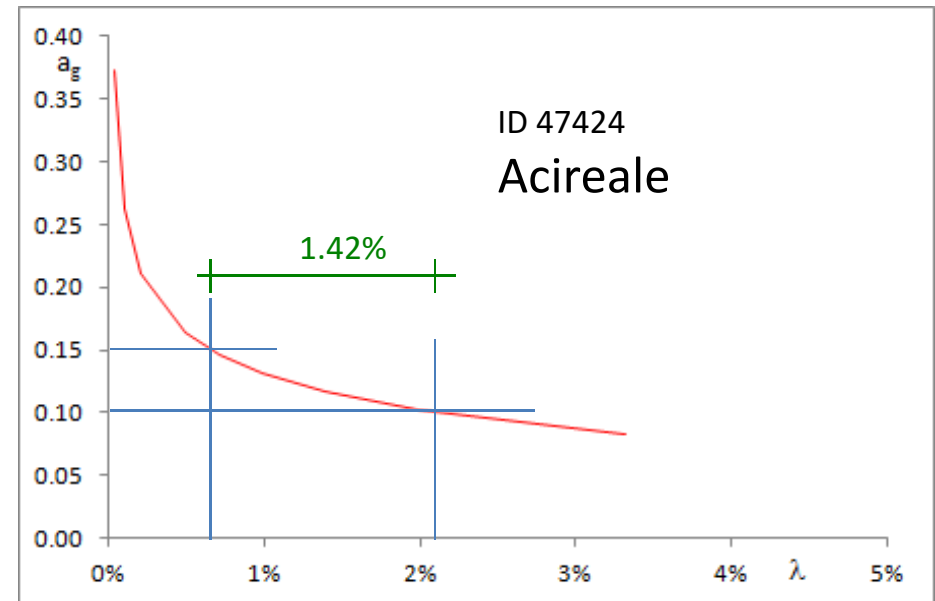
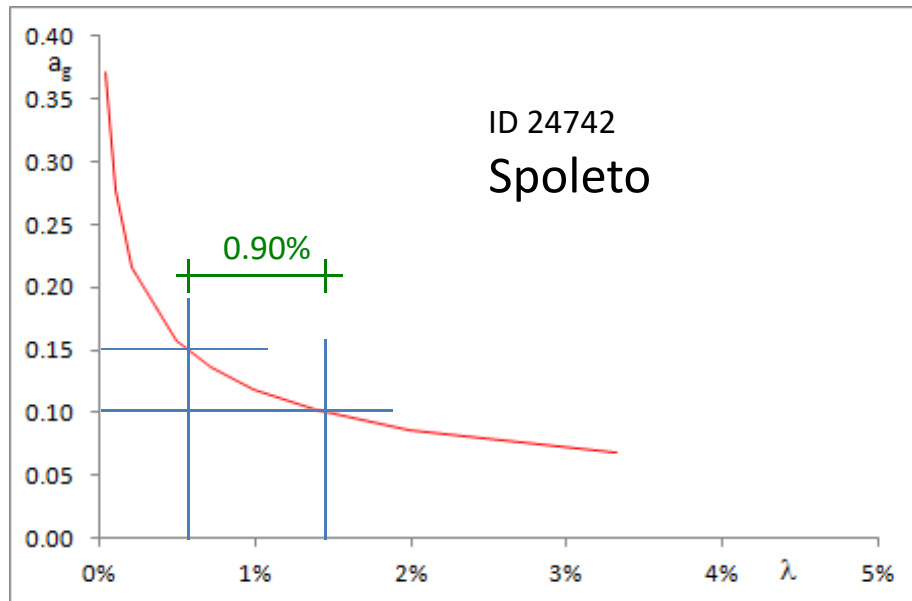
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
 - A Spoleto ho 0.90 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità tra 0.10 g e 0.15 g



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 probabilistico, cioè tenendo espressamente conto nel calcolo della possibile distribuzione probabilistica delle accelerazioni sismiche
 - Seguendo un approccio semiprobabilistico, cioè operando in maniera apparentemente deterministica, ma usando come riferimento valori corrispondenti ad opportuni frattili della distribuzione probabilistica

2. Vulnerabilità sismica

Vulnerabilità sismica

quale danno produce un assegnato evento sismico?

L'evento sismico può essere definito:

- In maniera probabilistica, come insieme di accelerogrammi che rappresentano i possibili eventi sismici
- In maniera semiprobabilistica, come valore di accelerazione (o meglio, come spettro di risposta)

Le proprietà meccaniche della struttura possono essere definite:

- In maniera probabilistica, considerando valori differenti della resistenza secondo una distribuzione statistica
- In maniera semiprobabilistica, come valore di resistenza corrispondente ad un assegnato frattile

Vulnerabilità sismica

valutazione probabilistica

- Se l'evento sismico è assegnato come insieme di accelerogrammi (anche se la resistenza del materiale strutturale è definita con riferimento ad un assegnato frattile) occorre operare in maniera probabilistica per determinare la probabilità che per un livello di intensità sismica a_g si verifichi un livello di danneggiamento D_j

$$V = p(a_g, D_j)$$

Vulnerabilità sismica

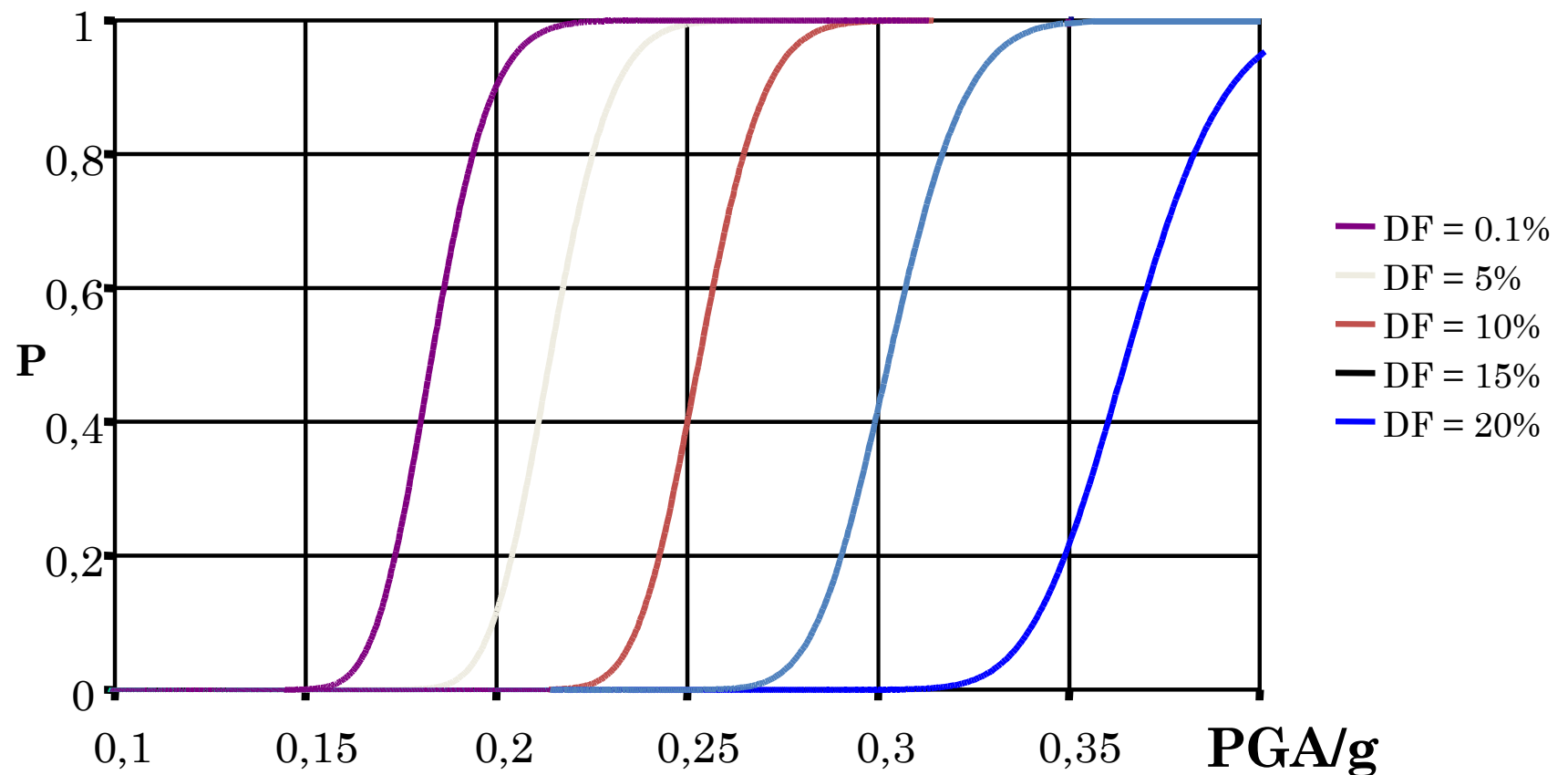
valutazione probabilistica

- Si utilizza un insieme di accelerogrammi
- Si valuta la risposta dinamica incrementale per ciascun accelerogramma
- Per ciascun valore di a_g si determina media e scarto quadratico medio del parametro usato per valutare il danneggiamento (rotazione plastica, rotazione alla corda, spostamento di interpiano)
- Ipotizzando che la distribuzione sia lognormale, si valuta la probabilità di avere un valore del parametro superiore a quello ultimo
- Si riporta in grafico questa probabilità (numero tra 0 e 1) in funzione di a_g

Vulnerabilità sismica

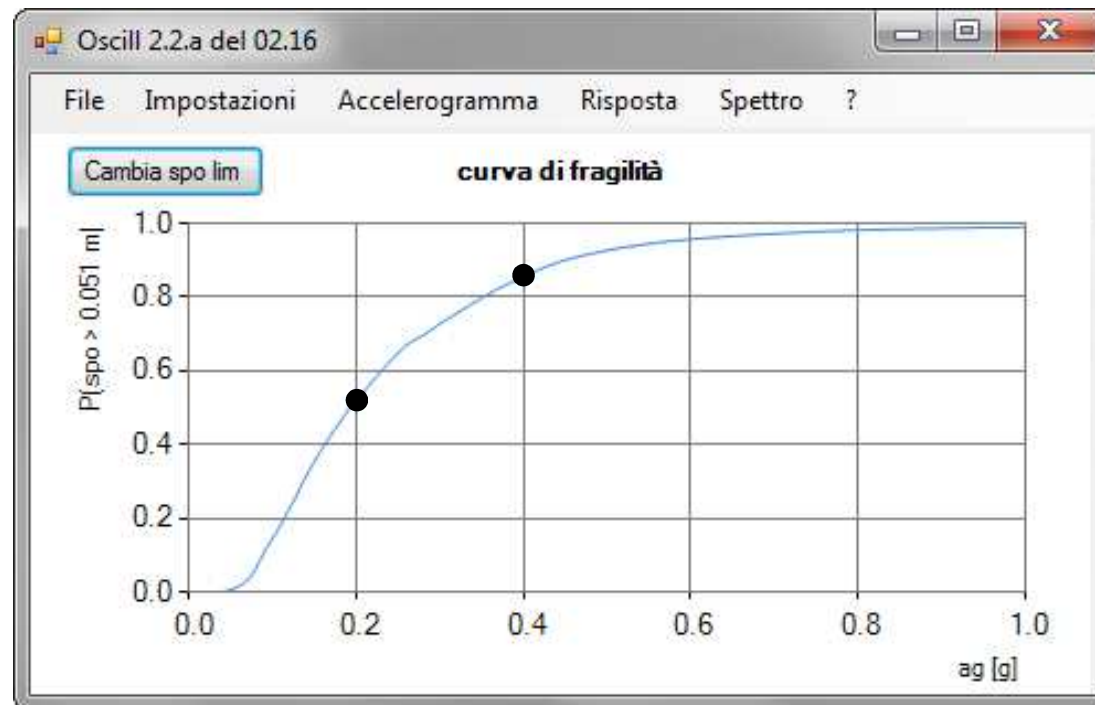
curva di fragilità

- La relazione tra danno e intensità sismica in termini probabilistici è definita **curva di fragilità**



Curve di fragilità

- Esempio: supponendo che il livello di danno in esame corrisponda ad uno spostamento ultimo $u_{ult}=51$ mm, si ottiene la curva di fragilità qui riportata



La curva mostra che per $a_g=0.2$ g la probabilità di superamento è pari al 52%, per $a_g=0.4$ g è pari all'85%

Vulnerabilità sismica

valutazione probabilistica

- Unendo le informazioni fornite dalla **curva di pericolosità** (che indica la probabilità di avere certi valori dell'accelerazione sismica) e dalla **curva di fragilità** (che indica la probabilità di superamento di uno stato limite in funzione dell'accelerazione sismica) si può calcolare la **frequenza media annua di superamento** dello stato limite
- Si può esprimere un giudizio confrontando tale frequenza con valori limite per valutarne l'accettabilità

Vulnerabilità sismica

valutazione semiprobabilistica

- Se l'evento sismico è assegnato come spettro di risposta e la resistenza del materiale strutturale è definita con riferimento ad un assegnato frattile si effettua una “tradizionale” verifica della struttura
- Occorre però tener presente che l'azione sismica probabilmente porterà al superamento della resistenza del materiale
 - L'uso di **modelli lineari** con fattore di comportamento q (con **verifiche di resistenza**) è affidabile se la struttura rispetta i criteri di gerarchia delle resistenze e di duttilità locale
 - In caso contrario diventa fondamentale l'uso di **modelli non lineari** (e si devono effettuare **verifiche di duttilità**)

Vulnerabilità sismica

considerazioni (1)

- Sarebbe interessante affrontare l'approccio probabilistico, che tiene espressamente conto anche della variabilità dell'azione sismica
 - Indicazioni in tal senso sono fornite dalle Istruzioni CNR-DT 212 "Istruzioni per la Valutazione Affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti"
- Nel corso se ne dà solo un cenno, alla fine
- La vulnerabilità sismica è l'argomento maggiormente approfondito in questo corso
- Si segue principalmente l'approccio semiprobabilistico

Vulnerabilità sismica

considerazioni (2)

- La vulnerabilità sismica è l'argomento maggiormente approfondito in questo corso
- Si segue principalmente l'approccio semiprobabilistico, cioè si assegna l'evento sismico come spettro di risposta e la resistenza della struttura sulla base di opportuni frattili delle proprietà dei materiali
- Nel farlo si possono seguire diversi tipi di analisi
 - Analisi lineari possono essere utili per ricavare una prima idea del comportamento della struttura
 - Analisi non lineari sono fondamentali per avere una migliore conoscenza del comportamento della struttura

Vulnerabilità sismica

considerazioni (3)

- La vulnerabilità sismica è l'argomento maggiormente approfondito in questo corso
- Si segue principalmente l'approccio semiprobabilistico
- Pur mantenendosi in questo ambito occorre tener conto in qualche modo di:
 - Influenza delle **incertezze di tipo aleatorio** (variabilità delle resistenza del materiale) sulla risposta non lineare della struttura
 - Influenza delle **incertezze di tipo epistemico** (possibili variazioni del modello con cui si rappresenta la struttura, ad esempio contributo delle tamponature)
 - Influenza della scelta del modello di comportamento non lineare (modelli a plasticità concentrata o a plasticità diffusa)

3. Esposizione

Esposizione

- È una misura della perdita (economica, di vite umane, ecc.) associata ad un livello di danno
- In termini probabilistici è la probabilità che che per un livello di danneggiamento D_j si verifichi una livello di perdita L_i

$$E = p(D_j, L_i)$$

Esposizione

considerazioni

- L'esposizione non viene direttamente presa in considerazione in questo corso
- Dell'esposizione si tiene in qualche modo conto:
 - Mediante la definizione di classi d'uso delle costruzioni, che prescrive l'uso di accelerazioni sismiche maggiori per struttura di maggiore importanza
 - Mediante l'attribuzione di un costo convenzionale di riparazione della costruzione, in relazione al raggiungimento degli stati limite indicati in normativa

Classificazione del rischio sismico

Concetti generali

DM 28/2/2017

Classificazione del rischio sismico degli edifici

- È definita una classificazione del rischio sismico degli edifici
- Analogamente a quella relativa alle prestazioni energetiche, le classi vanno da A⁺ a G
- La classe di rischio fa riferimento:
 - All'accelerazione per il quale l'edificio raggiunge lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)
Indice di sicurezza (IS-V)
 - Al costo di riparazione, che dipende dalle varie intensità di sisma che possono colpire l'edificio
Perdita Annuale Media attesa (PAM)

DM 28/2/2017

Classificazione del rischio sismico degli edifici

- È definita una classificazione del rischio sismico degli edifici
- Analogamente a quella relativa alle prestazioni energetiche, le classi vanno da A⁺ a G
- La classe di rischio fa riferimento a:
 - Indice di sicurezza (IS-V)
 - Perdita Annuale Media attesa (PAM)
- I due aspetti vengono valutati separatamente, determinando per ciascuno dei due una classe di rischio sismico
- La classe di rischio sismico dell'edificio è la peggiore tra le due
... ma sarebbe opportuno esaminarle separatamente, perché forniscono informazioni diverse

Indice di sicurezza IS-V

o Indice di rischio

- È un indicatore della sicurezza della struttura nei confronti dello Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)
Nota: è espresso in %
- È definito come rapporto tra
 - La **Capacità**, cioè l'accelerazione a_g (o PGA, Peak Ground Acceleration) che la struttura può sopportare
 - La **Domanda**, cioè l'accelerazione prevista dalla norma per la struttura nel sito in cui essa è ubicata, per SLV
- La Capacità può essere determinata con
 - Analisi lineare e verifiche di resistenza delle sezioni
 - Analisi non lineare e verifiche di duttilità (capacità deformativa oltre il limite elastico)

Classe di rischio IS-V

- È funzione dell'indice di sicurezza IS-V

Indice IS-V	Classe IS-V
$100\% < \text{IS-V}$	$A^+_{\text{IS-V}}$
$80\% < \text{IS-V} \leq 100\%$	$A_{\text{IS-V}}$
$60\% < \text{IS-V} \leq 80\%$	$B_{\text{IS-V}}$
$45\% < \text{IS-V} \leq 60\%$	$C_{\text{IS-V}}$
$30\% < \text{IS-V} \leq 45\%$	$D_{\text{IS-V}}$
$15\% < \text{IS-V} \leq 30\%$	$E_{\text{IS-V}}$
$\text{IS-V} \leq 15\%$	$F_{\text{IS-V}}$

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- È un indicatore dei costi di riparazione della struttura dopo un terremoto
Nota: è espresso in %
- È definito come rapporto tra
 - Perdite economiche associate ai danni degli elementi strutturali e non strutturali
 - Costo di ricostruzione dell'edificio (escluso il suo contenuto)
- È calcolato assegnando in maniera convenzionale un costo di ricostruzione a ciascuno stato limite

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- Stati limite e costo di ricostruzione CR

Stato limite		T_R	CR
SLR	Stato Limite di Ricostruzione	come SLC	100%
SLC	Stato Limite di Collasso	da calcolare ⁽¹⁾	80%
SLV	Stato Limite di salvaguardia Vita	da calcolare	50%
SLD	Stato Limite di Danno	da calcolare ⁽²⁾	15%
SLO	Stato Limite di Operatività	da calcolare ⁽³⁾	7%
SLID	Stato Limite di Inizio Danno	10 anni	0%

Note:

- (1) Può essere valutato a partire da quello per SLV
- (2) Non superiore a quello per SLV
- (3) Può essere valutato a partire da quello per SLD

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- Per ciascuno stato limite SL è possibile calcolare il valore di a_g (PGA) per il quale lo si raggiunge
Nota: questa affermazione vale in astratto; tutto questo corso serve a dare indicazioni su come fare a stimare questo valore
- Nota la PGA è possibile determinare a quale periodo di ritorno (e a quale frequenza media annua di superamento) corrisponde questa PGA nel sito in cui è posto l'edificio

Convenzionalmente, se PGA_D è il valore richiesto dalla norma per lo SL (con periodo di ritorno T_{RD}) e PGA_C è il valore per il quale l'edificio raggiunge lo SL, ad esso corrisponde un T_{RC}

$$T_{RC} = T_{RD} \left(\frac{PGA_C}{PGA_D} \right)^\eta \quad \text{con un opportuno valore di } \eta$$

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- Esempio:
dati del sito (D = domanda)

	Tr (D)	λ (D)	ag (D)
SLO	30	3.333%	0.061
SLD	50	2.000%	0.082
SLV	475	0.211%	0.250
SLC	975	0.103%	0.339

- L'analisi ha fornito
(C = capacità)

	ag (C)	Tr (C)	λ (C)
SLO			
SLD	0.075	40.2	2.486%
SLV	0.210	310.5	0.322%
SLC			

- Si ottiene per SLV
e per SLD

$$T_{RC} = 475 \left(\frac{0.210}{0.250} \right)^{1/0.41} = 310.5 \quad \lambda = \frac{1}{T_R} = 0.322\%$$

$$T_{RC} = 50 \left(\frac{0.075}{0.082} \right)^{1/0.41} = 40.2 \quad \lambda = \frac{1}{T_R} = 2.486\%$$

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- I valori della frequenza media annua di superamento per SLO e SLC possono essere ricavati da quelli calcolati per SLD e SLV

$$\lambda_{SLO} = 1.67 \lambda_{SLD}$$

$$\lambda_{SLC} = 0.49 \lambda_{SLV}$$

Nota:

$$1.67 = 50/30, 0.49 = 475/975$$

	ag (C)	Tr (C)	λ (C)
SLO			4.152%
SLD	0.075	40.2	2.486%
SLV	0.210	310.5	0.322%
SLC			0.158%

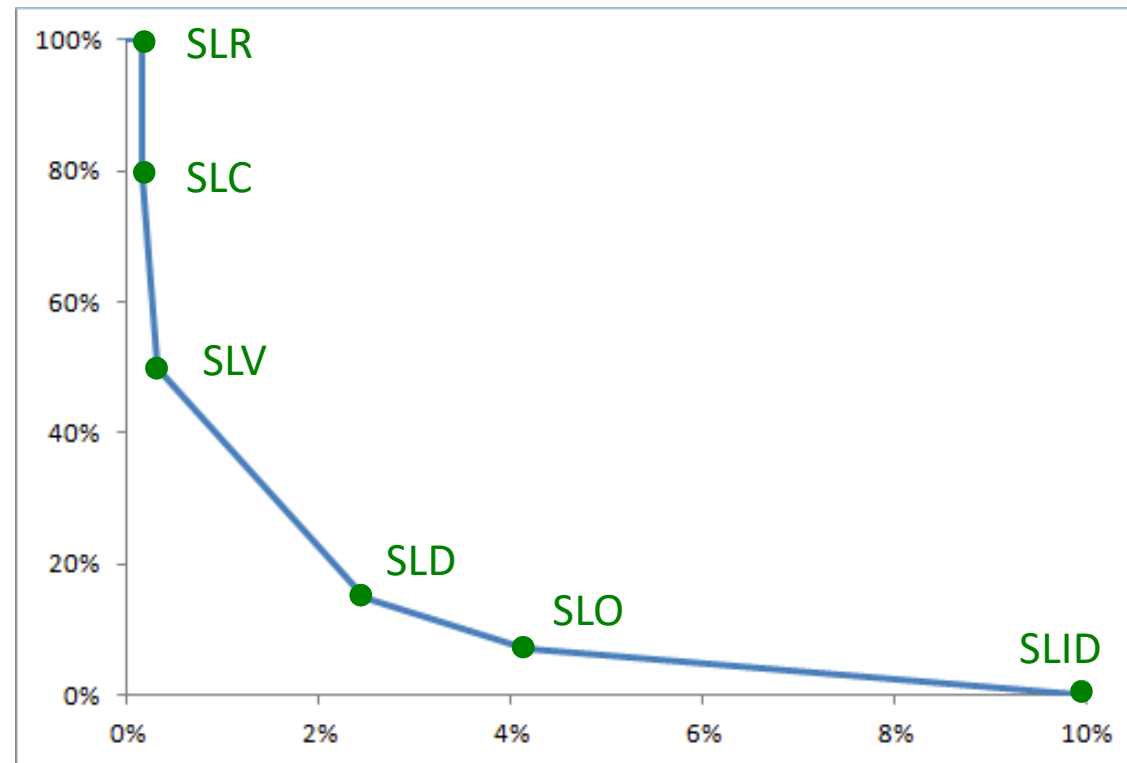
- I valori per SLID e SLR sono assegnati in maniera convenzionale

	ag (C)	Tr (C)	λ (C)
SLID			10.000%
SLO			4.152%
SLD	0.075	40.2	2.486%
SLV	0.210	310.5	0.322%
SLC			0.158%
SLR			0.158%

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- È possibile diagrammare il costo di riparazione in funzione della frequenza media annua di superamento, assumendo un andamento lineare tra gli SL

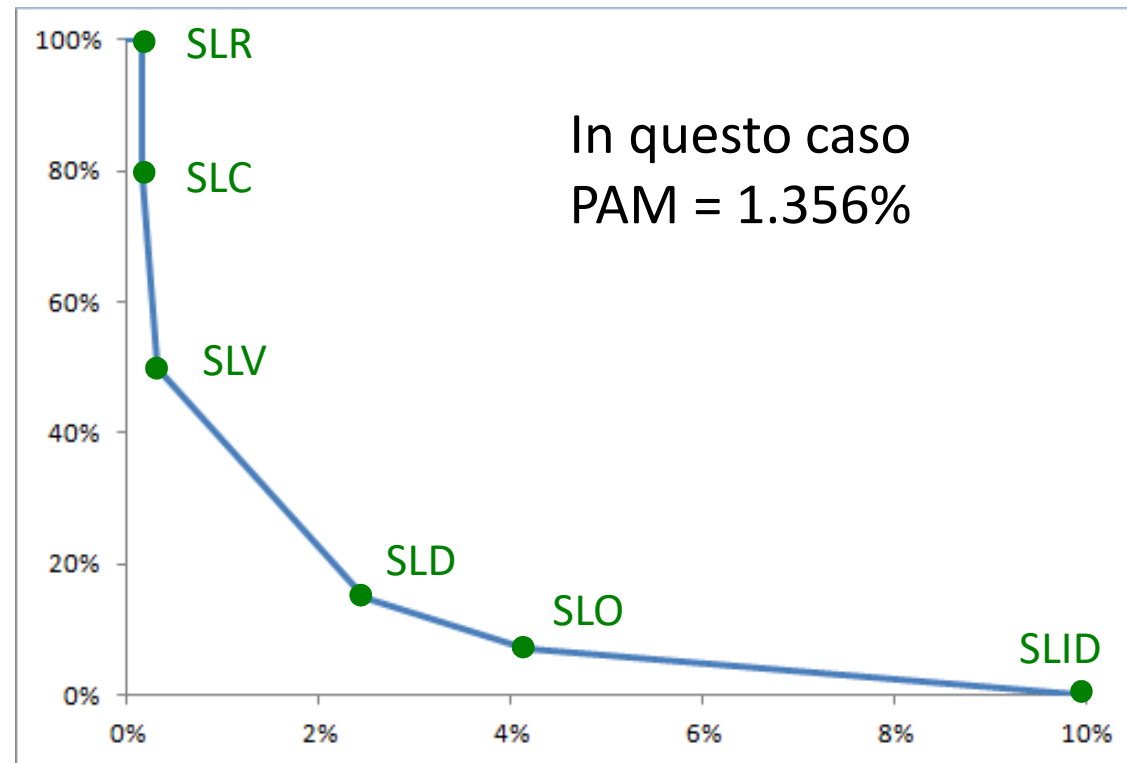


File Excel "Classe rischio"

Perdita Annuale Media attesa

PAM

- La Perdita Annuale Media attesa è l'area sottesa dalla curva, ovvero l'integrale $\int CR d\lambda$



Classe di rischio PAM

- È funzione della PAM

PAM	Classe PAM
$PAM \leq 0.5\%$	A^+_{PAM}
$0.5\% < PAM \leq 1.0\%$	A_{PAM}
$1.0\% < PAM \leq 1.5\%$	B_{PAM}
$1.5\% < PAM \leq 2.5\%$	C_{PAM}
$2.5\% < PAM \leq 3.5\%$	D_{PAM}
$3.5\% < PAM \leq 4.5\%$	E_{PAM}
$4.5\% < PAM \leq 7.5\%$	F_{PAM}
$7.5 < PAM$	G_{PAM}

Classe di rischio

- Nell'esempio:

$PAM = 1.356\%$ classe PAM = B

- Ma contemporaneamente

$PGA_C = 0.210 \text{ g}$ $PGA_D = 0.250 \text{ g}$

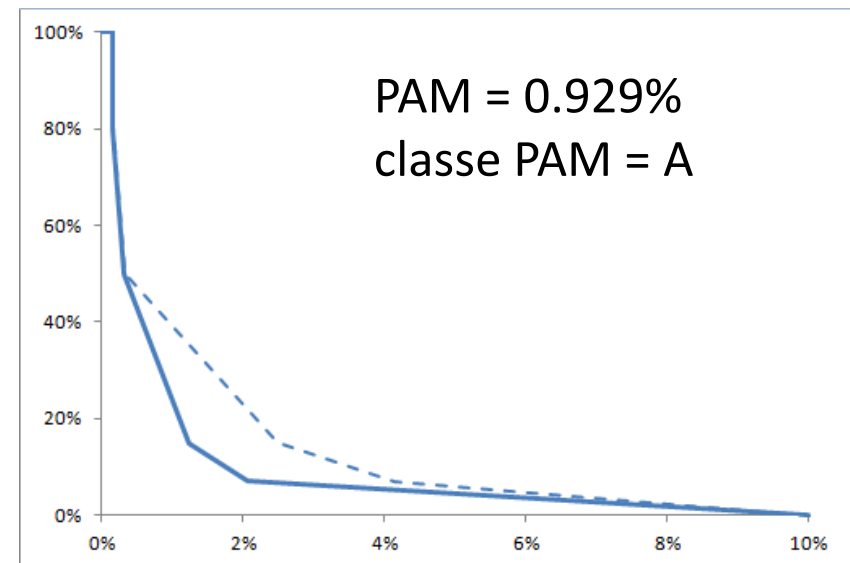
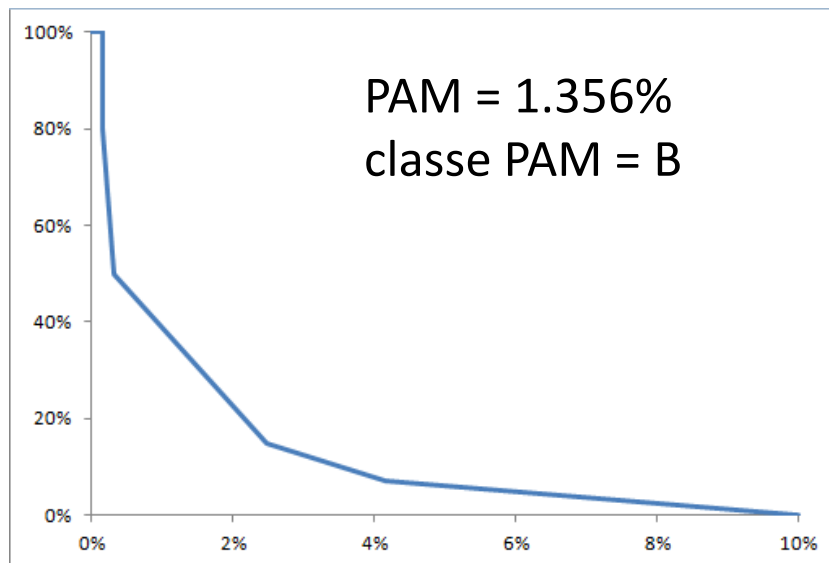
Indice di sicurezza $IS-V = 0.210/0.250 = 84.0\%$

classe di rischio IS-V = A

- La classe di rischio della struttura è la peggiore tra le due
Nell'esempio, l'edificio ha classe di rischio B

Classe di rischio

- Considerazioni:
lo stato di limite di danno influenza notevolmente l'indice PAM
 - Nell'esempio di prima, se per SLD si avesse $PGA=0.100$ g mantenendo inalterata la resistenza per SLV si passerebbe da classe B a classe A



Classe di rischio

considerazioni

- Sia per la valutazione dell'indice di sicurezza (IS-V) che quella della classe PAM è necessario valutare l'accelerazione che porta al raggiungimento degli stati limite indicati dalla normativa, in particolare SLV e SLD (se possibile anche SLC e SLO)
- La valutazione di questi valori di accelerazione è oggetto specifico di questo corso