

Corso di aggiornamento  
Progettazione strutturale e  
Norme Tecniche per le Costruzioni

**Evoluzione della normativa: quali effetti su  
progetto e verifica di edifici in cemento armato?**

2 - Pericolosità sismica

Villa Redenta, Spoleto

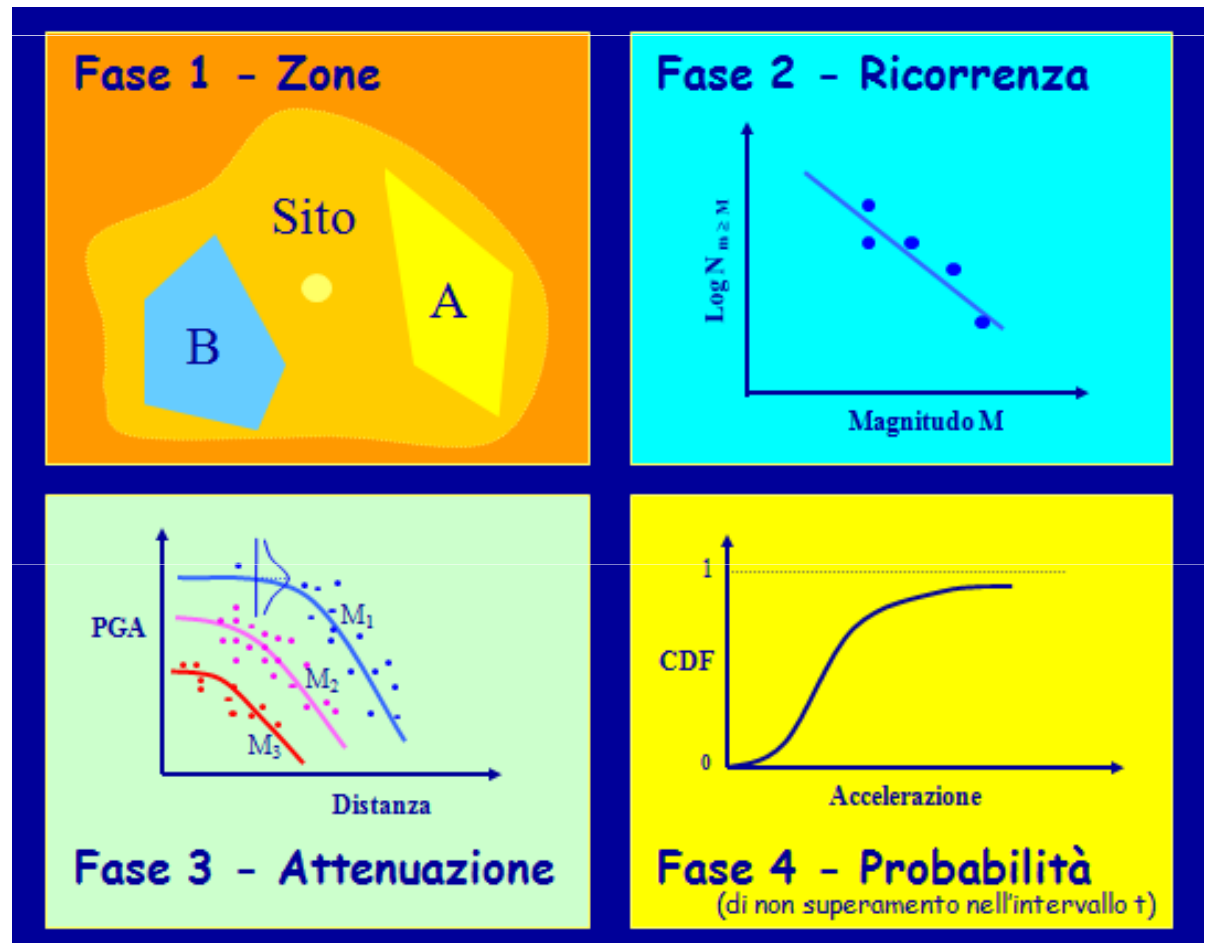
1 dicembre 2017

Aurelio Ghersi

# Terremoti previsti per un determinato sito

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

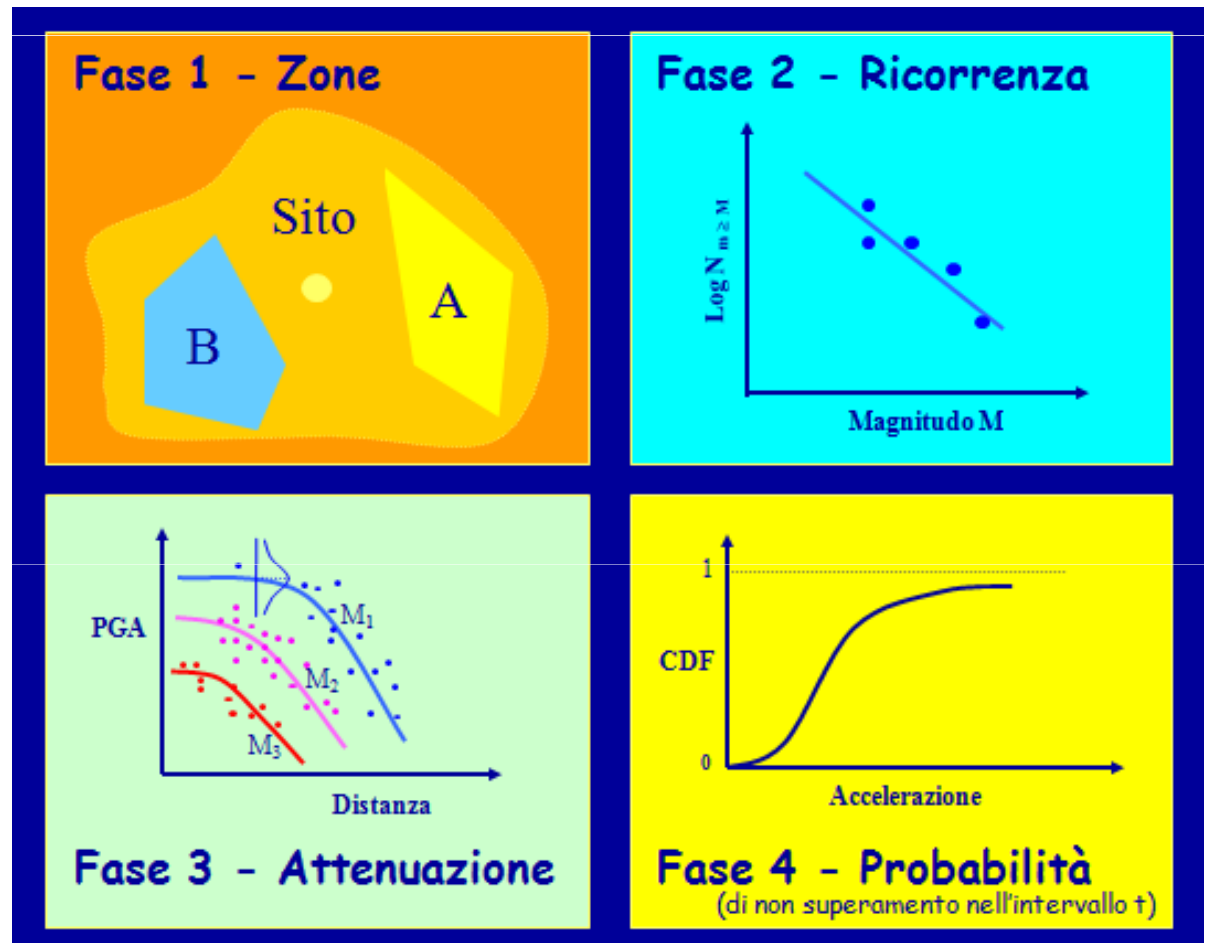
Partendo dallo studio  
geologico, dall'individuazione  
delle faglie, dalla ricorrenza  
degli eventi sismici e dalla  
attenuazione delle onde  
sismiche con la distanza si  
valuta la probabilità di avere  
assegnate accelerazioni in  
ciascun sito



# 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)



# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

## Distribuzione di Poisson:

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

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

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Distribuzione di Poisson:

Più specificamente, nel caso di eventi sismici

- Un evento sismico può accadere in maniera casuale in un qualsiasi istante
- L'occorrenza di un evento sismico in un determinato intervallo di tempo è indipendente da quanto si ha in un qualsiasi altro intervallo

Queste ipotesi sono in realtà poco realistiche, perché il terremoto è dovuto a fenomeni fisici e la probabilità di avere un evento dipende dalla energia accumulata ...

Ma noi non siamo in grado di tenere conto di questo

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Distribuzione di Poisson:

Più specificamente, nel caso di eventi sismici

- La probabilità di occorrenza di un evento sismico di intensità pari o superiore ad un valore assegnato  $a_g$  in un piccolo intervallo  $\Delta t$  (in anni) è proporzionale a  $\Delta t$  e può essere espressa con  $\lambda(a_g) \Delta t$ , dove  $\lambda(a_g)$  è la possibilità media di occorrenza dell'evento (assunta costante)

Occorre sempre fare riferimento all'intensità  $a_g$

Note:

- Anche quando scriverò solo  $\lambda$  intenderò sempre  $\lambda(a_g)$
- Con  $a_g$  si intende la PGA (accelerazione di picco al bedrock)

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

## Distribuzione di Poisson:

- Il valore  $\Delta t$  per il quale si ha  
 $\lambda(a_g) \Delta t = 1$   
rappresenta l'intervallo di tempo per il quale  
mediamente si avrà un terremoto di intensità pari o  
superiore ad un valore assegnato  $a_g$
- Questo intervallo di tempo è indicato con il simbolo  
 $T_R(a_g)$  ed è denominato **periodo di ritorno** (in anni) di  
un terremoto di intensità pari o superiore ad un  
valore assegnato  $a_g$
- Si ha quindi 
$$T_R(a_g) = \frac{1}{\lambda(a_g)} \quad \lambda(a_g) = \frac{1}{T_R(a_g)}$$

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Per una distribuzione di Poisson, la probabilità  $P$  di avere  $n$  eventi in un intervallo di tempo  $\Delta t$ , 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

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



# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

La “probabilità di superamento”  $P_{VR}$ , cioè 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

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

Si ha quindi la seguente 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  $P_{VR}$

È fornita dalla relazione:

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

Esempio:

probabilità di superamento del 10% in 50 anni

Il periodo di ritorno è:

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

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

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

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

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

$P(V_R=50 \text{ anni})$	$T_R$	Terremoto
81%	30	Frequente
63%	50	Occasionale
10%	475	Raro
5%	975	Estremamente raro

Hanno particolare rilevanza alcune probabilità di superamento, ai cui eventi è stata assegnata una specifica denominazione

# Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

Dove troviamo, per un qualsiasi sito, l'intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento (o a un periodo di ritorno)?

- Deriva dal Progetto Finalizzato Geodinamica
- È riportata in dettaglio nel sito INGV, suddivisa in più fogli di calcolo Excel
- È sintetizzata nelle NTC08, Tabella 1 e 2

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

# Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

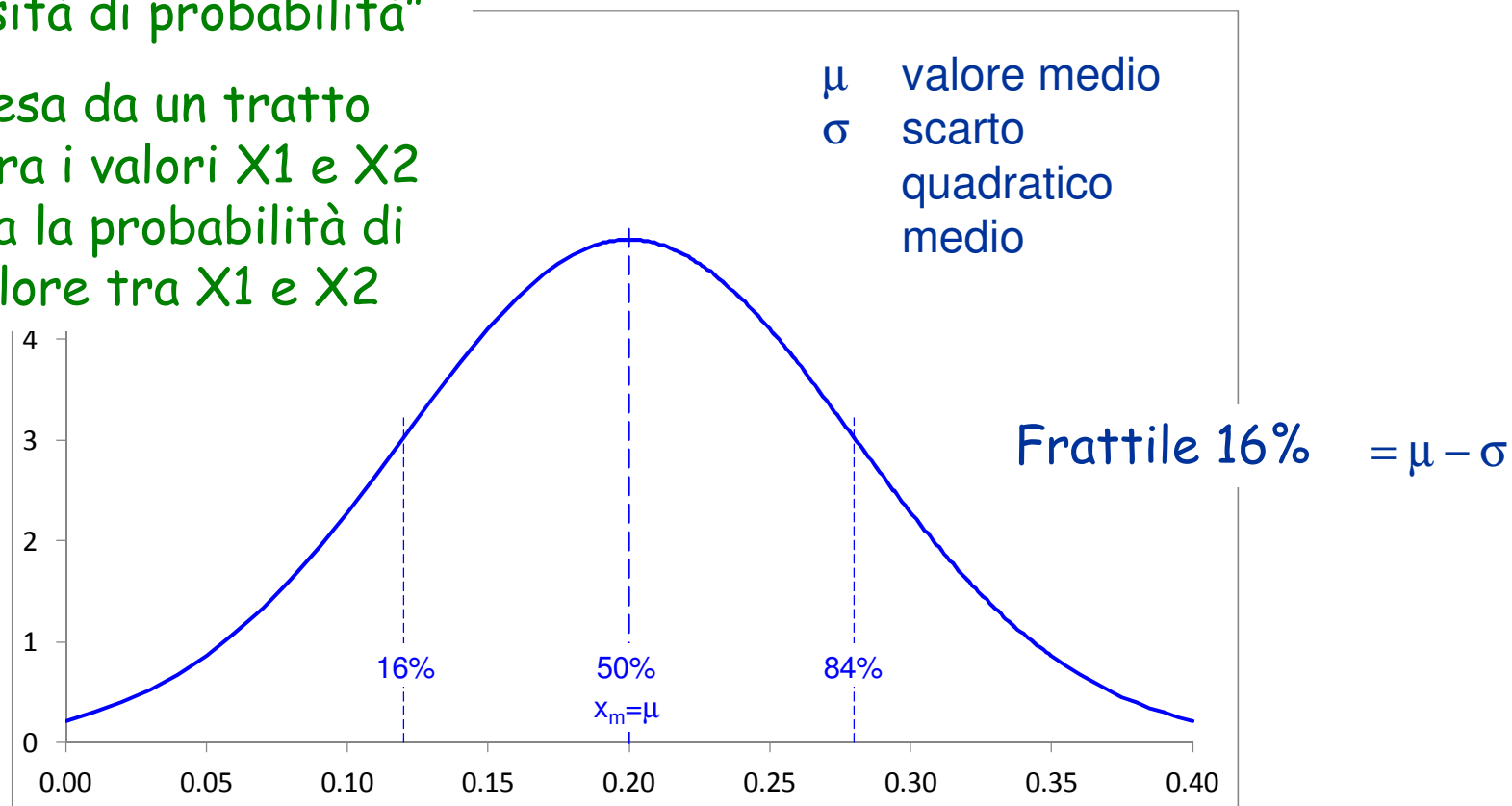
- In realtà il valore dell'accelerazione corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento non è definito in maniera certa ma mediante una distribuzione probabilistica lognormale

# Distribuzione normale o Gaussiana

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

Curva "densità di probabilità"

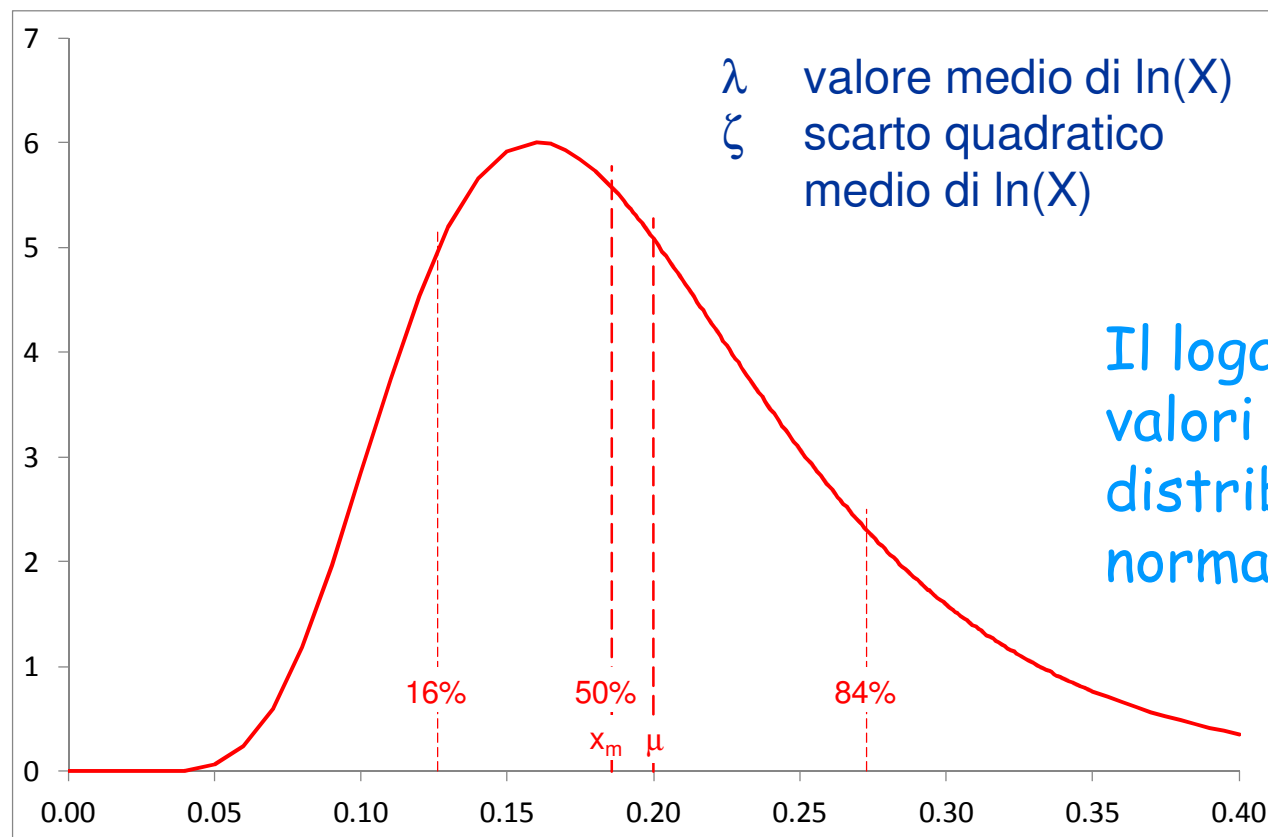
L'area sottesa da un tratto compreso tra i valori  $X_1$  e  $X_2$  rappresenta la probabilità di avere un valore tra  $X_1$  e  $X_2$



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

# Distribuzione lognormale

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

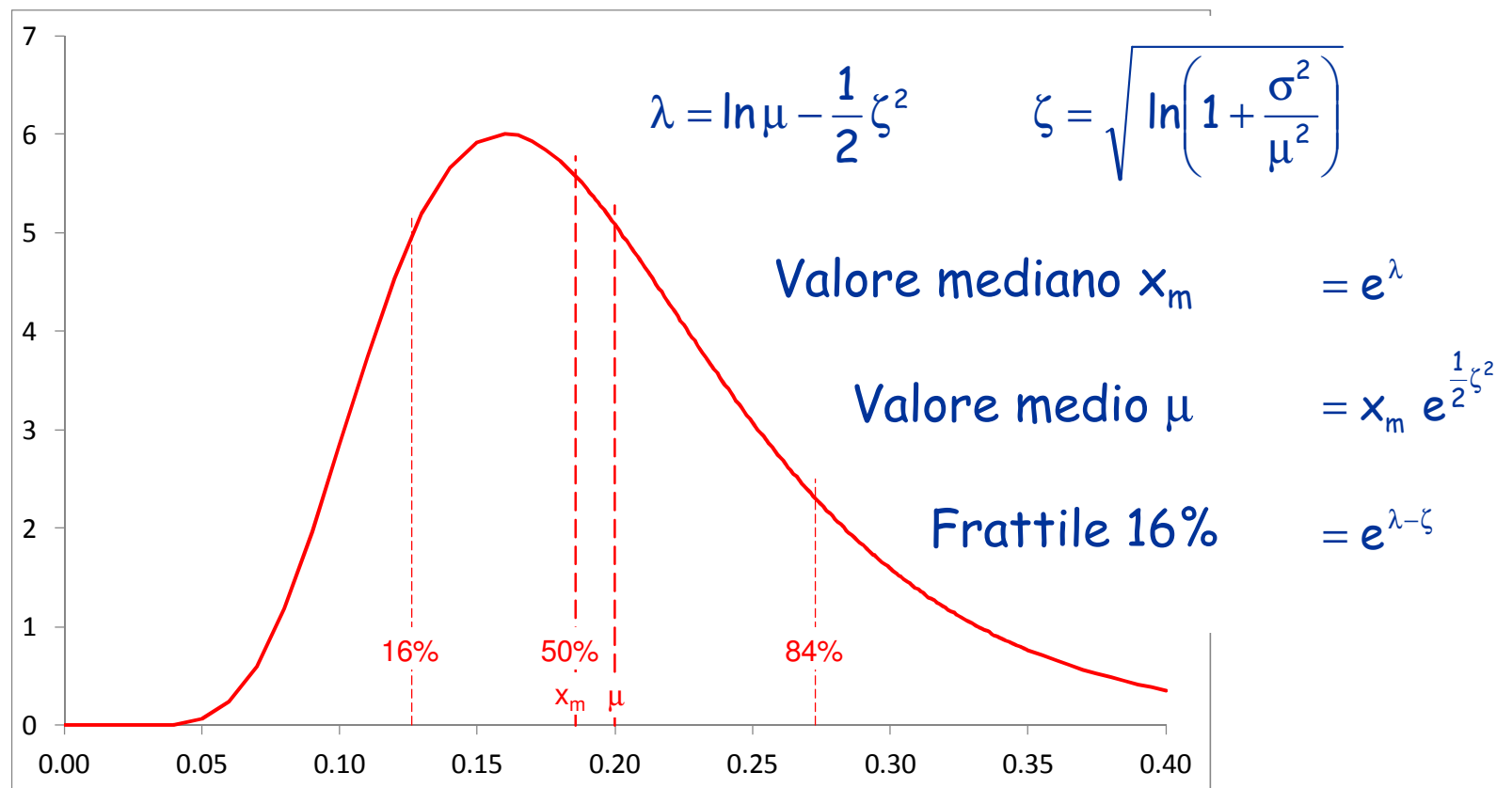


Distribuzione non simmetrica; valore medio  $\mu \neq$  mediano  $x_m$



# 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  $x_m$

# Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

Dal sito  
INGV

Foglio 10%

punto di  
riferimento  
(Spoleto)

I valori sono forniti per  
diverse probabilità di  
superamento

in 50 anni	TR	$\lambda_s = 1/TR$
81%	30	0.033215
63%	50	0.019885
50%	72	0.013863
39%	101	0.009886
30%	140	0.007133
22%	201	0.004969
10%	475	0.002107
5%	975	0.001026
2%	2475	0.000404

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	0.2668	0.2242

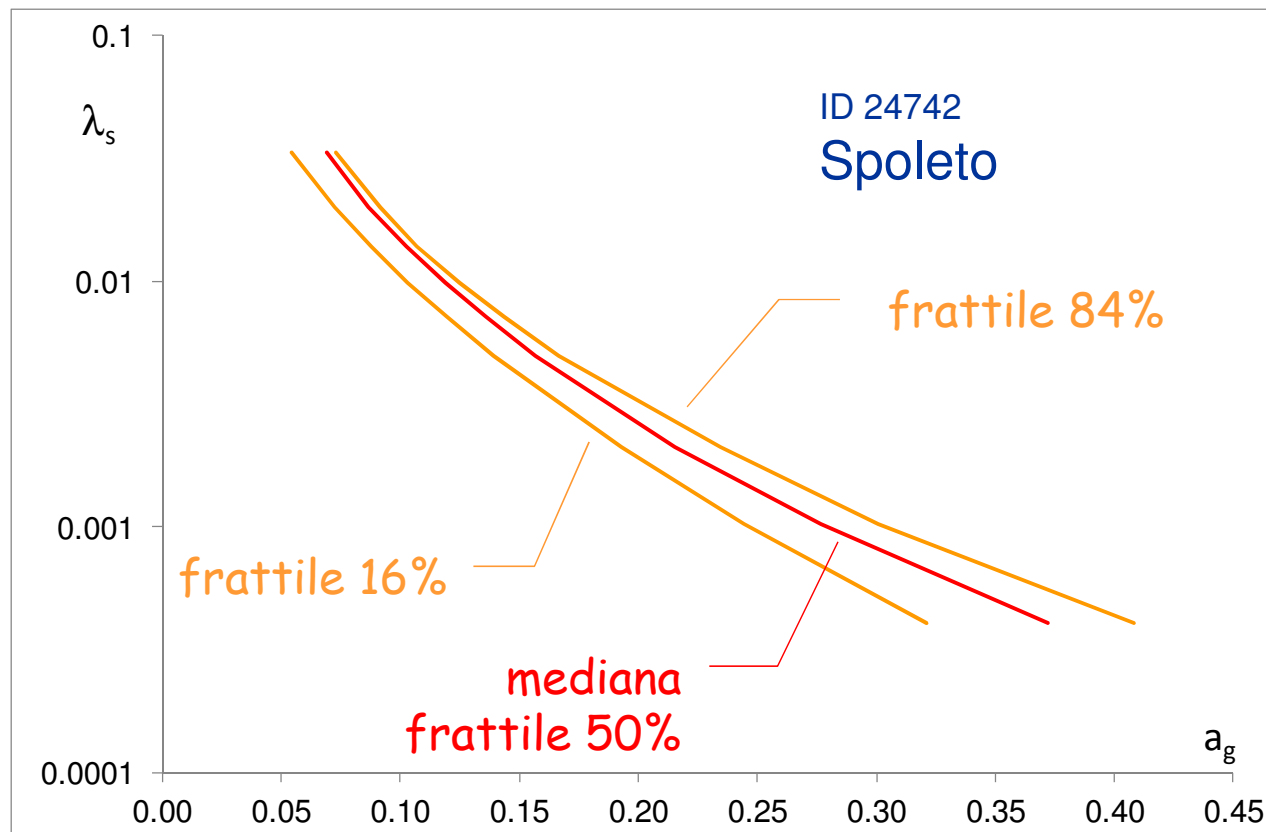
valore di  $a_g$   
mediano

frattili  
84% e 16%

Vedere anche il foglio Excel Pericolosità e spettri

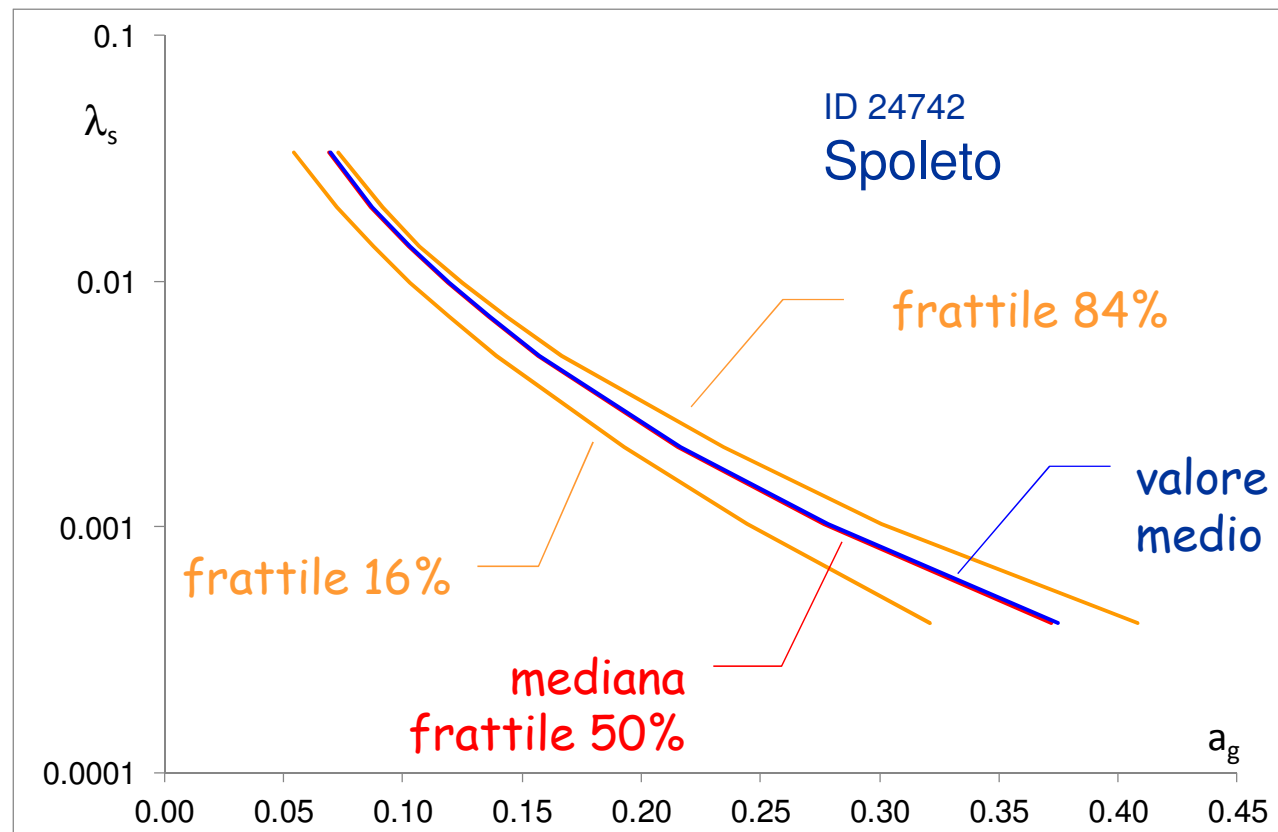
# Curva di pericolosità

- 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%)

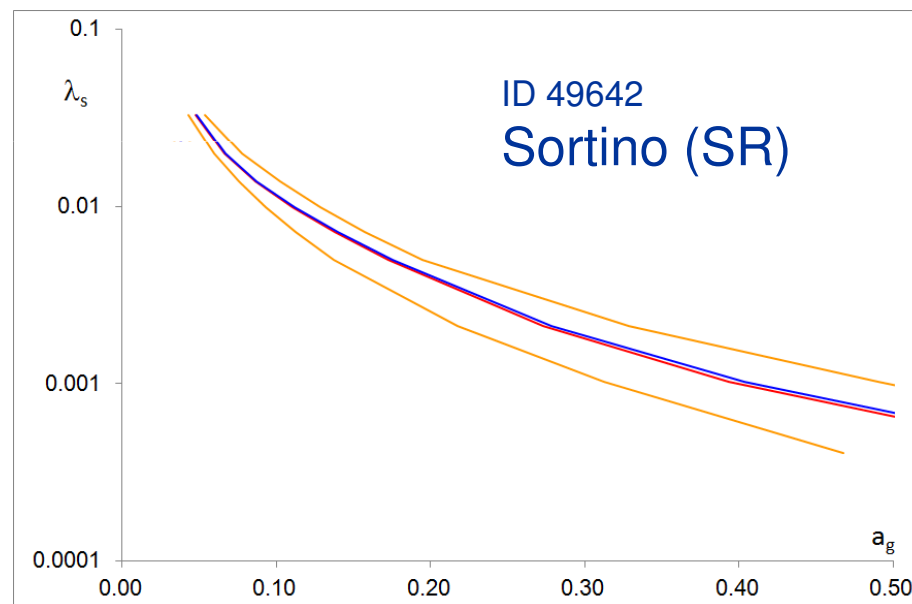
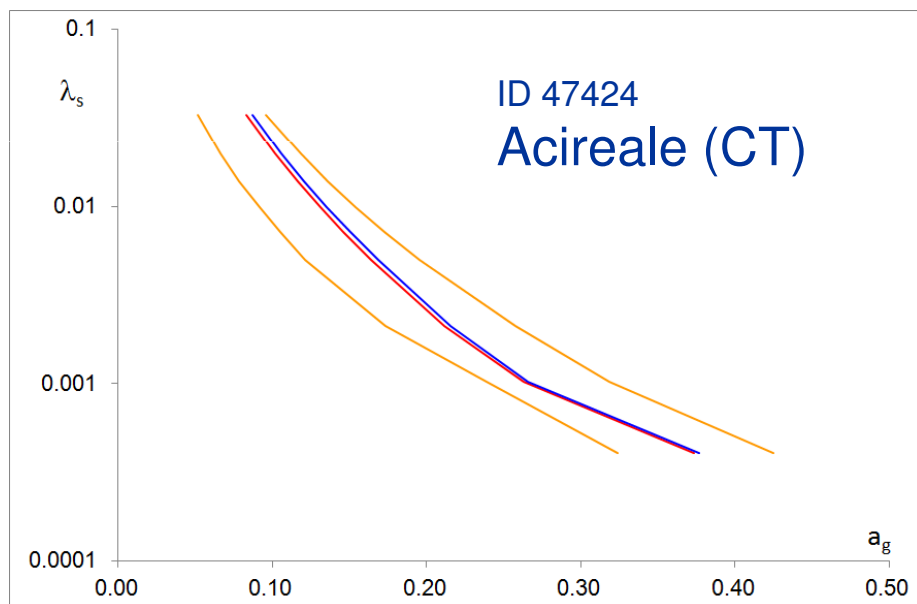
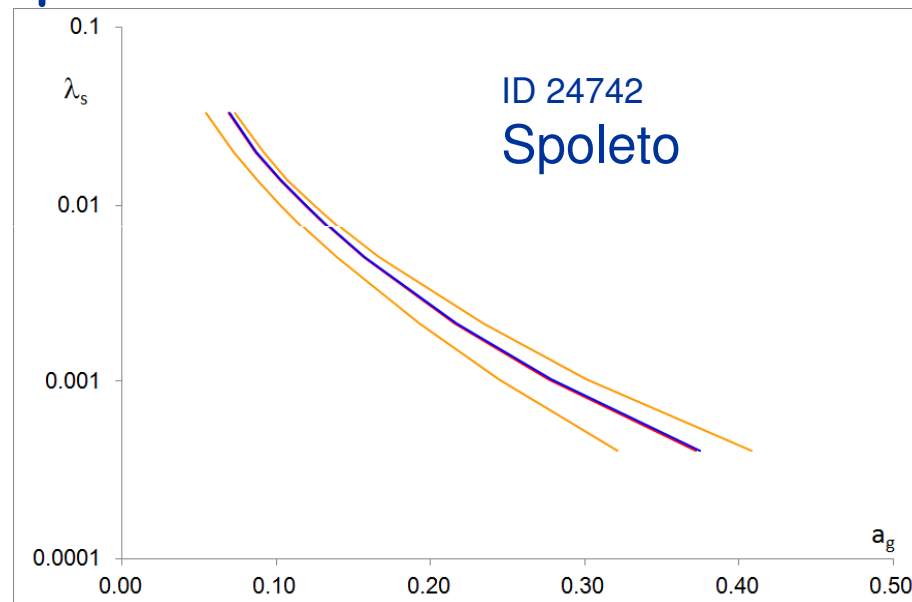
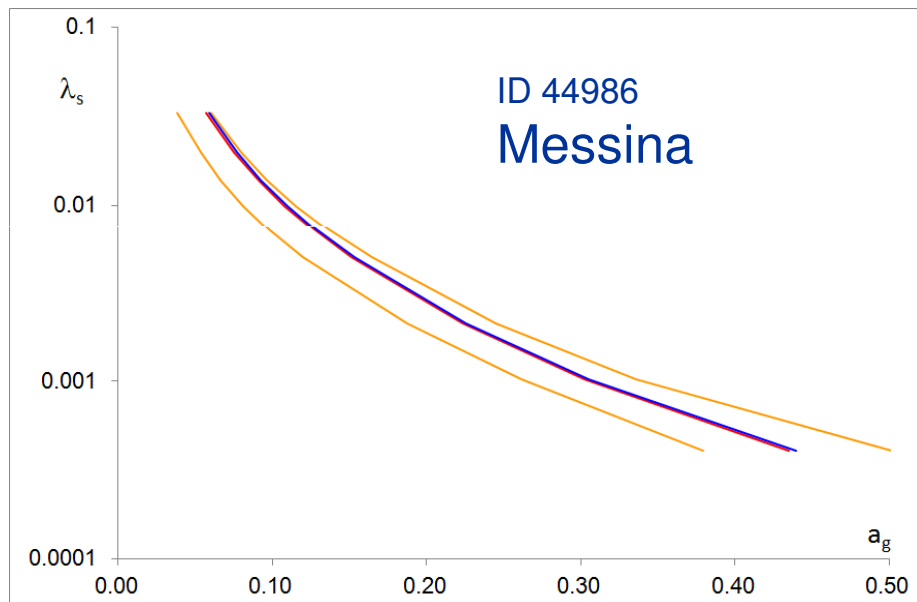


# Curva di pericolosità

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



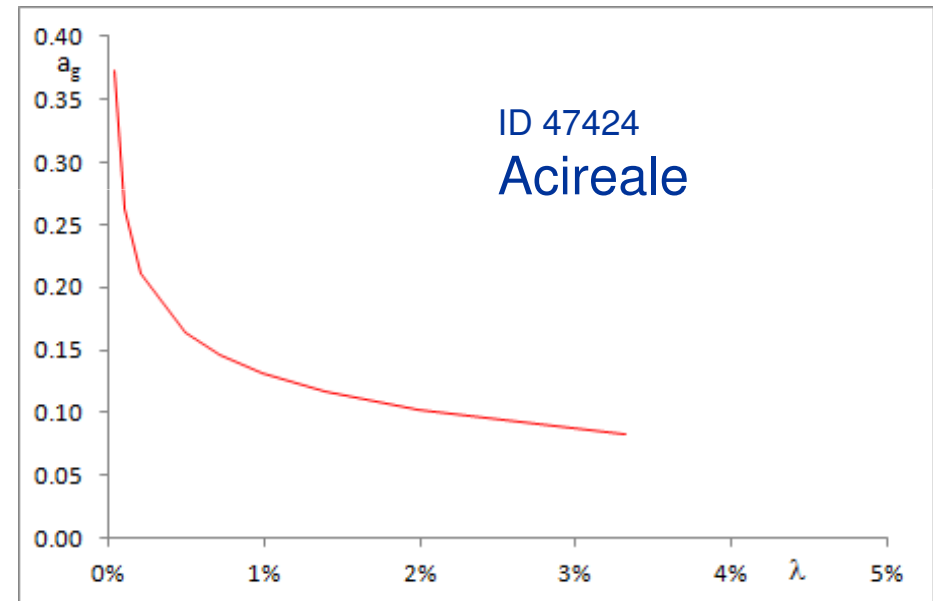
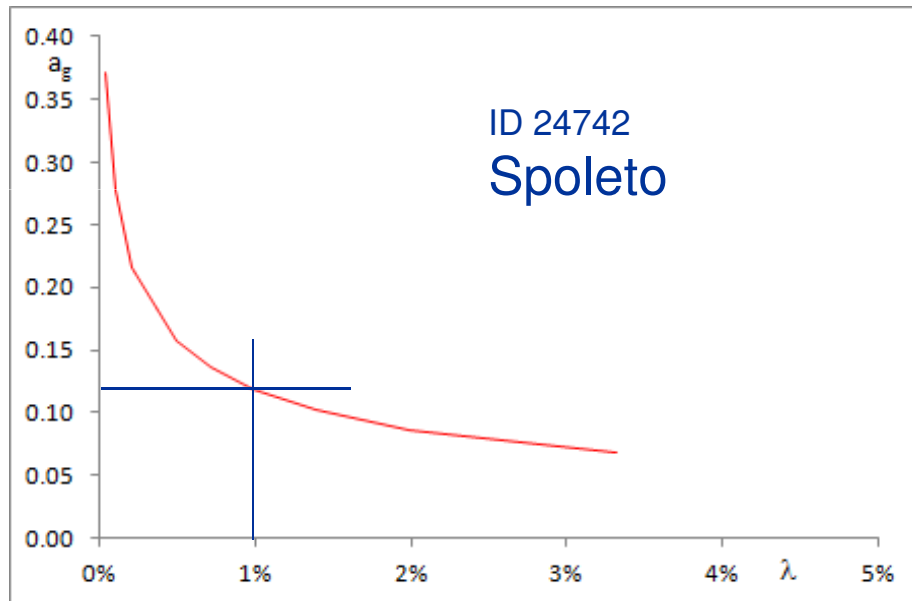
# Curva di pericolosità esempi



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

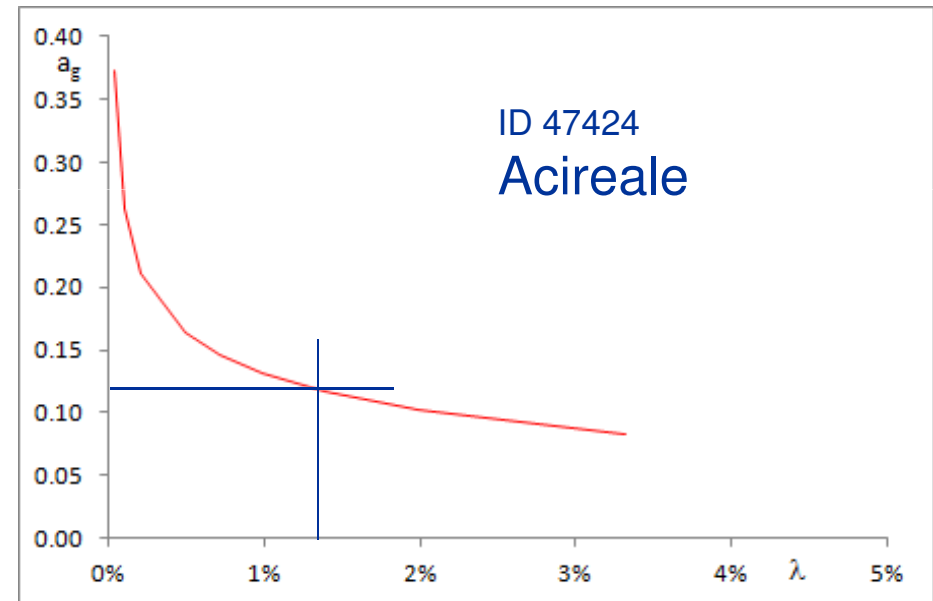
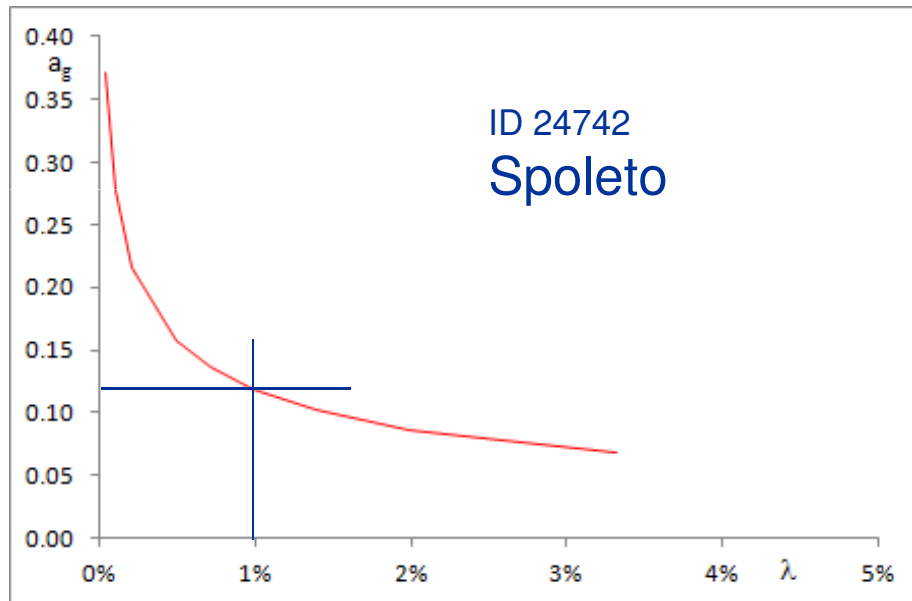
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - A Spoleto ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

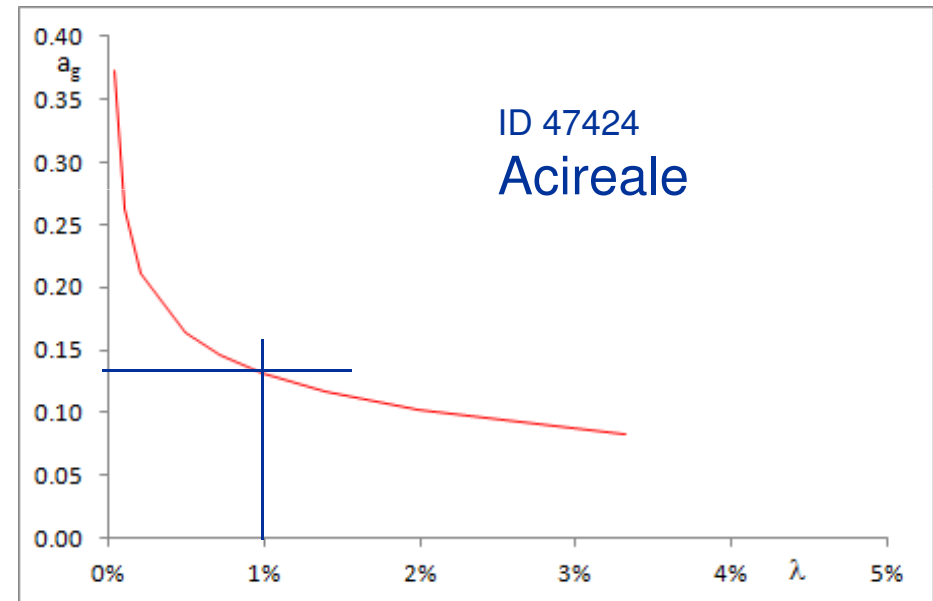
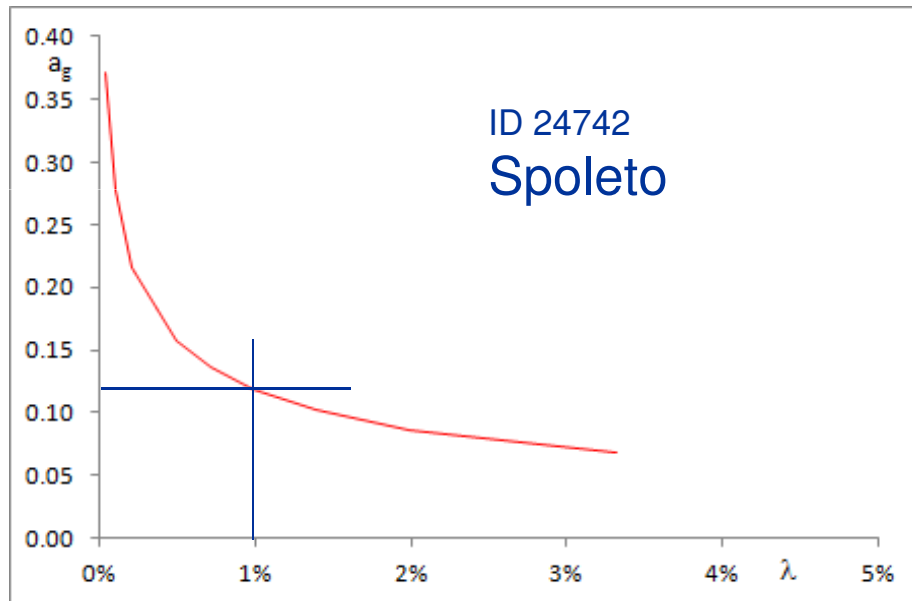
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - Ad Acireale ho 1.33 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



# 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

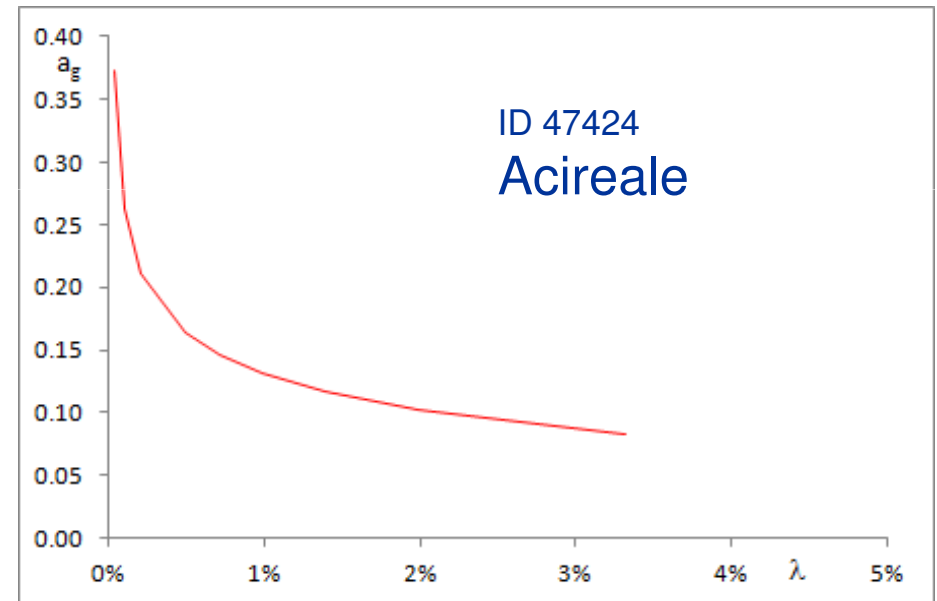
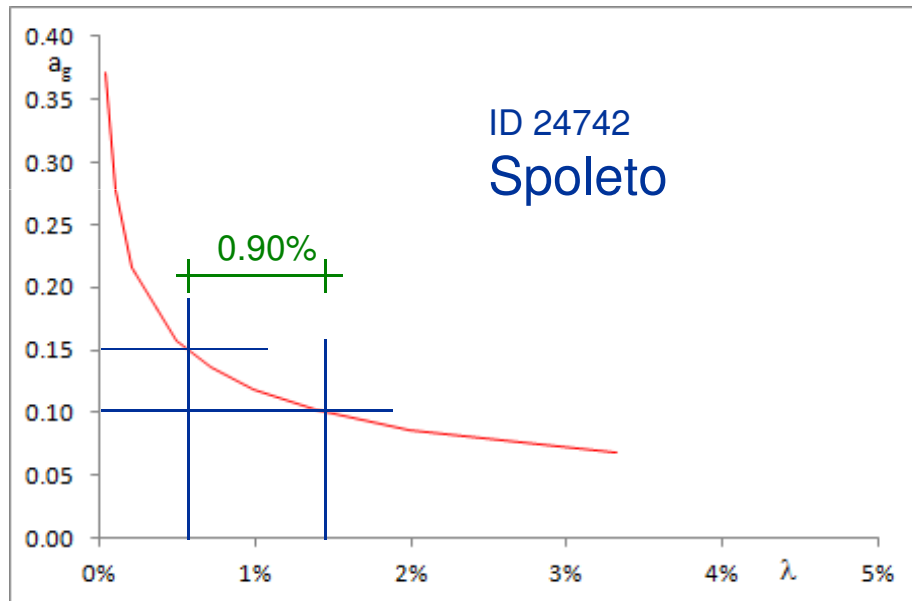




# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

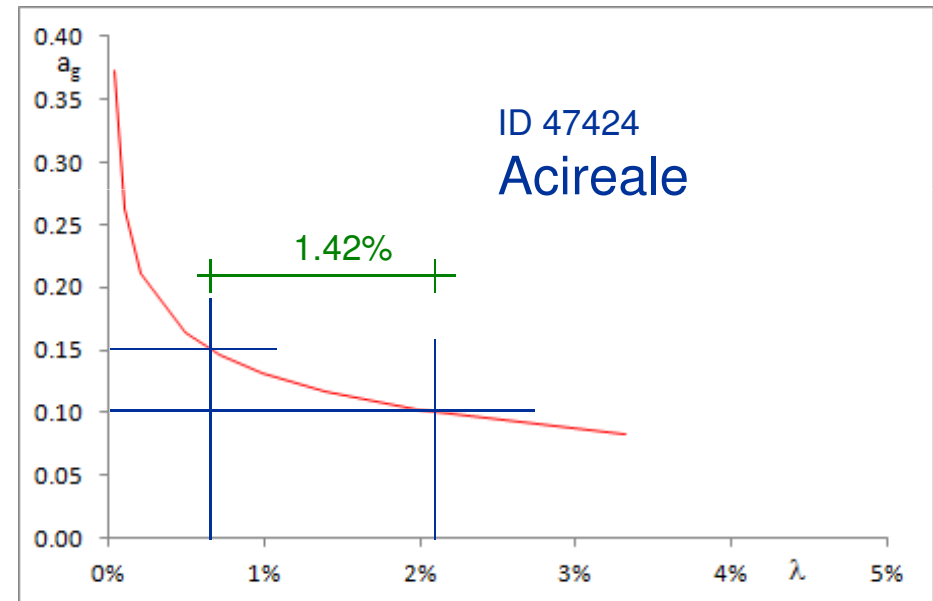
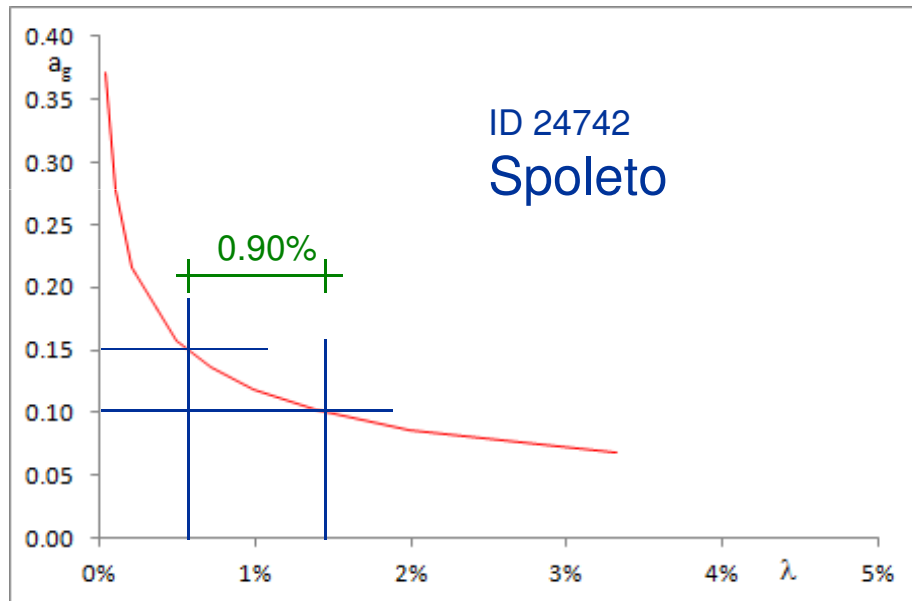
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - A Spoleto ho 0.90 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità tra 0.10 g e 0.15 g



# Accelerazione

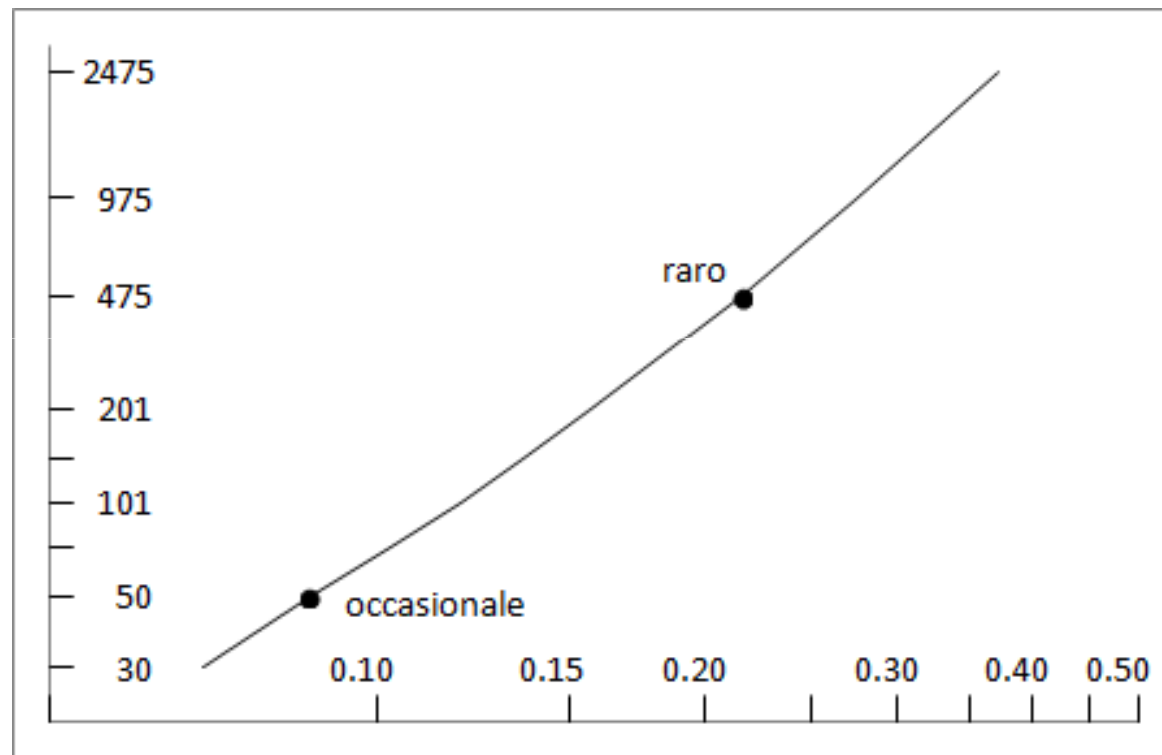
## e possibilità media di occorrenza

- 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



# Accelerazione e periodo di ritorno

- Si può diagrammare il periodo di ritorno in funzione dell'accelerazione, usando per entrambi una scala logaritmica

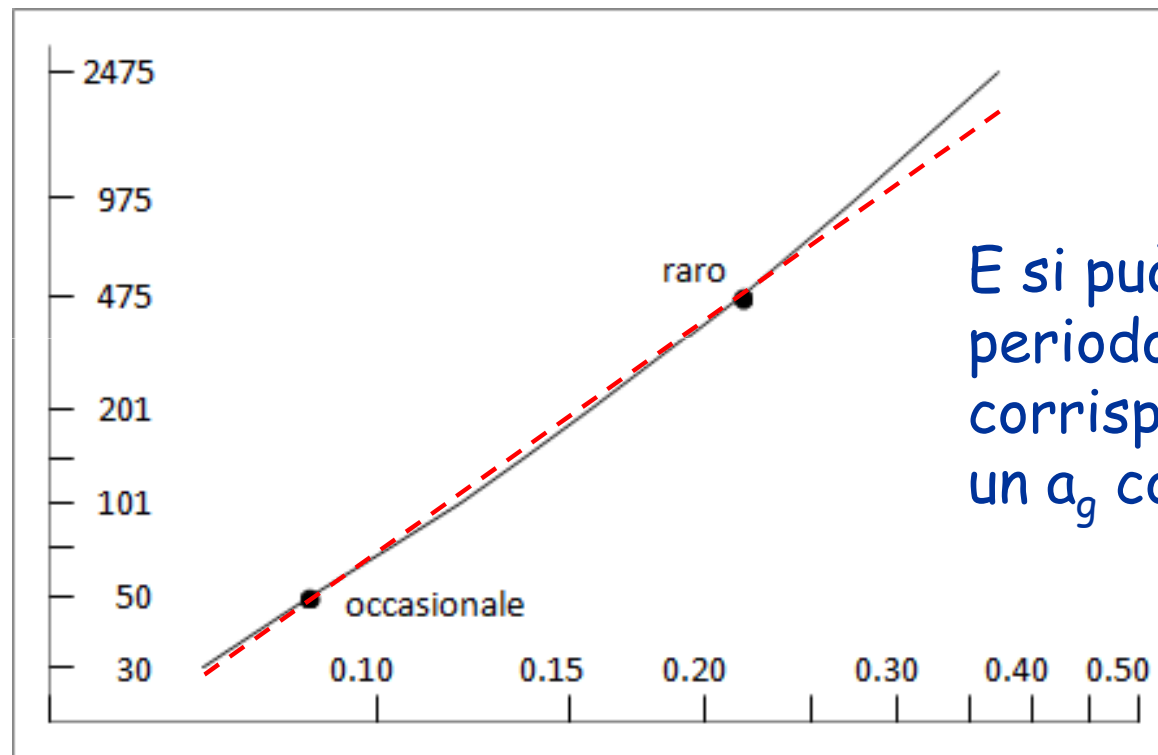


# Accelerazione e periodo di ritorno

- L'andamento è quasi lineare. La pendenza  $\eta$  può essere calcolata come

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

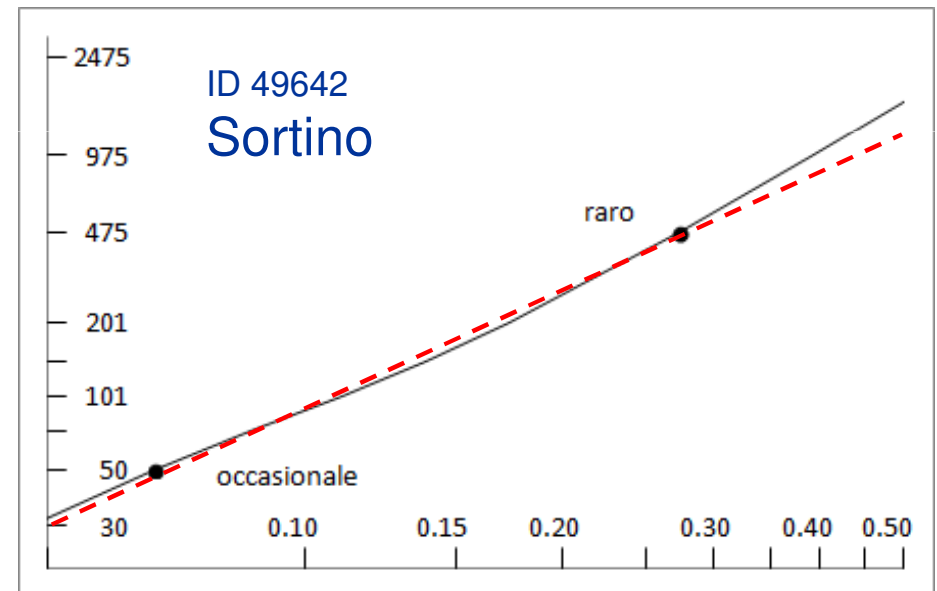
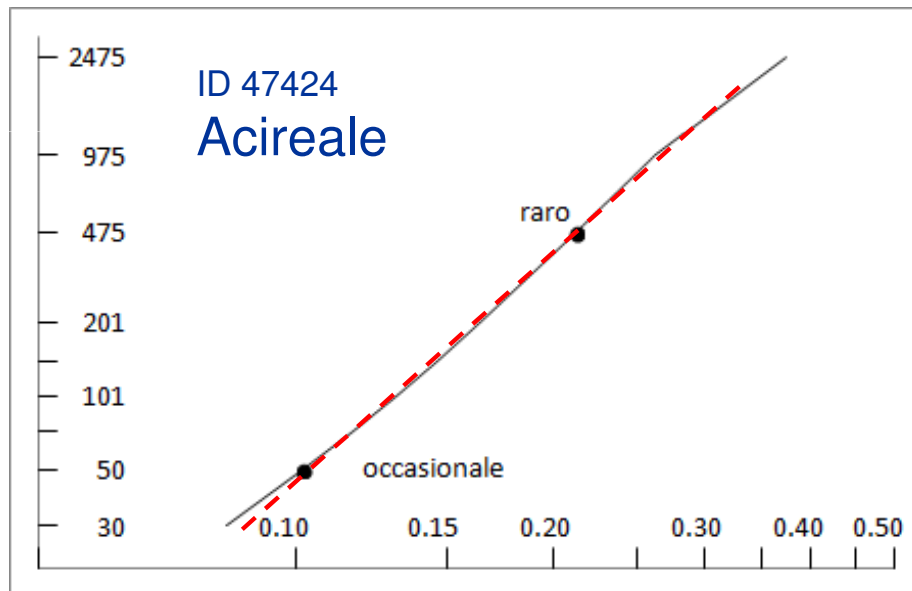
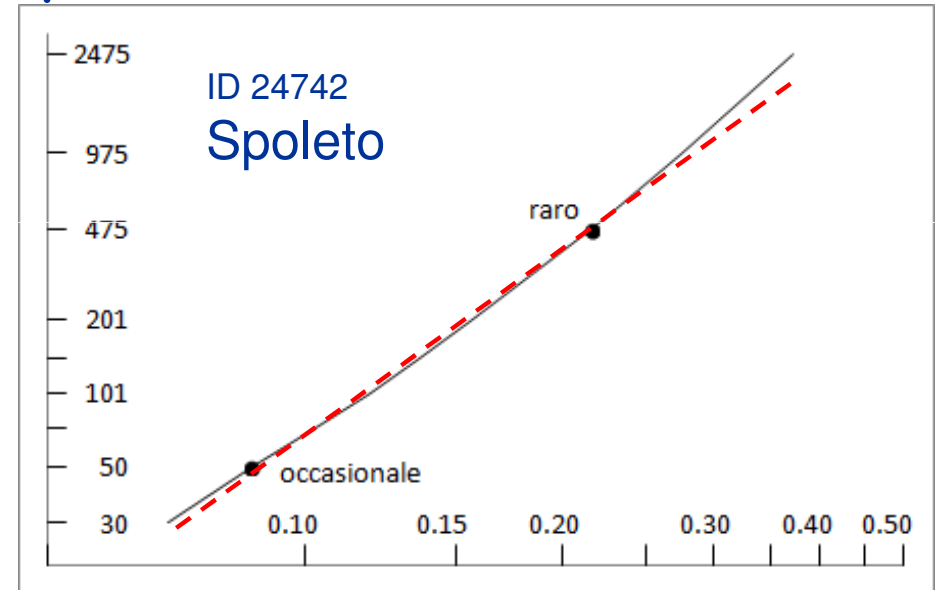
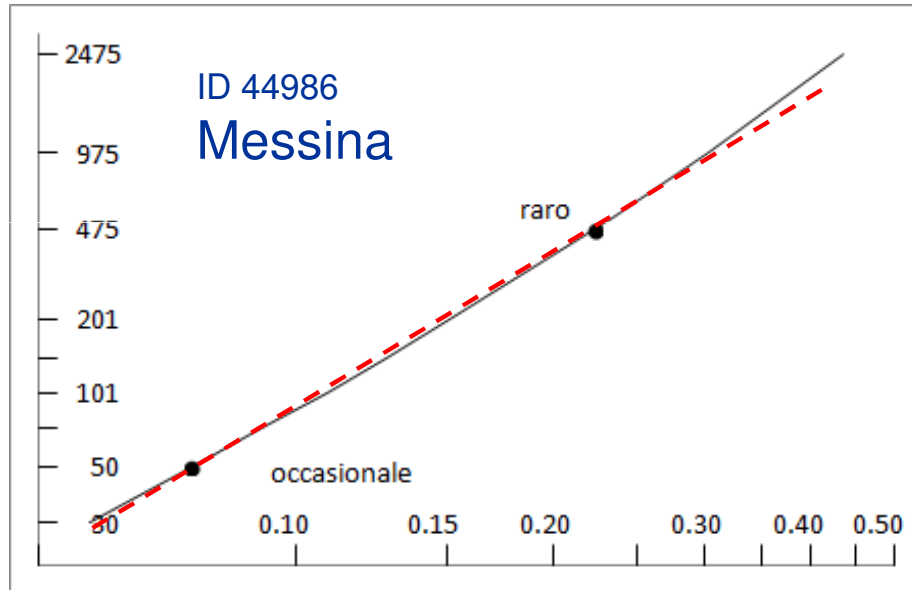
Avendo più punti si può calcolare la pendenza tratto per tratto, ottenendo esponenti leggermente diversi



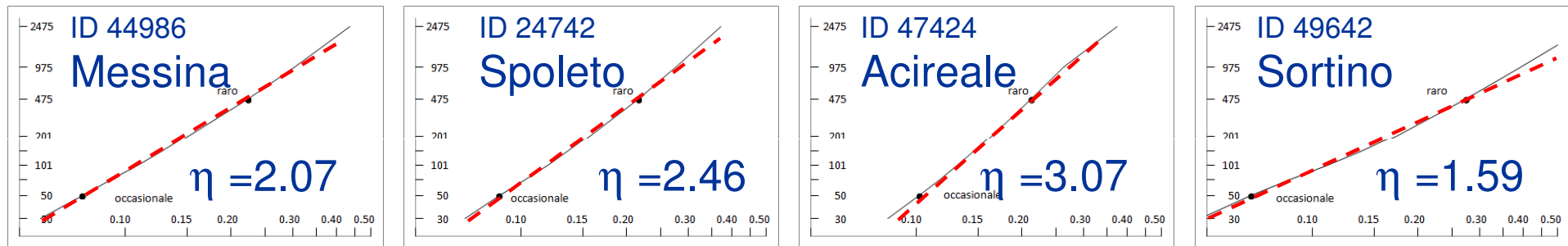
E si può calcolare il periodo di ritorno corrispondente ad un  $a_g$  con

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

# 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  $\eta$  consiste nel far riferimento ai dati del sito

# Accelerazione e periodo di ritorno

## SLV e SLD

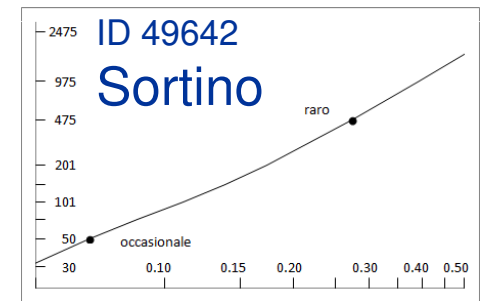
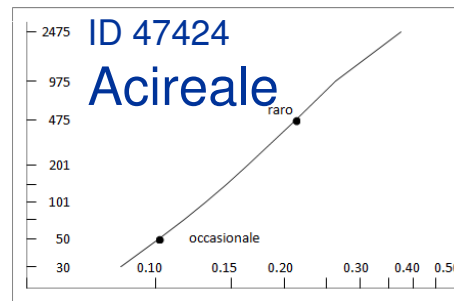
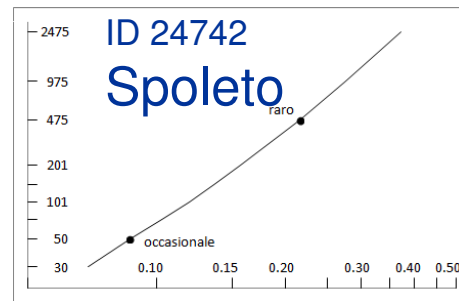
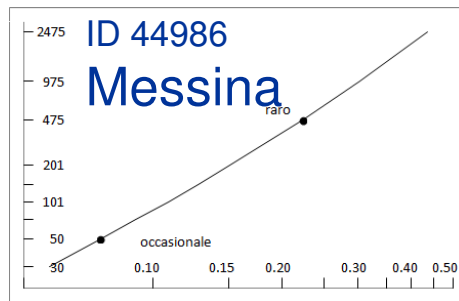
Il rapporto tra le ordinate spettrali di SLV e SLD:

- in una impostazione tradizionale (usata da EC8) è costante e pari a 2.5
- nell'impostazione della normativa italiana, varia da sito a sito
- È opportuno conoscere quale sia il rapporto tra le ordinate spettrali di SLV e SLD nel proprio sito (sia come PGA su roccia che per il periodo fondamentale della struttura)

# Accelerazione e periodo di ritorno

## SLV e SLD

### Esempio - PGA su roccia



	Messina	Spoleto	Acireale	Sortino
PGA - SLV	0.224 g	0.216 g	0.212 g	0.273 g
PGA - SLD	0.075 g	0.087 g	0.102 g	0.067 g
rapporto	2.96	2.49	2.08	4.10



# Confronto tra spettri al variare del sito

