PROGETTO DI EDIFICI ANTISISMICI IN CEMENTO ARMATO

Ascoli Piceno, 17-18 maggio 2019

02 – Pericolosità sismica e spettri di risposta

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Corso organizzato da: FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI ASCOLI PICENO

Pericolosità sismica:

quali terremoti ci aspettiamo in 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

Fine ‘700 ed ‘800

- **Norme che fornivano prescrizioni costruttive e limitazioni all’altezza degli edifici**

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

1909

Prima norma sismica moderna

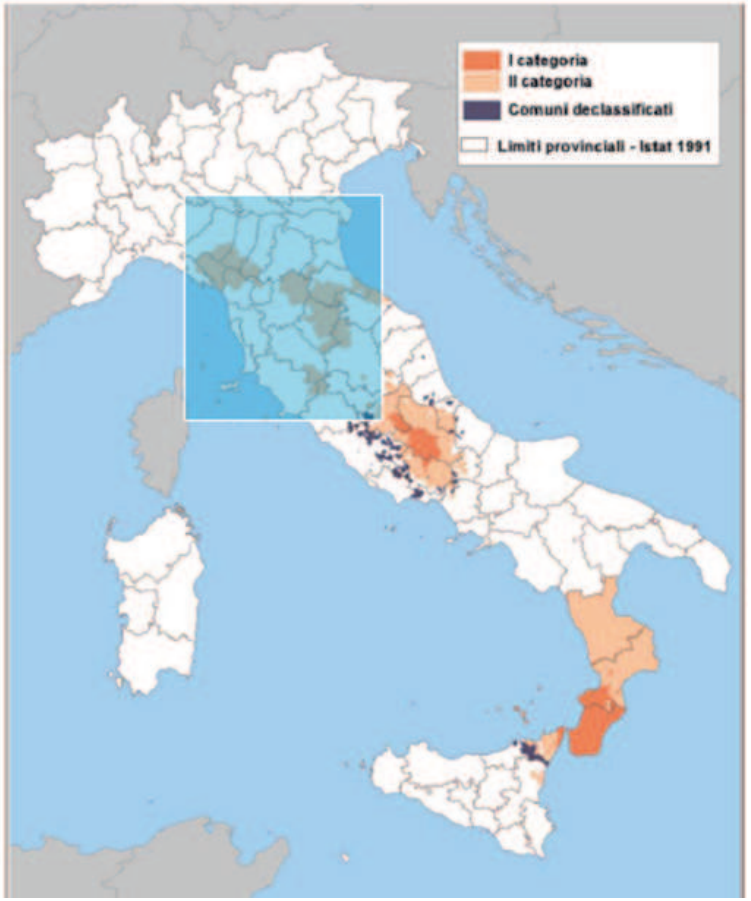
Terremoto: **Messina (1908)**
80000 morti e 600 miliardi di lire (di allora) di danni

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"

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

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

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

1930-1935

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

R.D. 25 marzo 1935, n. 640

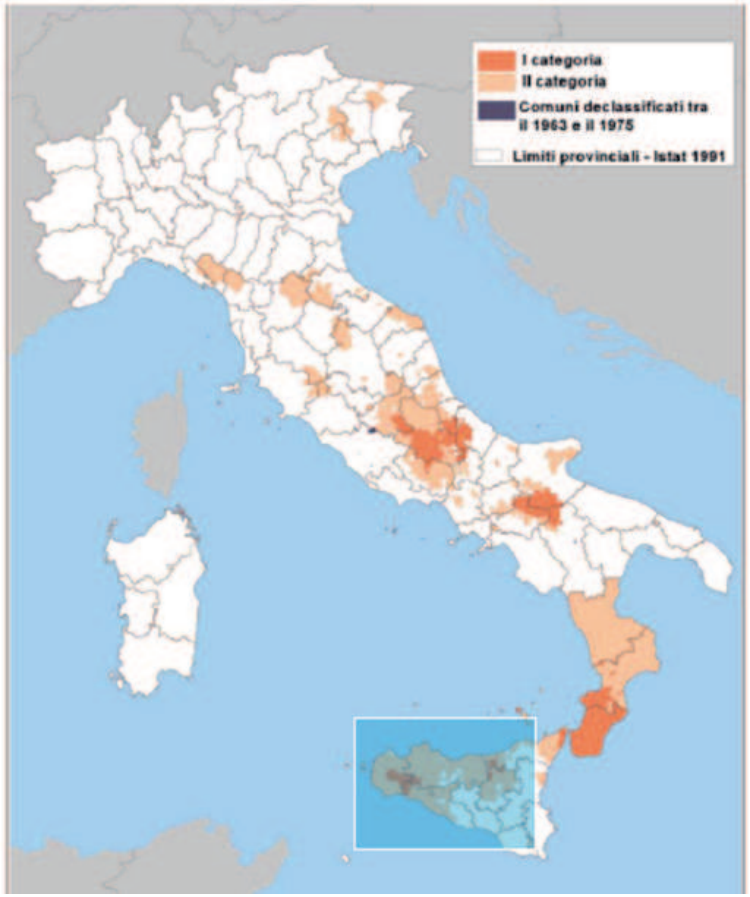
Impone azioni di entità analoga a quelle utilizzate fino a fine XX secolo (ma con accelerazione uguale a tutti i piani)

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

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

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

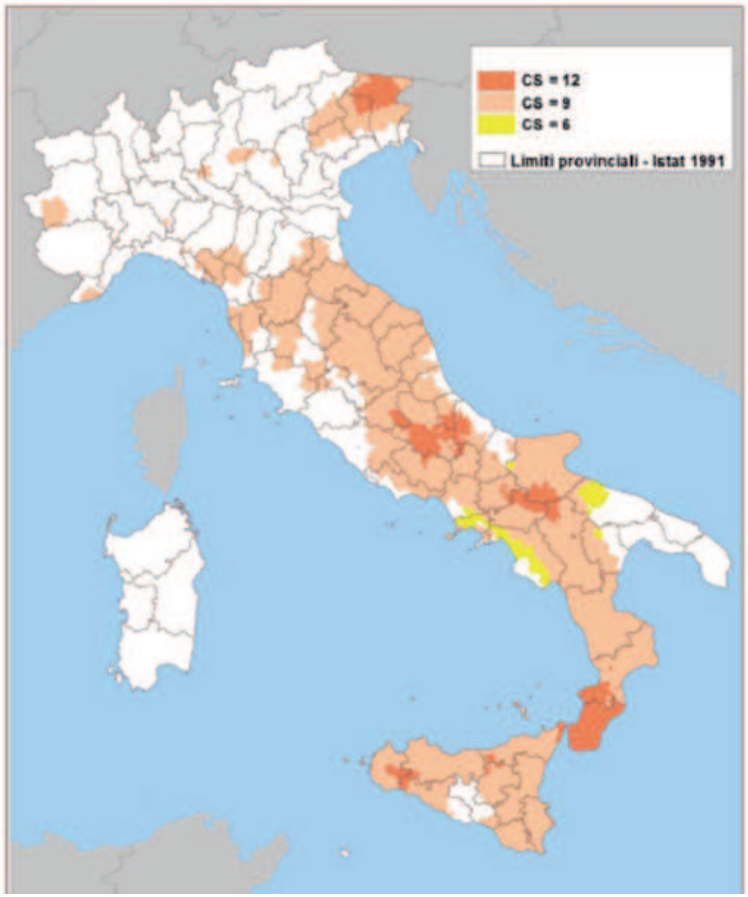
Introduce un "coefficiente di struttura"

Consente l'analisi dinamica (modale)

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

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

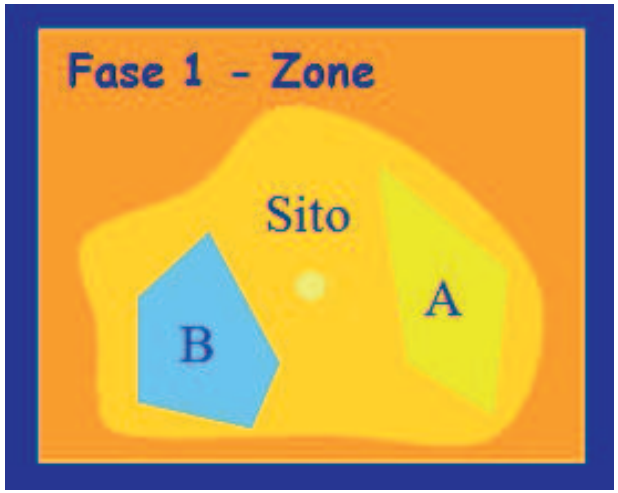
D.M. 2 luglio 1981, n. 593

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

Introduce il calcolo anche per gli edifici in muratura

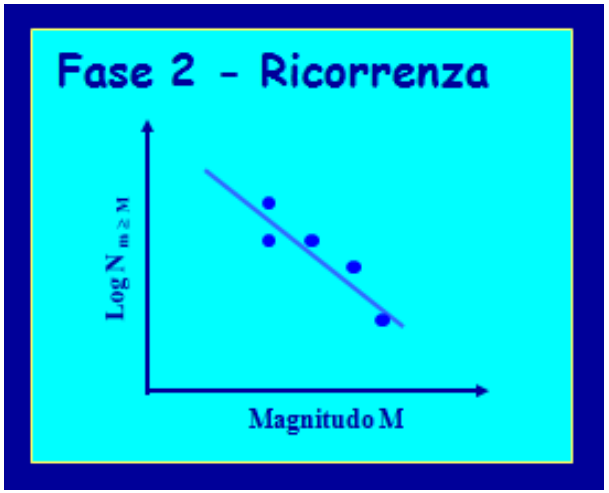
Dopo il terremoto del Friuli (1976) parte il Progetto Finalizzato Geodinamica (CNR)

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

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



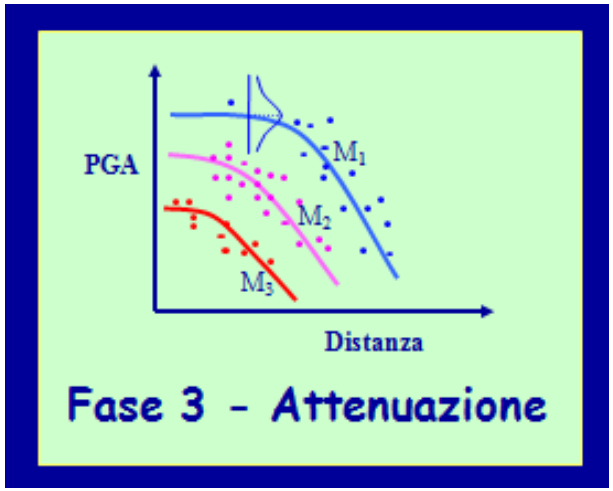
Partendo dallo studio geologico, dall'individuazione delle faglie, dalla ricorrenza degli eventi sismici e dalla attenuazione delle onde sismiche con la distanza si valuta la probabilità di avere assegnate accelerazioni in ciascun sito

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

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

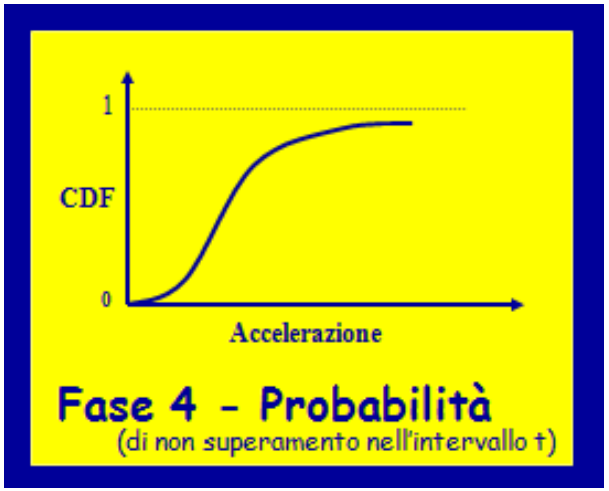
Partendo dallo studio geologico, dall'individuazione delle faglie, dalla ricorrenza degli eventi sismici e dalla attenuazione delle onde sismiche con la distanza si valuta la probabilità di avere assegnate accelerazioni in ciascun sito



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

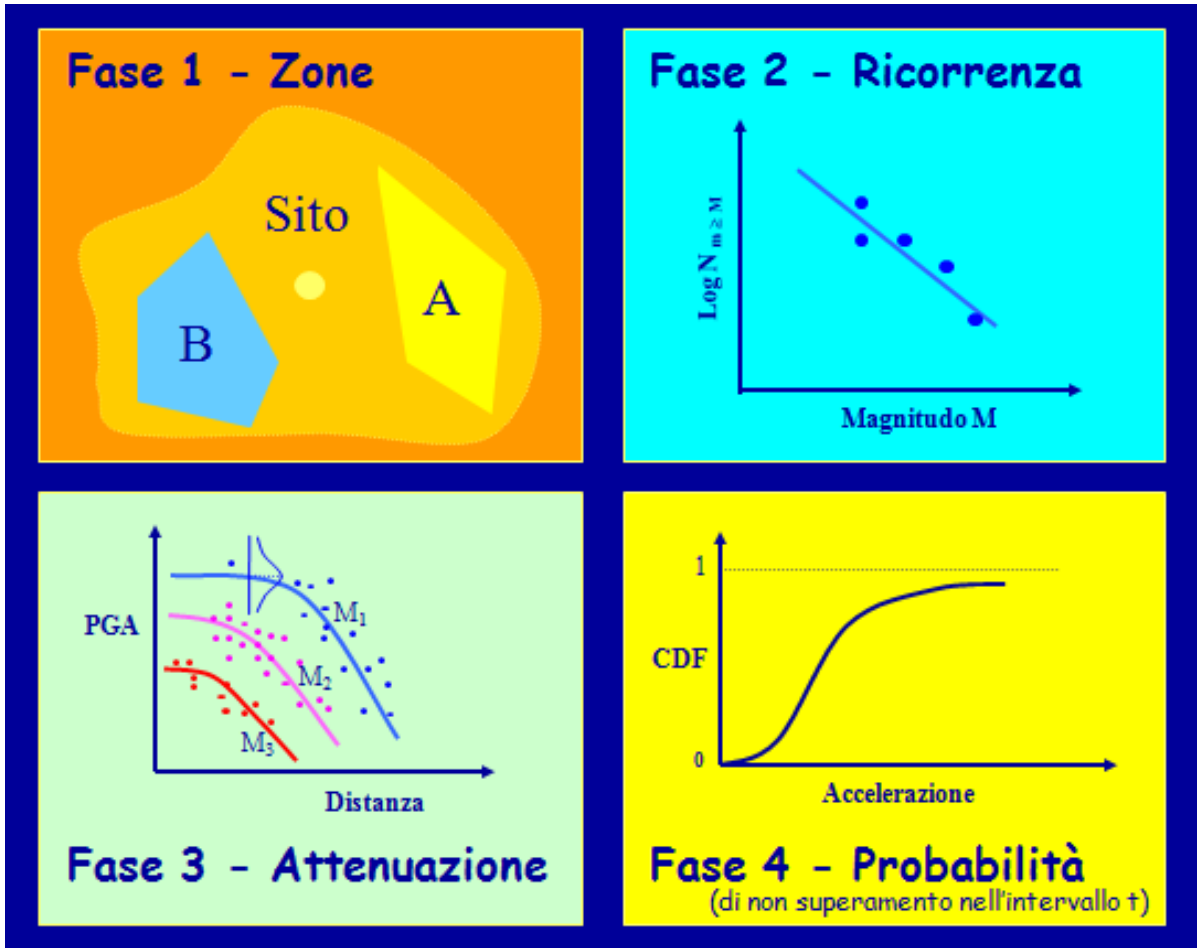
Valutazione della probabilità di avere assegnate accelerazioni nel sito in esame

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



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

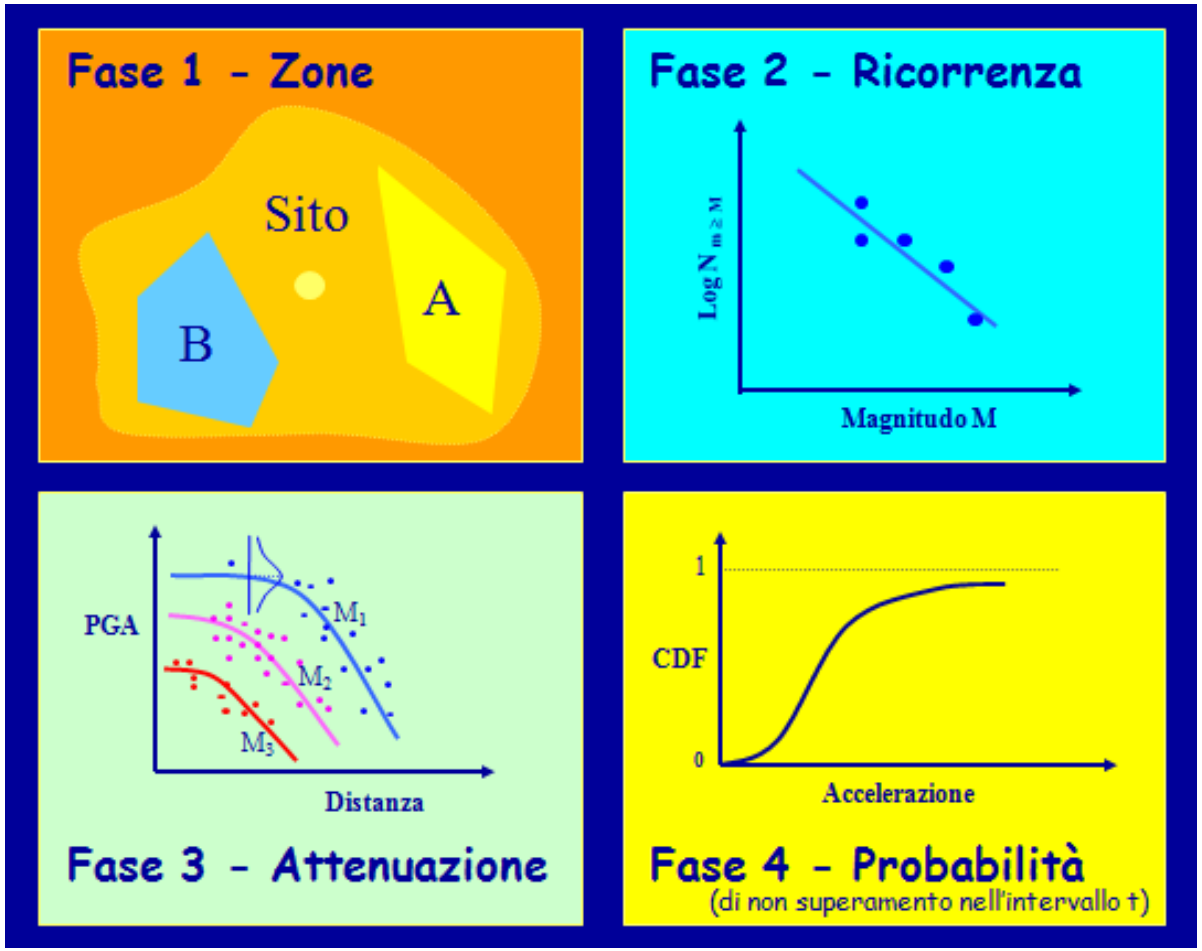


FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

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)

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



ACCELERAZIONE MASSIMA IN UN SITO

- Gli studi svolti consentono di valutare quale sarà l'accelerazione massima che si può avere in un sito in un assegnato intervallo di tempo
- I risultati non sono deterministici, ma devono essere analizzati in maniera probabilistica

- I valori sono stati ottenuti dal Progetto Finalizzato Geodinamica e sono riportati nel sito INGV
- Sono riportati per oltre 10000 siti il valore mediano (frattile 50%) 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

- **Ad esempio per Ascoli Piceno per un intervallo di tempo pari a 50 anni si ha:**
  - Valore mediano (frattile 50%) $a_g = 0.0724$ g
  - Frattile 16% $a_g = 0.0550$ g
  - Frattile 84% $a_g = 0.0769$ g

per un intervallo di tempo pari a 475 anni si ha:

- Valore mediano (frattile 50%) $a_g = 0.1792$ g
- Frattile 16% $a_g = 0.1400$ g
- Frattile 84% $a_g = 0.1976$ g

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

- **Si parla di di "accelerazione massima a_g in un assegnato intervallo di tempo" T**
- **Si intende quindi che, mediamente, quel valore di a_g verrà raggiunto (o superato) ogni T anni**

- **Comunemente 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

- **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)**
- **La possibilità media di occorrenza dell'evento λ_s è l'inverso del periodo di ritorno T_r**

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

- **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**

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

- **Viceversa, la relazione tra T_R e P_{VR} è**

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

Esempio:
Probabilità di superamento del 10% in 50 anni

Il periodo di ritorno è:

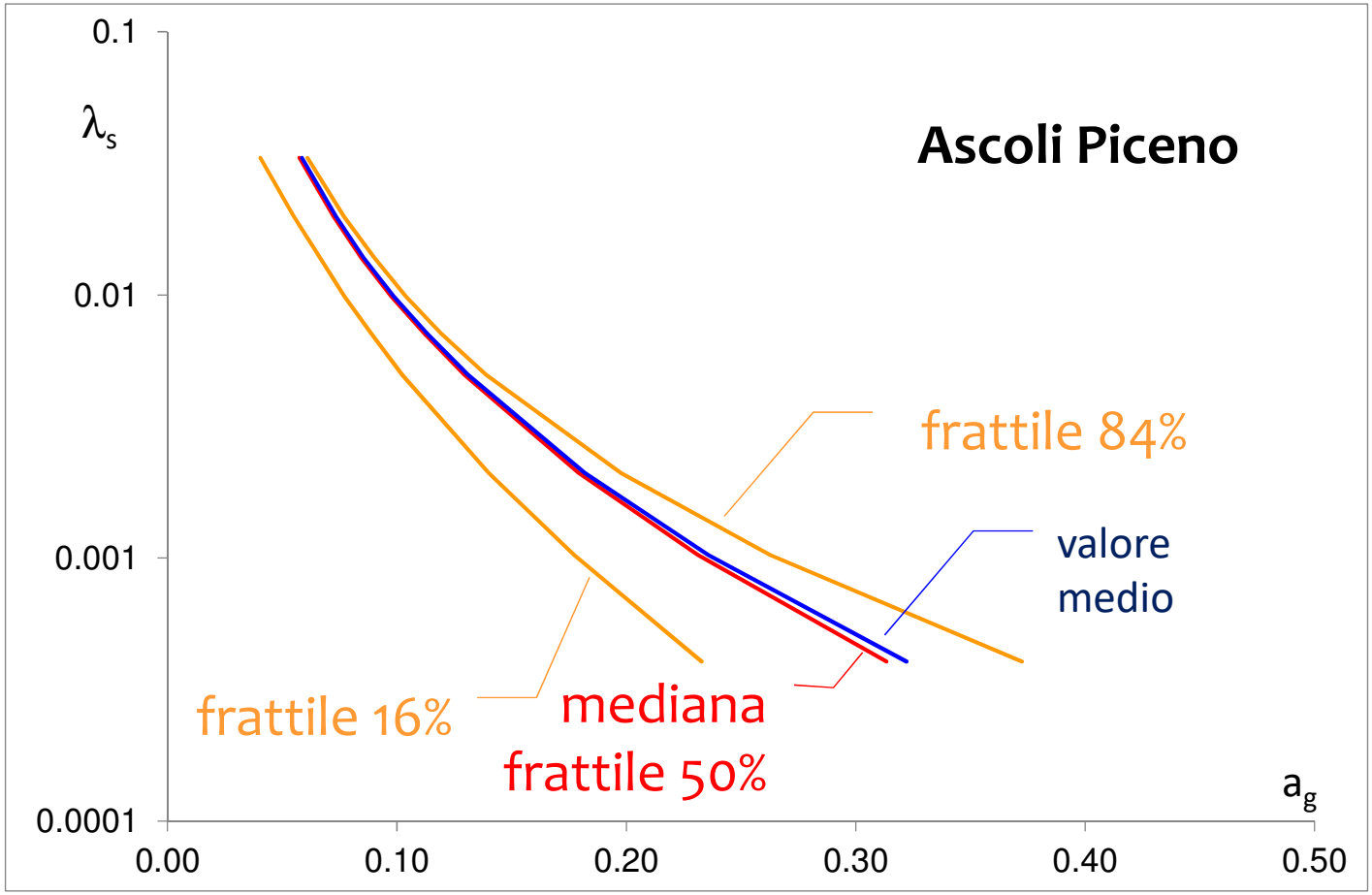
$$T_R = -\frac{50}{\ln(1 - 0.10)} = 474.6 \cong 475 \text{ anni}$$

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

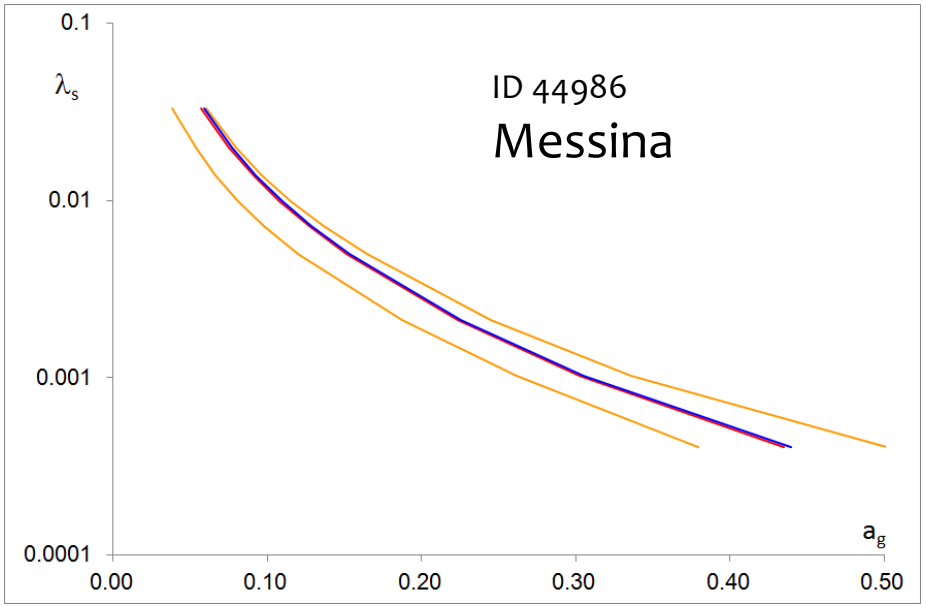
$P(V_R=50$ anni)	T_R (arrotondato)
81%	30
63%	50
50%	72
39%	101
30%	140
22%	201
10%	475
5%	975
2%	2475

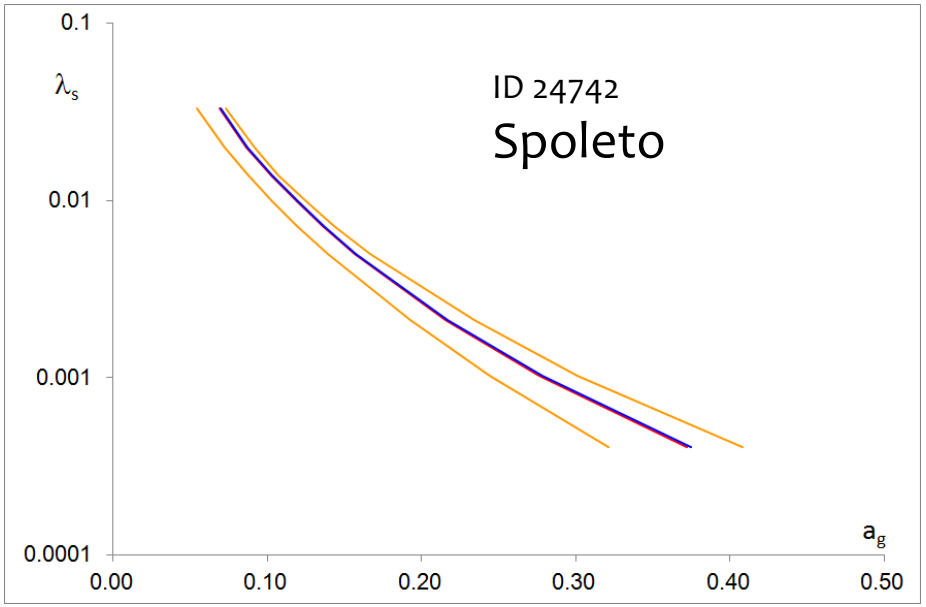
- Nel sito INGV sono riportati il valore mediano ed i frattili 16% e 84% di a_g
- I valori mediani di a_g sono riportati anche nelle NTC08, Tabella 1 e 2

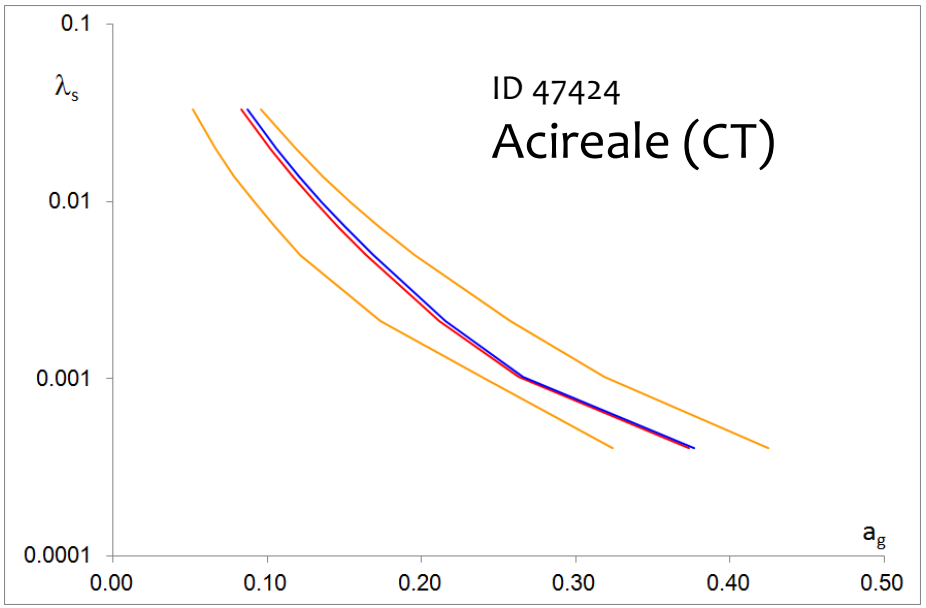
- **I valori relativi ad un sito possono essere diagrammati nella cosiddetta curva di pericolosità, che mostra la relazione tra la possibilità media di occorrenza $\lambda_s = 1/T_R$ e l'accelerazione a_g**

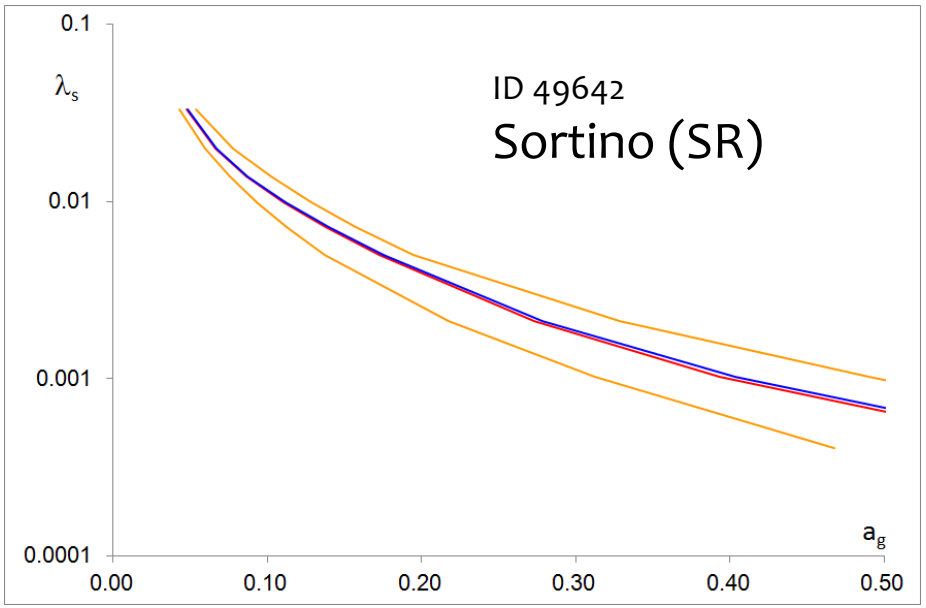


CURVA DI PERICOLOSITÀ - ESEMPI





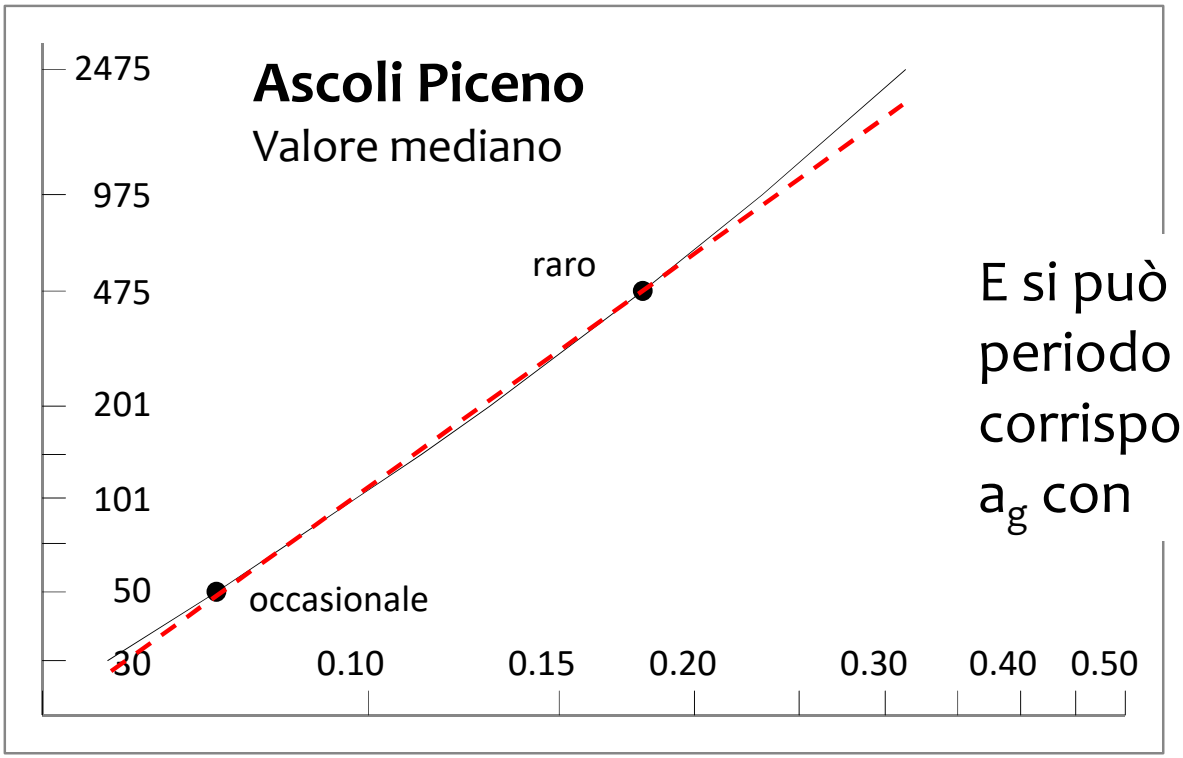




- **Gli stessi valori possono essere diagrammati riportando il periodo di ritorno in funzione dell'accelerazione, usando per entrambi una scala logaritmica**

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

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

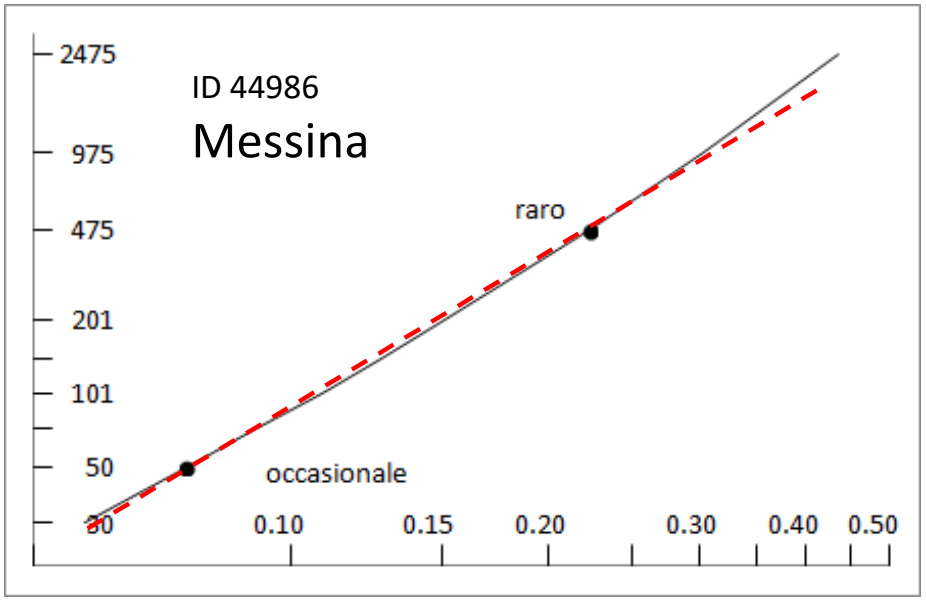


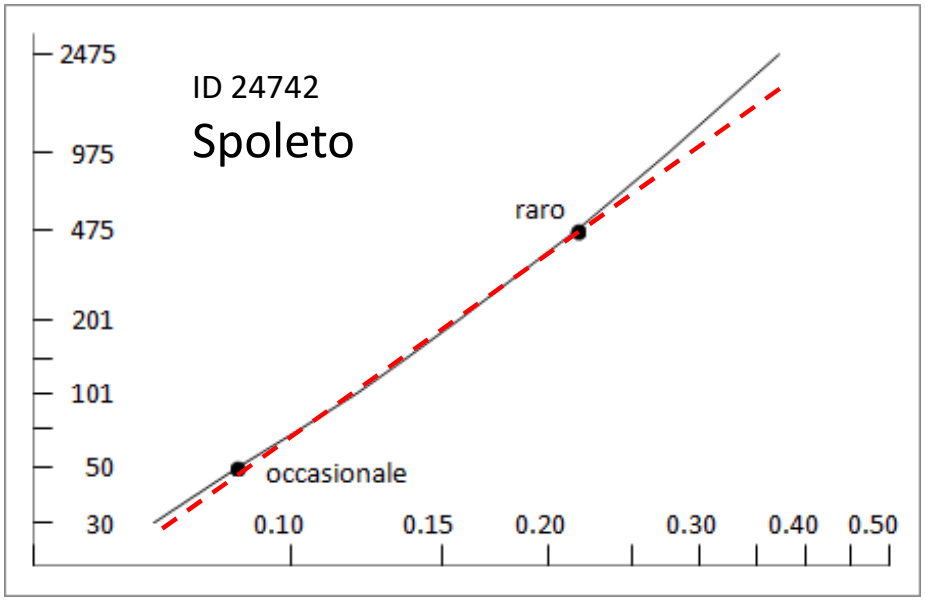
Avendo più punti si può calcolare la pendenza tratto per tratto, ottenendo esponenti leggermente diversi

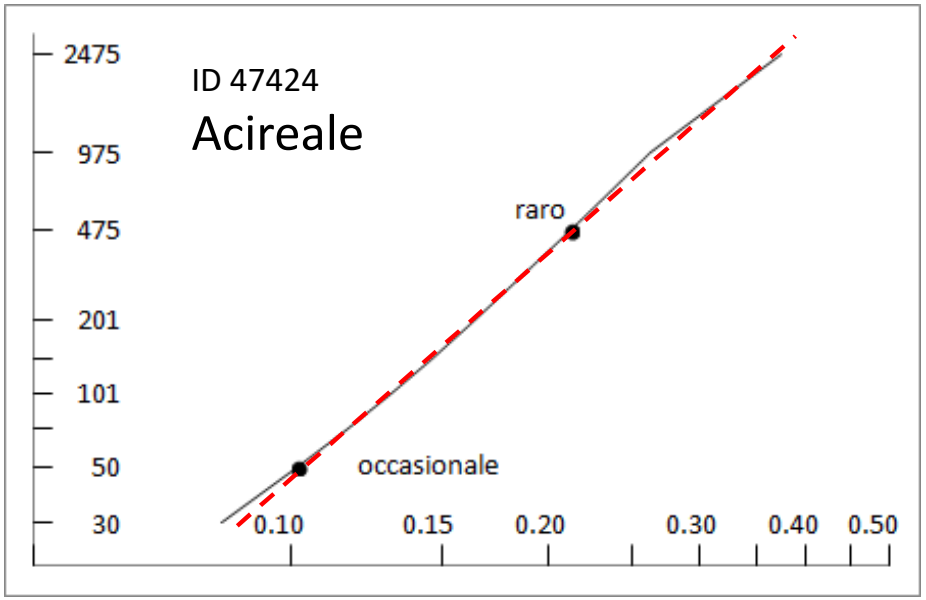
E si può calcolare il periodo di ritorno corrispondente ad un a_g con

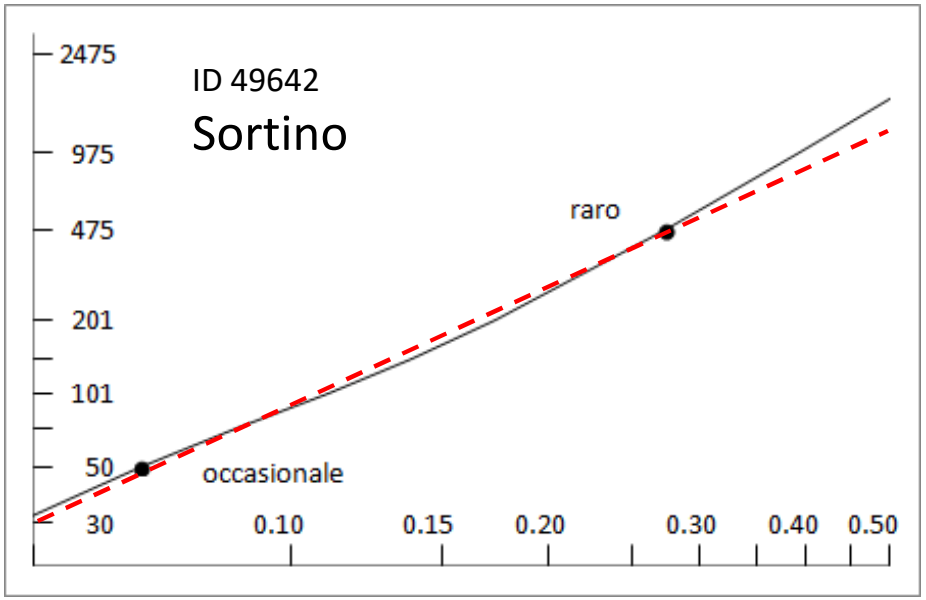
$$T_R = T_{R,2}\left(\frac{a_g}{a_{g,2}}\right)^{\eta}$$

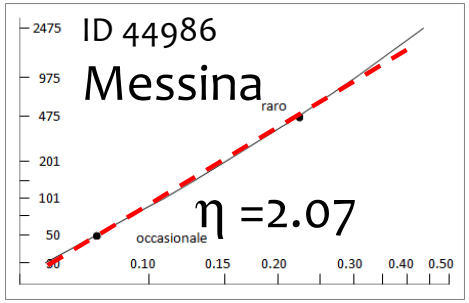
ACCELERAZIONE E PERIODO DI RITORNO

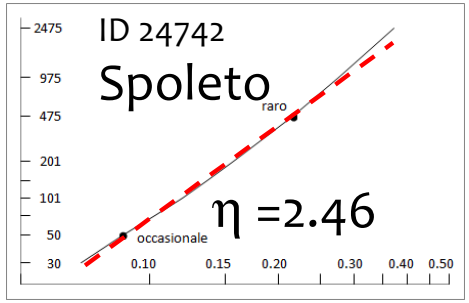


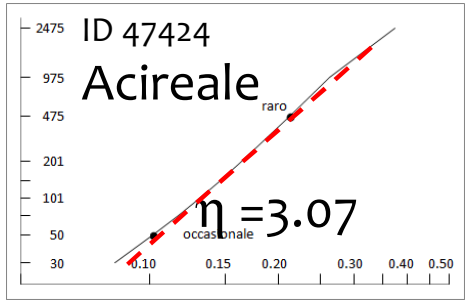


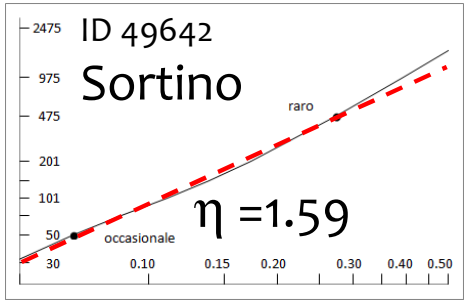












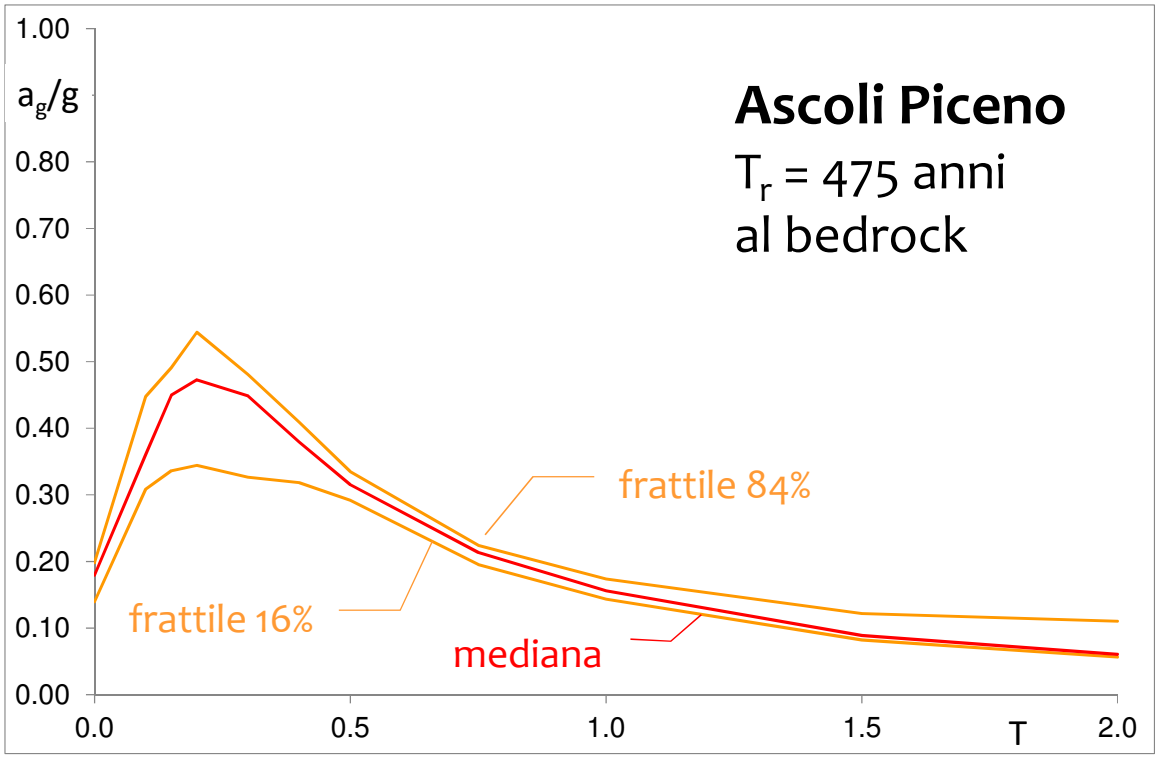
- **Una norma attuale (DM 28/2/17) suggerisce di usare sempre come esponente η = 1/0.41 = 2.44**
  oppure di differenziarlo in funzione di a_g
- **Con questa differenziazione si avrebbe nei primi tre casi η = 1/0.43 = 2.33, nel quarto η = 1/0.49 = 2.04**
- **È evidente che l'unico modo corretto per scegliere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

- **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

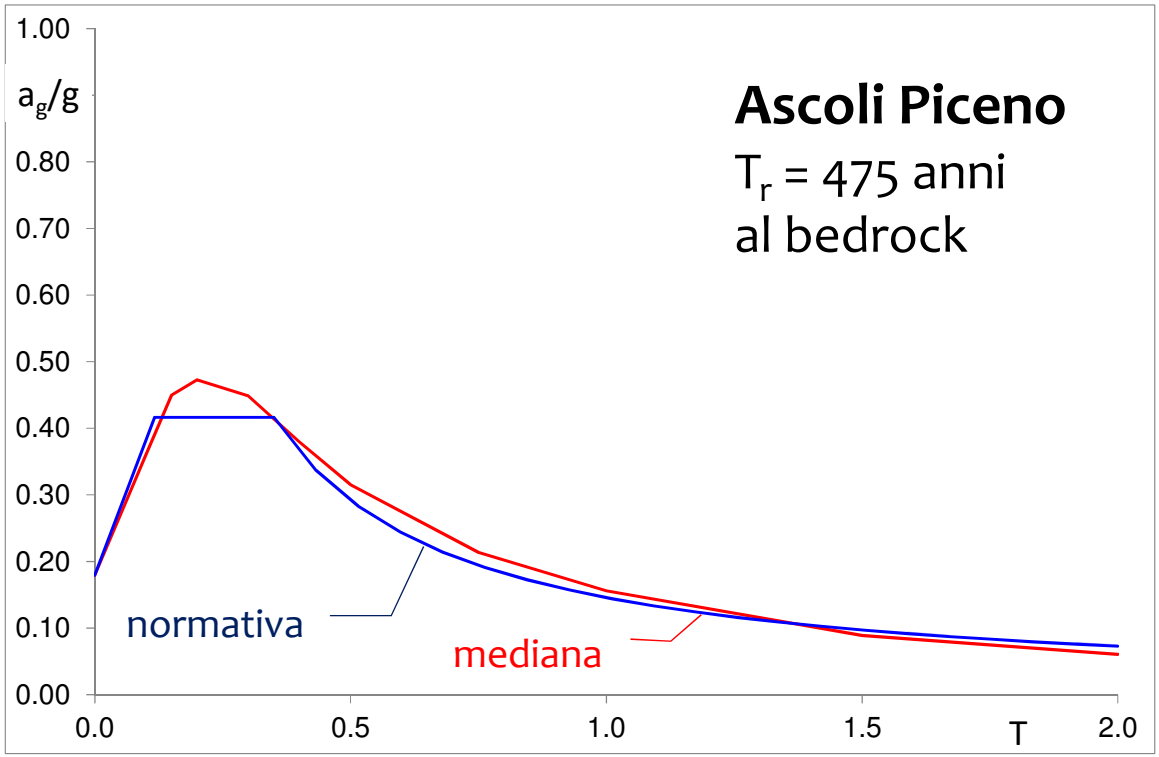
- **I dati di pericolosità sismica possono essere utilizzati:**
  - Seguendo un approccio semiprobabilistico, cioè operando in maniera apparentemente deterministica, ma usando come riferimento valori corrispondenti ad opportuni frattili della distribuzione probabilistica
  - Seguendo un approccio probabilistico, cioè tenendo espressamente conto nel calcolo della possibile distribuzione probabilistica delle accelerazioni sismiche

Spettri di risposta elastica per un assegnato sito

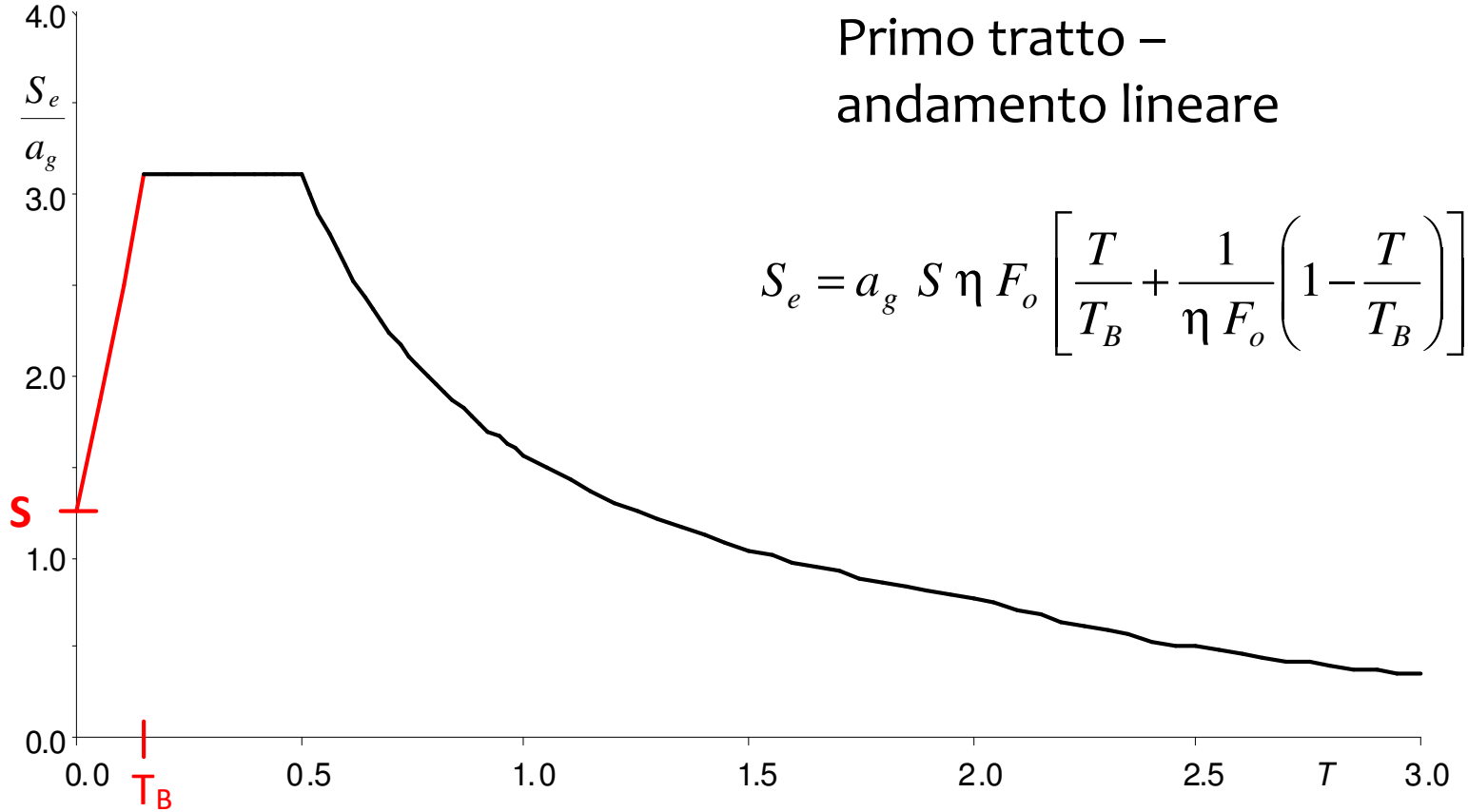
- **Spettro di risposta (elastico, in termini di accelerazione) è un diagramma che riporta il valore massimo dell'accelerazione che si avrà in un oscillatore semplice in funzione del suo periodo**
- **Le analisi svolte nell'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica hanno consentito di individuare, per ogni sito, gli spettri di risposta mediano e frattili 16%, 84% corrispondenti a vari periodi di ritorno**



- **Spettro di risposta (elastico, in termini di accelerazione) è un diagramma che riporta il valore massimo dell'accelerazione che si avrà in un oscillatore semplice in funzione del suo periodo**
- **La forma dello spettro mediano (linea rossa) è stata semplificata (linea blu) in modo da usare le stesse formule (con parametri diversi) per tutti i siti**



- **Forma generale degli spettri (e equazioni che li descrivono)**



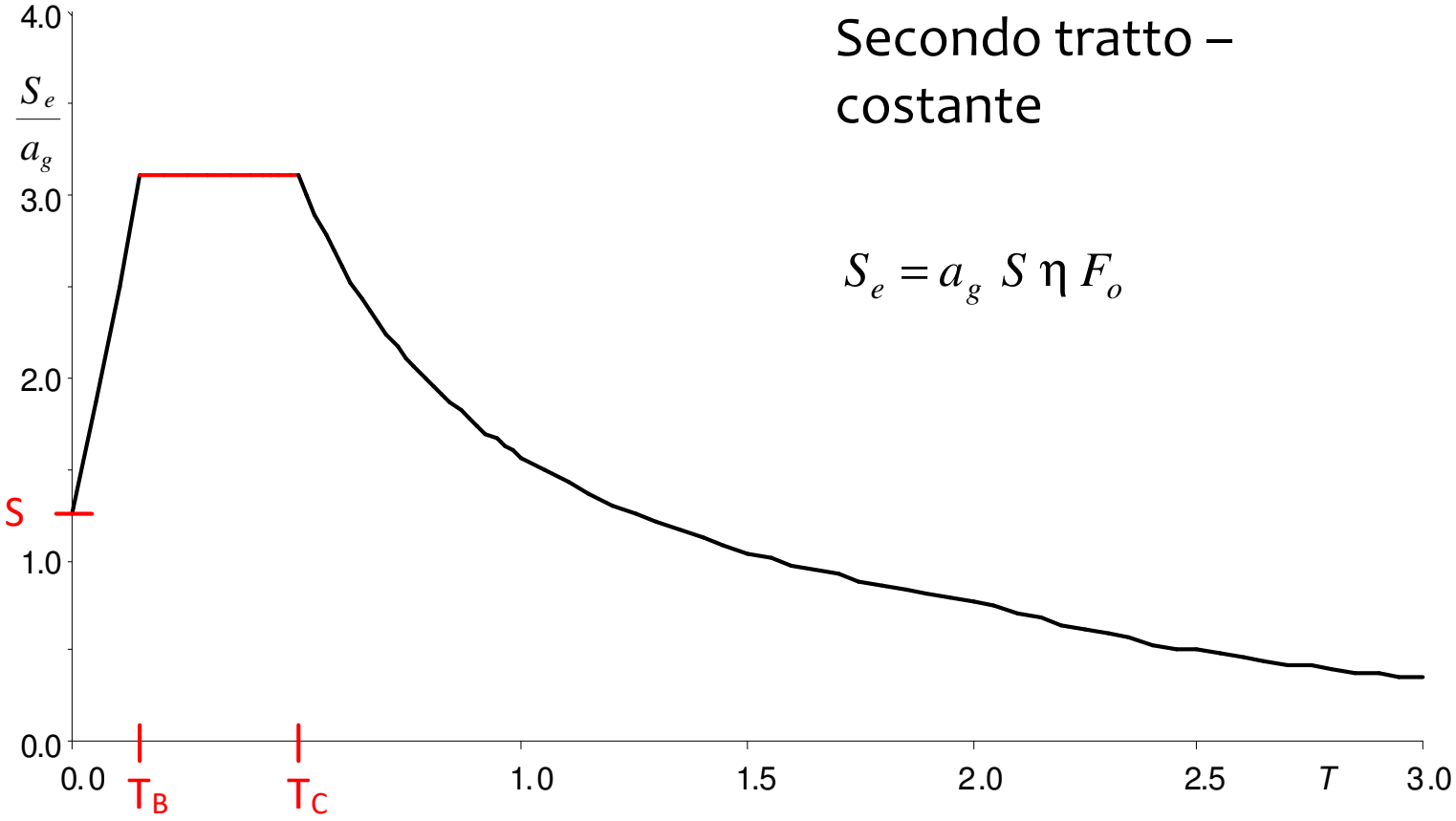
Primo tratto – andamento lineare

$$S_e = a_g \; S \, \eta \, F_o \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \, F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

Amplificazione, legata al tipo di terreno

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0.55$$

- **Forma generale degli spettri (e equazioni che li descrivono)**

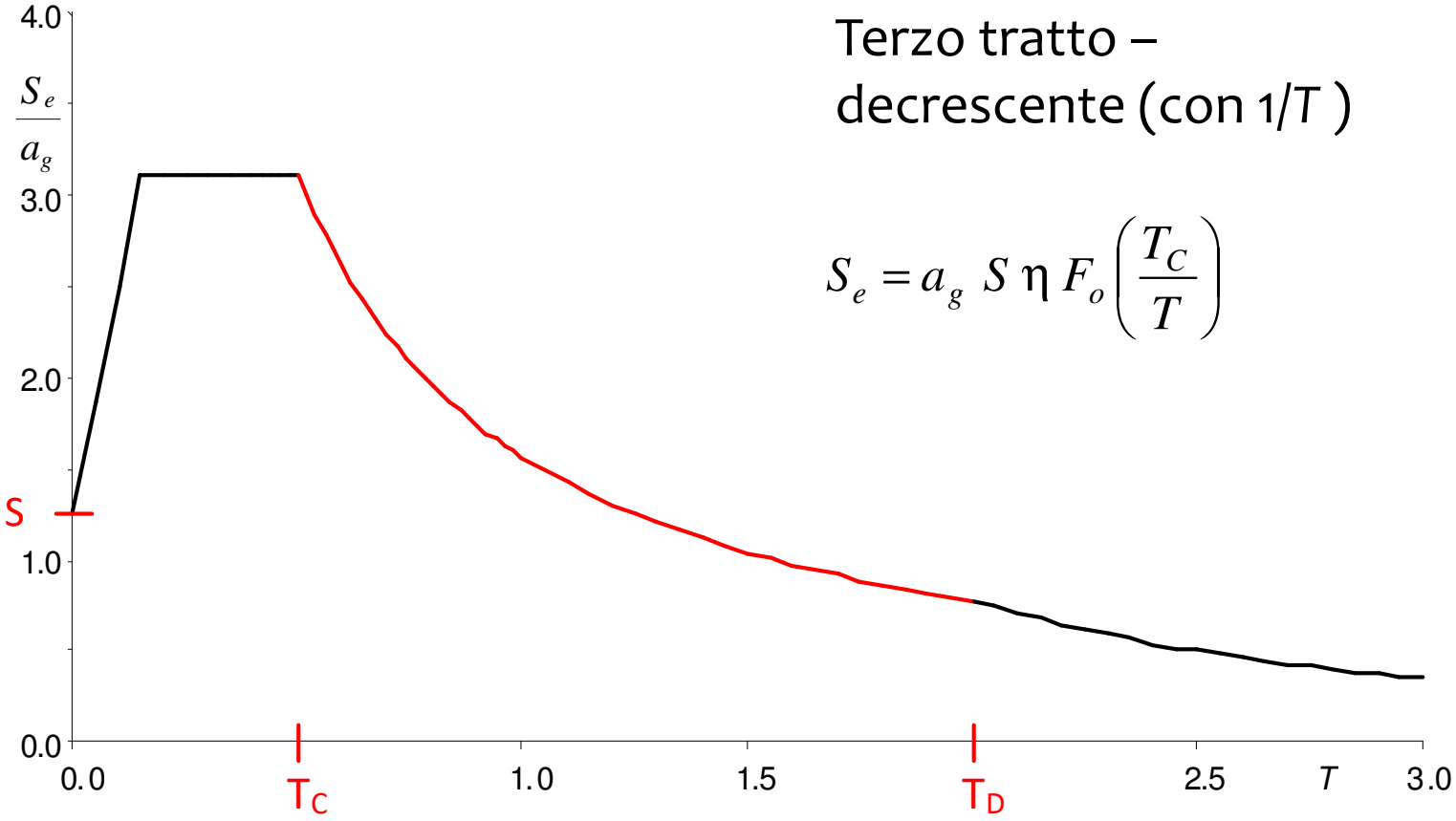


Secondo tratto – costante

$$S_e = a_g \, S \, \eta \, F_o$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0.55$$

- **Forma generale degli spettri (e equazioni che li descrivono)**

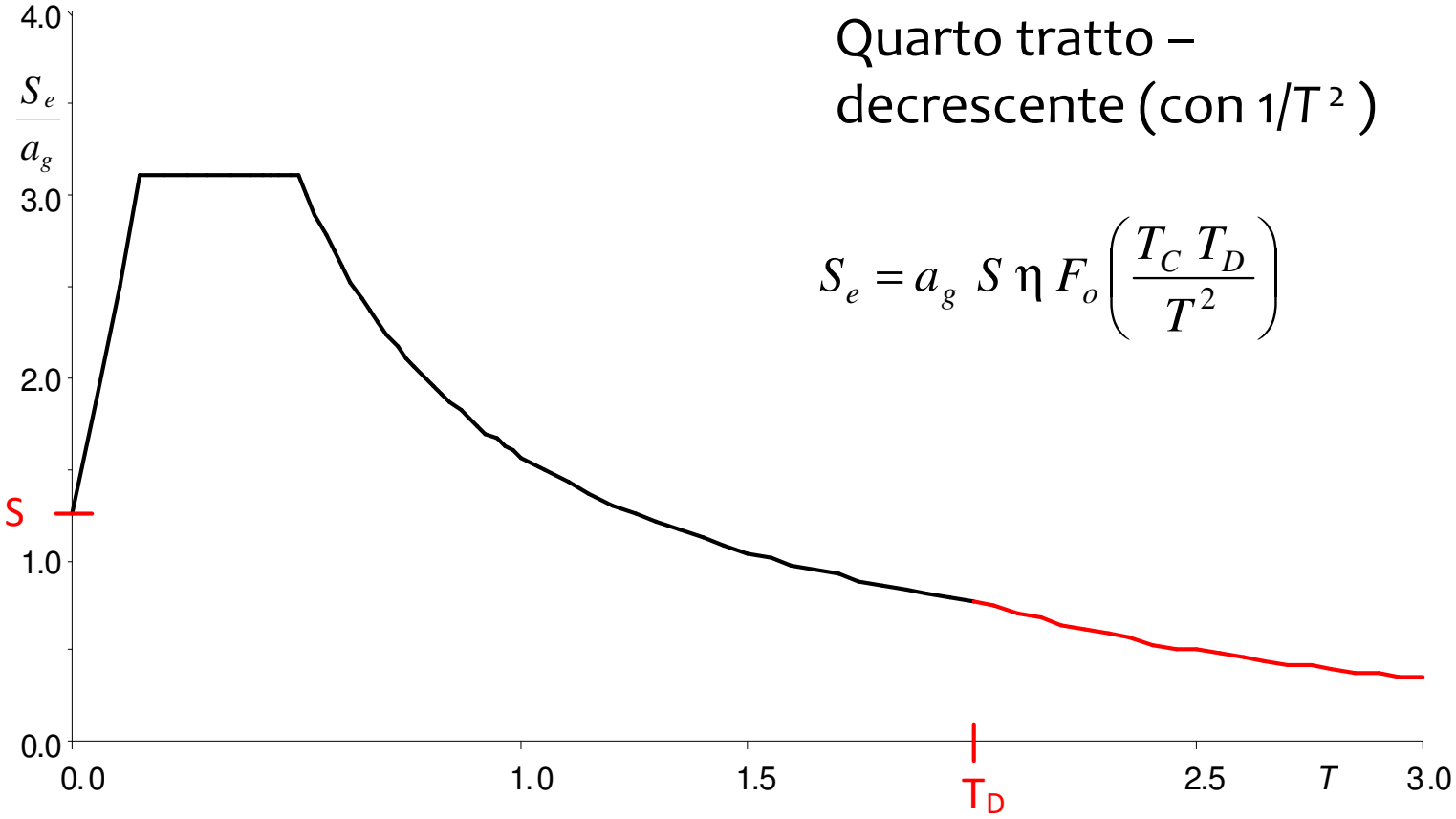


Terzo tratto – decrescente (con 1/*T*)

$$S_e = a_g \; S \; \eta \; F_o \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0.55$$

- **Forma generale degli spettri (e equazioni che li descrivono)**



Quarto tratto – decrescente (con $1/T^2$)

$$S_e = a_g \, S \, \eta \, F_o \left(\frac{T_C \, T_D}{T^2} \right)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0.55$$

- **Per definire uno spettro di risposta elastico occorre indicare i parametri**
  - a_g **accelerazione del terreno (su roccia)**
  - S **amplificazione dovuta al tipo di terreno**
  - T_B T_C T_D **periodi che separano i diversi tratti**
  - ξ **smorzamento della struttura**

S T_B T_C T_D si ricavano a partire dai tre parametri

$$a_g \quad F_o \quad T_C^*$$

che sono forniti dalla normativa (con riferimento al bedrock) per il sito e per il periodo di ritorno T_r

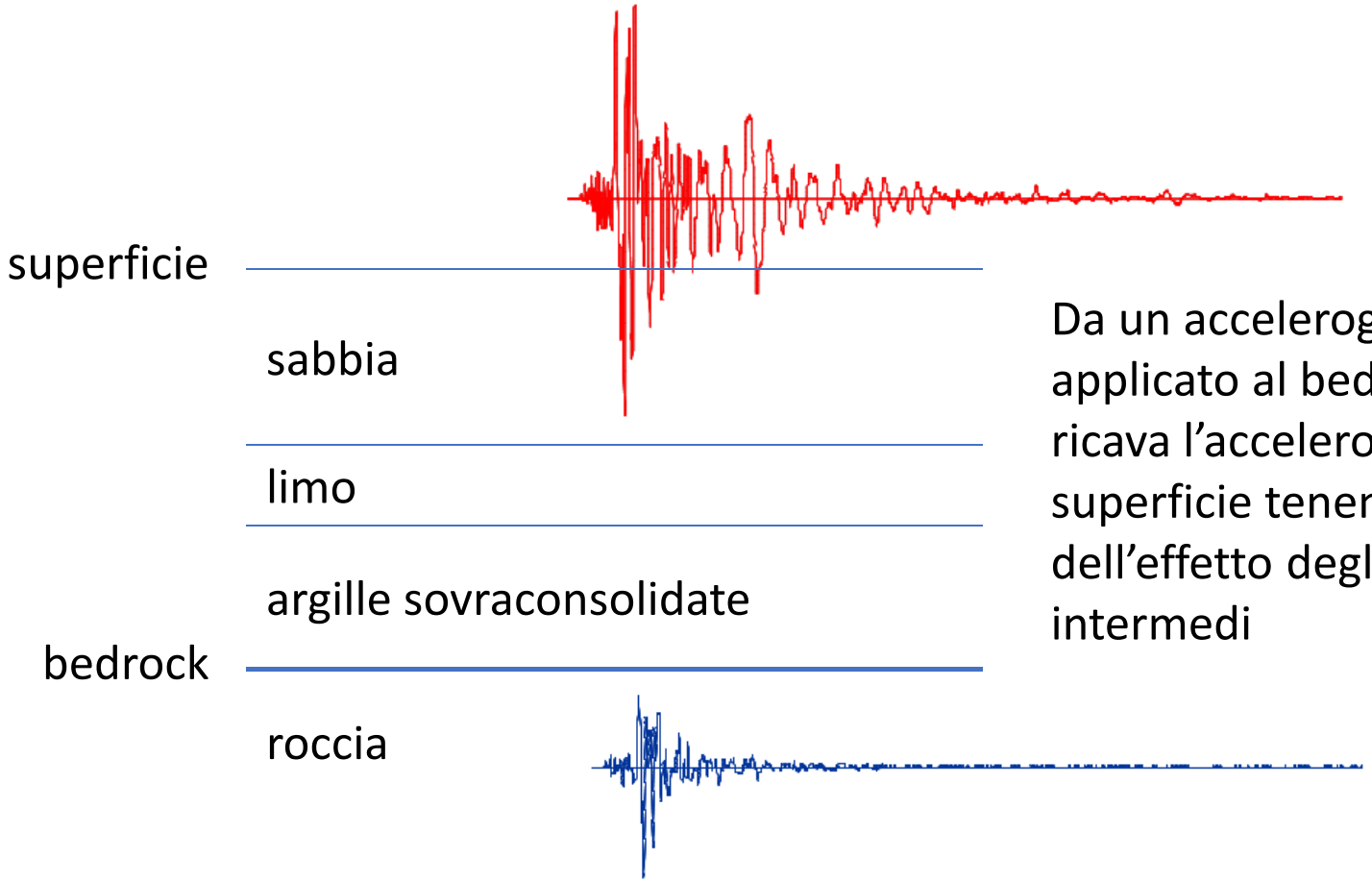
S T_B T_C T_D dipendono anche dalle caratteristiche del terreno

CARATTERISTICHE DEL SUOLO E SPETTRO DI RISPOSTA

- **Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi**
- **In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento**

NTC, punto 3.2.2

- **Risposta sismica locale**



Da un accelerogramma applicato al bedrock si ricava l'accelerogramma in superficie tenendo conto dell'effetto degli strati intermedi

- **Risposta sismica locale**

  Problemi:

  - **Quali accelerogrammi considerare (naturali, artificiali, con quali caratteristiche)?**
  - **Quanti accelerogrammi considerare?**
  - **Quanto è importante tener conto della variazione della stratigrafia da punto a punto?**
  - **Quanto è importante tenere conto della tridimensionalità del problema?**

… e inoltre:

- **Che senso ha la presenza di singoli picchi nello spettro di risposta che si ottiene?**
- **Bisogna usarla per avere maggiore cautela o la si può usare per risparmiare?**

- **Categorie di sottosuolo di riferimento**

  La normativa individua più tipologie di suolo, a ciascuna delle quali attribuisce opportune variazioni dello spettro rispetto a quello su roccia

  Classificazione in base a:
  - **Stratigrafia**
  - **Parametri meccanici del singolo strato (V_s, N_{SPT}, C_u)**

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

NTC08

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel § 7.11.3. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III)

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio (definita successivamente) entro i primi 30 m di profondità.

Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, la classificazione può essere effettuata in base ai valori di $N_{SPT,30}$ nei terreni prevalentemente a grana grossa e di $c_{u,30}$ nei terreni prevalentemente a grana fina.

NTC08, punto 3.2.2

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

NTC08

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel § 7.11.3. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III)

NTC18

Unico parametro da usare è la velocità delle onde di taglio V_S ma tali valori "sono ottenuti mediante specifiche prove ovvero, con giustificata motivazione …, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche"

NTC, punto 3.2.2

Confronto NTC08 – NTC18

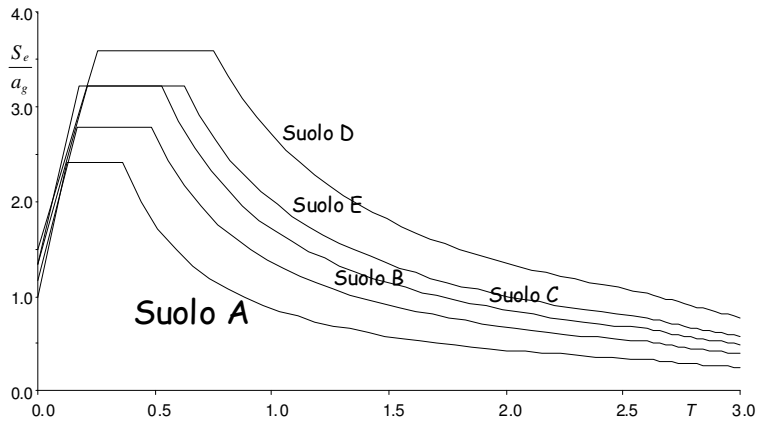
- **In NTC18 scompare nella definizione del suolo il riferimento diretto a N_{SPT} e c_u**
- **In NTC18 scompare la tabella 3.2.III che descriveva le categorie aggiuntive S1 e S2**
- **In NTC18 si parla di $V_{s,eq}$ valutata nella profondità H del substrato roccioso, ovvero con Vs ≥ 800 m/s (ma se H > 30 m si fa riferimento a 30 m)**

$V_{s,eq}$

Velocità media di propagazione delle onde di taglio negli H m superiori del suolo

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

NTC, punto 3.2.2



Suolo A

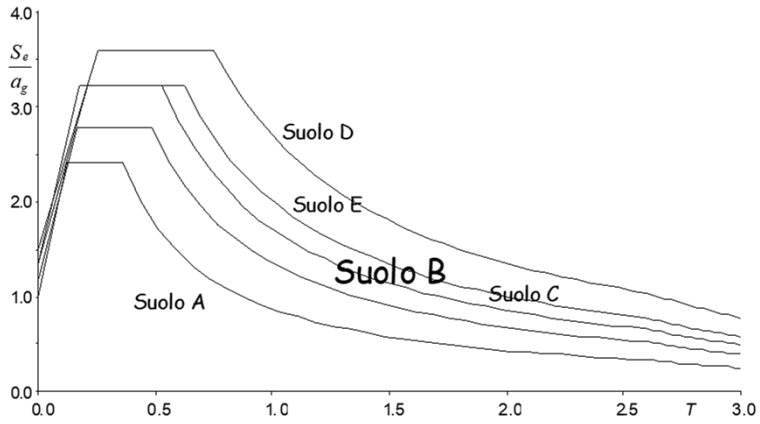
Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi

V_{S30} > 800 m/s

eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$S = 1$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.4$ s $T_D = 2.5$ s



Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$S = 1.20$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.5$ s

Suolo B

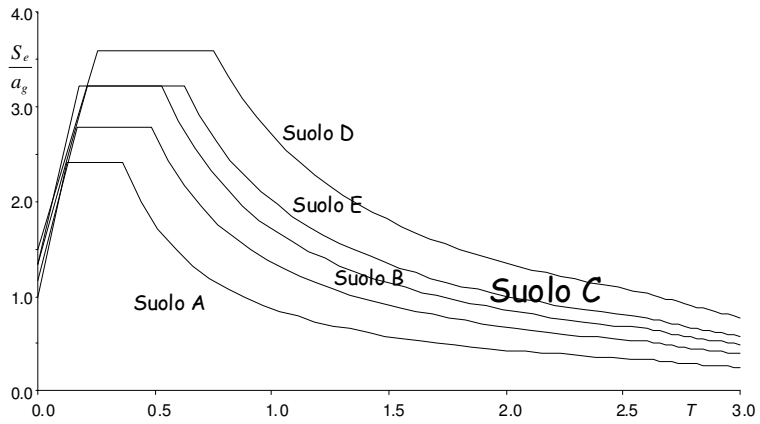
Rocce tenere, depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità

$360 \text{ m/s} < V_{S30} < 800 \text{ m/s}$

Per NTC08 anche:

Resistenza penetrometrica $N_{SPT} > 50$

Coesione non drenata
$c_u > 250$ kPa



Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$S = 1.30$ $T_B = 0.15$ s $T_C = 0.5$ s

Suolo C

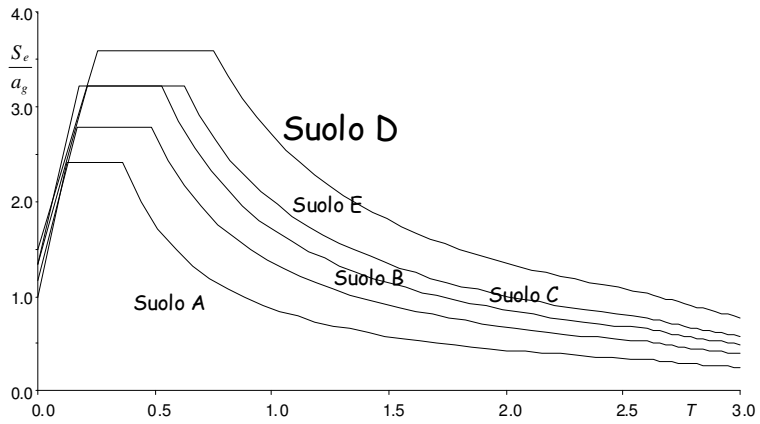
Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità

$180 \text{ m/s} < V_{S30} < 360 \text{ m/s}$

Per NTC08 anche:

Resistenza penetrometrica
$15 < N_{SPT} < 50$

Coesione non drenata
$70 < c_u < 250$ kPa



Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

$S = 1.45$ $T_B = 0.25$ s $T_C = 0.8$ s

Suolo D

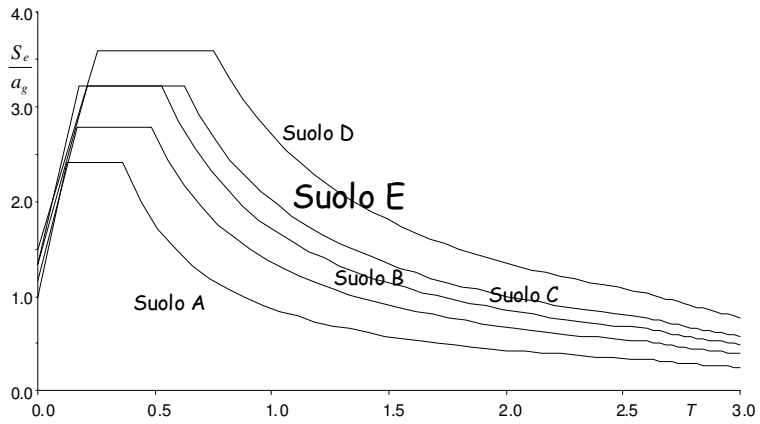
Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti, con miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità

$V_{S30} < 180$ m/s

Per NTC08 anche:

Resistenza penetrometrica
$N_{SPT} < 15$

Coesione non drenata
$c_u < 70$ kPa



Suolo E

Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 20 m

$S = 1.30$ $T_B = 0.2$ s $T_C = 0.6$ s

Valori orientativi per terremoti con alto periodo di ritorno

NTC18
profondità del substrato (roccia) non superiore a 30 m

FONDAZIONE INGEGNERI ASCOLI PICENO

Suolo S1

Depositi con strato di almeno 10 m di argille di bassa consistenza ed elevato indice di plasticità e contenuto di acqua

$V_{S30} < 100$ m/s

Coesione non drenata
$10 < c_u < 20$ kPa

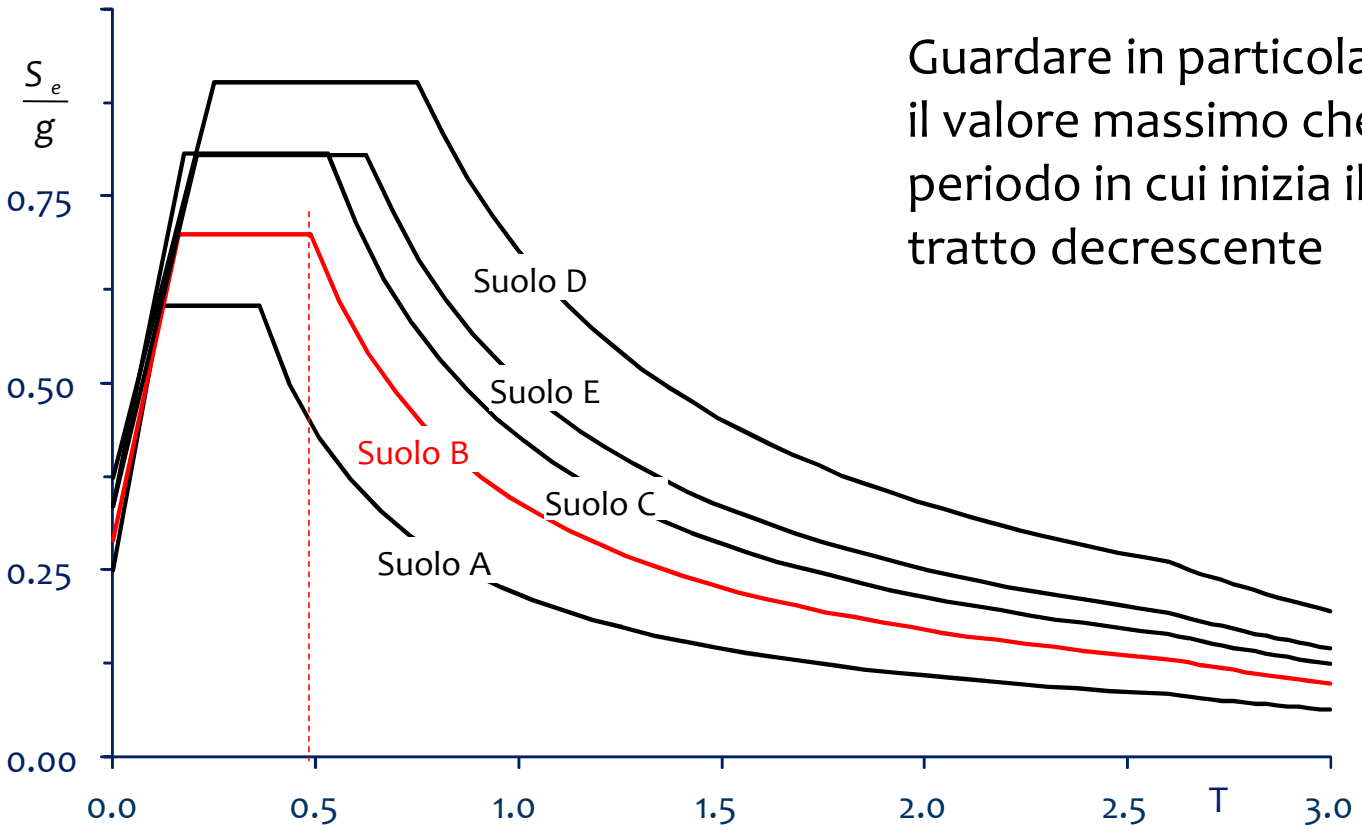
Suolo S2

Depositi di terreni soggetti a liquefazione

I suoli S1 e S2
non esistono più nelle NTC18

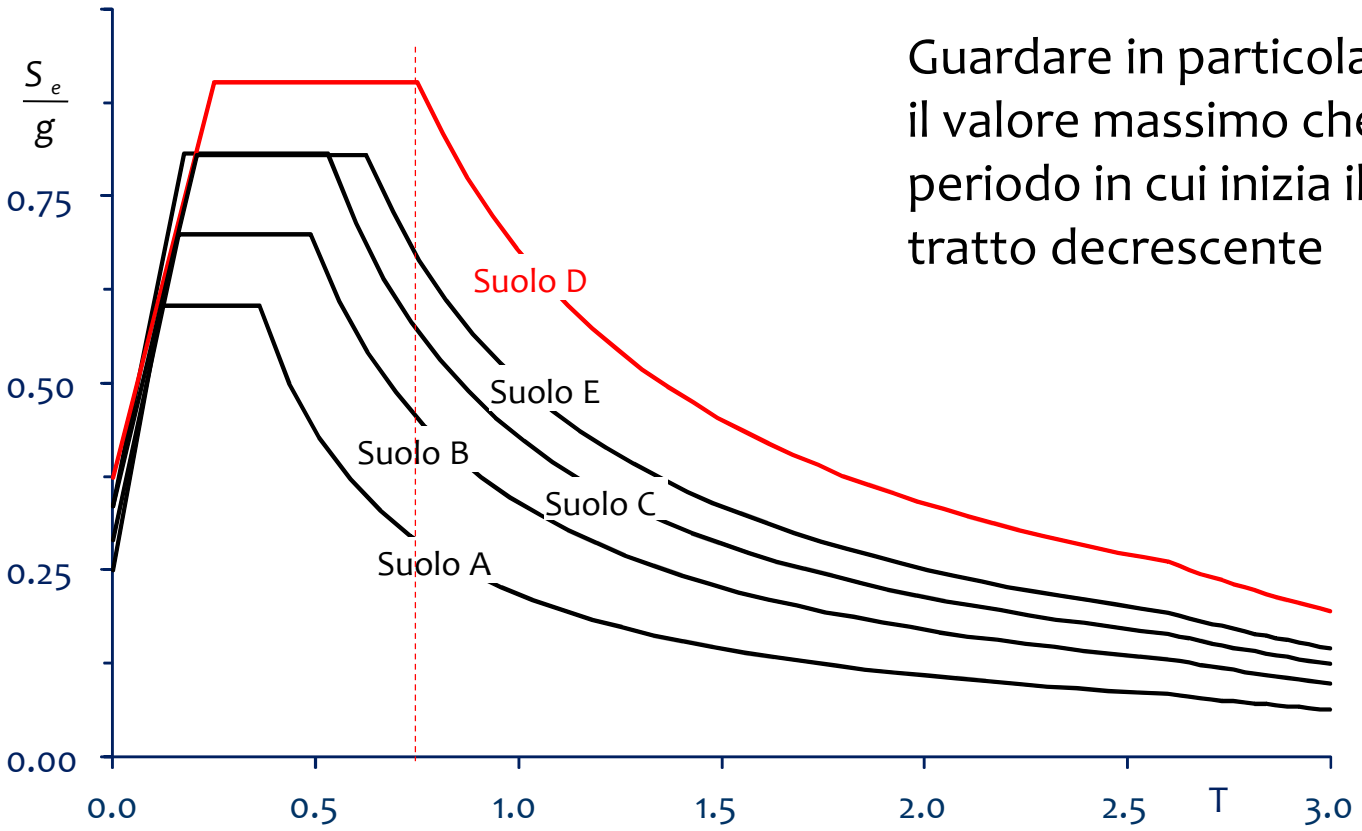
Per questi tipi di terreno occorrono studi speciali

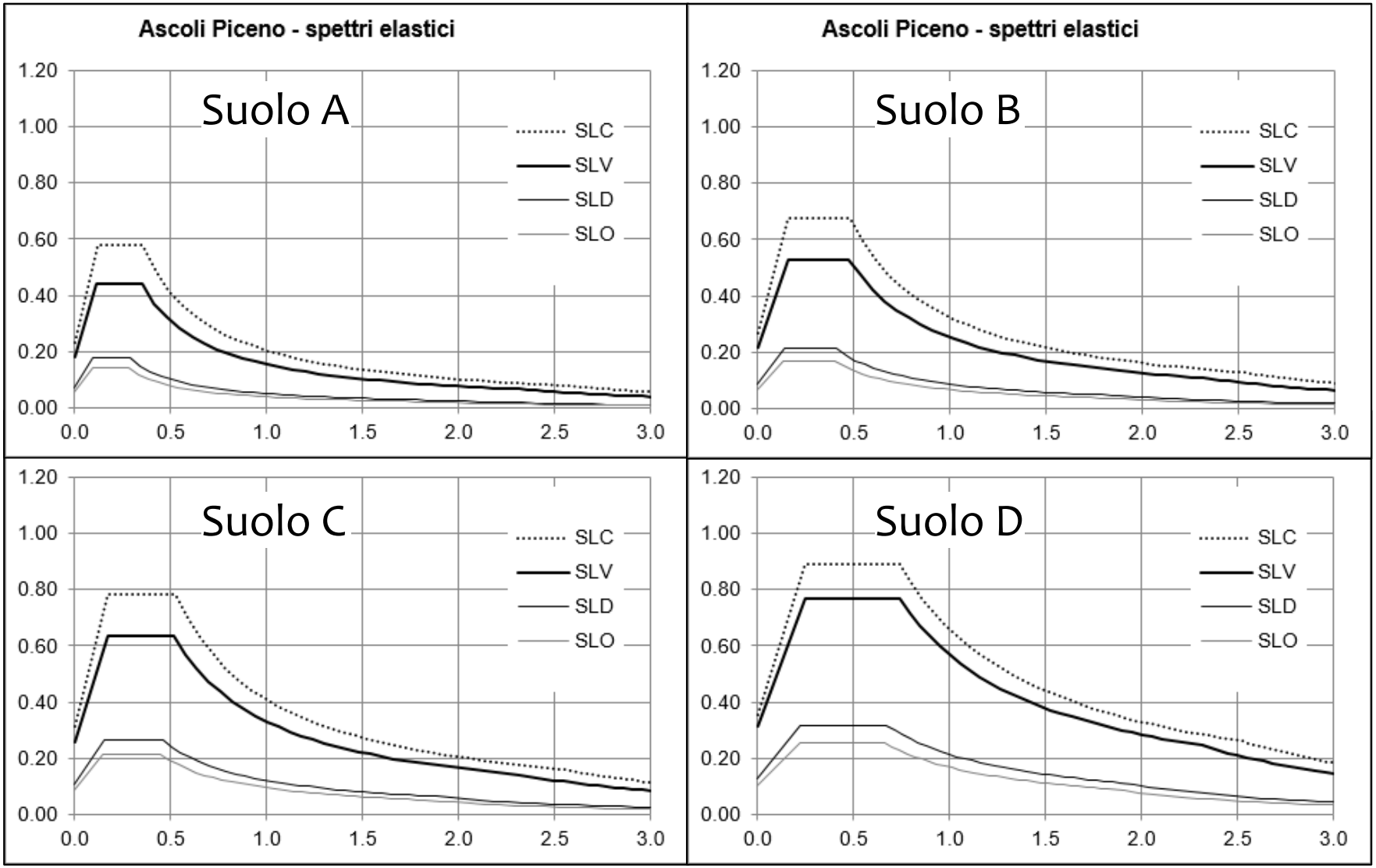
- **Esaminare lo spettro di risposta nel sito, per il terreno su cui è costruito l'edificio, è fondamentale per capire quale sia l'intensità del sisma**



Guardare in particolare sia il valore massimo che il periodo in cui inizia il tratto decrescente

- **Esaminare lo spettro di risposta nel sito, per il terreno su cui è costruito l'edificio, è fondamentale per capire quale sia l'intensità del sisma**



Guardare in particolare sia il valore massimo che il periodo in cui inizia il tratto decrescente

- **Ad esempio, ad Ascoli Piceno si hanno questi spettri**