

**Accordo tra il CSLP ed il Consorzio ReLuis
attuativo dei DM 578/2020 e DM 204/2022**

Attività di formazione per i tecnici degli Enti Locali

**Modulo II - Rischi naturali e interventi di mitigazione
per la sicurezza dei ponti**

coordinatori Proff. Edoardo Cosenza e Mauro Dolce

Lezione 1

Il rischio sismico dei ponti esistenti: basi teoriche

prof. Iunio Iervolino e prof. Eugenio Chioccarelli

Il **consorzio Reluis** è il soggetto attuatore identificato dal **CSLP** per le attività relative alla:

- Analisi dei risultati dell'applicazione delle Linee Guida
- **Formazione degli operatori**
- Ricerca scientifica in merito alla valutazione della sicurezza strutturale, ai possibili interventi e al monitoraggio dei ponti esistenti

| Modulo | Titolo | | data/durata |
|--|--------|---|---|
| L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti (24 + 4 ore) Marzo – Aprile 2024 | 1 | Le linee guida per i ponti esistenti | 4 ore in presenza per data e orario vedere calendario sede |
| | 2 | Le linee guida per i ponti esistenti | |
| | 3 | La CdA strutturale-fondazionale: casi studio (1) | |
| | 4 | La CdA strutturale-fondazionale: casi studio (2) Le ispezioni speciali e le indagini in situ | |
| | 5 | Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione | |
| | 6 | Esercitazione | |
| | 7 | L'aggiornamento normativo per i ponti esistenti: il punto di vista di istituzioni, enti locali, gestori e concessionari | 4 ore in asincrono |
| Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti (25 ore) Settembre - Ottobre 2024 | 1 | Il rischio sismico dei ponti esistenti: basi teoriche | 3 ore |
| | 2 | Il rischio sismico dei ponti esistenti: le Linee Guida | 3 ore |
| | 3 | Problematiche di tipo geologico | 4 ore |
| | 4 | Analisi di casi di crolli di ponti | 3 ore |
| | 5 | Il rischio frane | 4 ore |
| | 6 | Il rischio idraulico | 4 ore |
| | 7 | Casi applicativi di valutazione CdA frane e idraulica | 4 ore |

| Modulo | Titolo | | data/durata |
|---|--------|---|-------------|
| Valutazione accurata della sicurezza strutturale dei ponti esistenti (38-44 ore) Ottobre-Novembre 2024 | 1 | Durabilità degli elementi strutturali e corrosione | 4-6 ore |
| | 2 | Dispositivi di appoggio | 4 ore |
| | 3 | Sistemi in c.a.p. | 4-6 ore |
| | 4 | Selle Gerber | 4 ore |
| | 5 | Strutture in acciaio e acciaio-calcestruzzo | 4-6 ore |
| | 6 | Solette da impalcato e sezioni circolari in c.a. | 4 ore |
| | 7 | Prove di carico | 2 ore |
| | 8 | Il monitoraggio delle infrastrutture | 4 ore |
| | 9 | Valutazione formale della sicurezza | 4 ore |
| | 10 | Ponti in muratura | 4 ore |
| Modelli informativi digitali e tecnologie innovative (16 ore) Novembre - Dicembre 2024 | 1 | Digitalizzazione delle informazioni e implementazione dei modelli BIM | 8 ore |
| | 2 | Utilizzo di droni e droni robot | 4 ore |
| | 3 | Dati satellitari per applicazione alle infrastrutture | 4 ore |

1 – Il rischio sismico dei ponti esistenti: basi teoriche

Introduzione ai terremoti

Analisi probabilistica di pericolosità sismica

Richiami di dinamica delle strutture

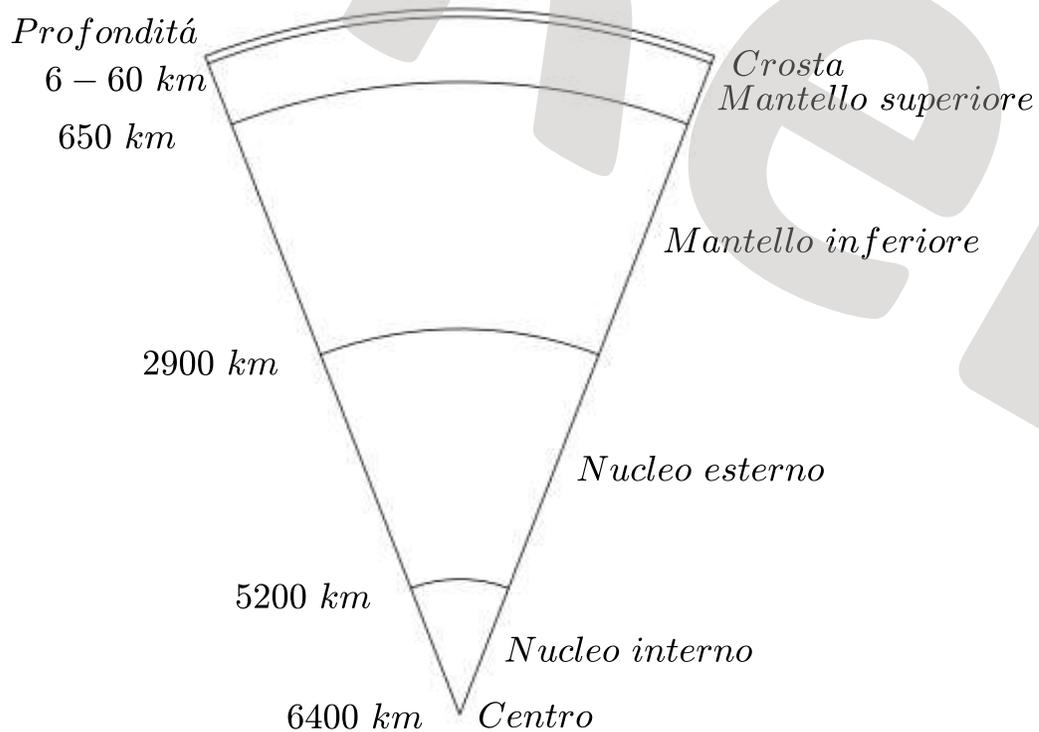
Azione sismiche sulle strutture

Accenni al comportamento post-elastico delle strutture

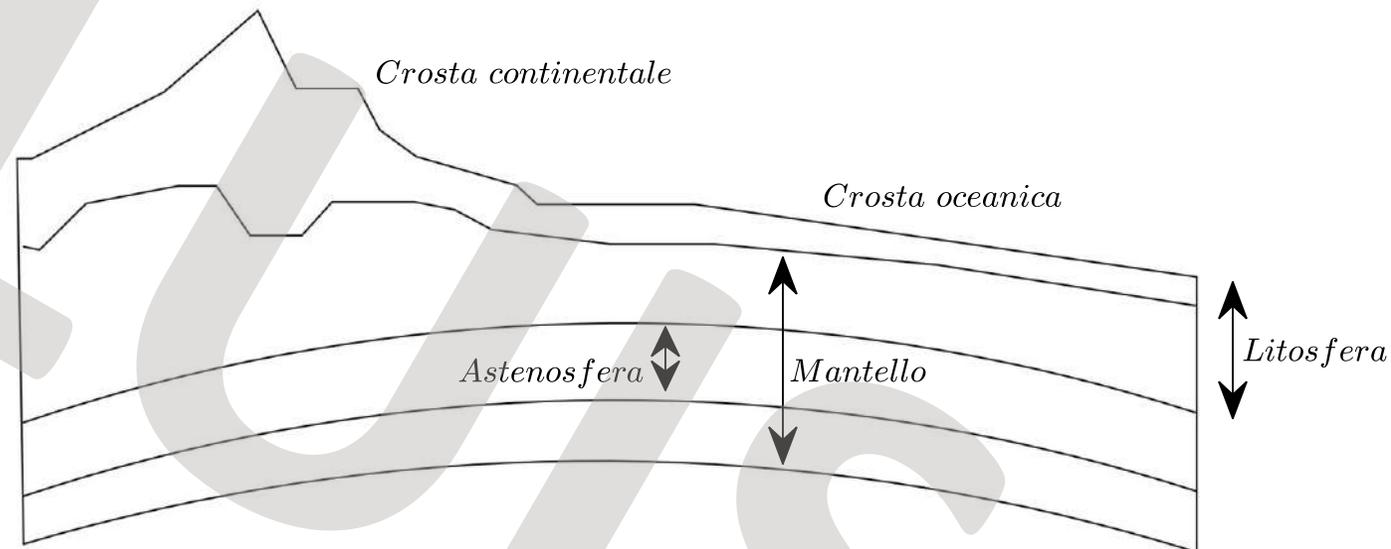
Definizione del rischio sismico

Durante la lezione, della durata complessiva di tre ore, sarà monitorata la partecipazione attraverso gli strumenti di TEAMS e attraverso la compilazione di un breve questionario il cui link sarà inviato in chat un paio di volte durante la lezione.

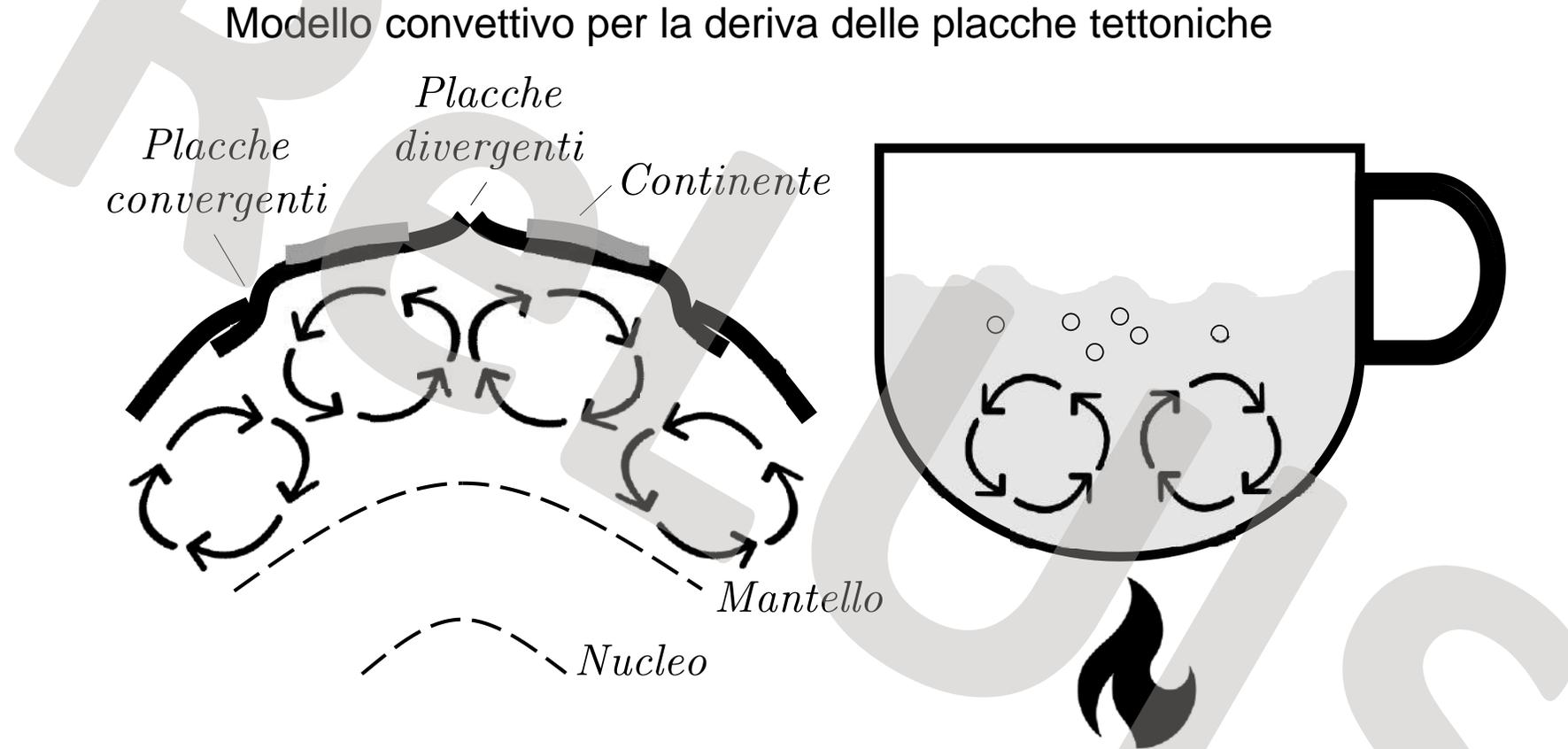
Rappresentazione degli strati della terra in relazione alla profondità



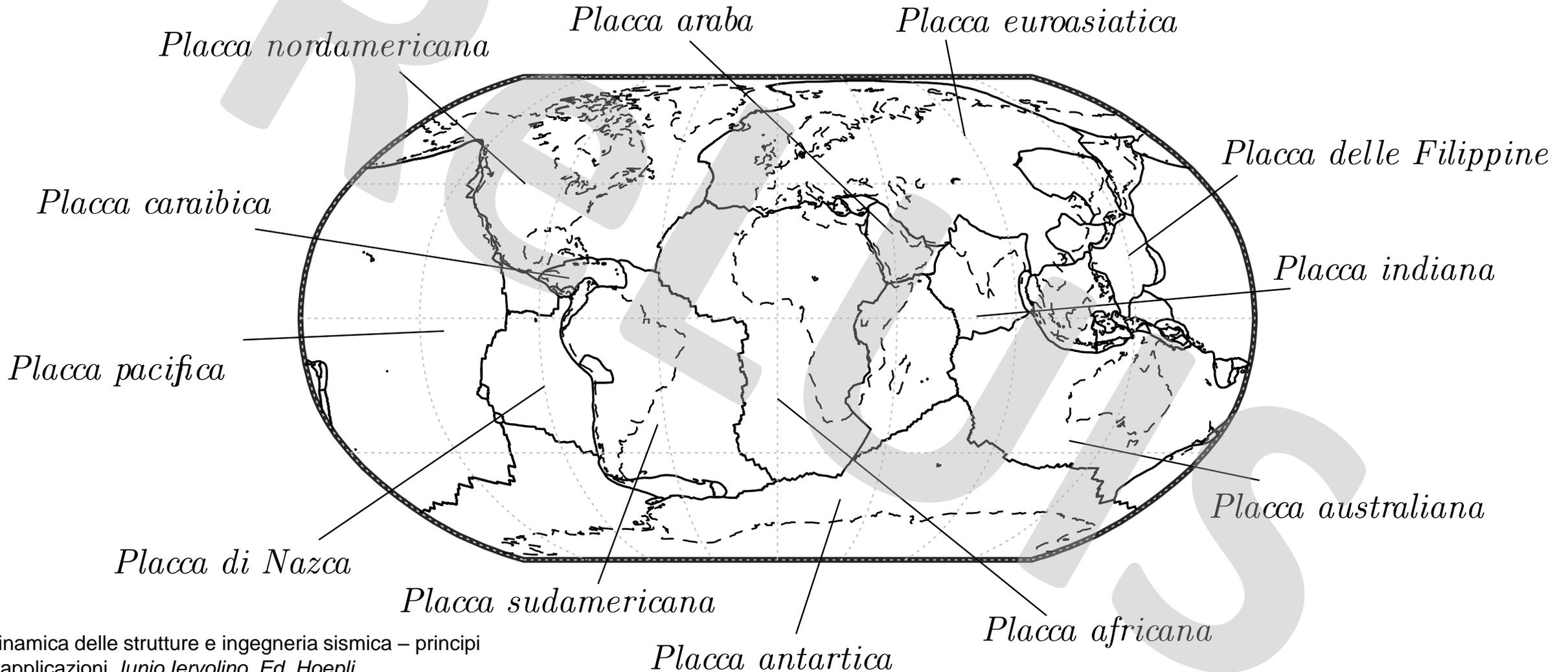
Gli strati più superficiali della terra e la distinzione tra litosfera e astenosfera



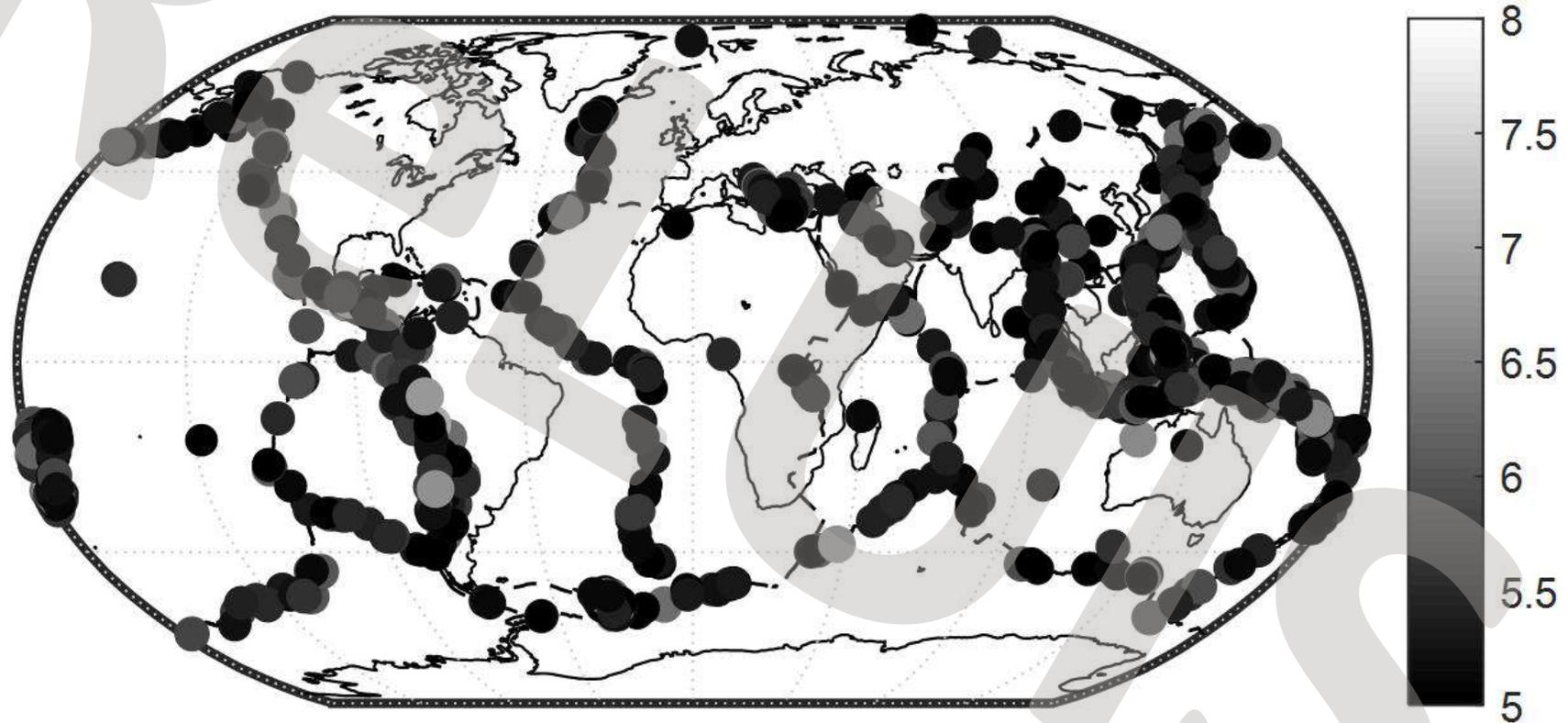
Tettonica a zolle e deriva dei continenti



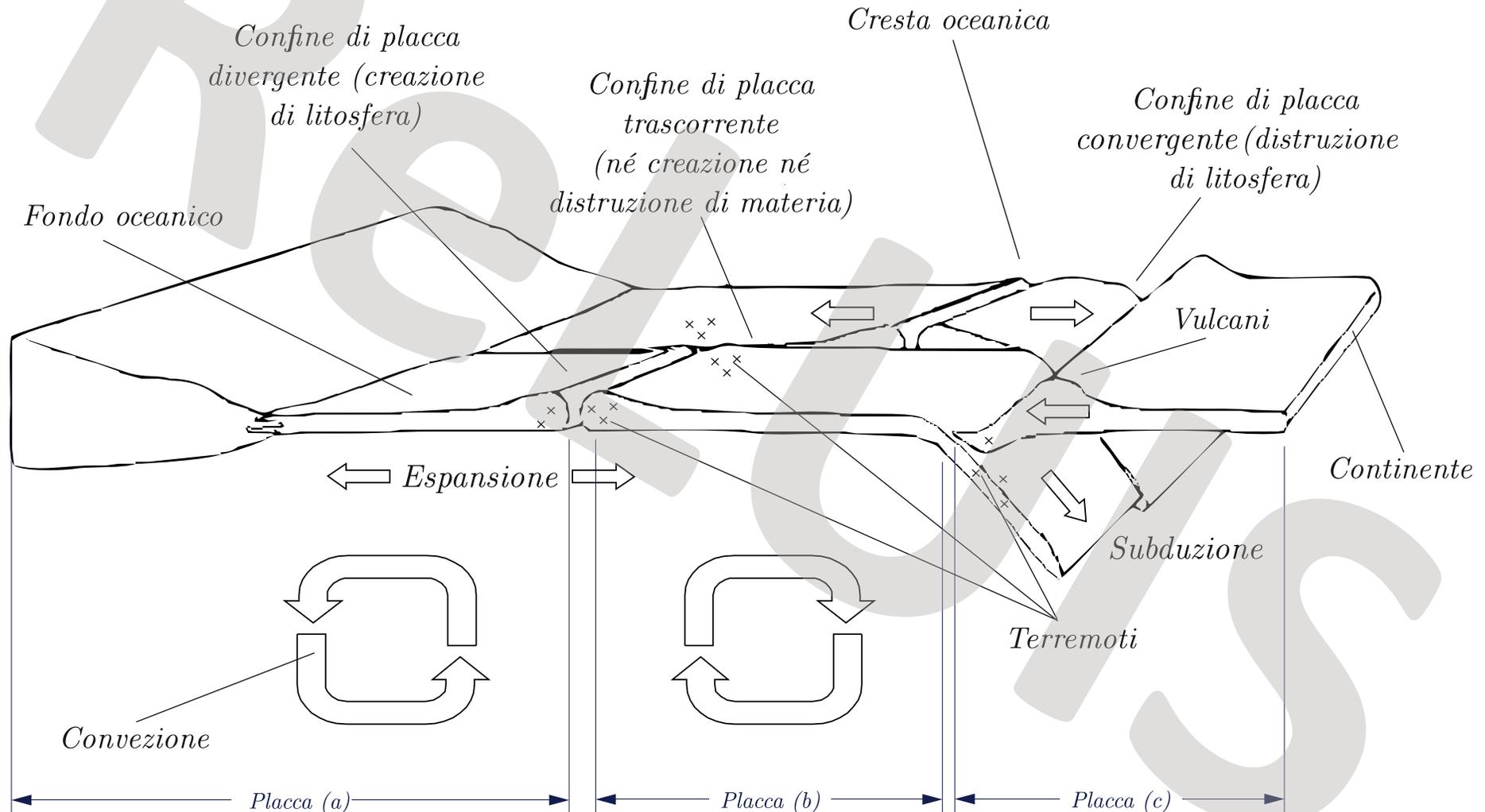
Principali placche tettoniche (le linee tratteggiate sono i confini continentali)



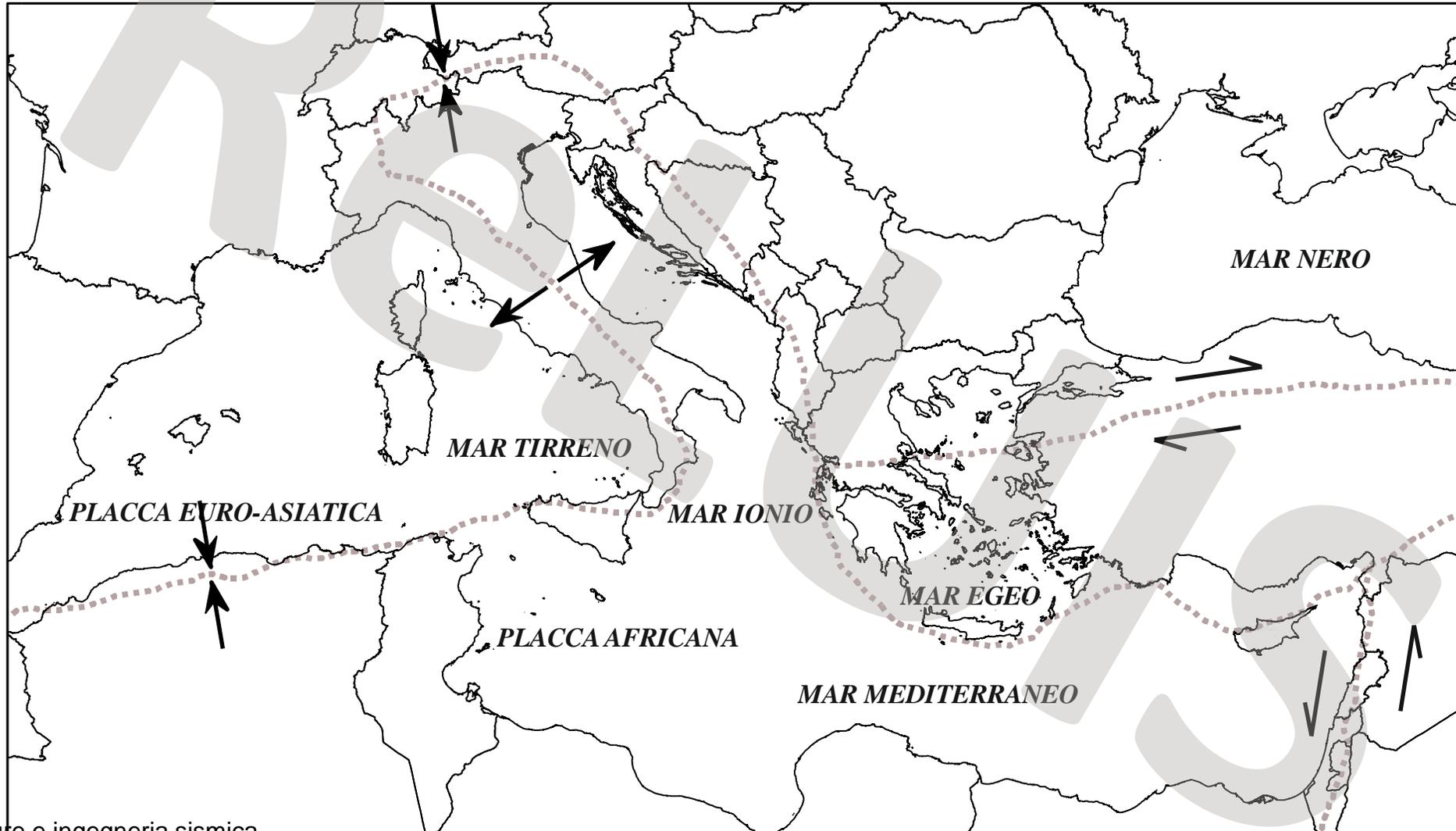
Terremoti di magnitudo maggiore di 5 nel 2019

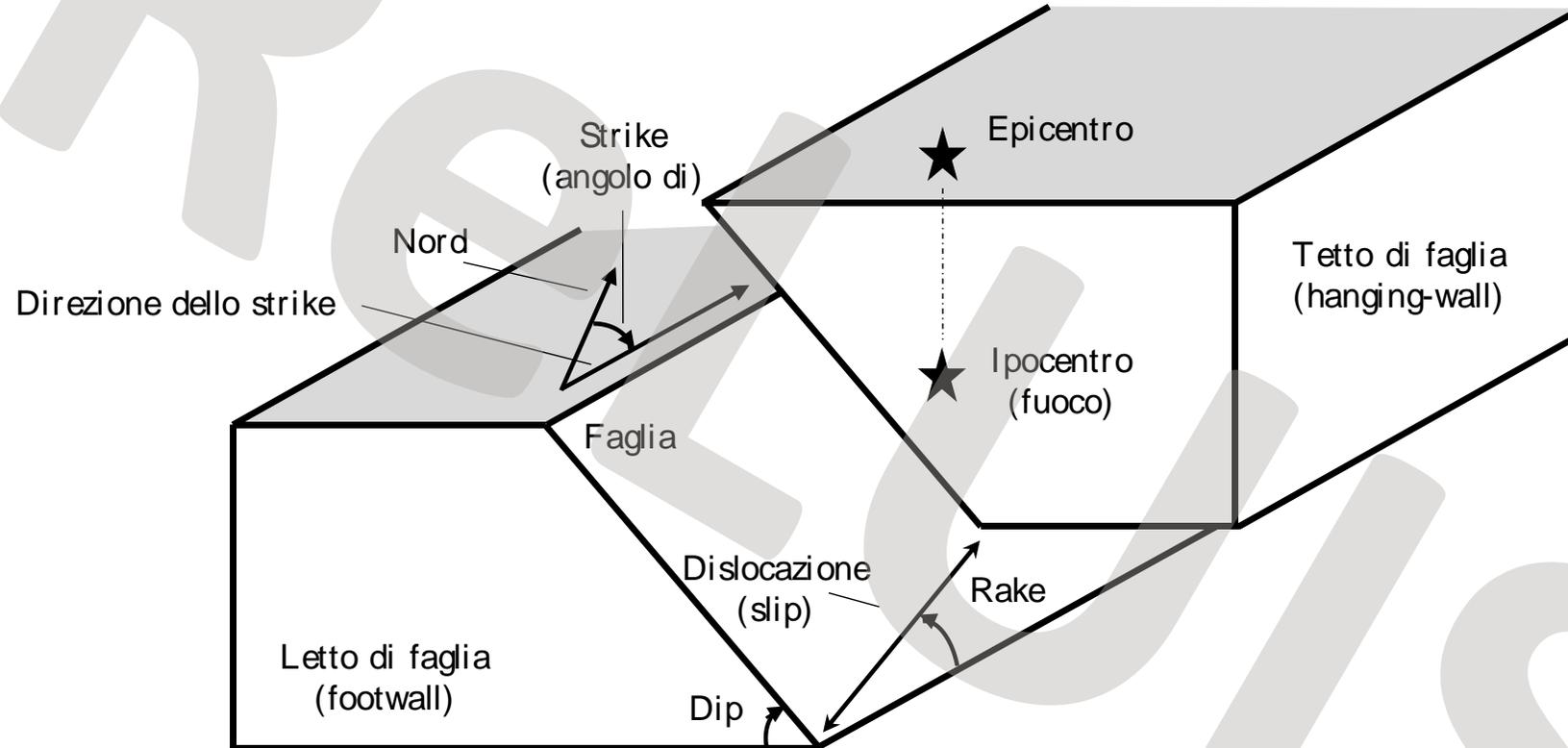


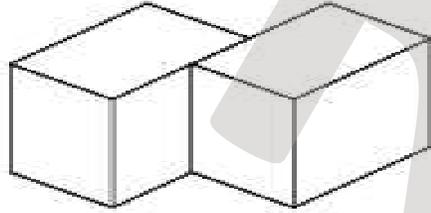
Creste oceaniche, meccanismi trascorrenti e subduzione delle placche



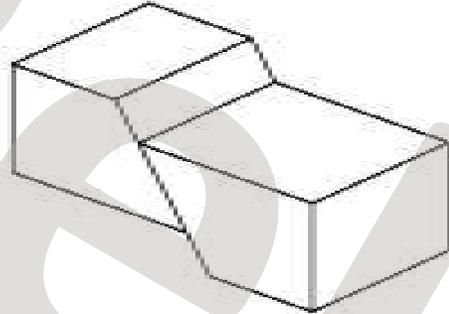
La situazione dell'Italia rispetto alle placche tettoniche rappresentate dalle curve tratteggiate



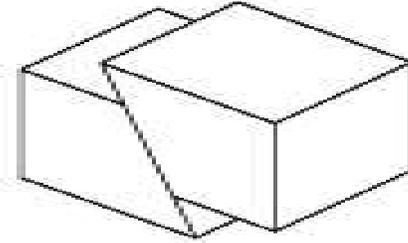




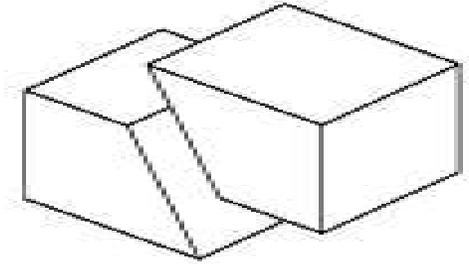
FAGLIA TRASCORRENTE: Il movimento avviene lungo la direzione del piano di faglia.



FAGLIA NORMALE: Il movimento avviene perpendicolarmente alla direzione del piano di faglia con uno spostamento verso il basso del tetto rispetto al letto.

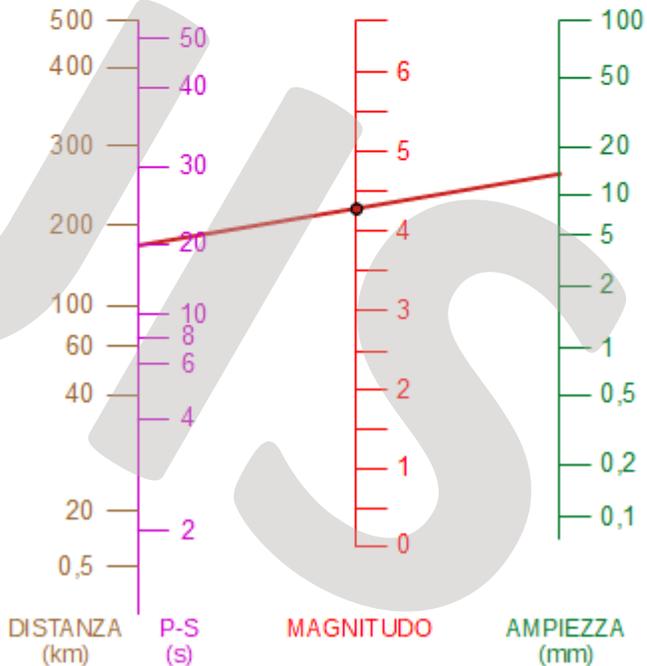
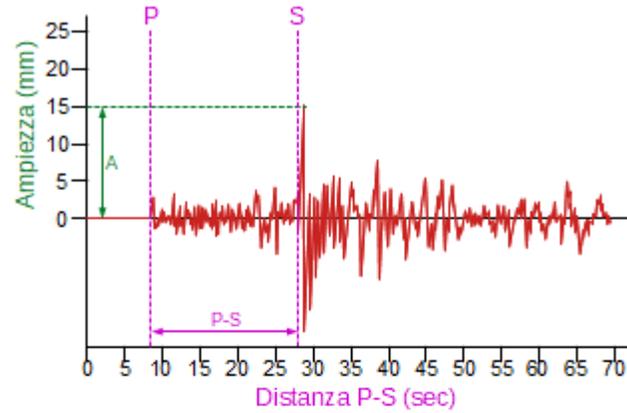
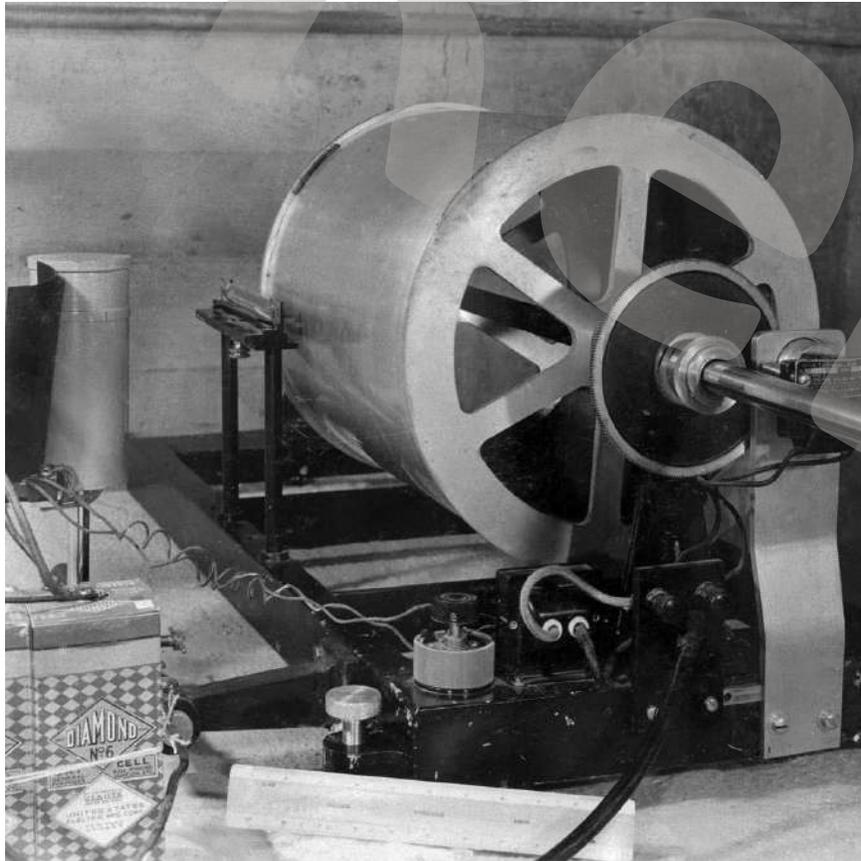


FAGLIA INVERSA: Il movimento avviene perpendicolarmente alla direzione del piano di faglia con uno spostamento verso l'alto del tetto rispetto al letto.

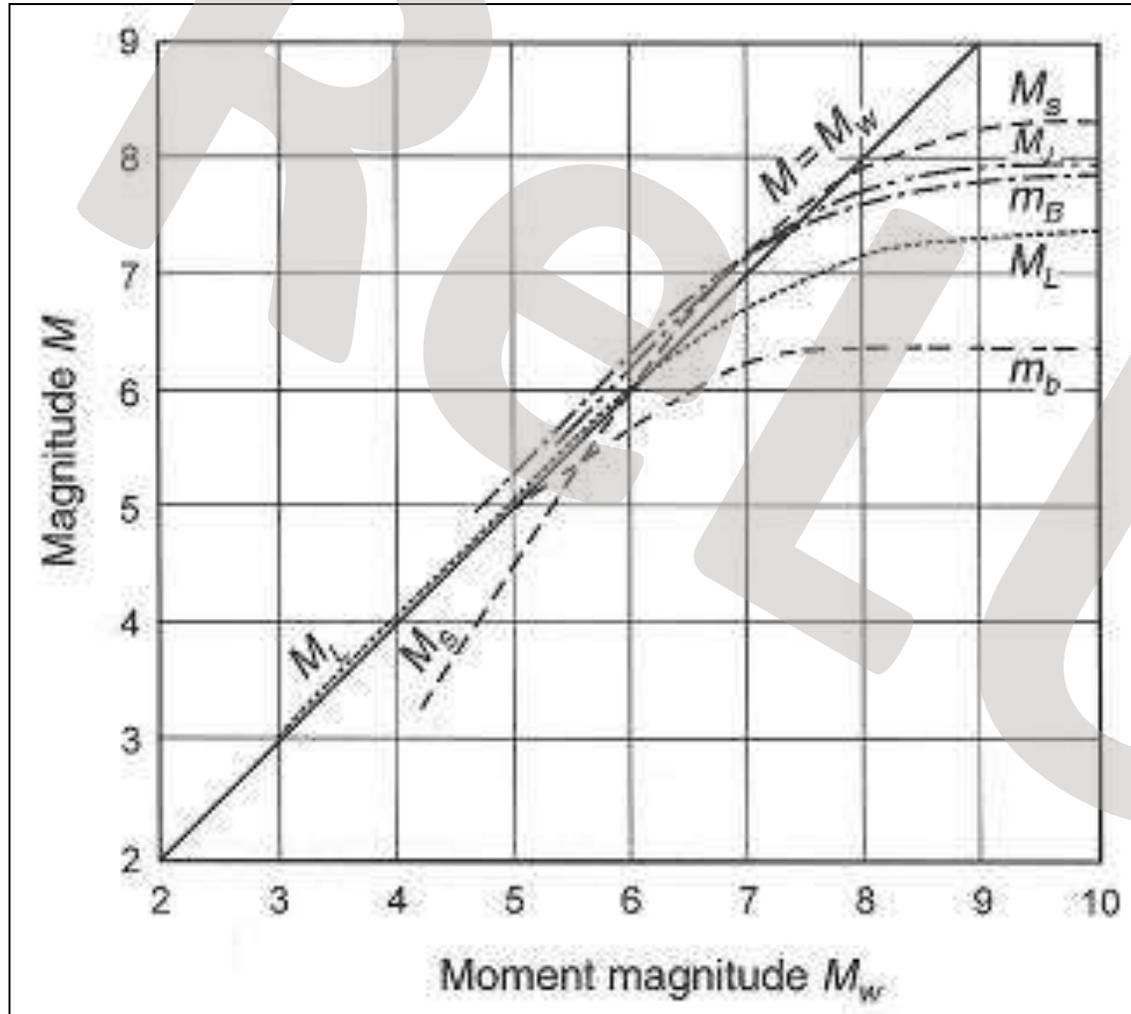


FAGLIA OBLIQUA: La faglia ha componenti di slip sia normali (o inverse) sia trascorrenti.

La magnitudo locale Richter si basa sulla misura della massima ampiezza letta da un sismografo standard Wood-Anderson posto a 100 km dall'epicentro.



By Bureau of Reclamation - Wood-Anderson seismograph recorder, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=110623946>



L'effetto saturazione è indicato dall'appiattirsi delle altre scale di magnitudo, in corrispondenza di terremoti di grossa entità.

La magnitudo momento (M_w) si definisce a partire dal *momento sismico* (M_0) che si valuta in relazione all'area di rottura. In particolare, esso è pari a:

$$M_0 = G \cdot S \cdot \Delta U.$$

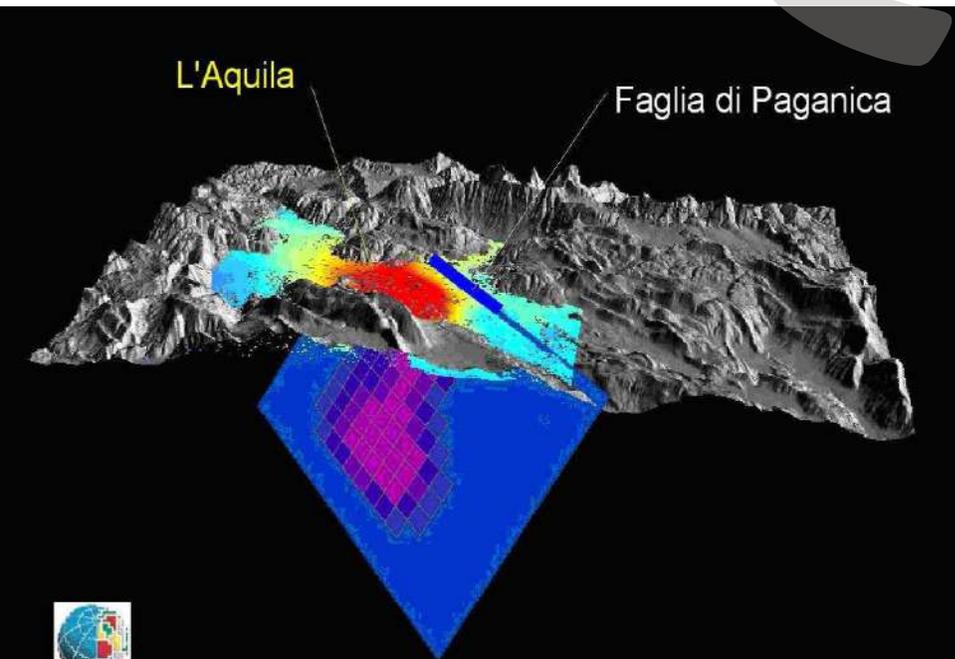
dove G è il *modulo di elasticità tangenziale* (medio) della crosta terrestre, S è l'area di rottura del terremoto e ΔU è lo spostamento permanente della faglia

A partire dal momento sismico, la magnitudo momento si definisce come:

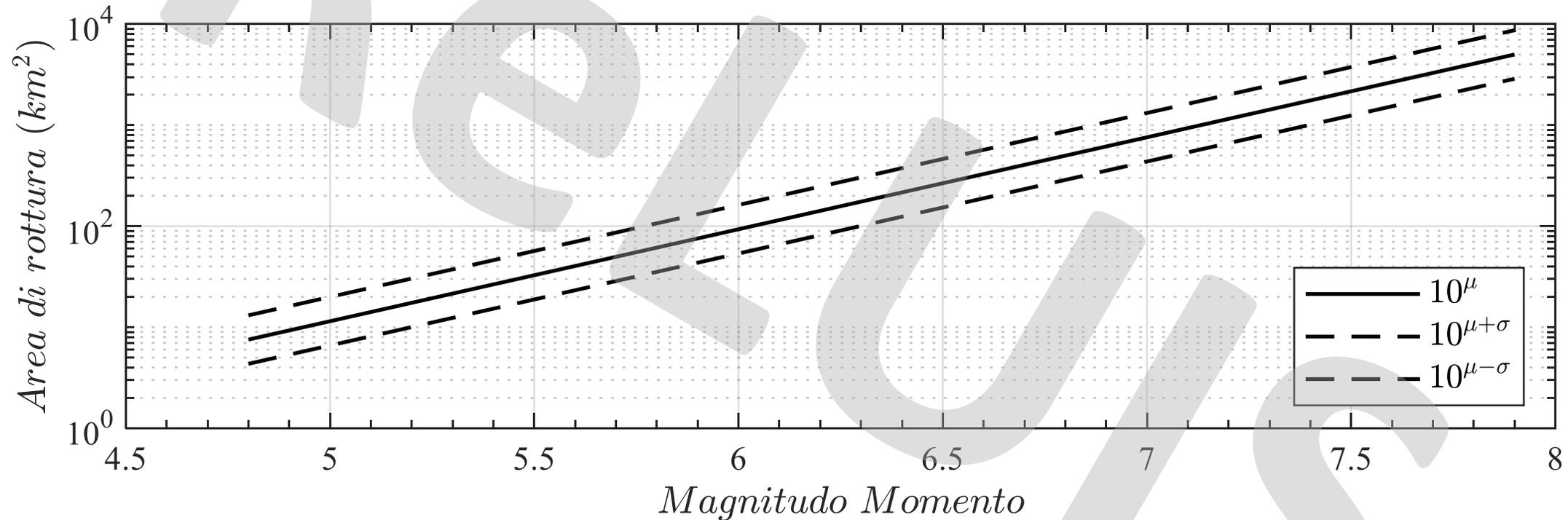
$$M_w = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.73.$$

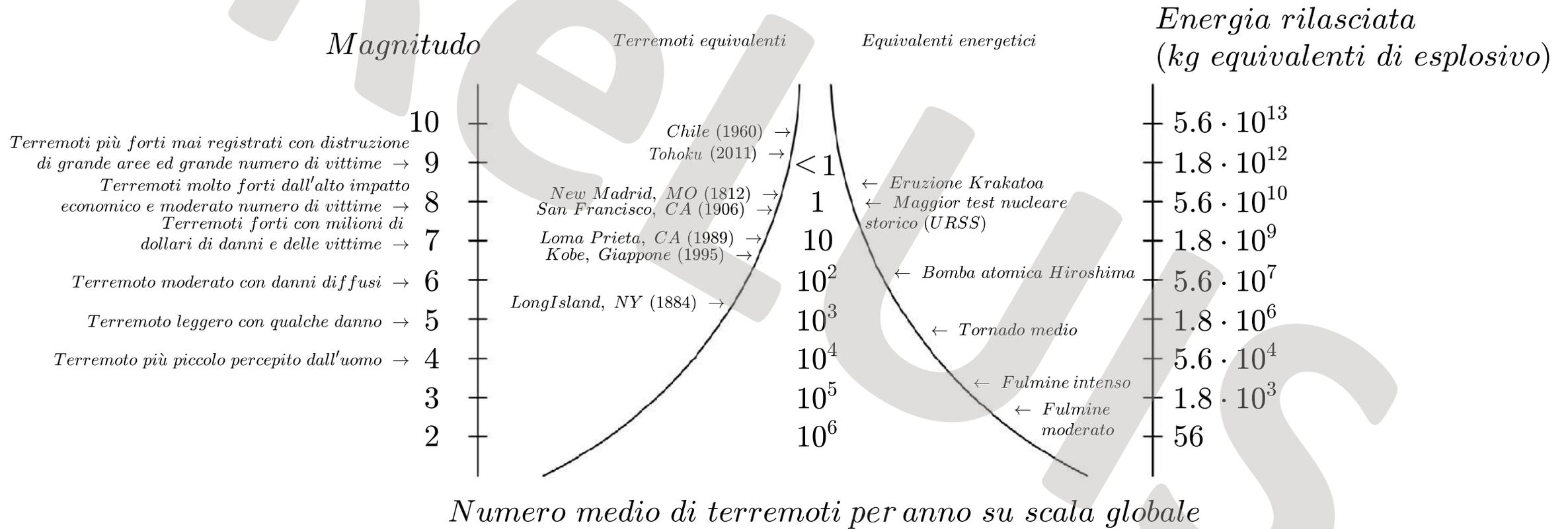
L'equazione di riferimento che lega l'energia sismica (E_s) al momento è

$$E_s = 10^{1.5 \cdot (M_w + 10.73) - 4.8}.$$

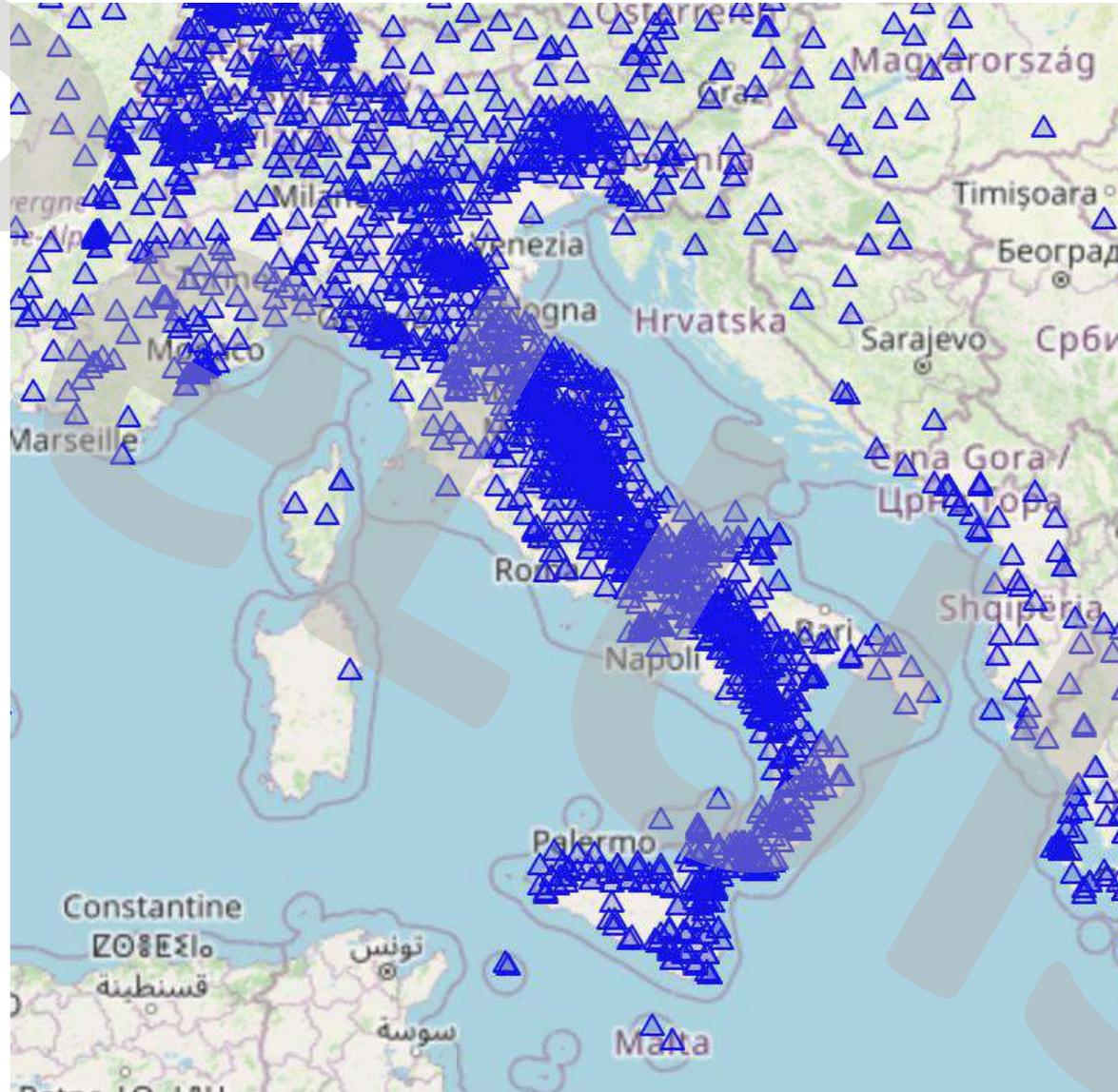


Legame semi-empirico tra area di rottura e magnitudo





Reti di monitoraggio sismico



Sensore



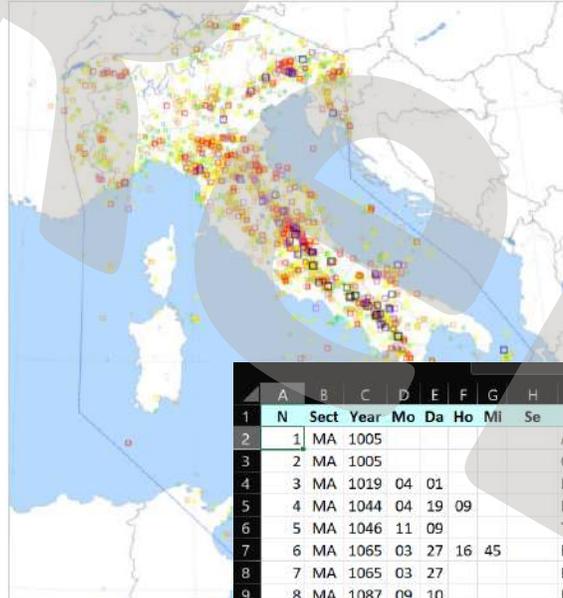
Acquisitore



<https://esm-db.eu/#/station/search>

English

CPTI15 v4.0 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani



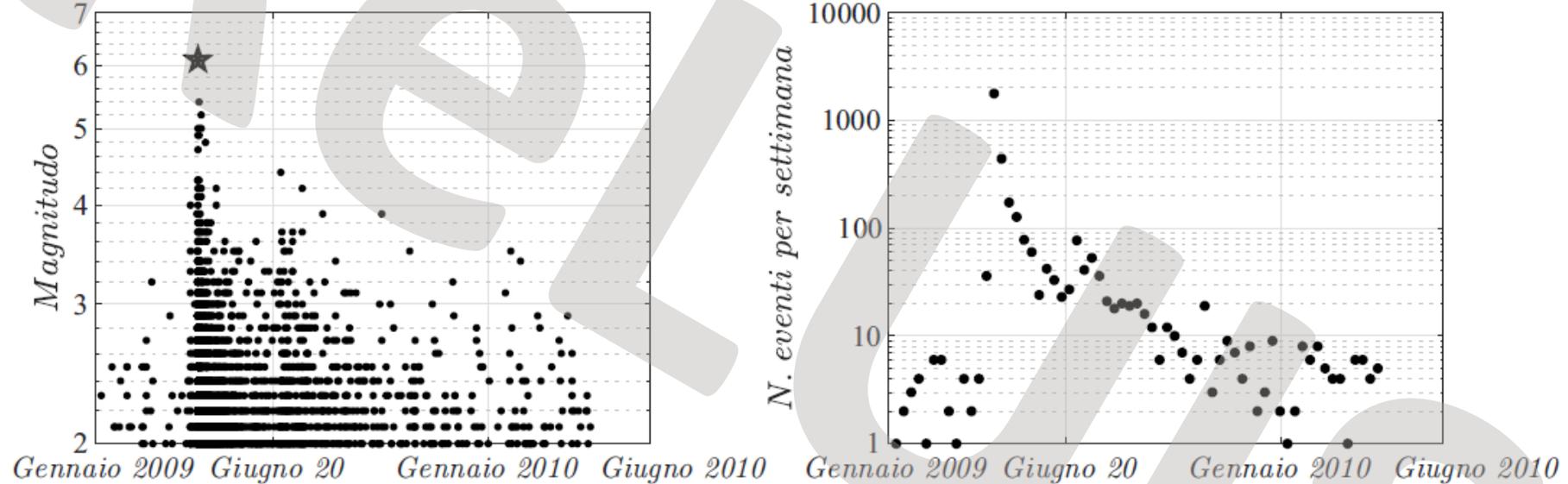
Fornisce dati parametrici strumentali, relativi ai terremoti di magnitudo ≥ 4.0 d'interesse temporale 1000-2020.



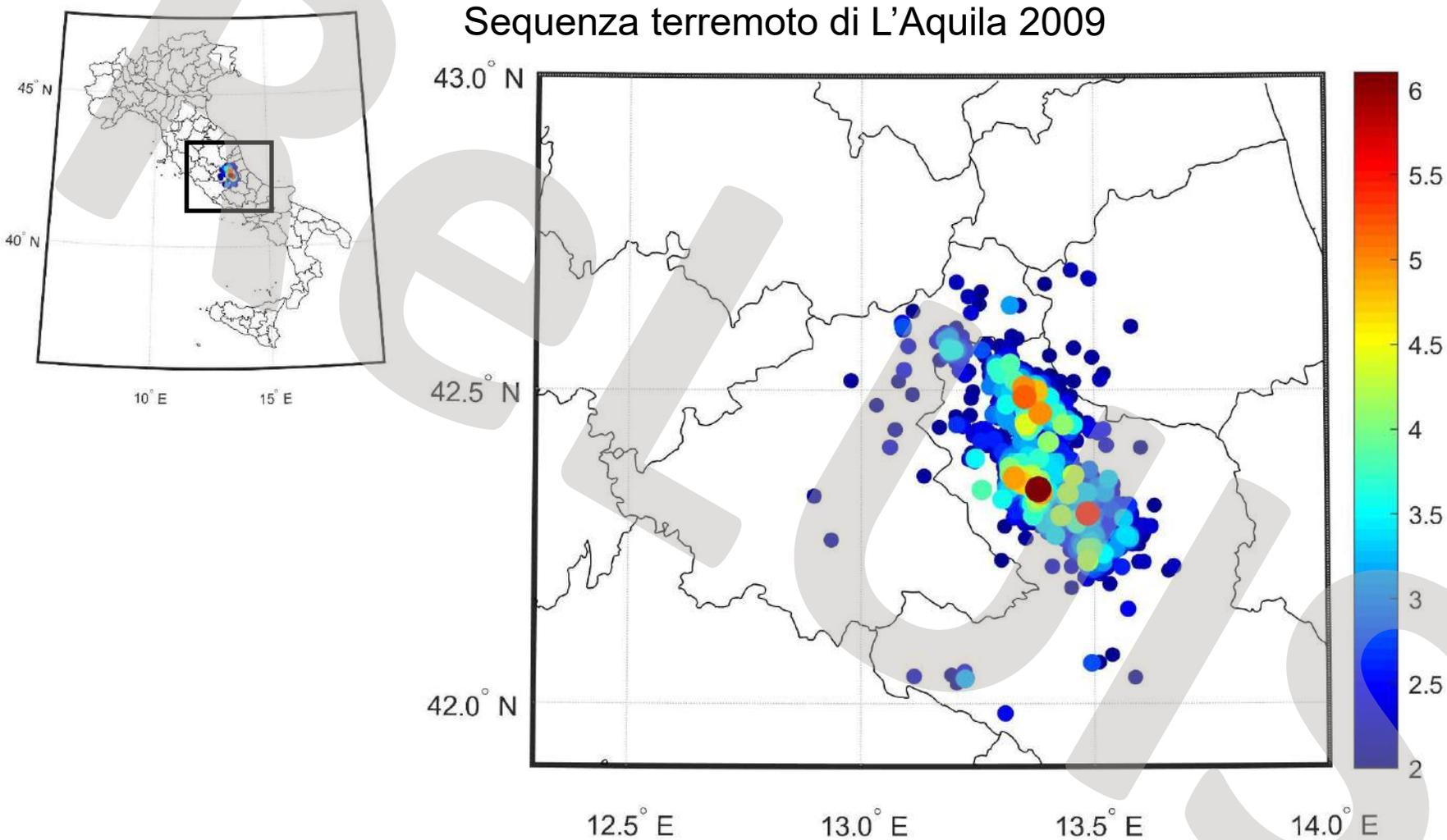
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | M |
|----|----|------|------|----|----|----|----|----|----------------------|-----------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|---------|--------|-----------|---|
| 1 | N | Sect | Year | Mo | Da | Ho | Mi | Se | EpicentralArea | MainRef | TLDef | LatDef | LonDef | DepDef | IoDef | TioDef | MwDef | ErMwDef | TMwDef | RefM | |
| 2 | 1 | MA | 1005 | | | | | | Arezzo | CASAL996 | MM | 43.464 | 11.882 | | 6-7 | bx | 4.86 | 0.46 | Mdm | CASAL996 | |
| 3 | 2 | MA | 1005 | | | | | | Cassino | FIMA002 | MM | 41.488 | 13.831 | | 7 | bx | 5.10 | 0.46 | Mdm | FIMA002 | |
| 4 | 3 | MA | 1019 | 04 | 01 | | | | Benevento | FIMA002 | MM | 41.131 | 14.778 | | 6 | bx | 4.63 | 0.46 | Mdm | FIMA002 | |
| 5 | 4 | MA | 1044 | 04 | 19 | 09 | | | Benevento | FIMA002 | MM | 41.131 | 14.778 | | 6 | bx | 4.63 | 0.46 | Mdm | FIMA002 | |
| 6 | 5 | MA | 1046 | 11 | 09 | | | | Trentino | ALEX990 | NP | | | | | | | | | ALEX990 | |
| 7 | 6 | MA | 1065 | 03 | 27 | 16 | 45 | | Brescia | CFTI4med | NP | | | | | | | | | | |
| 8 | 7 | MA | 1065 | 03 | 27 | | | | Brescia | GUICO005 | MM | 45.539 | 10.220 | | 7 | bx | 5.10 | 0.46 | Mdm | GUICO005 | |
| 9 | 8 | MA | 1087 | 09 | 10 | | | | Bari | FIMA002 | MM | 41.129 | 16.869 | | 6-7 | bx | 4.86 | 0.46 | Mdm | FIMA002 | |
| 10 | 9 | MA | 1091 | 01 | 27 | | | | Roma | CFTI4med | MM | 41.899 | 12.477 | | 7 | bx | 5.10 | 0.46 | Mdm | CFTI4med | |
| 11 | 10 | MA | 1094 | 01 | 14 | | | | Benevento | FIMA002 | MM | 41.131 | 14.778 | | 6 | bx | 4.63 | 0.46 | Mdm | FIMA002 | |
| 12 | 11 | MA | 1117 | 01 | 03 | 15 | 15 | | Veronese | CFTI4med | MM | 45.267 | 11.015 | | 9 | bx | 6.52 | 0.10 | Mdm | CFTI4med | |
| 13 | 12 | MA | 1117 | 01 | 03 | 15 | 15 | | Monti Pisani | CFTI4med | NP | | | | | | | | | CFTI4med | |
| 14 | 13 | MA | 1120 | 03 | 25 | | | | Valle del Garigliano | CFTI4med | MM | 41.377 | 13.917 | | 8-9 | bx | 5.80 | 0.46 | Mdm | CFTI4med | |
| 15 | 14 | MA | 1125 | 06 | 07 | 11 | | | Siracusa | CFTI4med | MM | 37.073 | 15.286 | | 8-9 | bx | 5.80 | 0.46 | Mdm | CFTI4med | |
| 16 | 15 | MA | 1125 | 10 | 11 | | | | Benevento | CAST997 | MM | 41.131 | 14.778 | | 7-8 | bx | 5.33 | 0.46 | Mdm | CAST997 | |
| 17 | 16 | MA | 1139 | 01 | 22 | | | | Benevento | AMGNDT995 | MM | 41.131 | 14.778 | | 5-6 | bx | 4.40 | 0.46 | Mdm | AMGNDT995 | |
| 18 | 17 | MA | 1148 | | | | | | Firenze | CASAL996 | MM | 43.773 | 11.257 | | 7 | bx | 5.10 | 0.46 | Mdm | CASAL996 | |
| 19 | 18 | MA | 1160 | 10 | 15 | | | | Subiaco | CFTI4med | MM | 41.925 | 13.095 | | 7-8 | bx | 5.33 | 0.46 | Mdm | CFTI4med | |
| 20 | 19 | MA | 1161 | 01 | 16 | 06 | | | Frusinate | CFTI4med | MM | 41.568 | 13.334 | | 7 | bx | 5.10 | 0.46 | Mdm | CFTI4med | |

<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

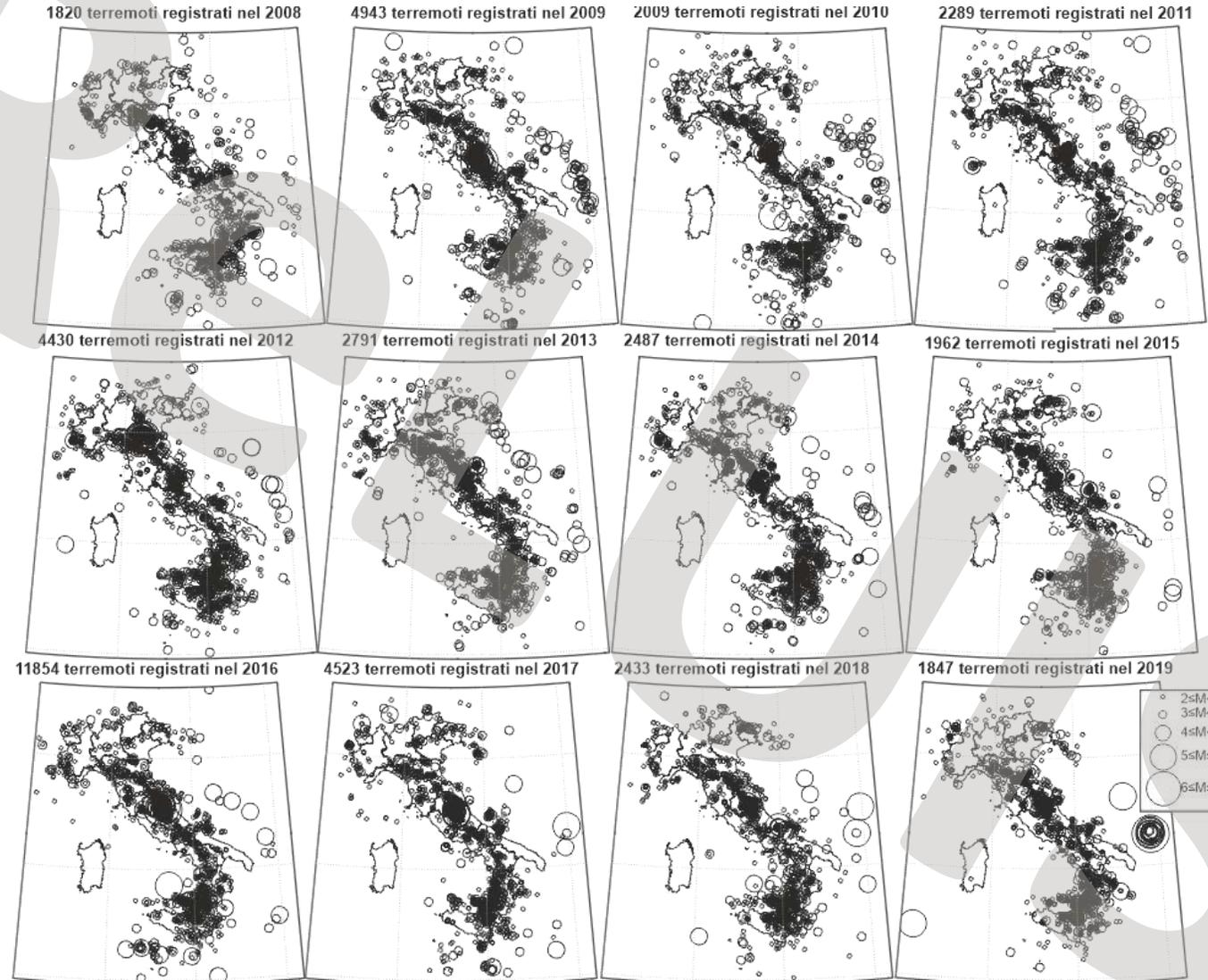
Sequenza terremoto di L'Aquila 2009



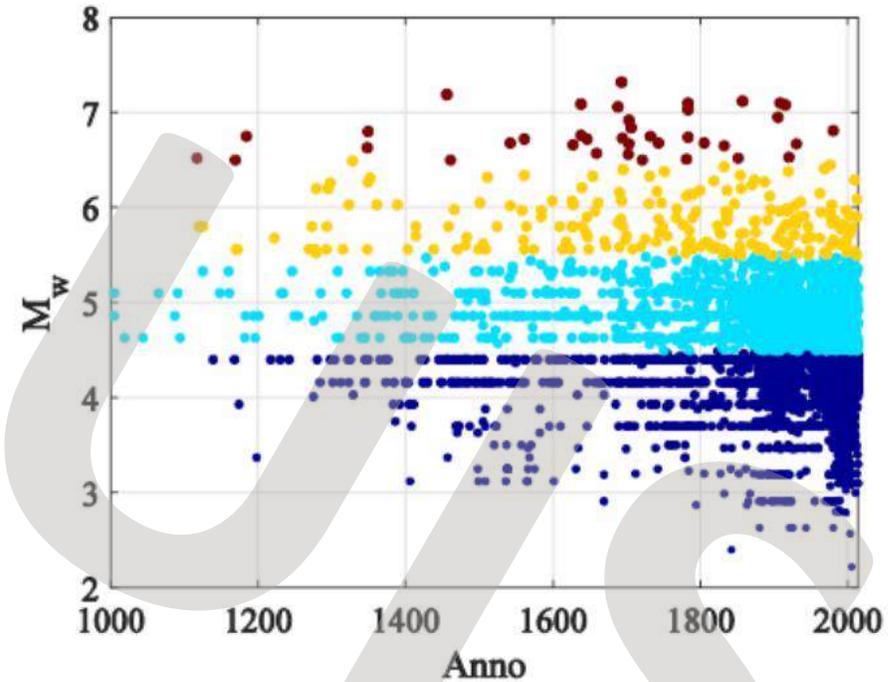
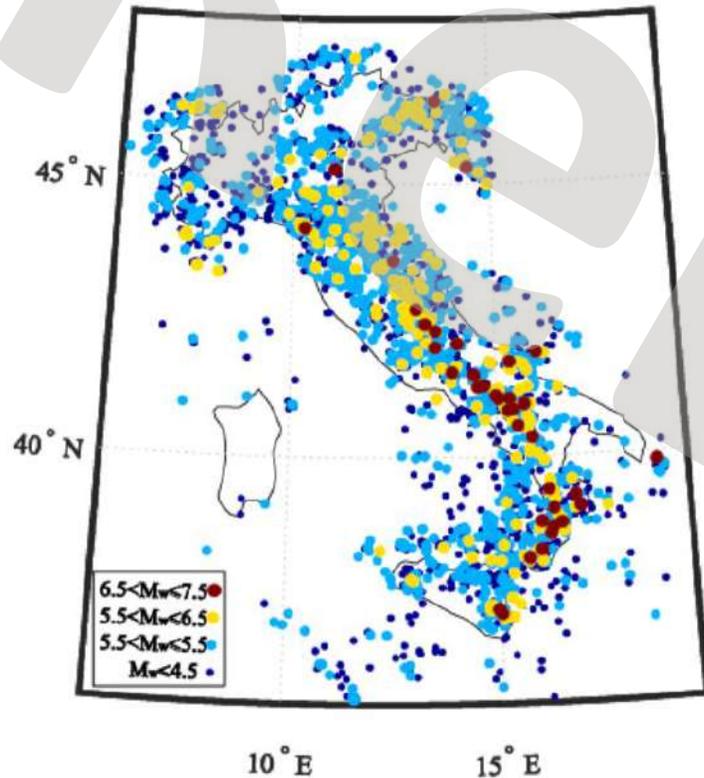
Circa 3400 terremoti



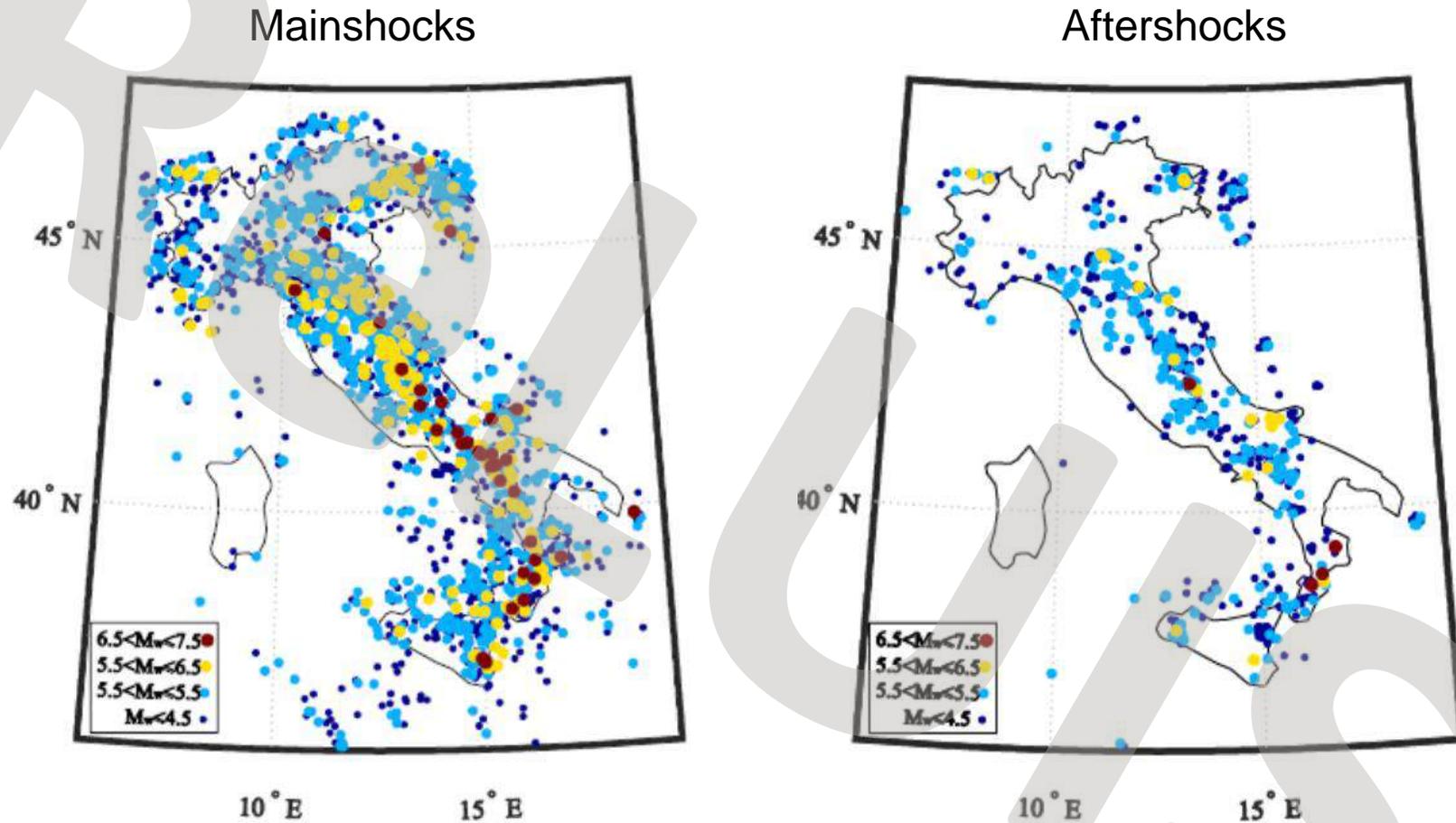
Distribuzione spaziale dei terremoti di magnitudo maggiore o uguale a due registrati in Italia negli ultimi dodici anni.



Terremoti principali (mainshock), foreshock e repliche (aftershock)

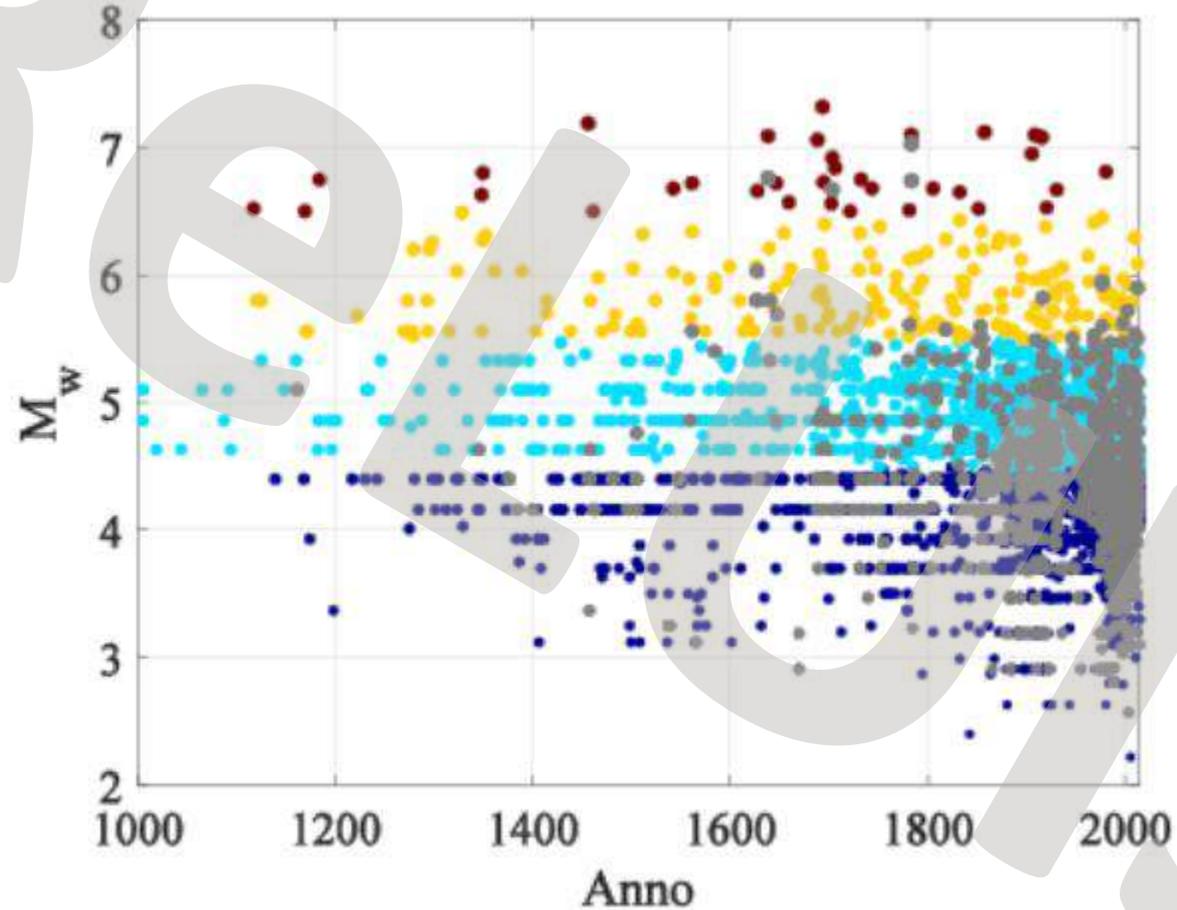


Catalogo parametrico dei terremoti italiani Declustering



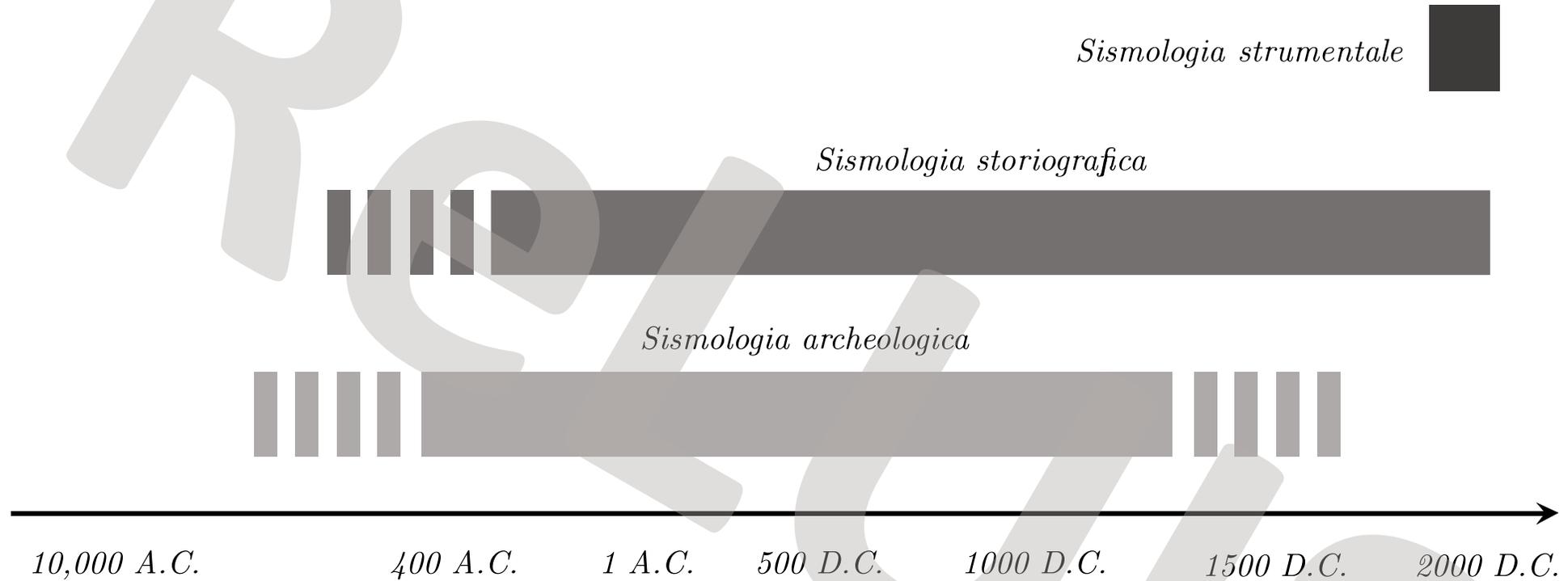
Circa 25% delle
registrazioni del
catalogo sono
repliche

Catalogo parametrico dei terremoti italiani Declustering



Catalogo parametrico dei terremoti italiani

Intervalli di completezza



Rappresentazione grafica dell'importanza delle scienze umane nella ricostruzione della storia sismica

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Junio Iervolino, Ed. Hoepli.*
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

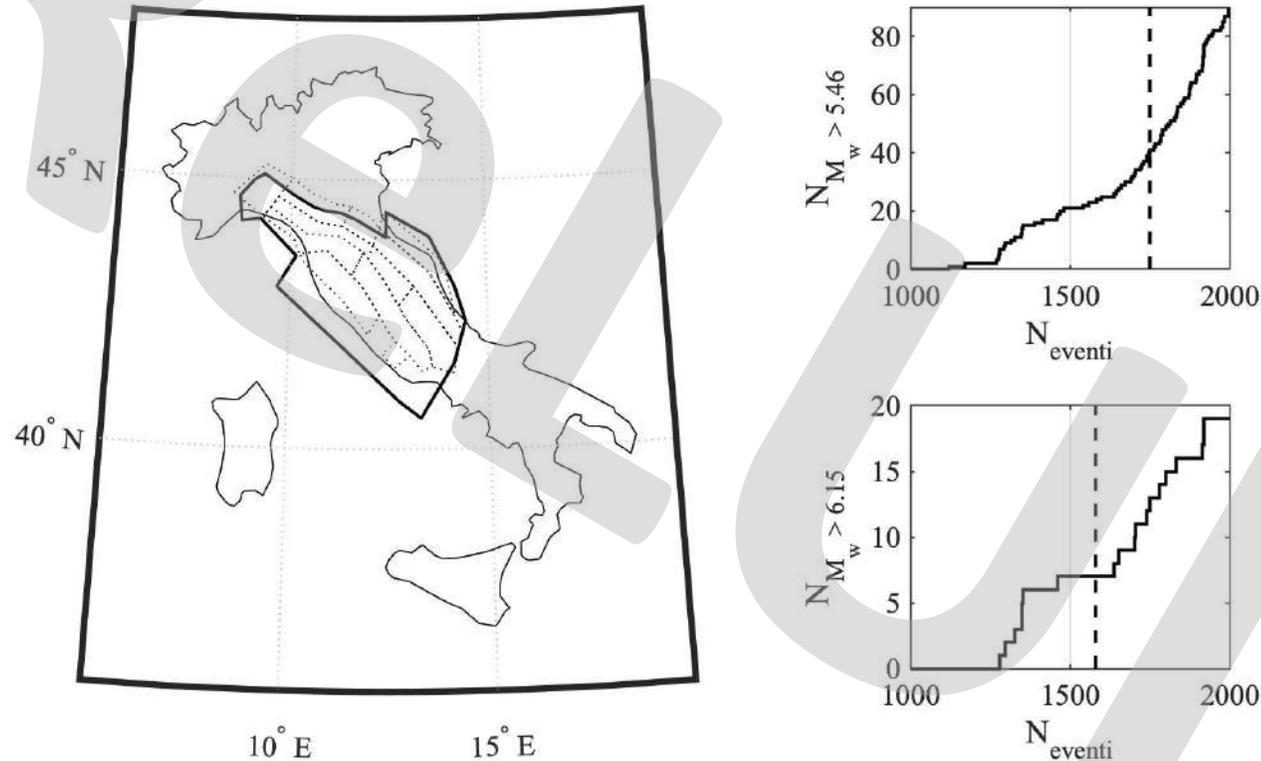
Modulo II - Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Lezione 1 - Il rischio sismico dei ponti esistenti: basi teoriche

Catalogo parametrico dei terremoti italiani

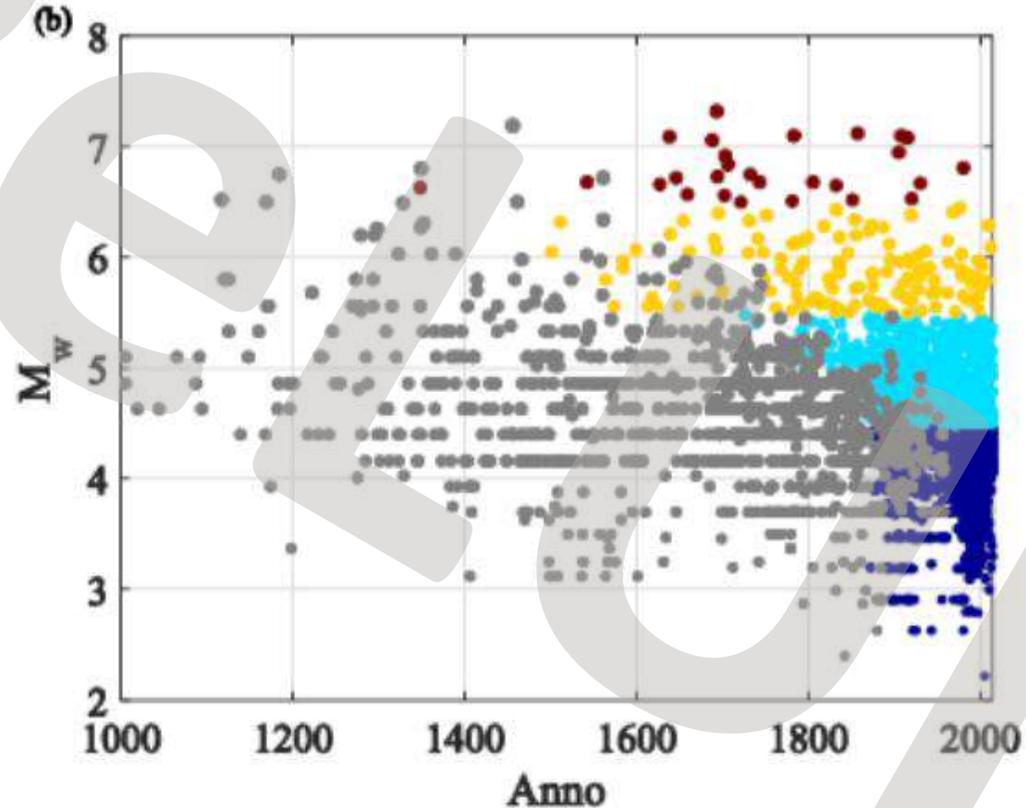
Intervalli di completezza

Esempio di valutazione della completezza del catalogo, relativamente all'area dell'Italia centrale, per due classi di magnitudo.



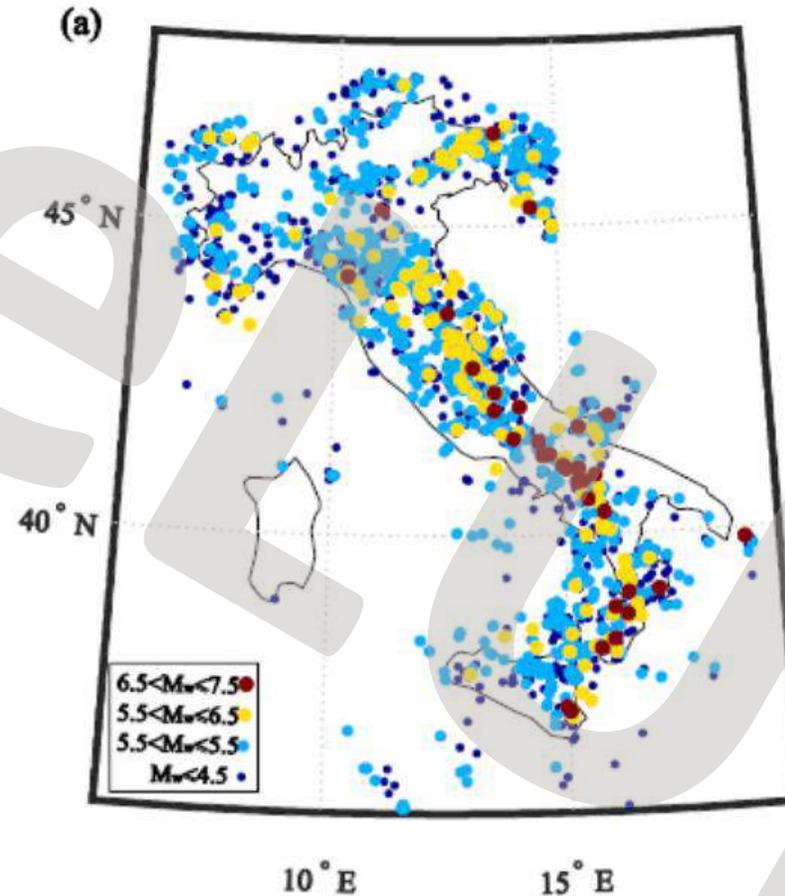
Catalogo parametrico dei terremoti italiani

Intervalli di completezza



Catalogo parametrico dei terremoti italiani

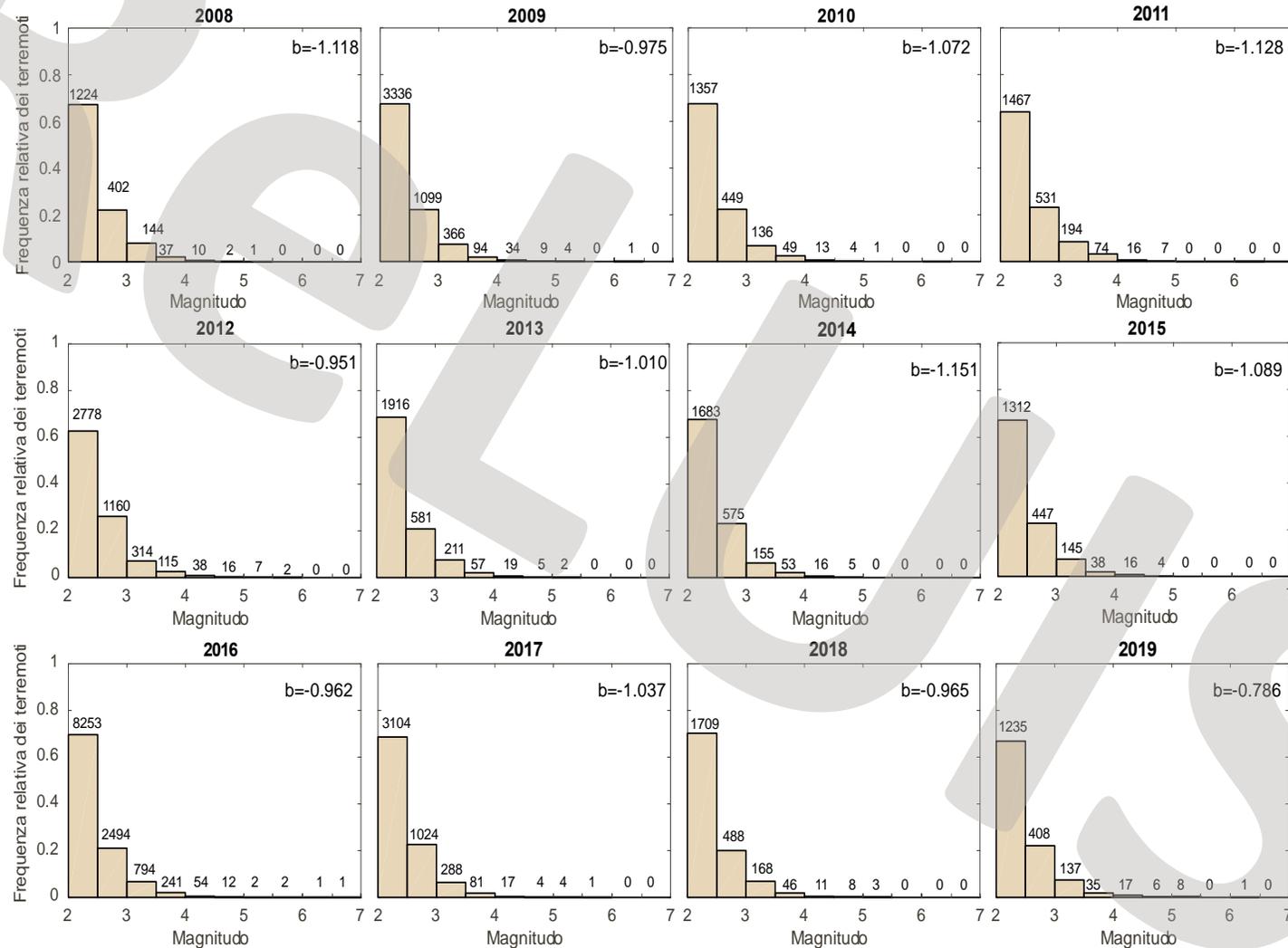
Intervalli di completezza



Distribuzione Gutenberg-Richter

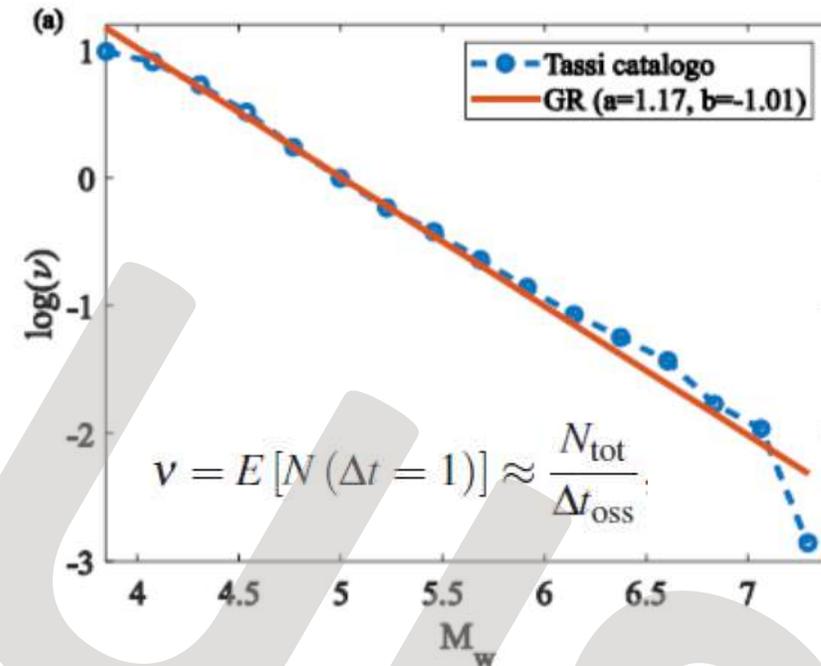
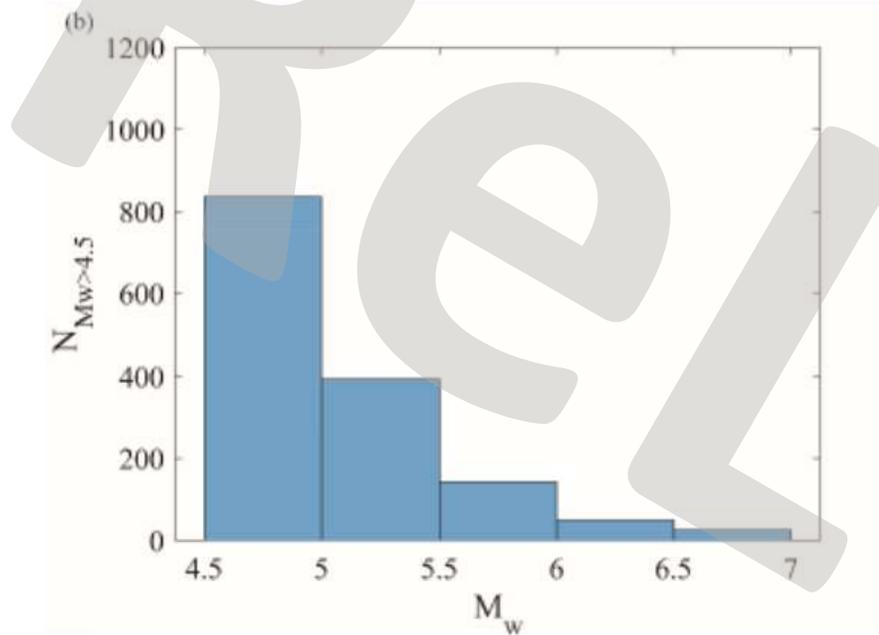
$$\log v(M_w) = a - b \cdot (M_w - M_{w,min})$$

Frequenze relative per classi di magnitudo dei terremoti di magnitudo maggiore o uguale a due registrati negli ultimi dodici anni.



Distribuzione Gutenberg-Richter

$$\log v(M_w) = a - b \cdot (M_w - M_{w,\min})$$

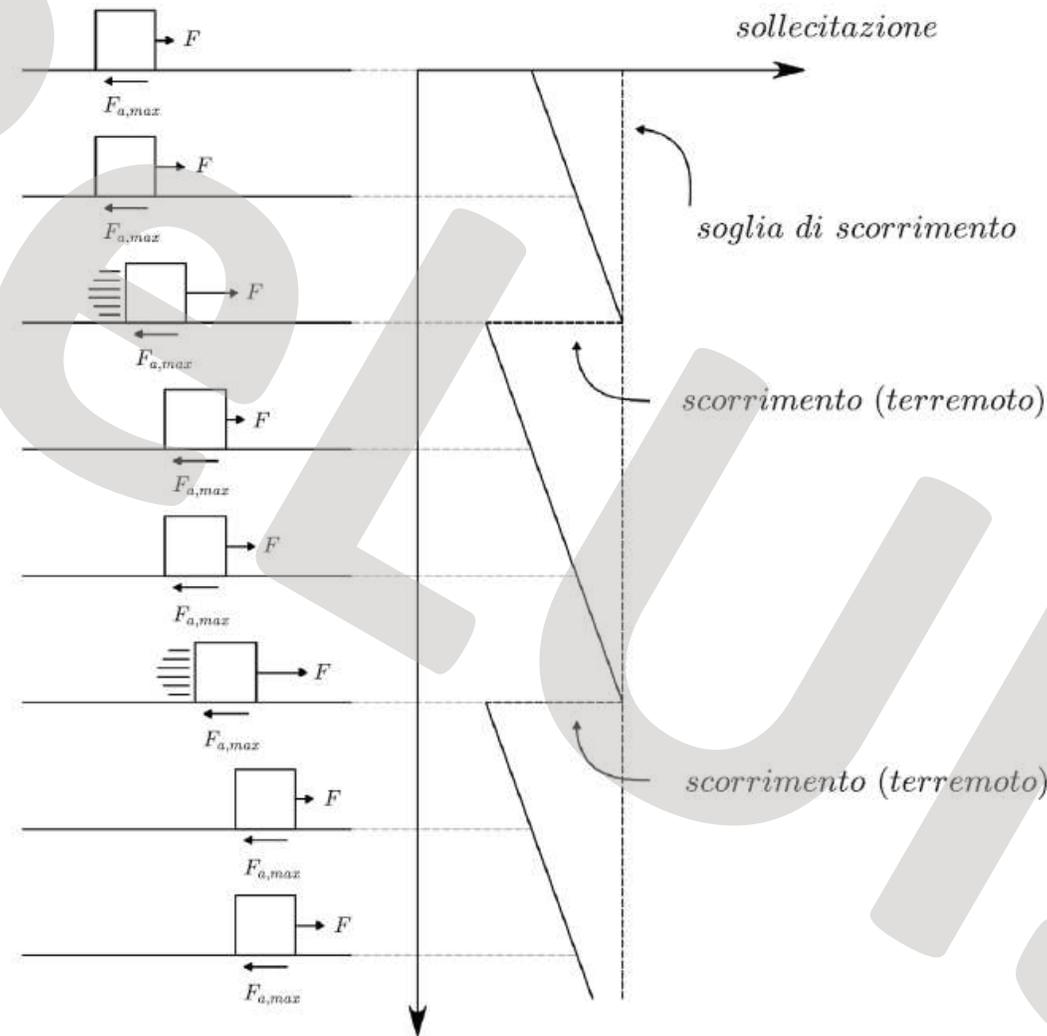


E' possibile modellare l'occorrenza di terremoti nel tempo attraverso un modello matematico che si chiama Processo di Poisson Omogeneo e descrive bene l'occorrenza di terremoti principali su aree geografici sufficientemente grandi.

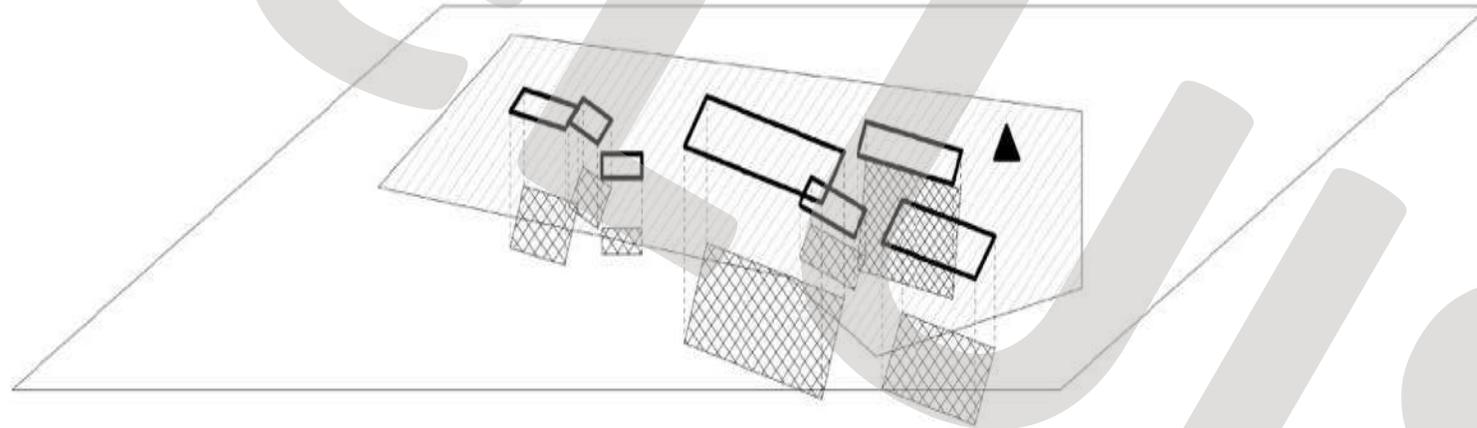
Numero medio terremoti nell'unità di tempo Intervallo temporale di interesse

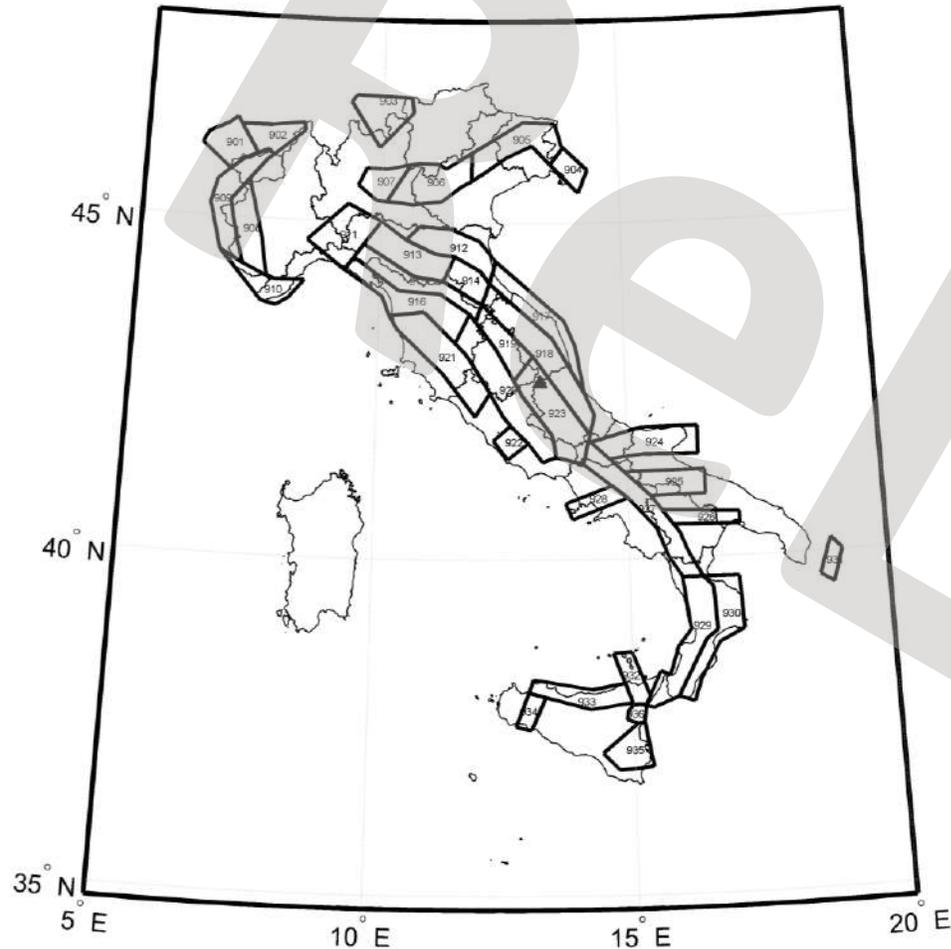
$$P[N(\Delta T) = n] = \frac{(\nu \cdot \Delta T)^n}{n!} \cdot e^{-\nu \cdot \Delta T}$$

| Magnitudo | Periodo di ritorno | P in 1 anno | P in 10 anno | P in 50 anno |
|-----------|--------------------|-------------|--------------|--------------|
| ≥5 | ~1 | ~0.63 | ~1.00 | ~1.00 |
| ≥6 | ~7 | ~0.13 | ~0.75 | ~1.00 |
| ≥7 | ~60 | ~0.02 | ~0.16 | ~0.57 |



- *Proiezione faglia*
- ▨ *Zona sismogenetica*
- ▩ *Faglia*





| Zone | M_{\min} | M_{\max} | $v(M_{\min})$ | b |
|------|------------|------------|---------------|-------|
| 901 | 4.3 | 5.8 | 0.045 | 1.133 |
| 902 | 4.3 | 6.1 | 0.103 | 0.935 |
| 903 | 4.3 | 5.8 | 0.117 | 1.786 |
| 904 | 4.3 | 5.5 | 0.050 | 0.939 |
| 905 | 4.3 | 6.6 | 0.316 | 0.853 |
| 906 | 4.3 | 6.6 | 0.135 | 1.092 |
| 907 | 4.3 | 5.8 | 0.065 | 1.396 |
| 908 | 4.3 | 5.5 | 0.140 | 1.408 |
| 909 | 4.3 | 5.5 | 0.055 | 0.972 |
| 910 | 4.3 | 6.4 | 0.085 | 0.788 |
| 911 | 4.3 | 5.5 | 0.050 | 1.242 |
| 912 | 4.3 | 6.1 | 0.091 | 1.004 |
| 913 | 4.3 | 5.8 | 0.204 | 1.204 |
| 914 | 4.3 | 5.8 | 0.183 | 1.093 |
| 915 | 4.3 | 6.6 | 0.311 | 1.083 |
| 916 | 4.3 | 5.5 | 0.089 | 1.503 |
| 917 | 4.3 | 6.1 | 0.121 | 0.794 |
| 918 | 4.3 | 6.4 | 0.217 | 0.840 |

| Zone | M_{\min} | M_{\max} | $v(M_{\min})$ | b |
|------|------------|------------|---------------|-------|
| 919 | 4.3 | 6.4 | 0.242 | 0.875 |
| 920 | 4.3 | 5.5 | 0.317 | 1.676 |
| 921 | 4.3 | 5.8 | 0.298 | 1.409 |
| 922 | 4.3 | 5.2 | 0.090 | 1.439 |
| 923 | 4.3 | 7.3 | 0.645 | 0.802 |
| 924 | 4.3 | 7.0 | 0.192 | 0.945 |
| 925 | 4.3 | 7.0 | 0.071 | 0.508 |
| 926 | 4.3 | 5.8 | 0.061 | 1.017 |
| 927 | 4.3 | 7.3 | 0.362 | 0.557 |
| 928 | 4.3 | 5.8 | 0.054 | 1.056 |
| 929 | 4.3 | 7.6 | 0.394 | 0.676 |
| 930 | 4.3 | 6.6 | 0.146 | 0.715 |
| 931 | 4.3 | 7.0 | 0.045 | 0.490 |
| 932 | 4.3 | 6.1 | 0.118 | 0.847 |
| 933 | 4.3 | 6.1 | 0.172 | 1.160 |
| 934 | 4.3 | 6.1 | 0.043 | 0.778 |
| 935 | 4.3 | 7.6 | 0.090 | 0.609 |
| 936 | 3.7 | 5.2 | 0.448 | 1.219 |

Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G., Boschi, E. (2008). A Seismic Source Zone Model for the Seismic Hazard Assessment of the Italian Territory, *Tectonophysics* 450, 85–108.

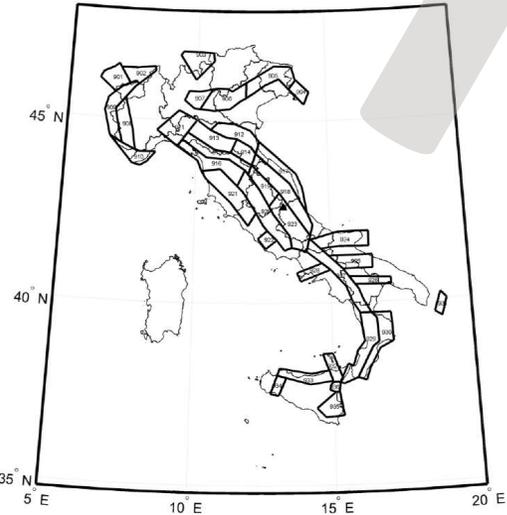
Barani S, Spallarossa D, Bazzurro P. Erratum to Disaggregation of Probabilistic Ground-Motion Hazard in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2010;100:3335–6. <https://doi.org/10.1785/0120100169>.

Barani S, Spallarossa D, Bazzurro P. Disaggregation of probabilistic ground-motion Hazard in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2009;99:2638–61. <https://doi.org/10.1785/0120080348>.

Modulo II - Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Lezione 1 - Il rischio sismico dei ponti esistenti: basi teoriche

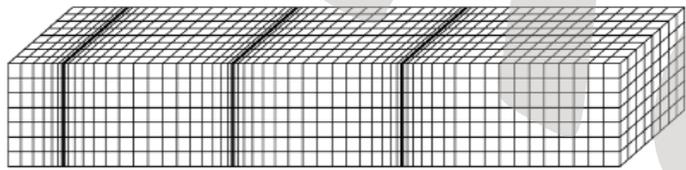
Dati INGV alla base delle NTC



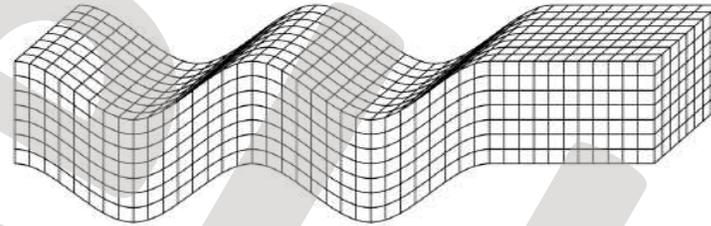
| Zona | v - tasso $M \geq 4$ [terremoti/anno] | Tr - periodo di ritorno [anni] | Zona | v - tasso $M \geq 4$ [terremoti/a nno] | Tr - periodo di ritorno [anni] |
|-----------------------------------|--|---|----------------------------|---|--------------------------------------|
| 923 Appennino Abruzzese | 0.64 | 1.6 | 932 Eolie - Patti | 0.12 | 8.5 |
| 929 Calabria tirrenica | 0.39 | 2.5 | 902 Vallese | 0.10 | 9.7 |
| 927 Sannio - Irpinia - Basilicata | 0.36 | 2.8 | 912 Dorsale Ferrarese | 0.09 | 10.9 |
| 920 Val di Chiana - Ciociaria | 0.32 | 3.2 | 916 Versilia-Chianti | 0.09 | 11.0 |
| 905 Friuli - Veneto Orientale | 0.32 | 3.2 | 922 Colli Albani | 0.09 | 11.1 |
| 915 Garfagnana - Mugello | 0.31 | 3.2 | 935 Iblei | 0.09 | 11.1 |
| 921 Etruria | 0.30 | 3.4 | 910 Nizza - Sanremo | 0.09 | 11.7 |
| 919 Appennino Umbro | 0.24 | 4.1 | 925 Ofanto | 0.07 | 14.1 |
| 918 Medio-Marchigiana/Abruzzese | 0.22 | 4.6 | 936 Etna ($M \geq 3.5$) | 0.07 | 14.3 |
| 913 Appennino Emiliano-Romagnolo | 0.21 | 4.9 | 907 Bergamasco | 0.07 | 15.2 |
| 924 Molise-Gargano | 0.19 | 5.2 | 926 Basento | 0.06 | 16.3 |
| 914 Forlivese | 0.18 | 5.5 | 909 Alpi Occidentali | 0.06 | 17.6 |
| 933 Sicilia settentrionale | 0.17 | 5.8 | 928 Ischia - Vesuvio | 0.06 | 18.0 |
| 930 Calabria ionica | 0.15 | 6.8 | 911 Tortona - Bobbio | 0.05 | 20.0 |
| 908 Piemonte | 0.14 | 7.2 | 904 Trieste - Monte Nevoso | 0.05 | 20.0 |
| 906 Garda - Veronese | 0.13 | 7.4 | 901 Savoia | 0.05 | 21.3 |
| 917 Rimini - Ancona | 0.12 | 8.2 | 931 Canale d'Otranto | 0.05 | 22.1 |
| 903 Grigioni - Valtellina | 0.12 | 8.4 | 934 Belice | 0.04 | 23.0 |

Onde di volume

Mezzo indisturbato

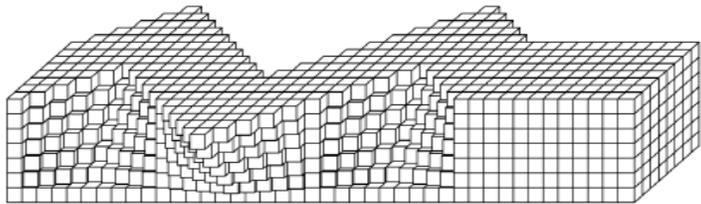


Deformazioni indotte dalle onde primarie nel mezzo di propagazione

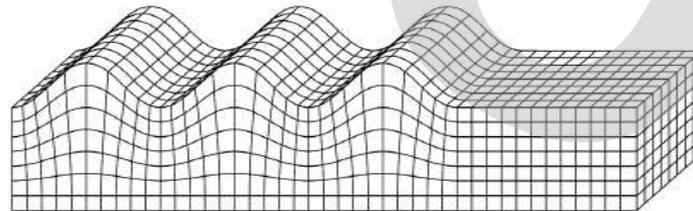


Deformazioni indotte dalle onde secondarie nel mezzo di propagazione

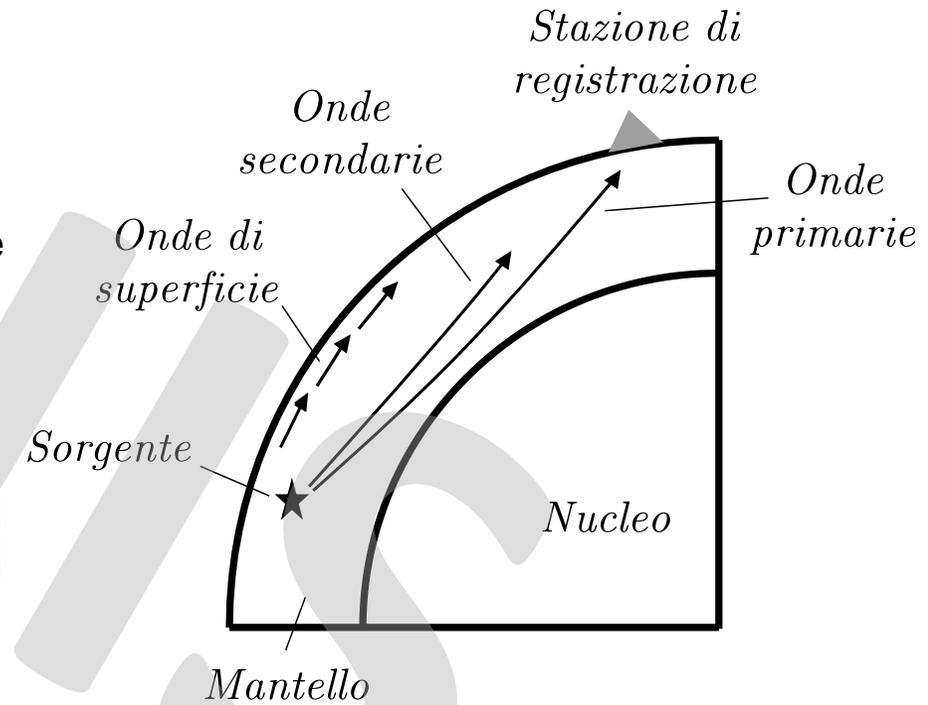
Onde di superficie



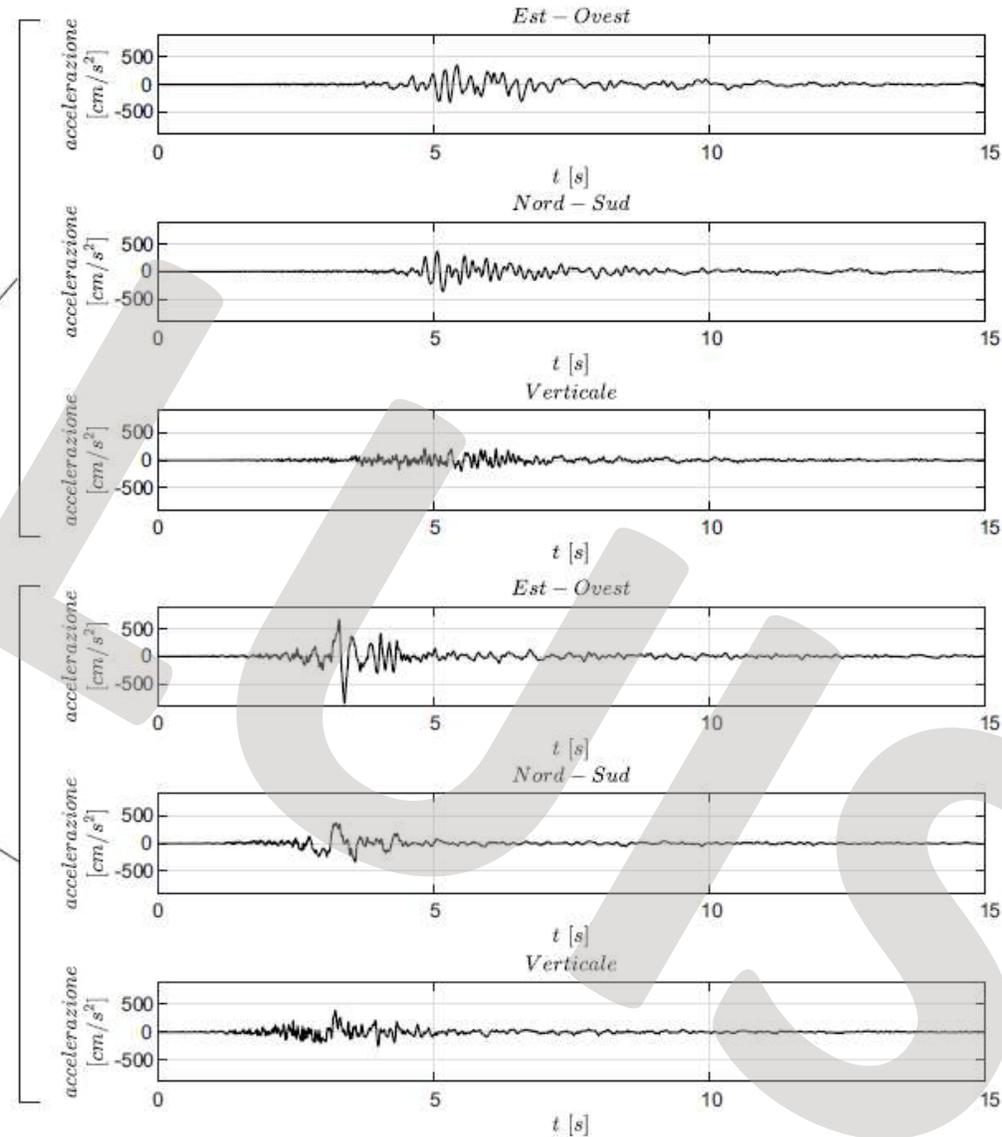
Deformazioni indotte dalle onde di Love nel mezzo di propagazione



Deformazioni indotte dalle onde di Rayleigh nel mezzo di propagazione



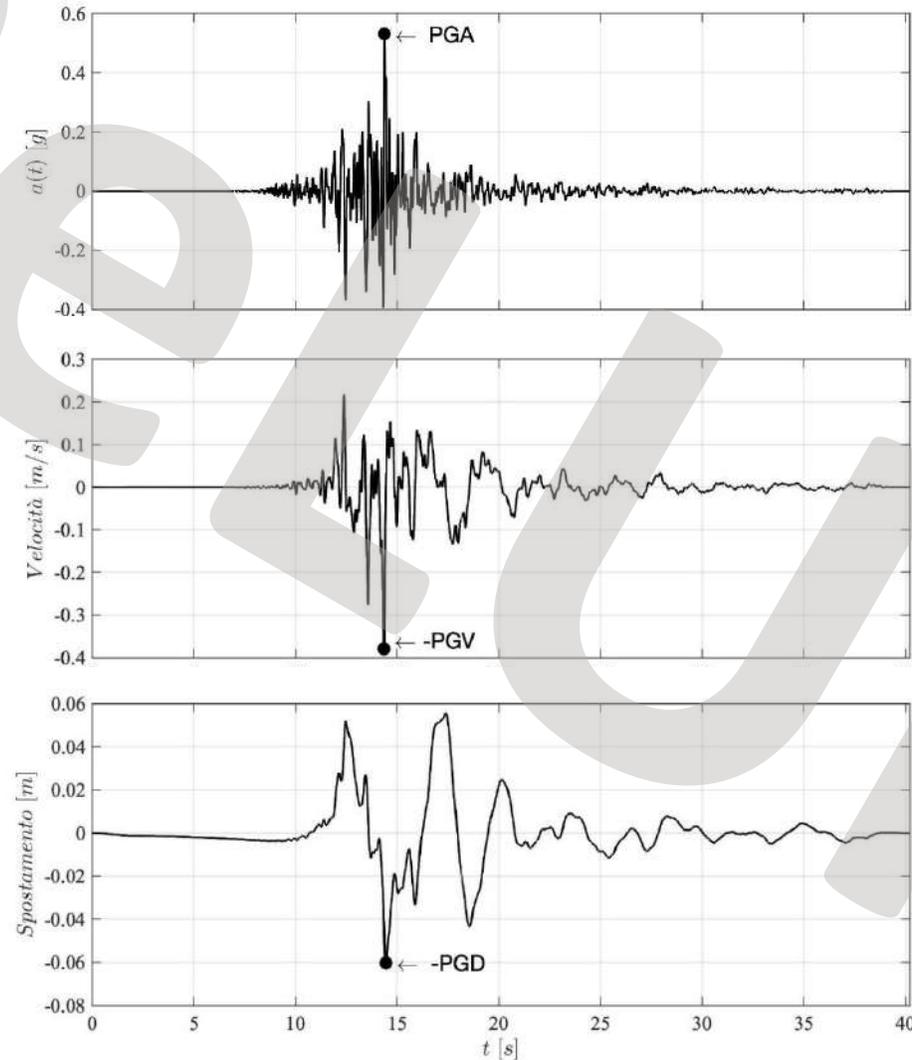
M6.0 24 ago. 2016

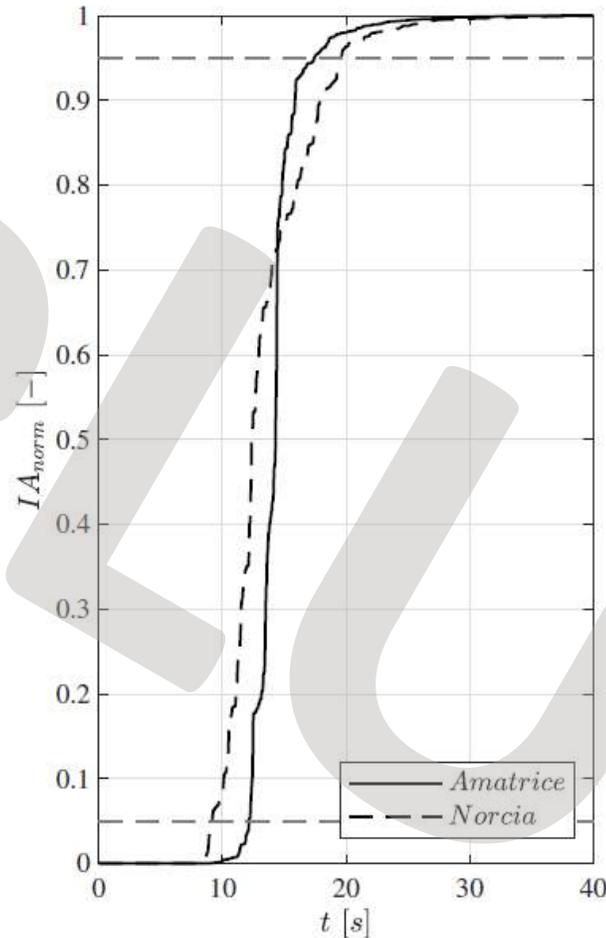
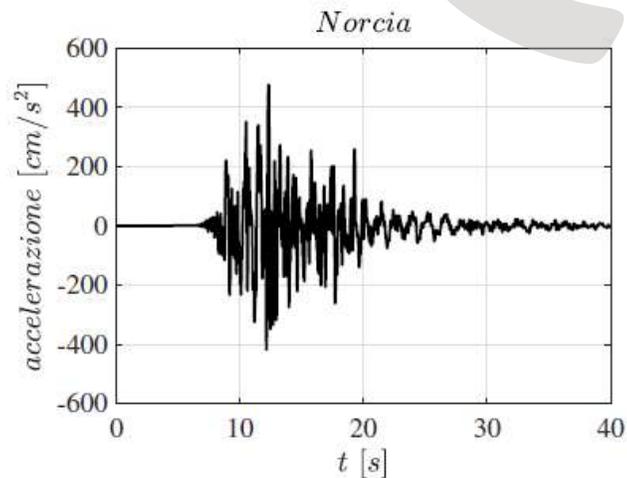
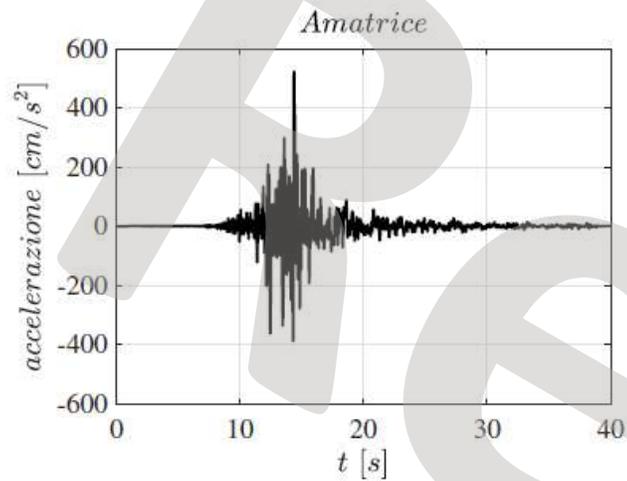


Segnali accelerometrici e misure di intensità

Ciò che interessa nella progettazione strutturale sono i segnali accelerometrici al sito di interesse. Purtroppo non siamo in grado in prevederli

$$\begin{cases} PGA = \max_t |a(t)| \\ PGV = \max_t |v(t)| \\ PGD = \max_t |s(t)| \end{cases}$$





$$IA(t) = \frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_{t_1}^t a^2(u) \cdot du.$$

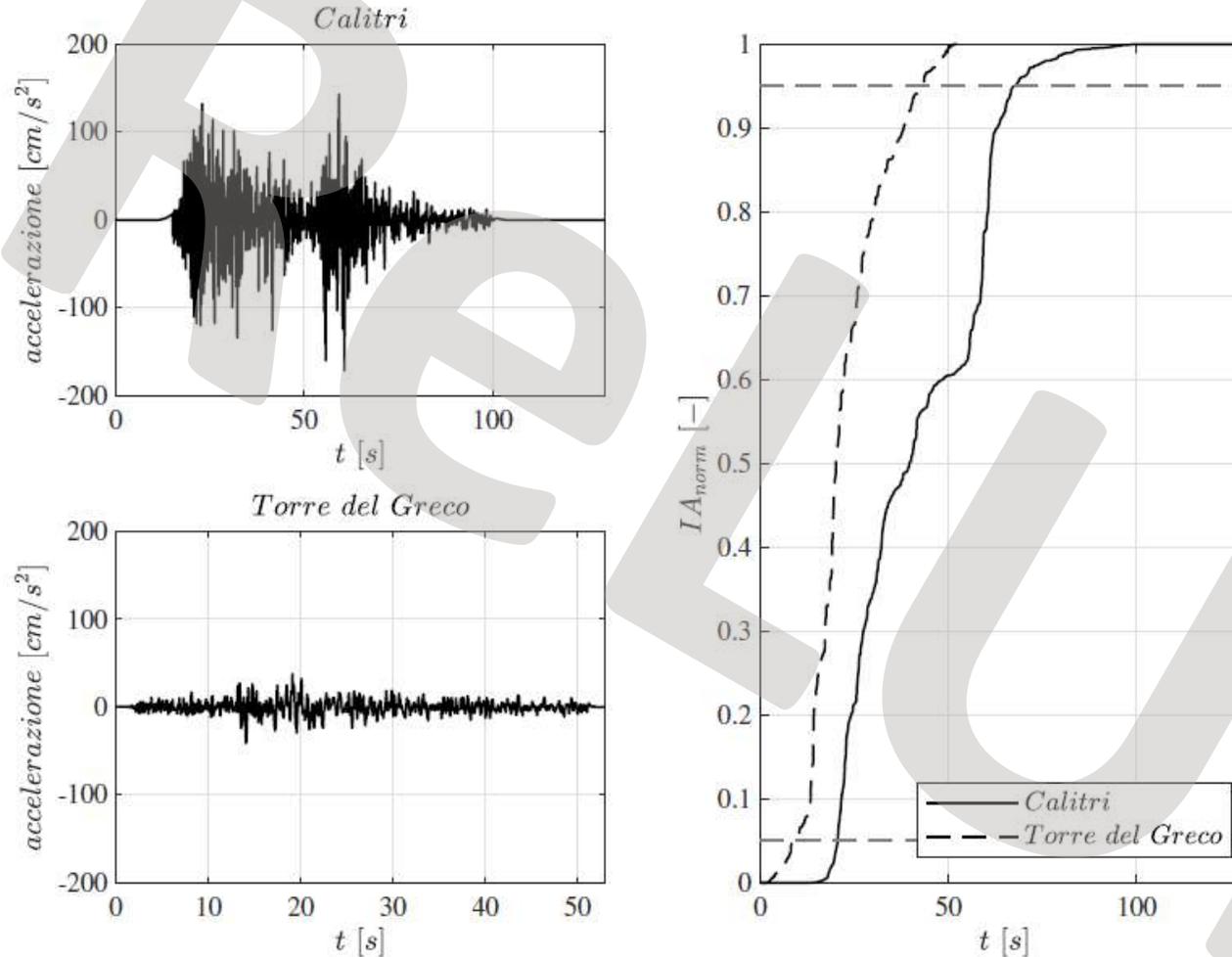
Durata significativa 5-95

$$D_{5-95} = t_{95} - t_5$$

Terremoto del centro Italia $M_w = 6.5$ del 30/10/2016 nelle stazioni NRC e AMT a distanza epicentrale rispettivamente di 4.6 e 26.4 km. Per entrambi i segnali sono state rappresentate le componenti orizzontali est-ovest e i rispettivi Husid plot.

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli. Copyright © *Ulrico Hoepli Editore S.p.A.* 2021

Segnali accelerometrici e misure di intensità



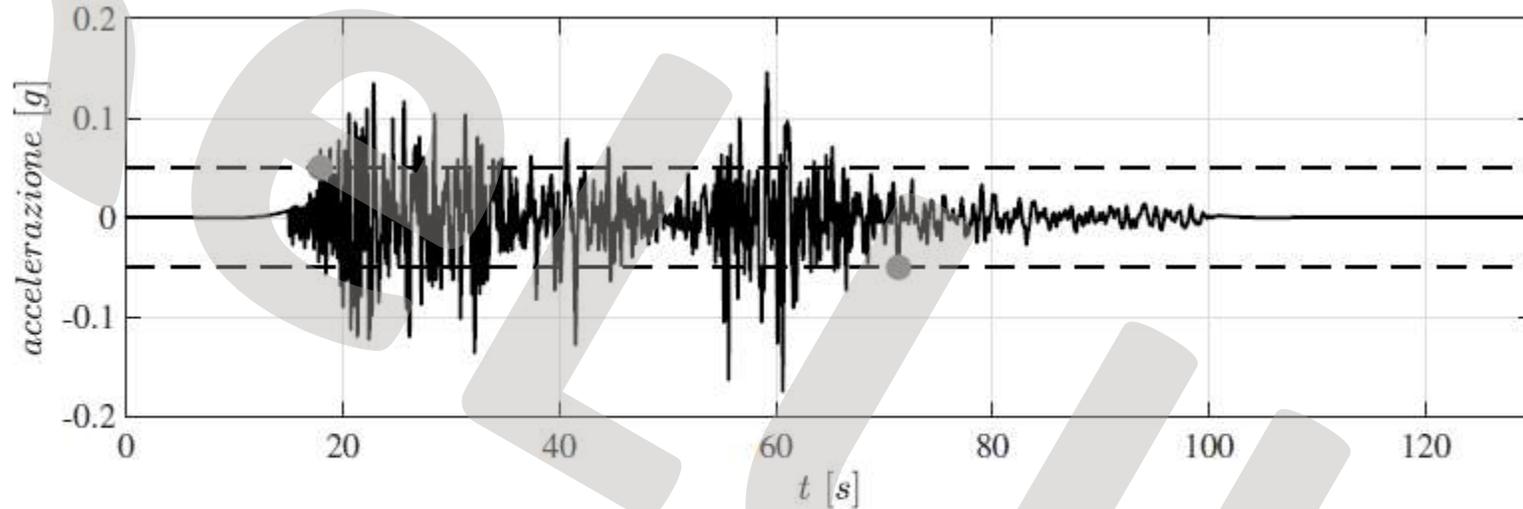
$$IA(t) = \frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_{t_1}^t a^2(u) \cdot du.$$

Durata significativa 5-95

$$D_{5-95} = t_{95} - t_5$$

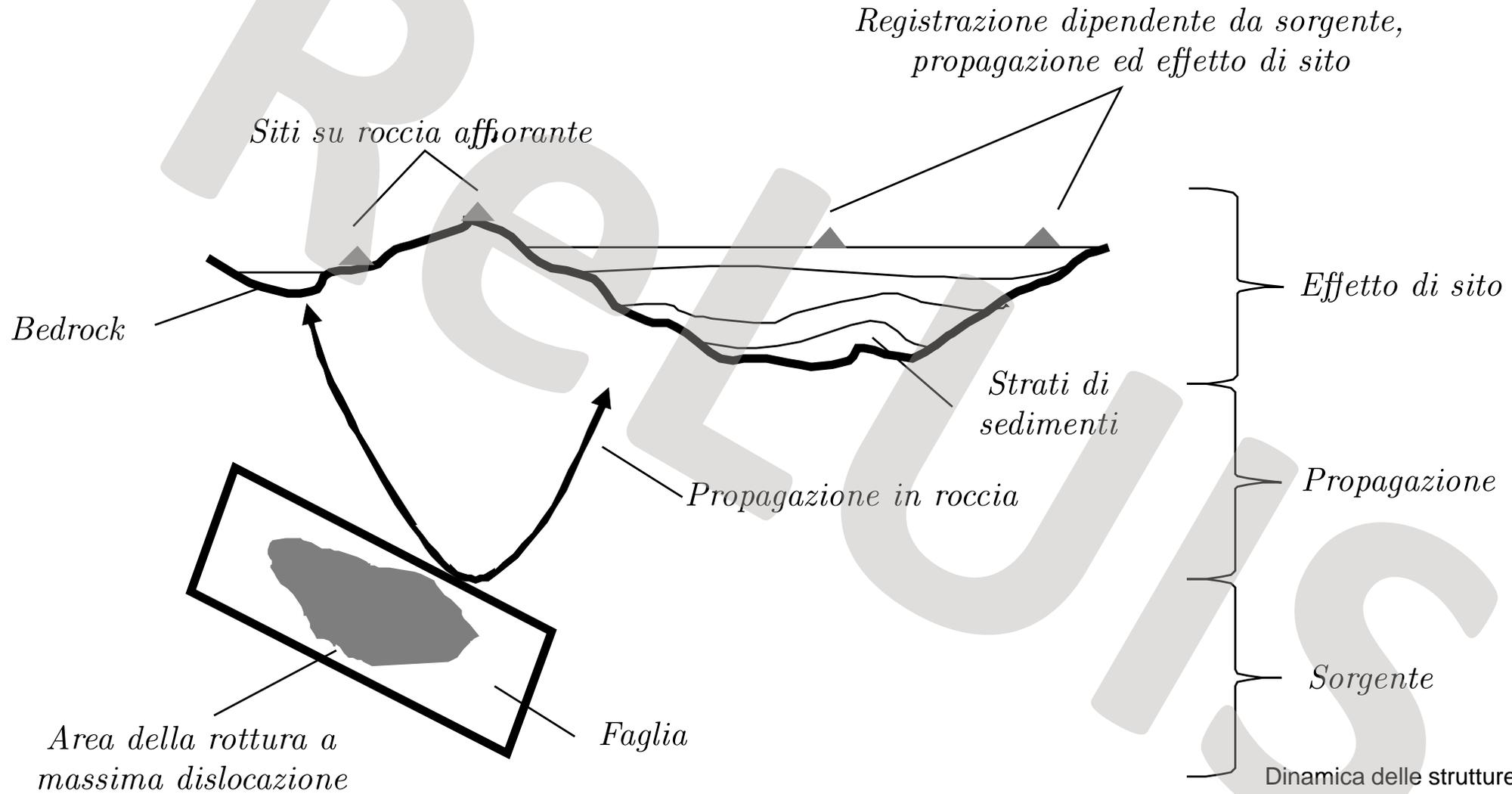
Terremoto dell'Irpinia 23/11/1980, $M_w = 6.9$. Segnali delle stazioni CLT e TDG, componenti est-ovest. Intensità di Arias normalizzata (Husid plot), in cui si vedono chiaramente tre eventi diversi a CLT, mentre il terremoto appare come unico a TGD.

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli. Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021*



Misura della *bracketed duration* del segnale di Calitri nel terremoto dell'Irpinia del 23/11/1980 ($M_w = 6.9$).

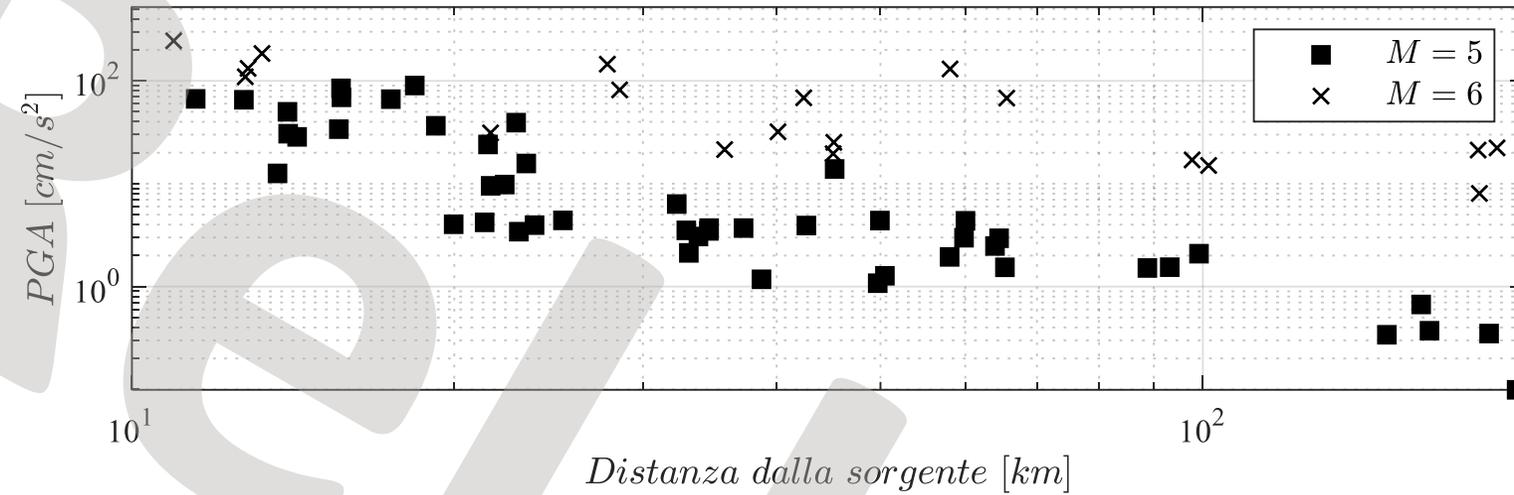
Propagazione del segnale



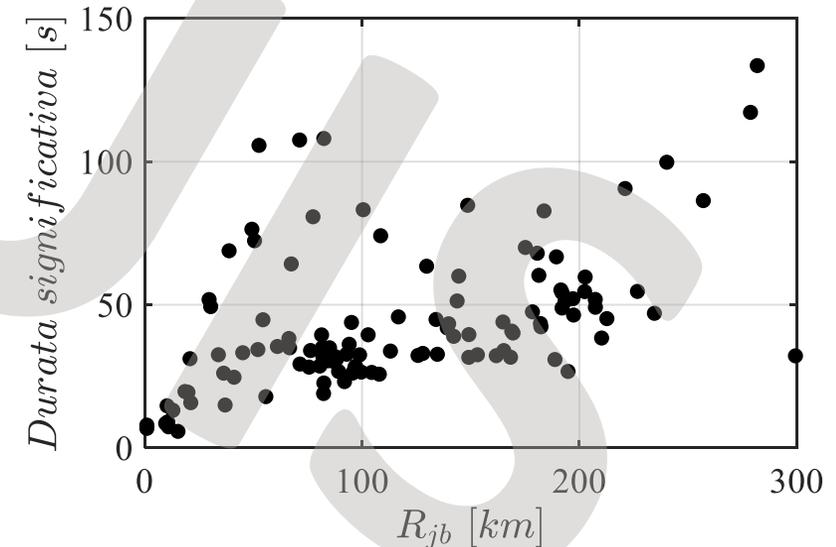
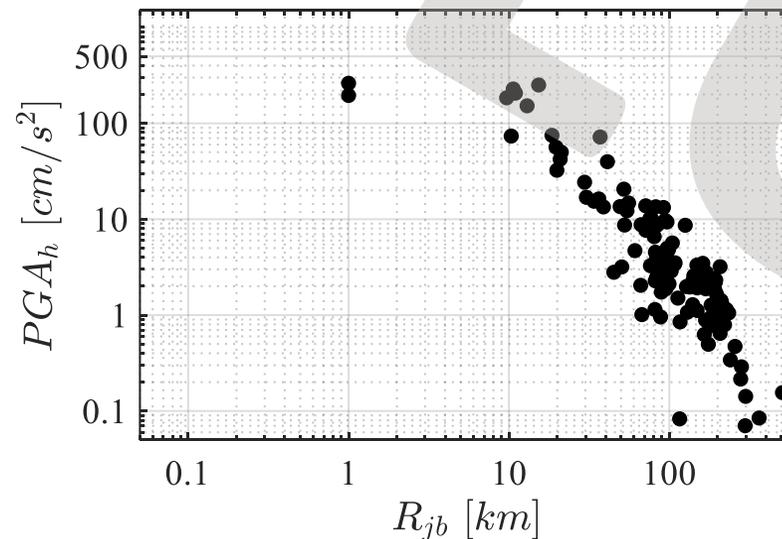
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli.
Copyright © *Ulrico Hoepli Editore S.p.A.* 2021

Propagazione del segnale

Effetto sorgente

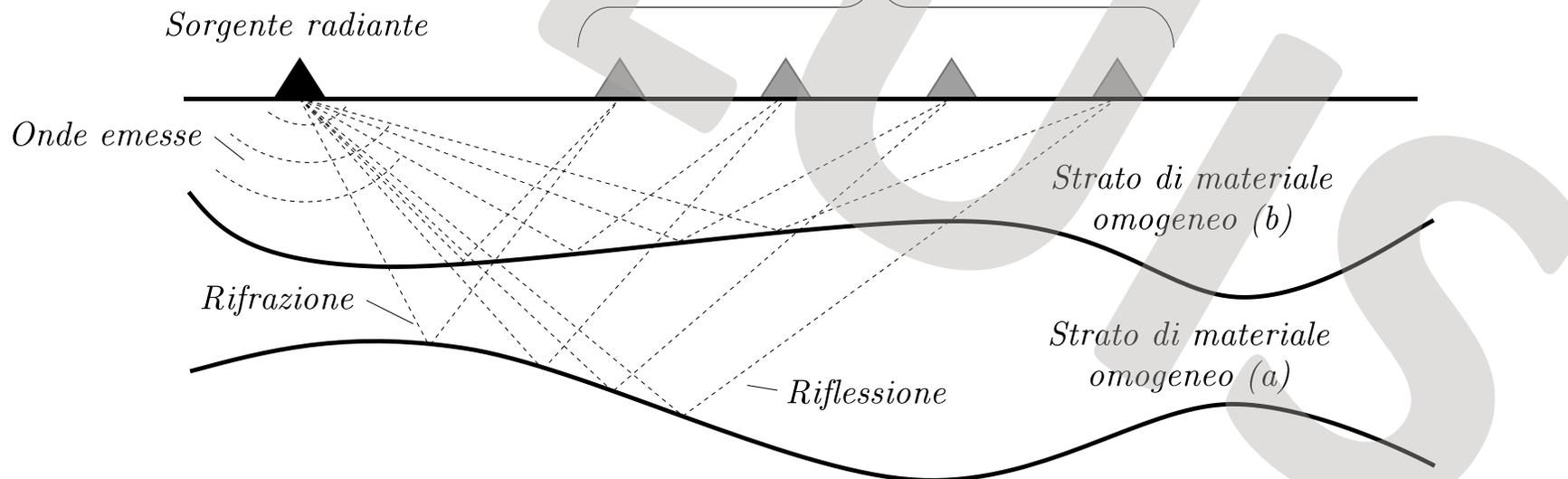
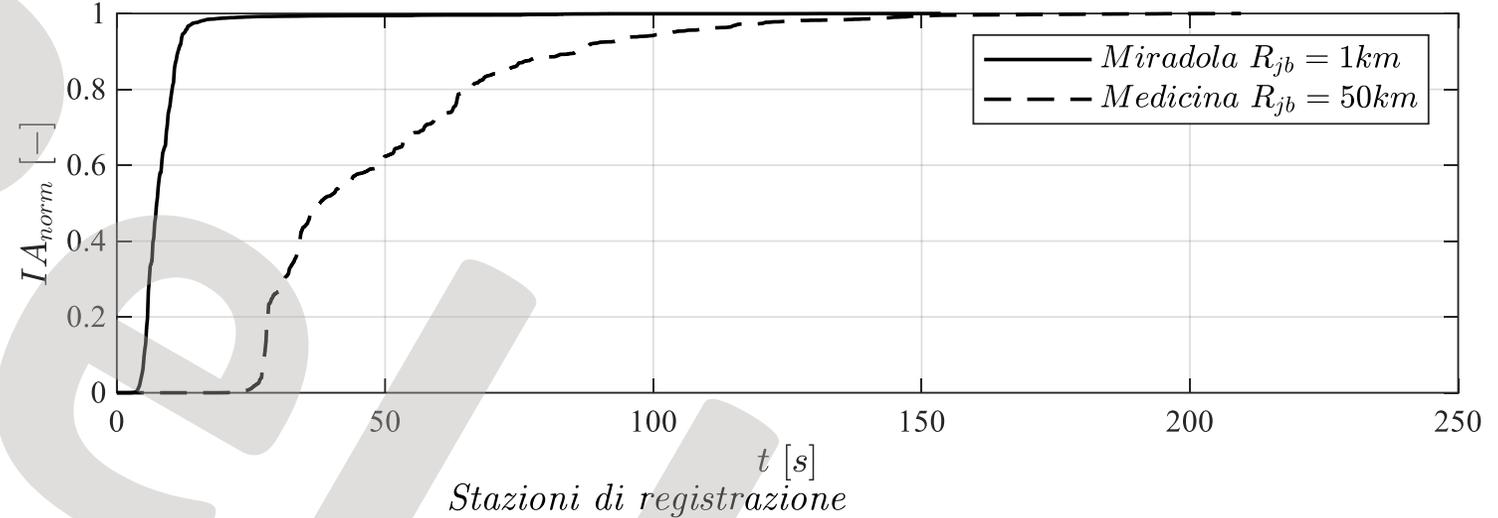


Esempi di propagazione delle misure di picco (sx) e integrali (dx) con la distanza sito-sorgente



Propagazione del segnale

Amplificazione di alcune misure di intensità integrali con la distanza sito-sorgente



Propagazione del segnale

Stazioni di registrazione

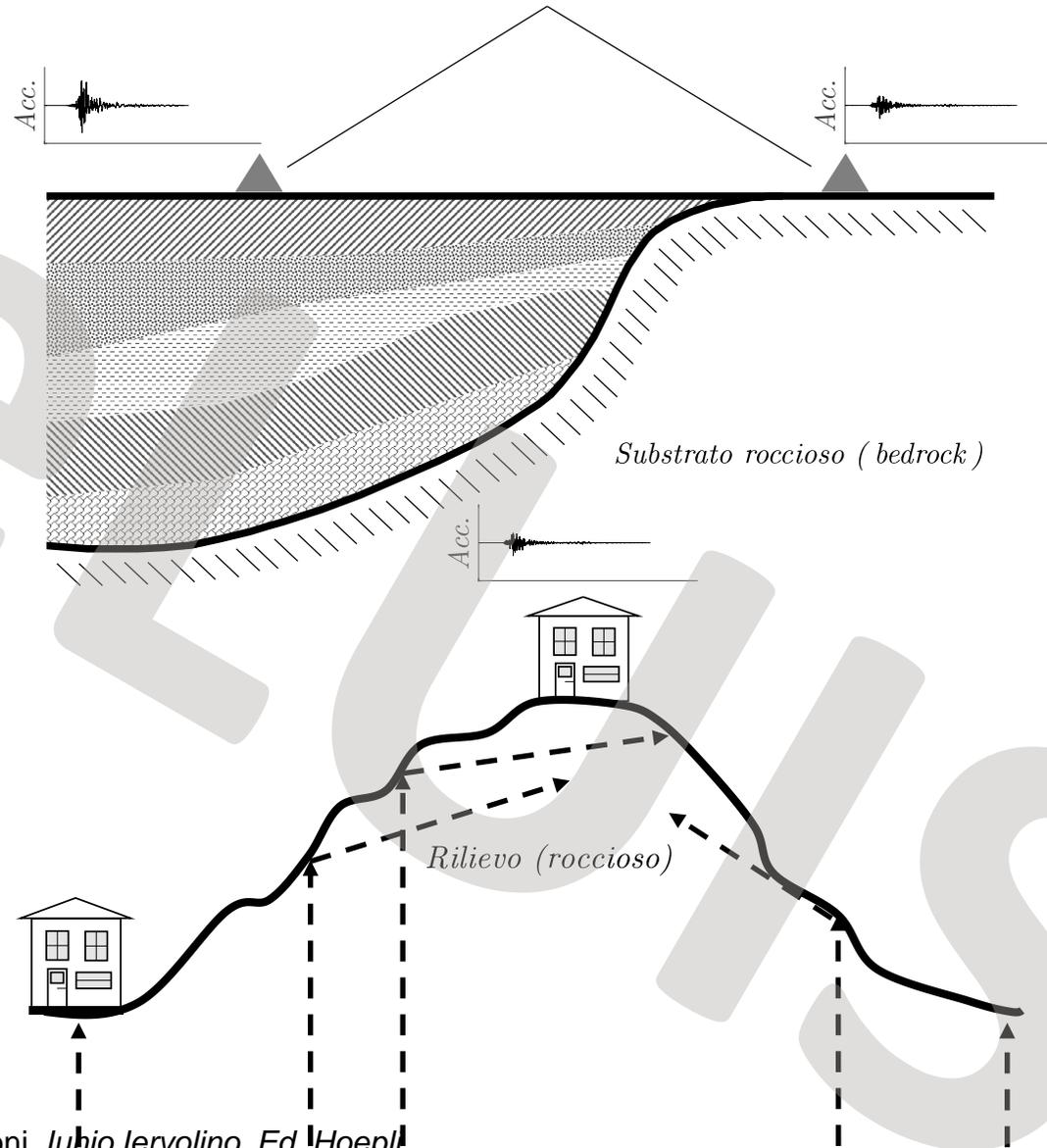
Effetto stratigrafico

Deposito di sedimenti

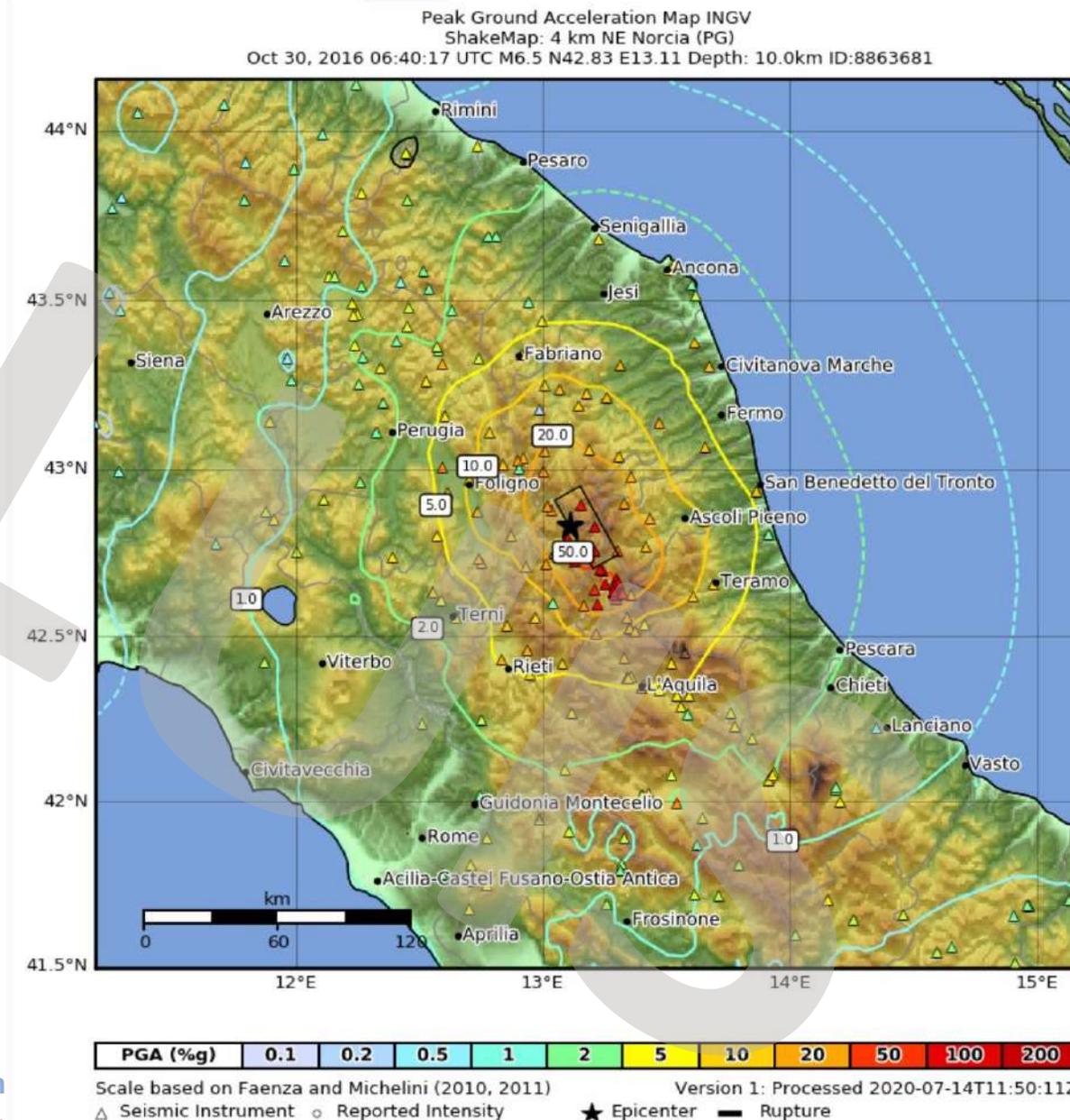
Substrato roccioso (bedrock)

Effetto topografico

Rilievo (roccioso)



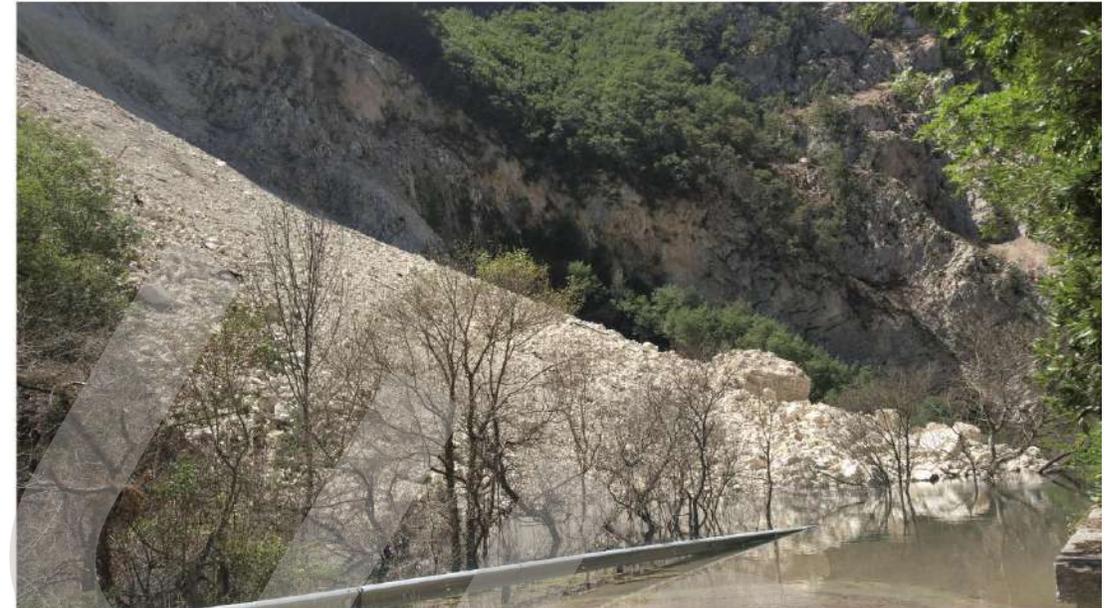
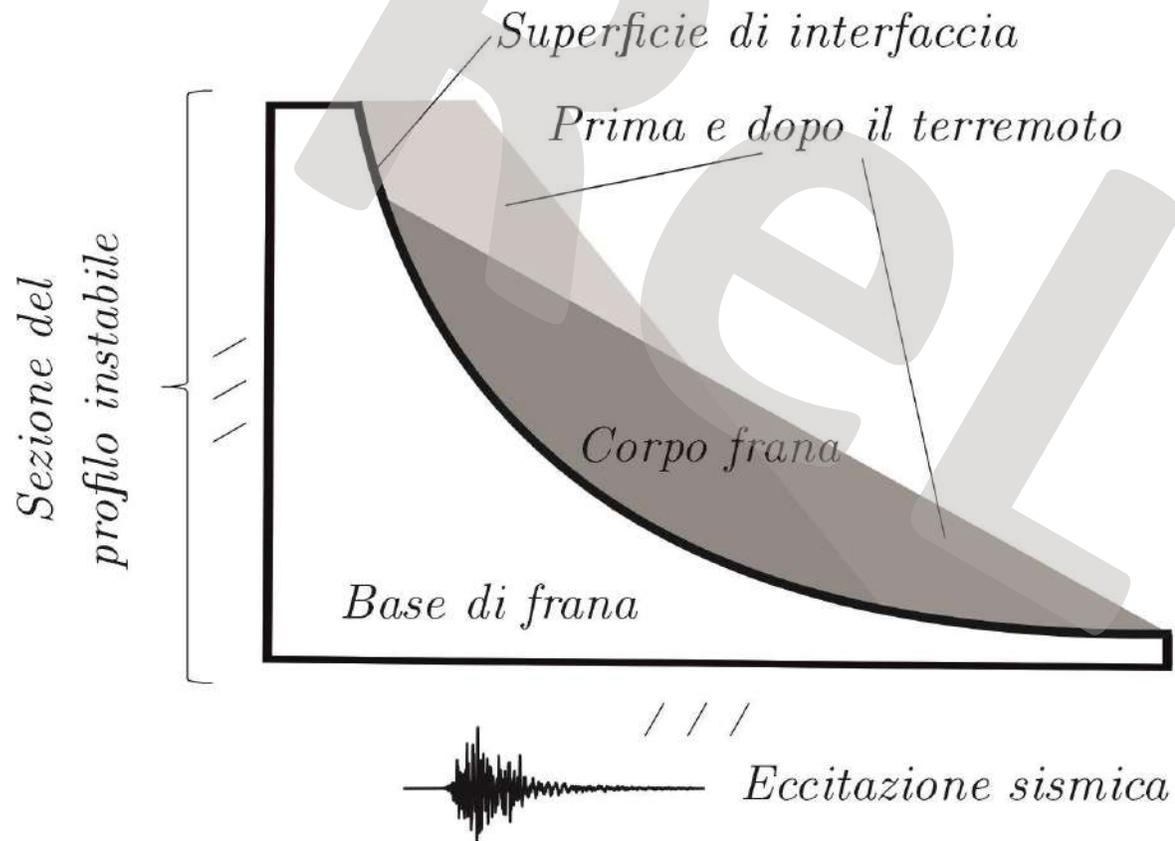
Mappe di scuotimento per il terremoto del 30/10/2016 di magnitudo 6.5.



<https://shakemap.ingv.it/>

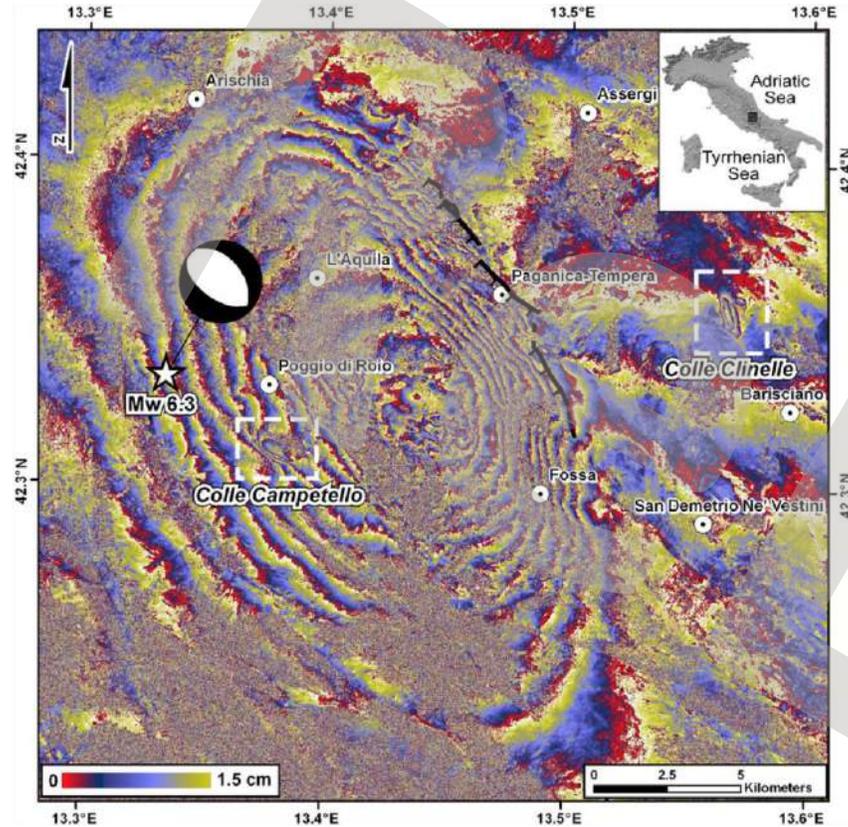
Modulo II - Rischi naturali e in

Lezione 1 - Il rischio sismico nei ponti esistenti. basi teoriche

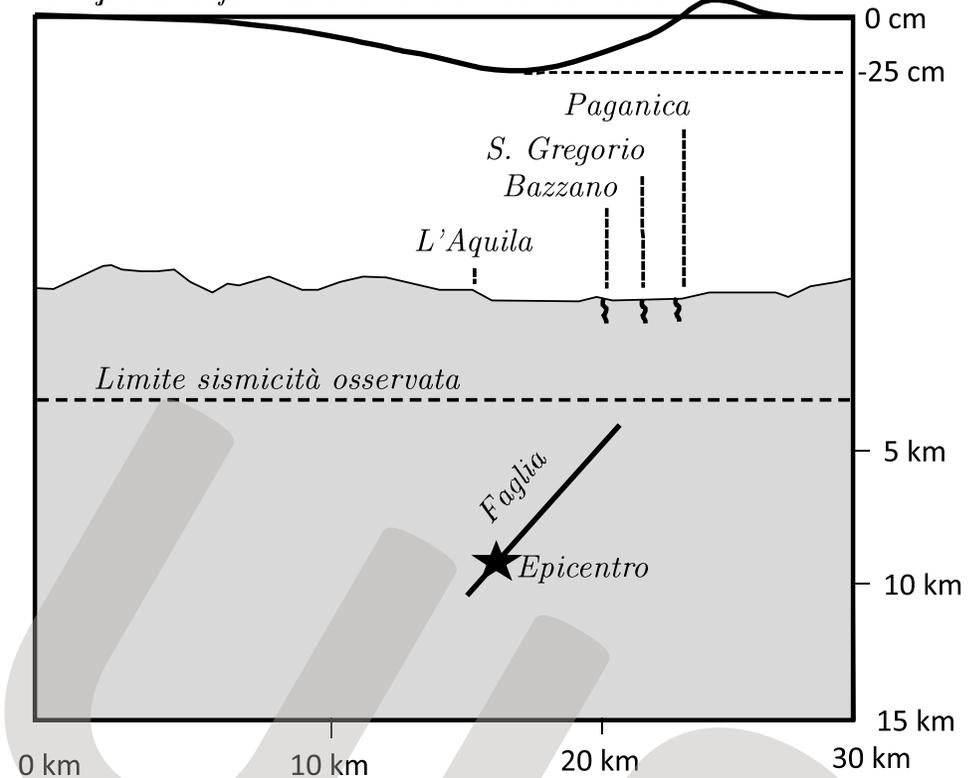


Schema di frana sismo-indotta (sinistra) e esempio di frana sismo-indotta in Valnerina durante la sequenza del centro Italia 2016-2017 (destra).

Spostamento sismico permanente



Profilo di deformazione co-sismica del suolo



Deformazione co-sismica per una sezione del territorio interessato dallo stesso terremoto

Interferogramma differenziale relativo al terremoto di $M_w = 6.3$ L'Aquila (Italia centrale), avvenuto il 6 aprile 2009. Ogni ciclo di colore (da rosso a blu) corrisponde a un gradiente di deformazione di 1.6 cm.

Dati COSMO-SkyMed dell'ASI (<https://www.ont.ingv.it/infrastrutture-di-ricerca/telerilevamento/laboratori-e-risorse?view=article&id=75&catid=2>)

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli. Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021*

Liquefazione e later-spreading

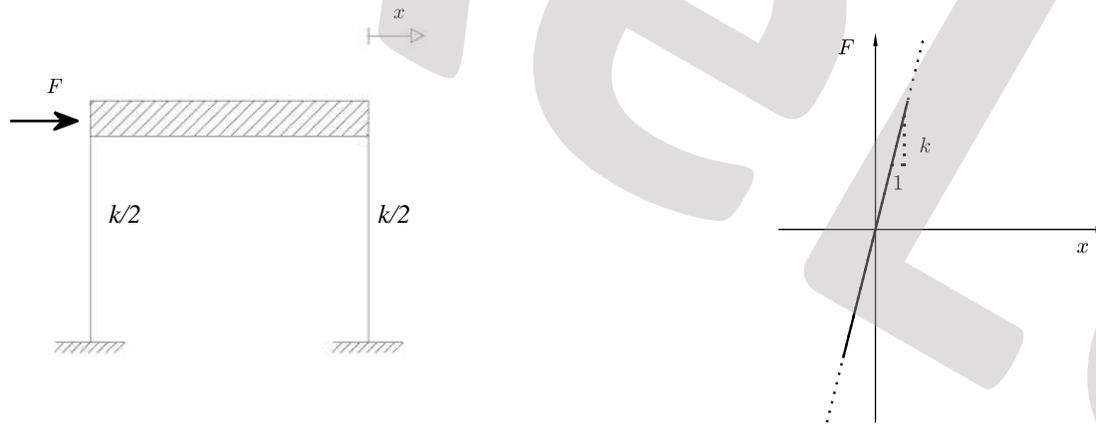


Effetto della liquefazione nel sito di Kawagishi-cho durante il terremoto di Niigata in Giappone ($M_w \approx 7.5 - 7.6$) del 16/06/1964

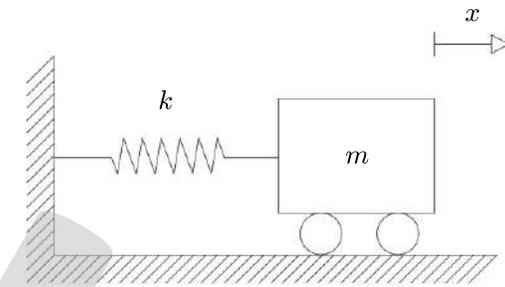
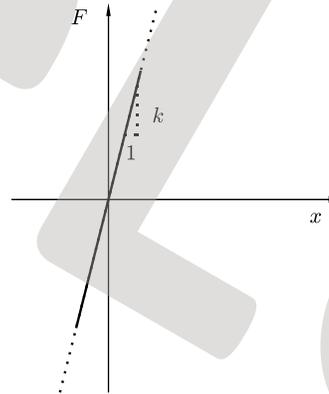
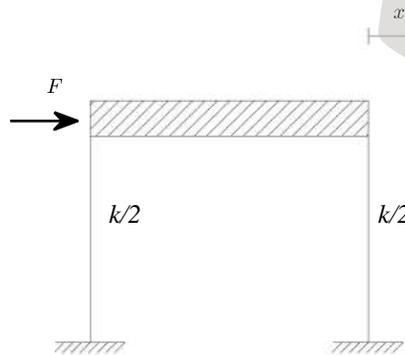
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli.*
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

Richiami di dinamica delle strutture – SDoF

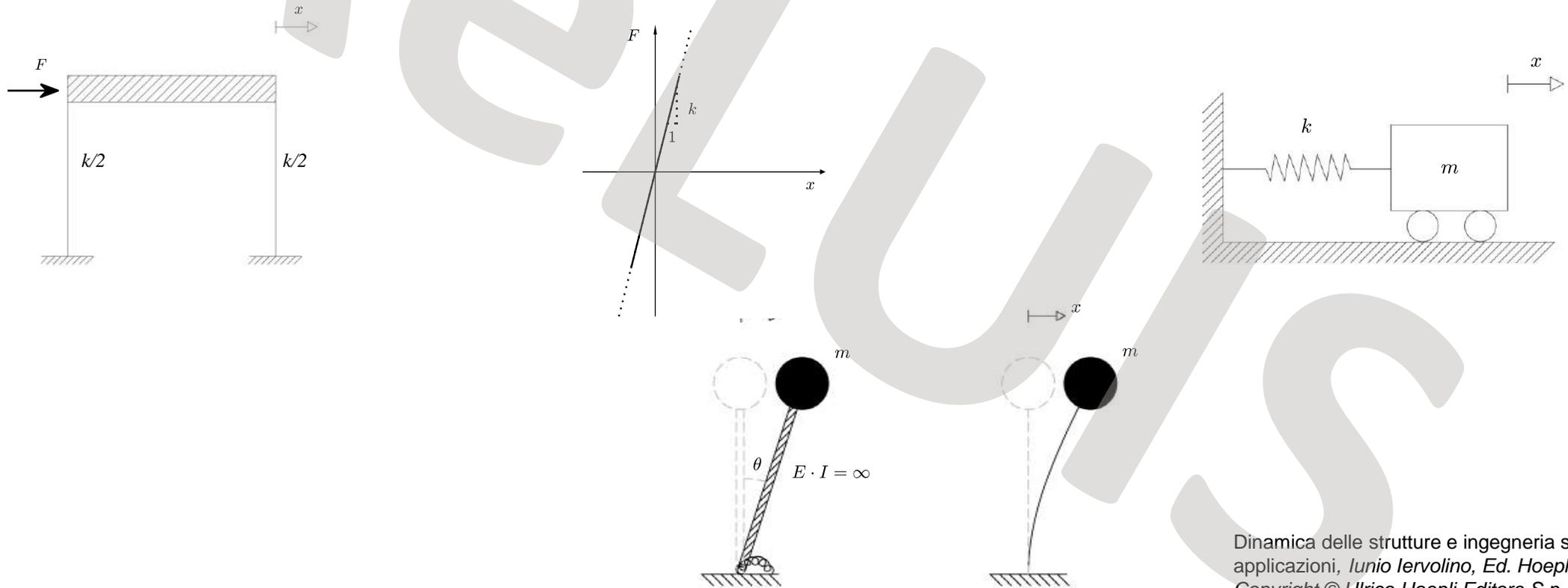
Si definiscono a un grado di libertà (*single degree of freedom* o SDoF) tutti i sistemi la cui configurazione in un qualsiasi istante di tempo, è completamente definita conoscendo il valore di un singolo parametro. Un esempio di tale categoria di sistemi è rappresentato da una struttura a telaio mono-piano e mono-campata. Un sistema a un grado di libertà con comportamento elastico-lineare, studiato in condizioni dinamiche, si chiama anche *oscillatore semplice elastico-lineare*.



Una rappresentazione alternativa dell'oscillatore semplice elastico-lineare è rappresentata da una massa posta su un carrello ad attrito nullo e collegata ad un riferimento fisso tramite una molla elastico-lineare di rigidezza k .



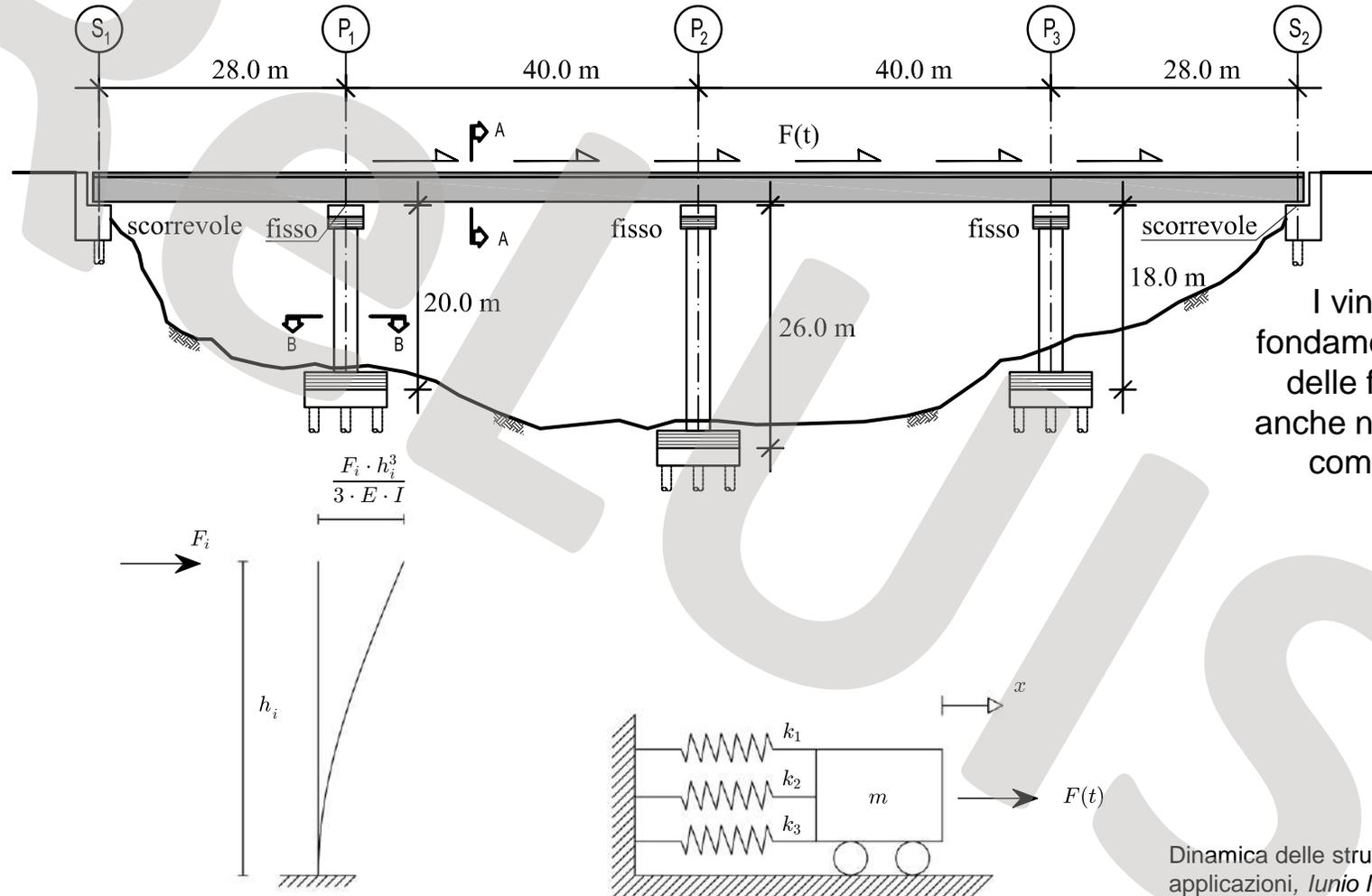
Una rappresentazione alternativa dell'oscillatore semplice elastico-lineare è rappresentata da una massa posta su un carrello ad attrito nullo e collegata ad un riferimento fisso tramite una molla elastico-lineare di rigidezza k . Esistono anche altre rappresentazioni equivalenti dello stesso sistema



Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli.
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

Anche alcuni ponti possono essere schematizzati, dal punto di vista dinamico, come oscillatori semplici elastico-lineare.

Ponte a travata continua

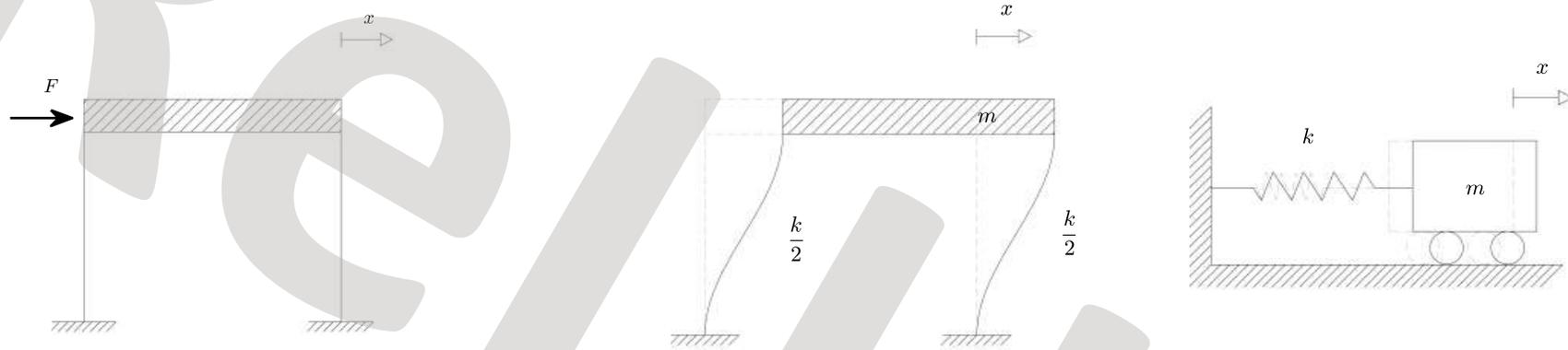


I vincoli giocano un ruolo fondamentale nella trasmissione delle forze sismiche e quindi anche nella scelta del modello di comportamento dinamico

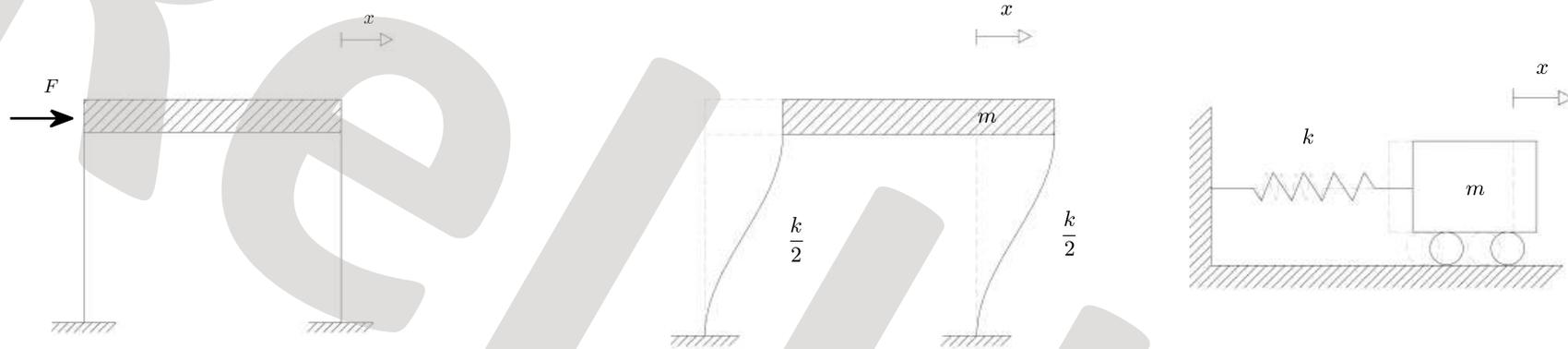
Modello di comportamento dinamico

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Junio Iervolino, Ed. Hoepli.*
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

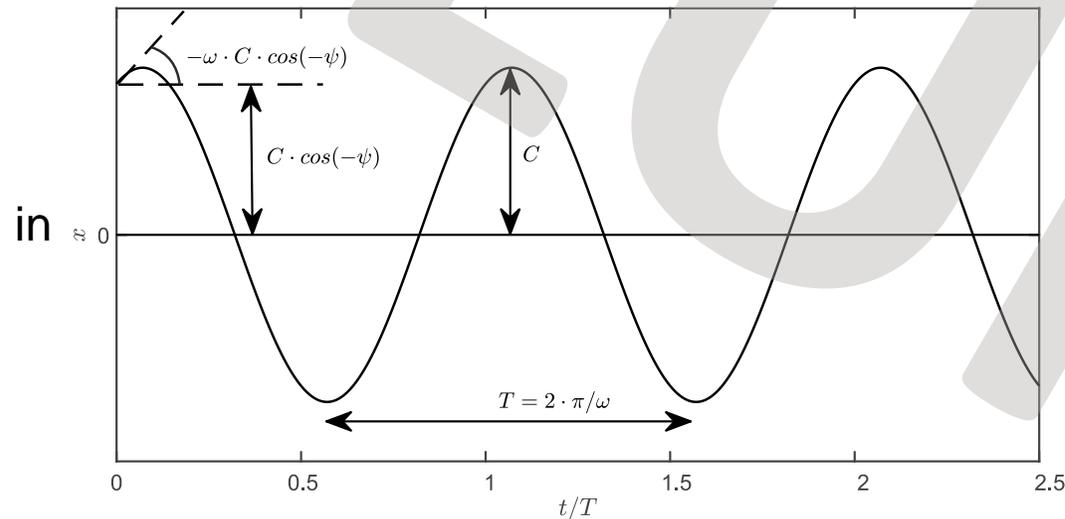
La risposta dinamica di un qualsiasi oscillatore semplice elastico-lineare può essere calcolata qualsiasi sia la sollecitazione agente nota. Tale risposta è governata dal periodo di vibrazione, T , che è una caratteristica propria del sistema.



La risposta dinamica di un qualsiasi oscillatore semplice elastico-lineare può essere calcolata qualsiasi sia la sollecitazione agente nota. Tale risposta è governata dal periodo di vibrazione, T , che è una caratteristica propria del sistema.

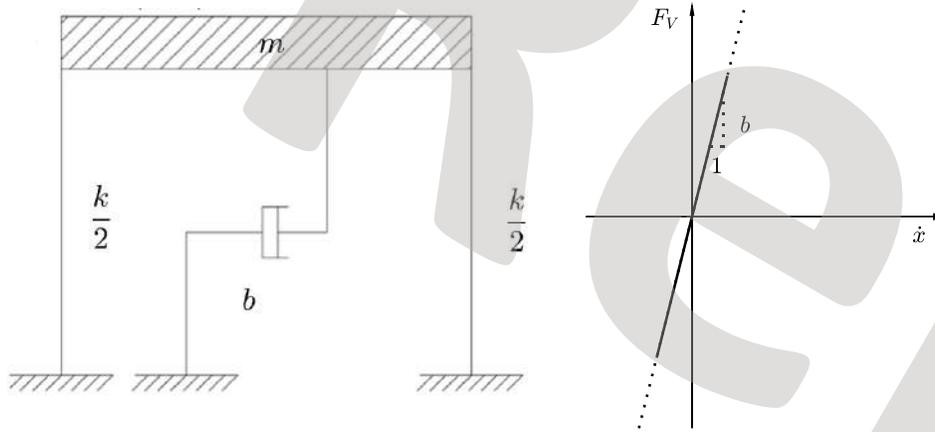


Risposta dinamica
oscillazioni libere

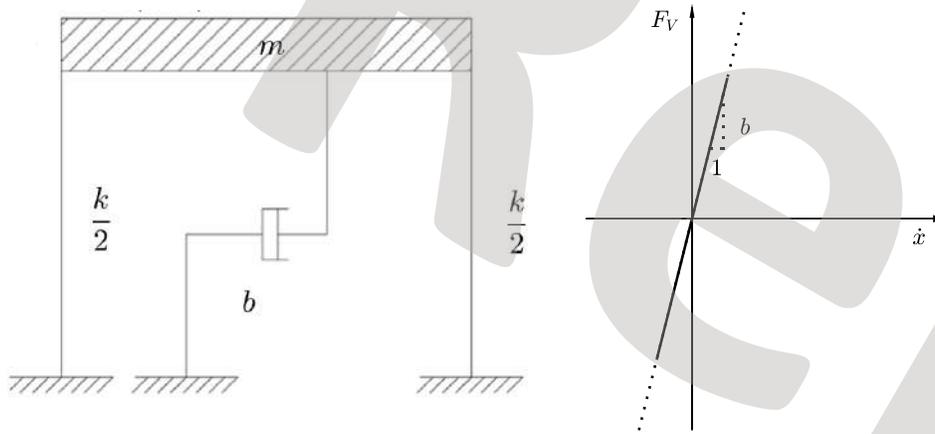


Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli.
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

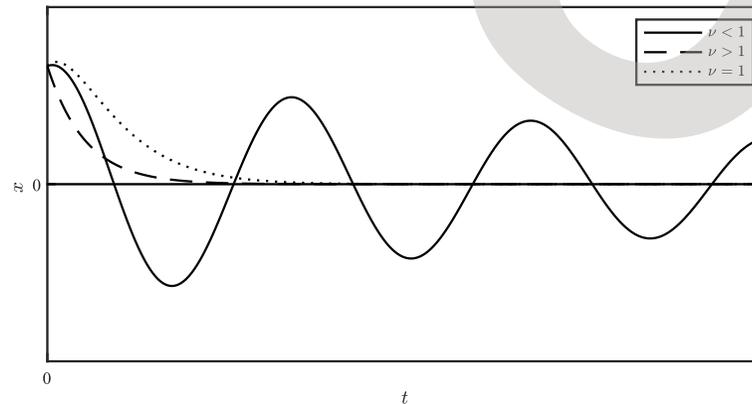
Per descrivere la risposta dinamica di strutture reali si deve tener conto di un ulteriore dispositivo che collega la massa al supporto. Tale dispositivo è definito dissipatore visco-elastico e la sua risposta è definita dal parametro b .



Per descrivere la risposta dinamica di strutture reali si deve tener conto di un ulteriore dispositivo che collega la massa al supporto. Tale dispositivo è definito dissipatore visco-elastico e la sua risposta è definita dal parametro b .

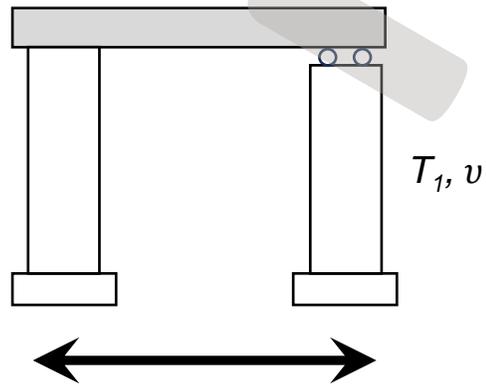
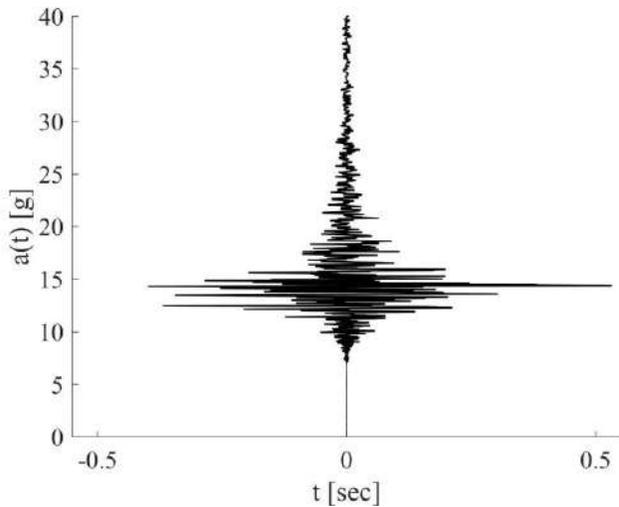


Anche la risposta dinamica di un qualsiasi oscillatore semplice elastico-lineare *smorzato* è nota qualsiasi sia la sollecitazione agente e dipende dal periodo di vibrazione e dallo smorzamento (adimensionalizzato ν). Qui si riporta il caso di oscillazioni libere.

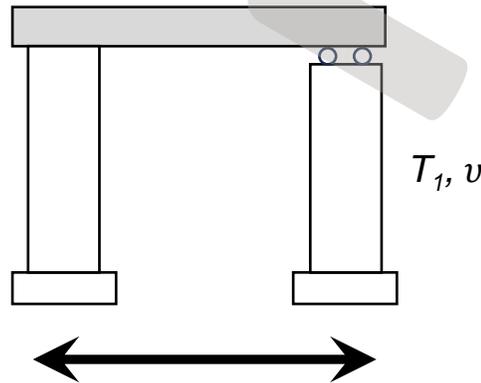
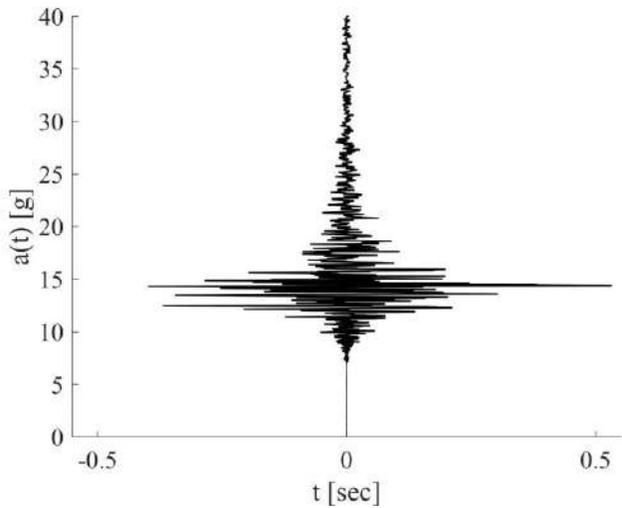
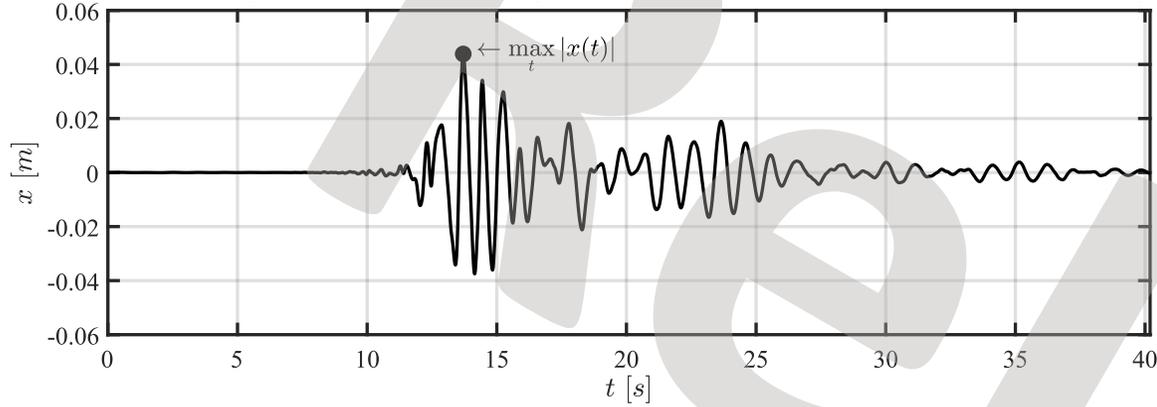


Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Junio Iervolino, Ed. Hoepli.*
 Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

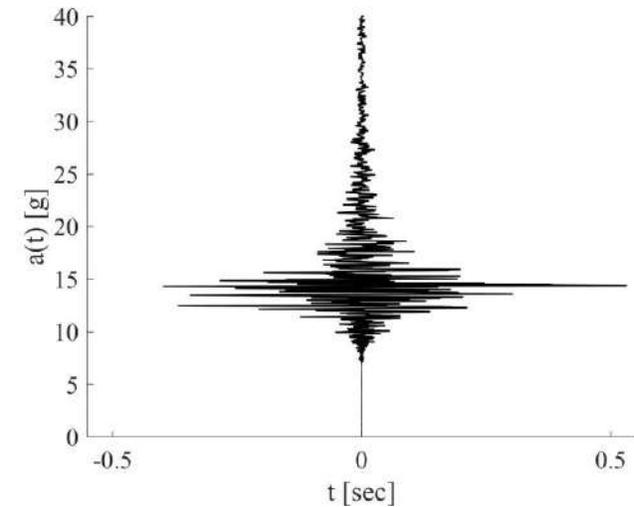
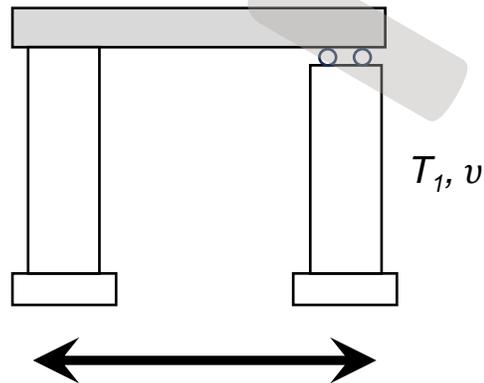
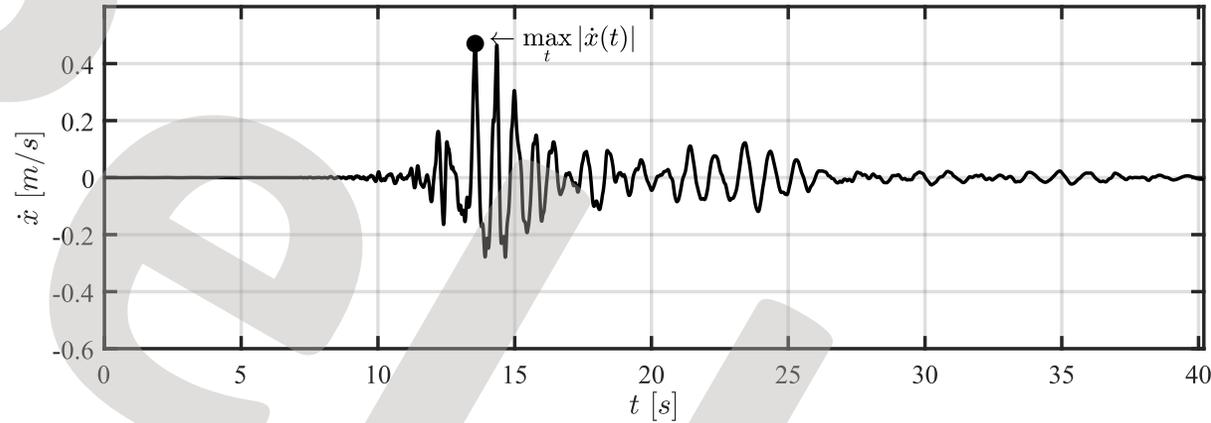
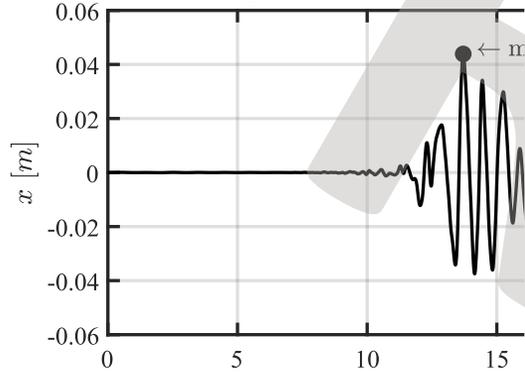
Dato un segnale accelerometrico e un SDoF definito da un periodo di vibrazione e dal fattore di smorzamento, si può calcolare la risposta nel tempo del sistema in termini di spostamenti, velocità e accelerazioni



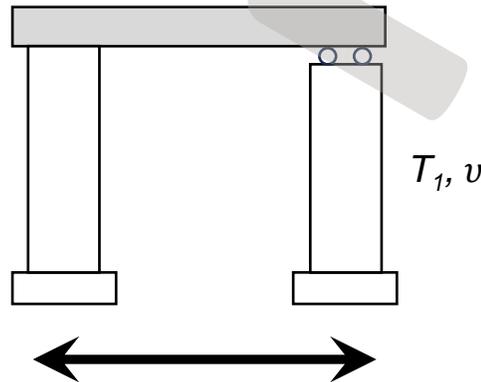
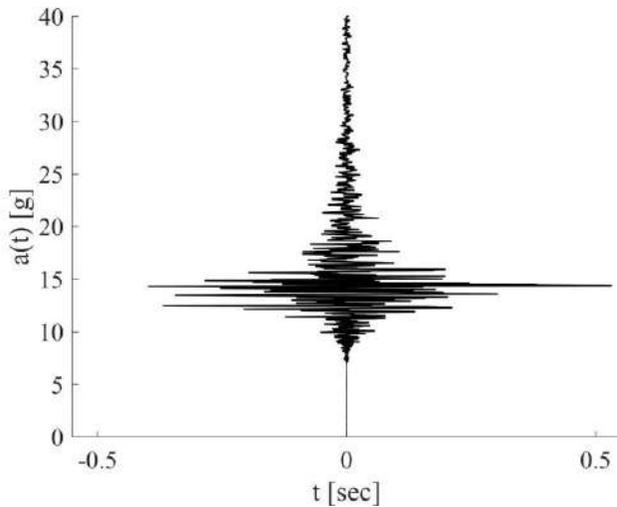
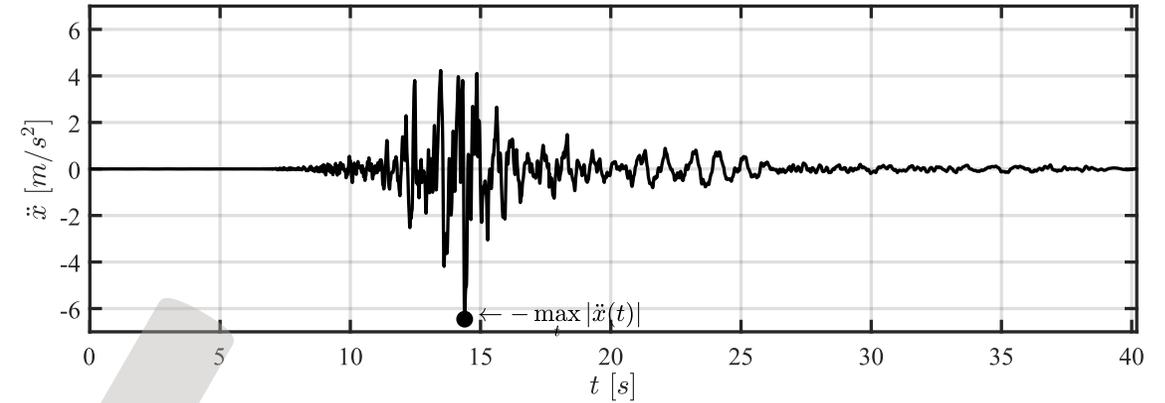
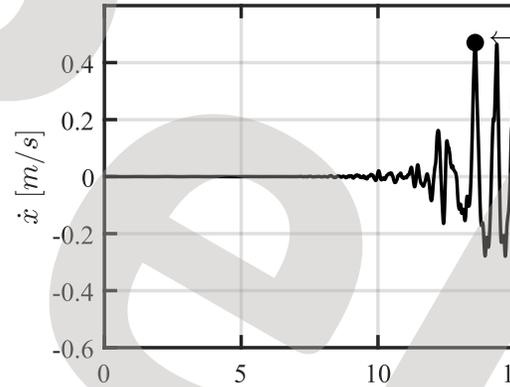
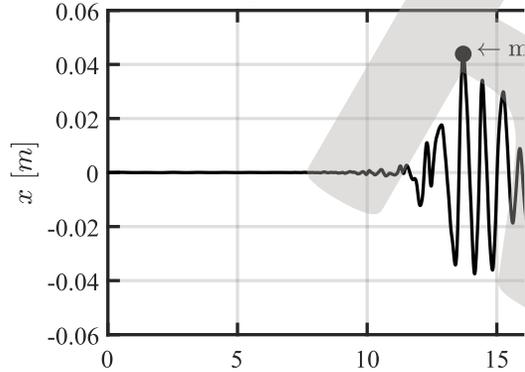
Dato un segnale accelerometrico e un SDoF definito da un periodo di vibrazione e dal fattore di smorzamento, si può calcolare la risposta nel tempo del sistema in termini di spostamenti, velocità e accelerazioni



Dato un segnale accelerometrico e un SDoF definito da un periodo di vibrazione e dal fattore di smorzamento, si può calcolare la risposta nel tempo del sistema in termini di spostamenti, velocità e accelerazioni

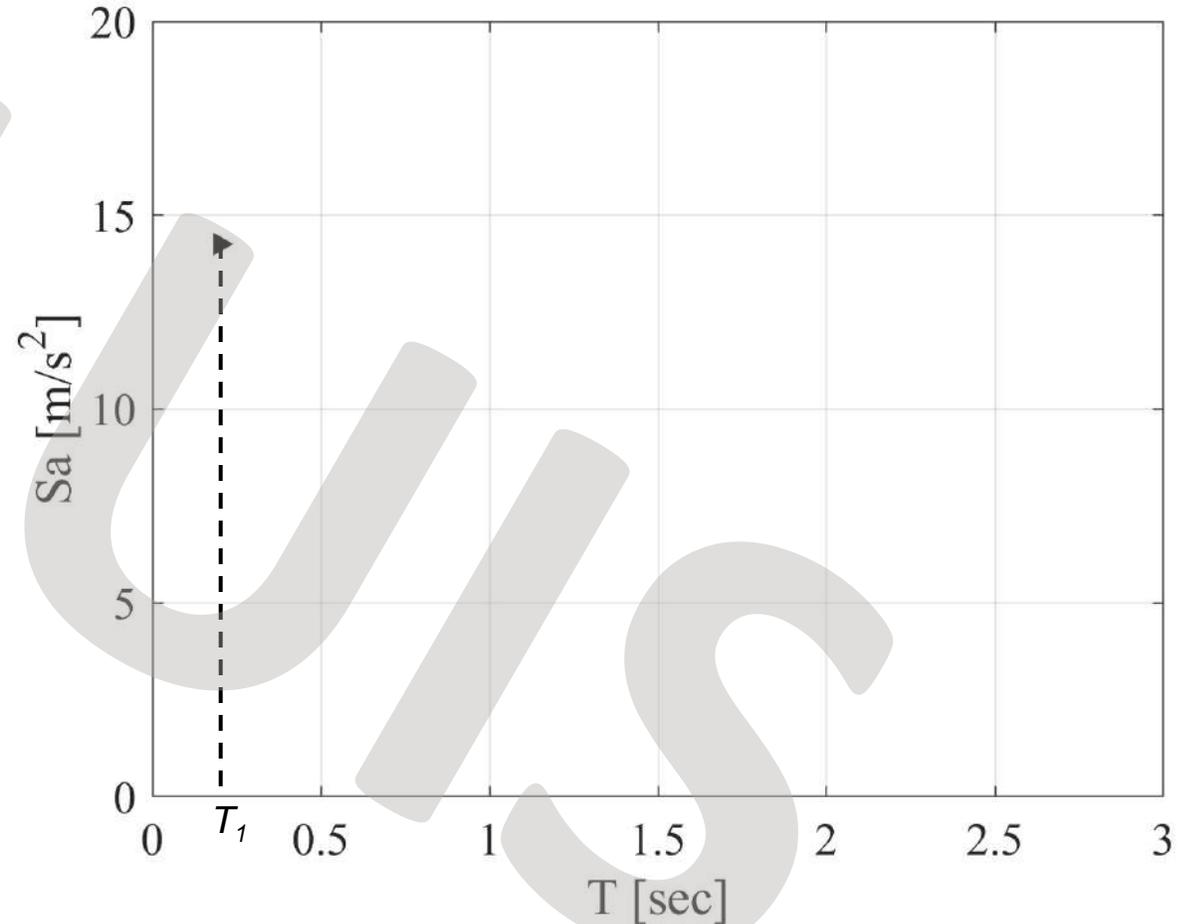
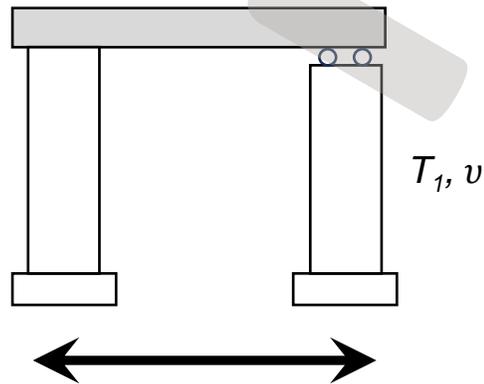
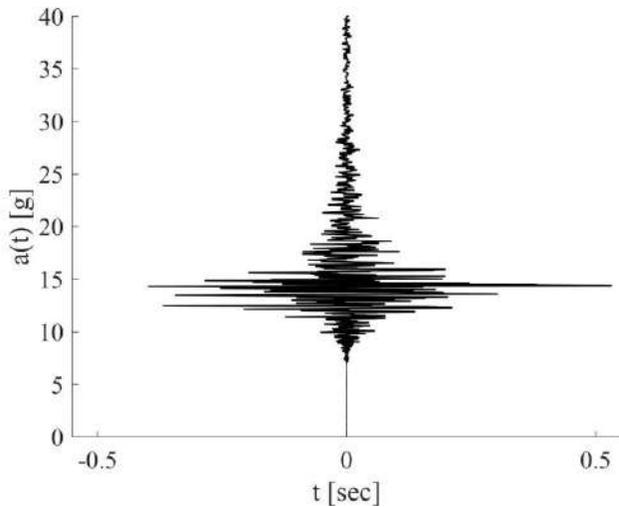


Dato un segnale accelerometrico e un SDoF definito da un periodo di vibrazione e dal fattore di smorzamento, si può calcolare la risposta nel tempo del sistema in termini di spostamenti, velocità e accelerazioni



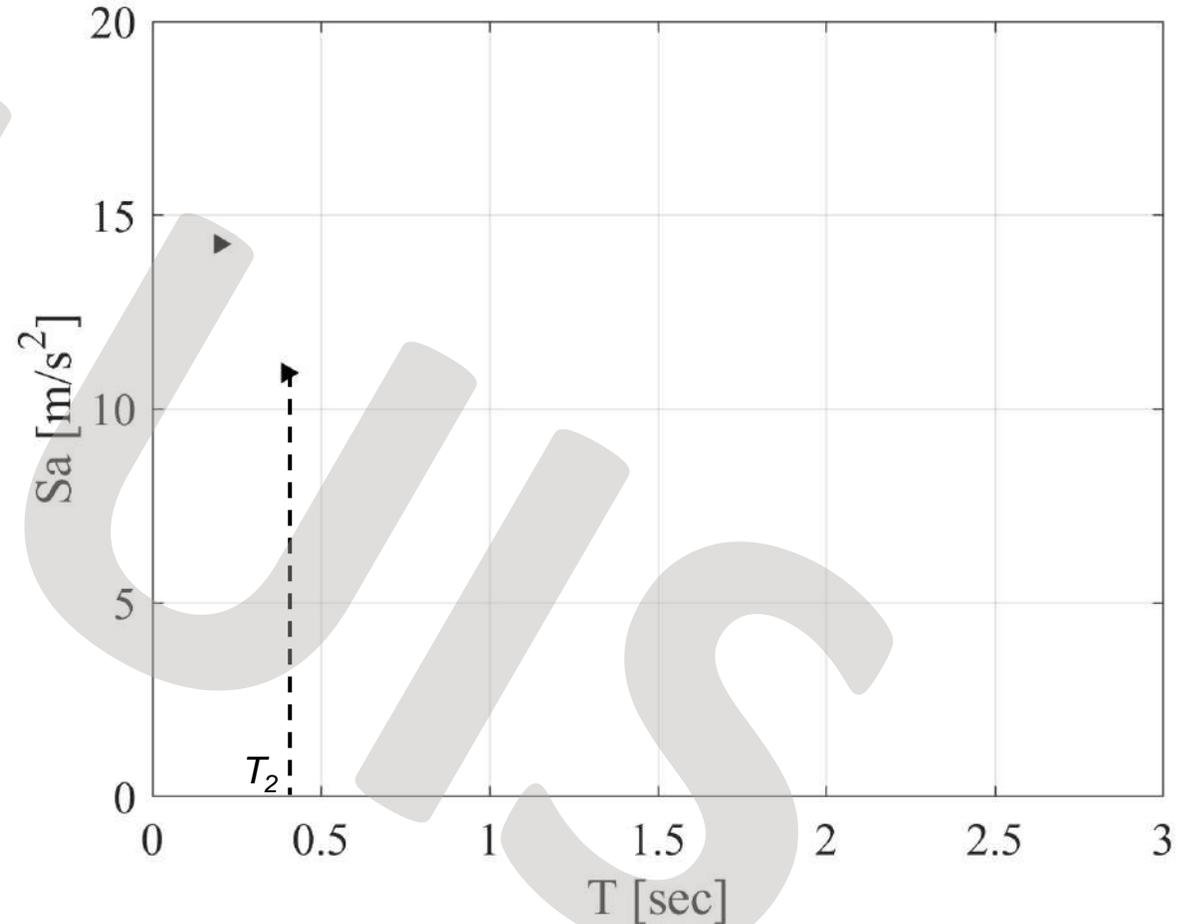
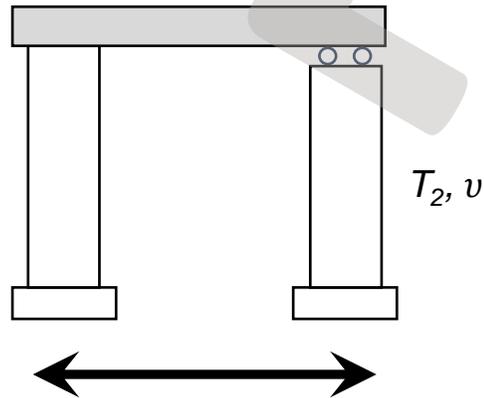
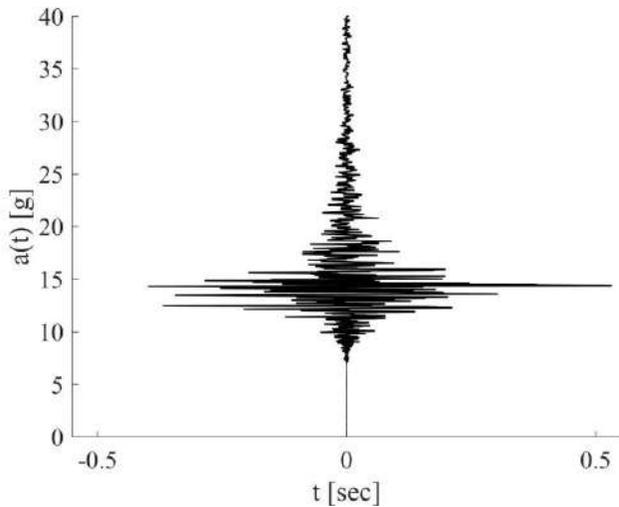
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



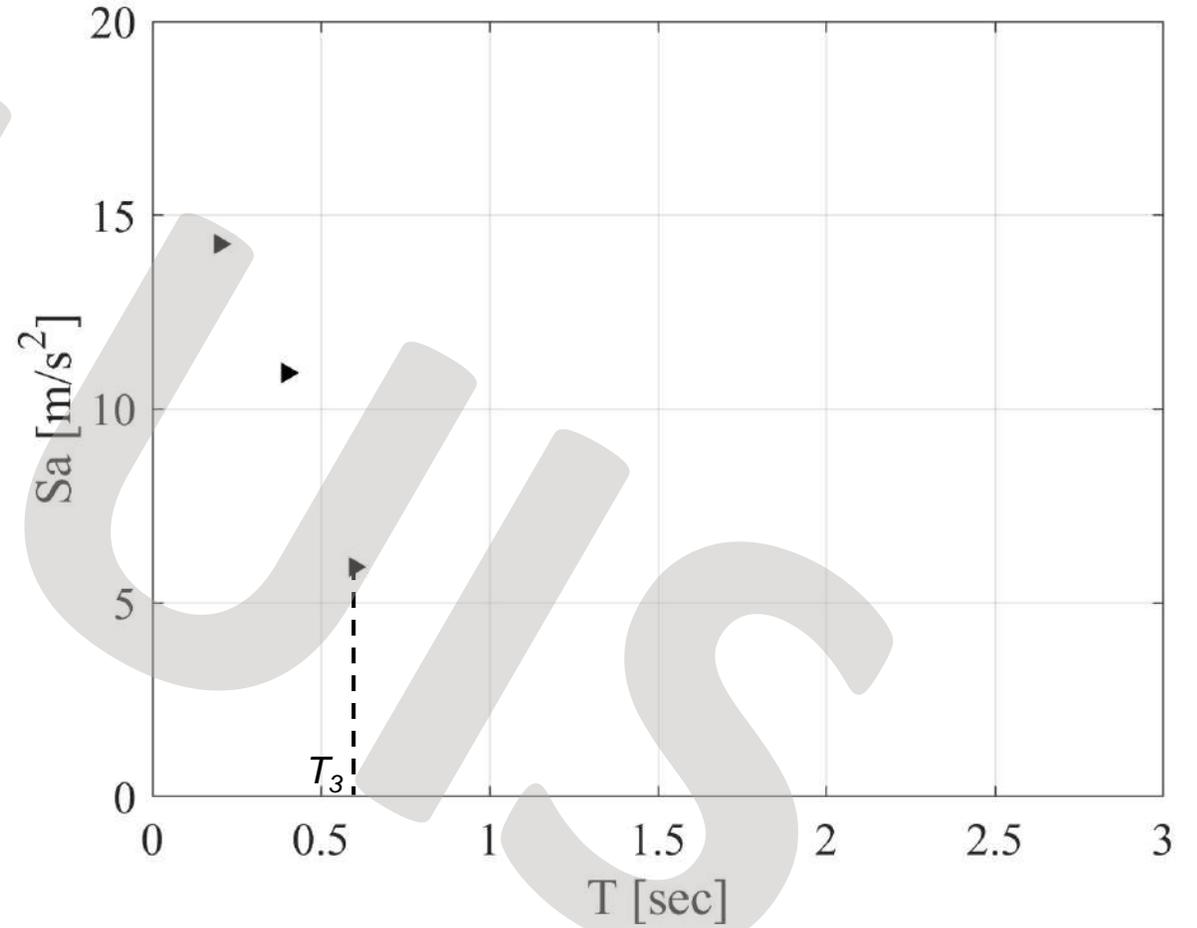
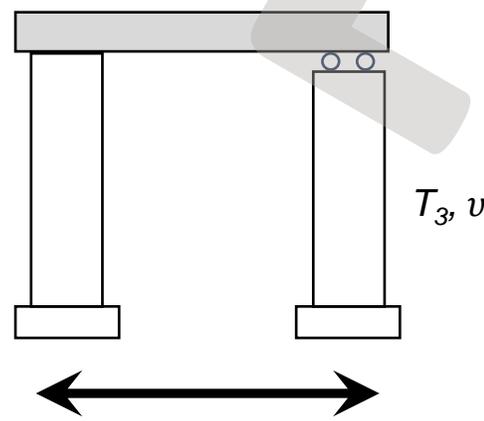
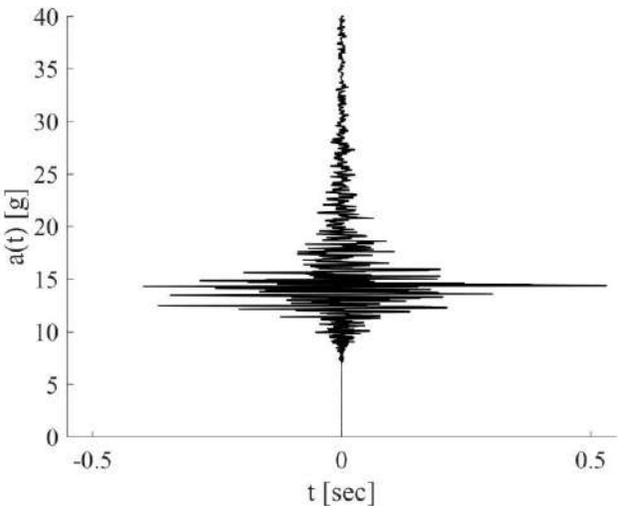
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



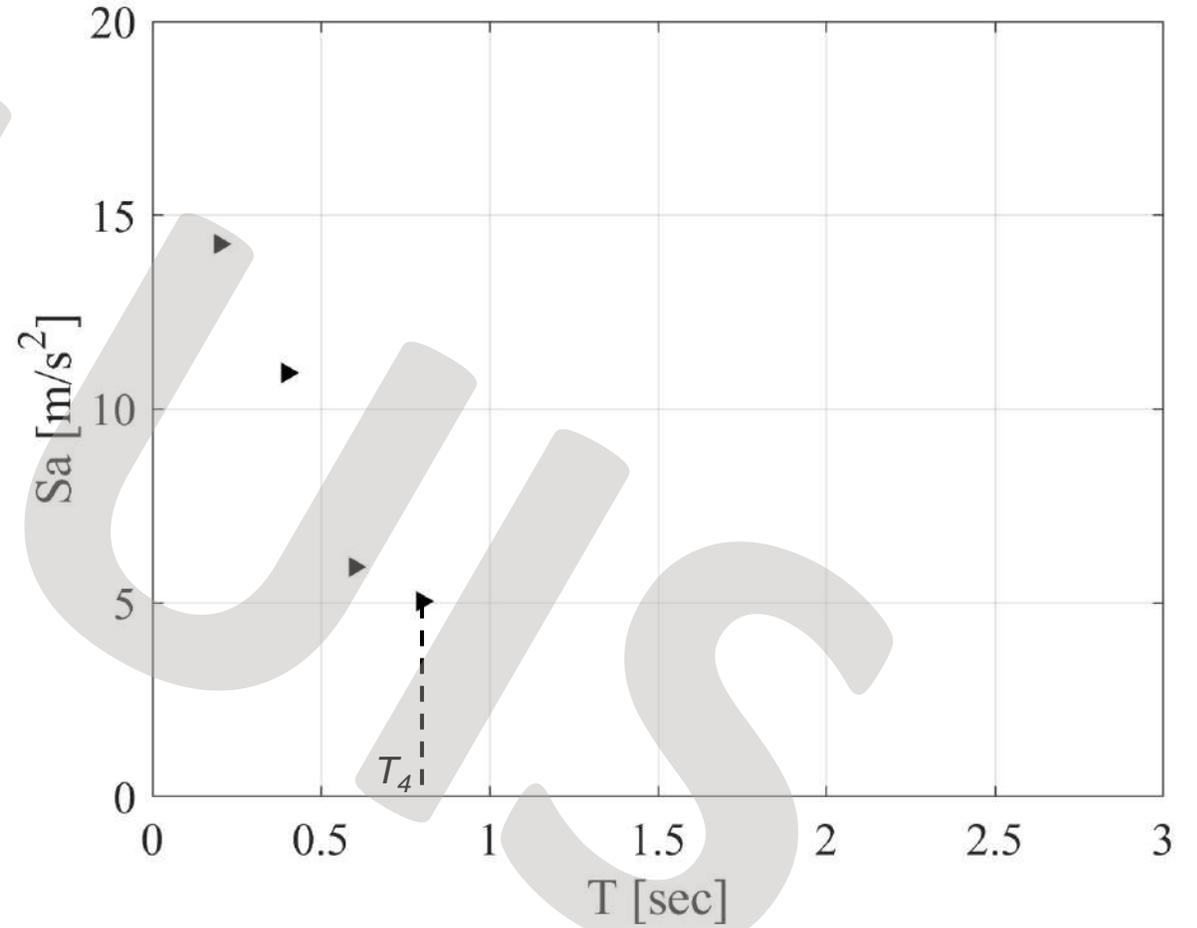
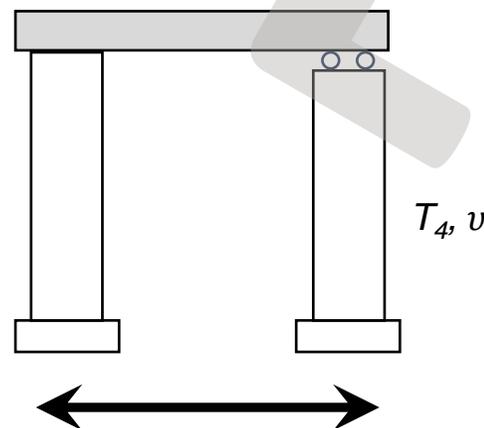
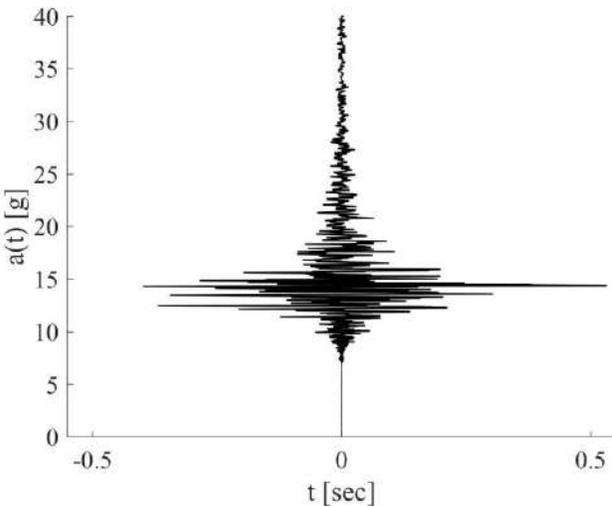
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



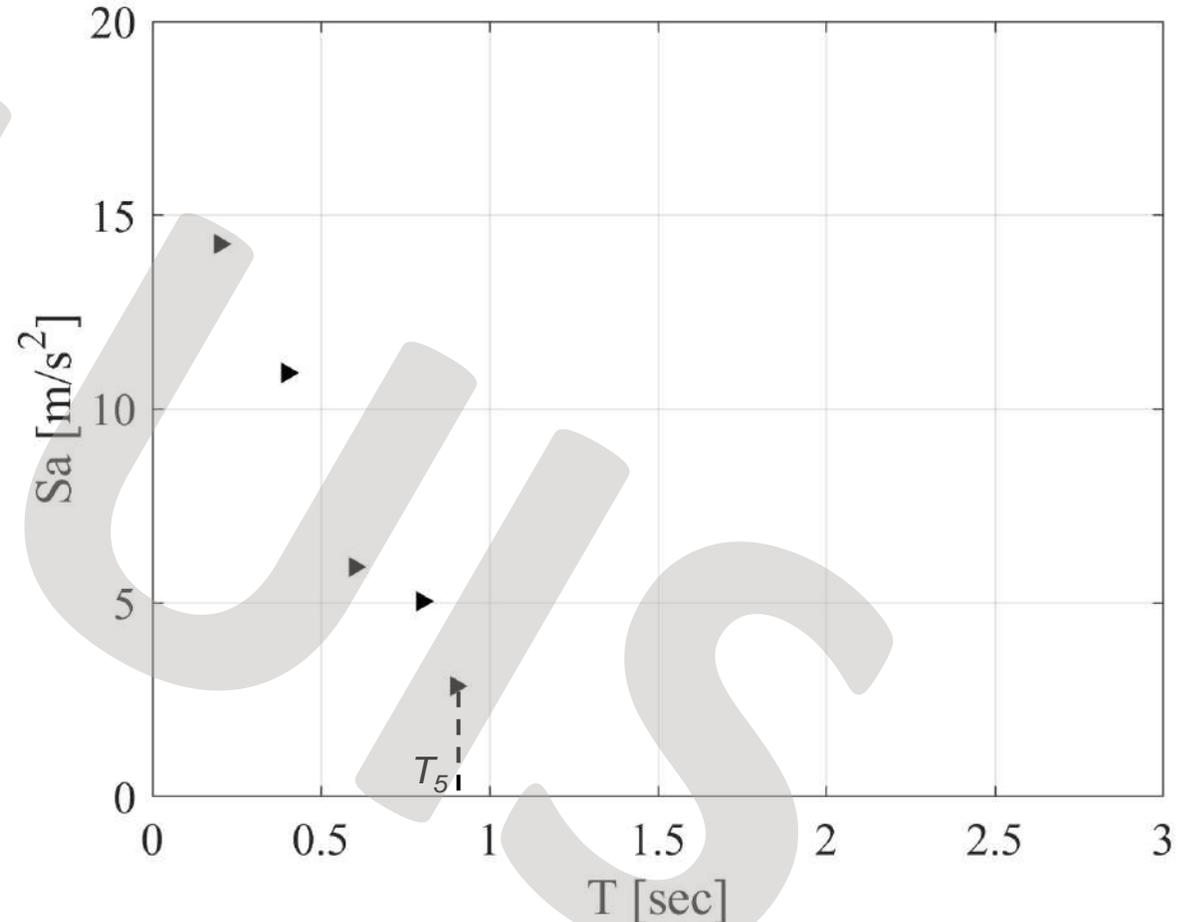
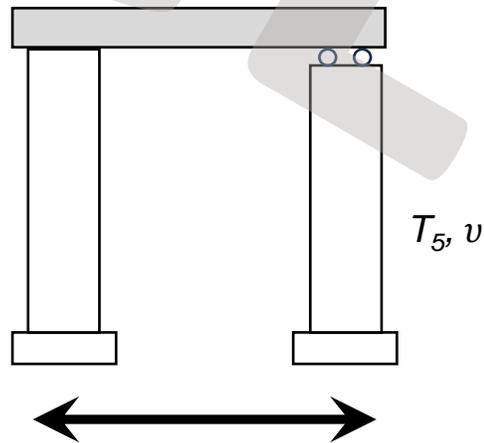
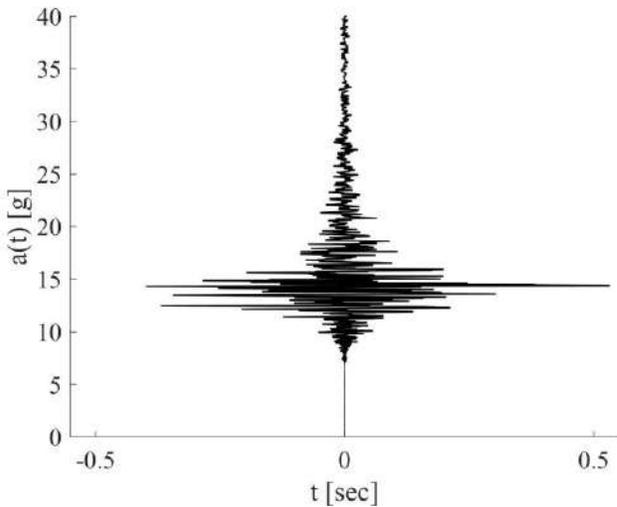
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



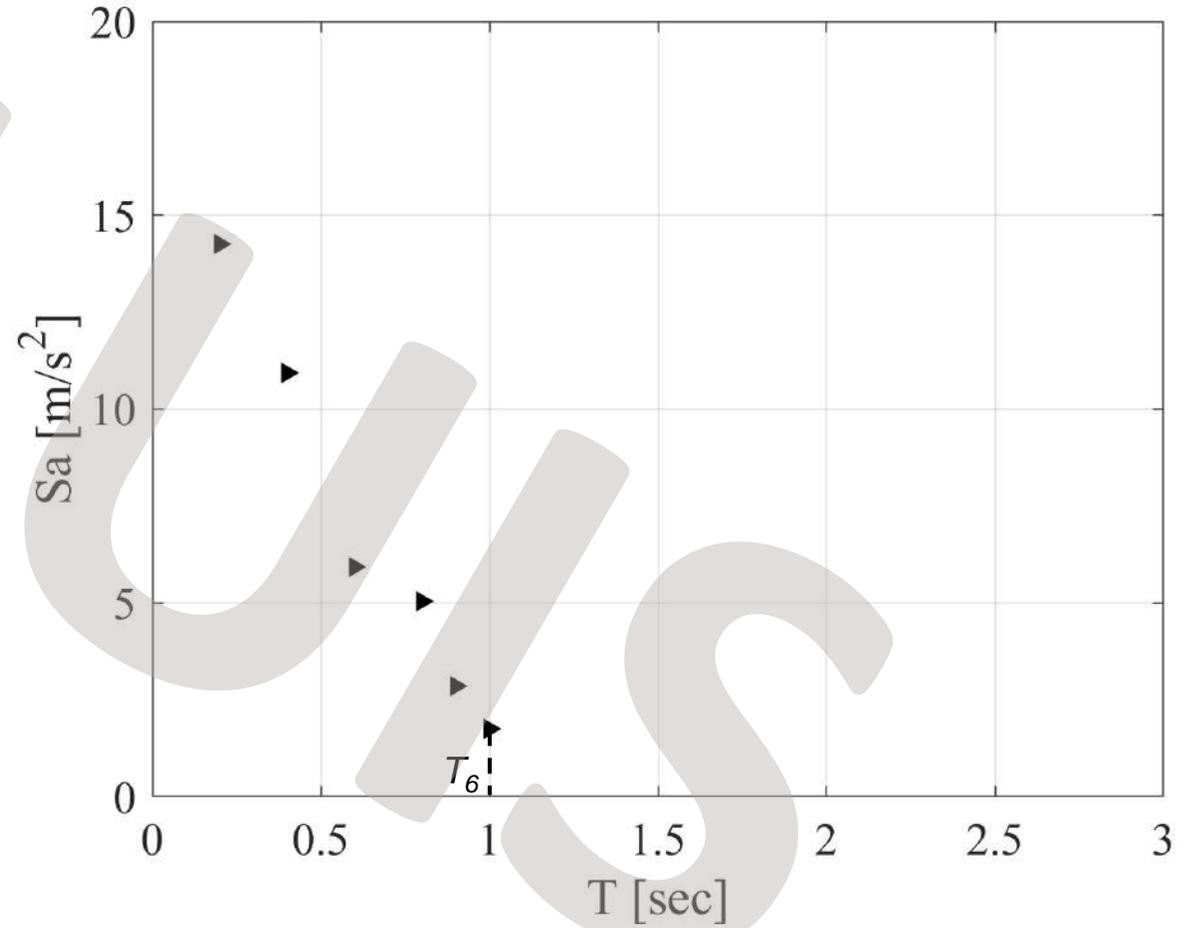
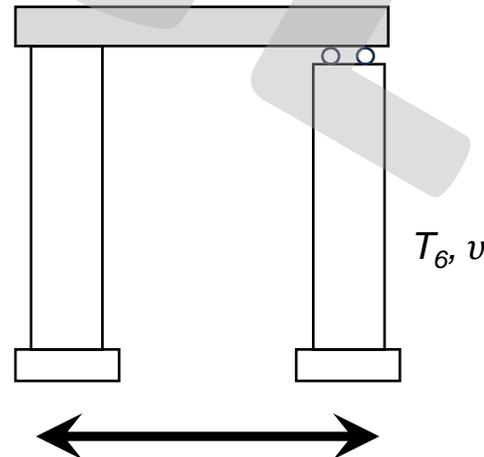
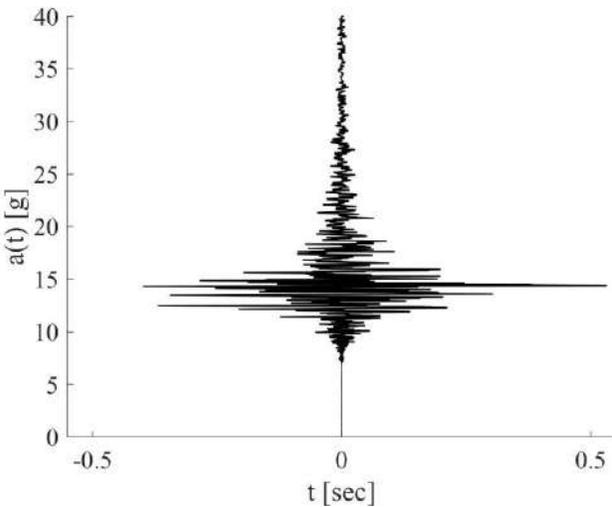
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



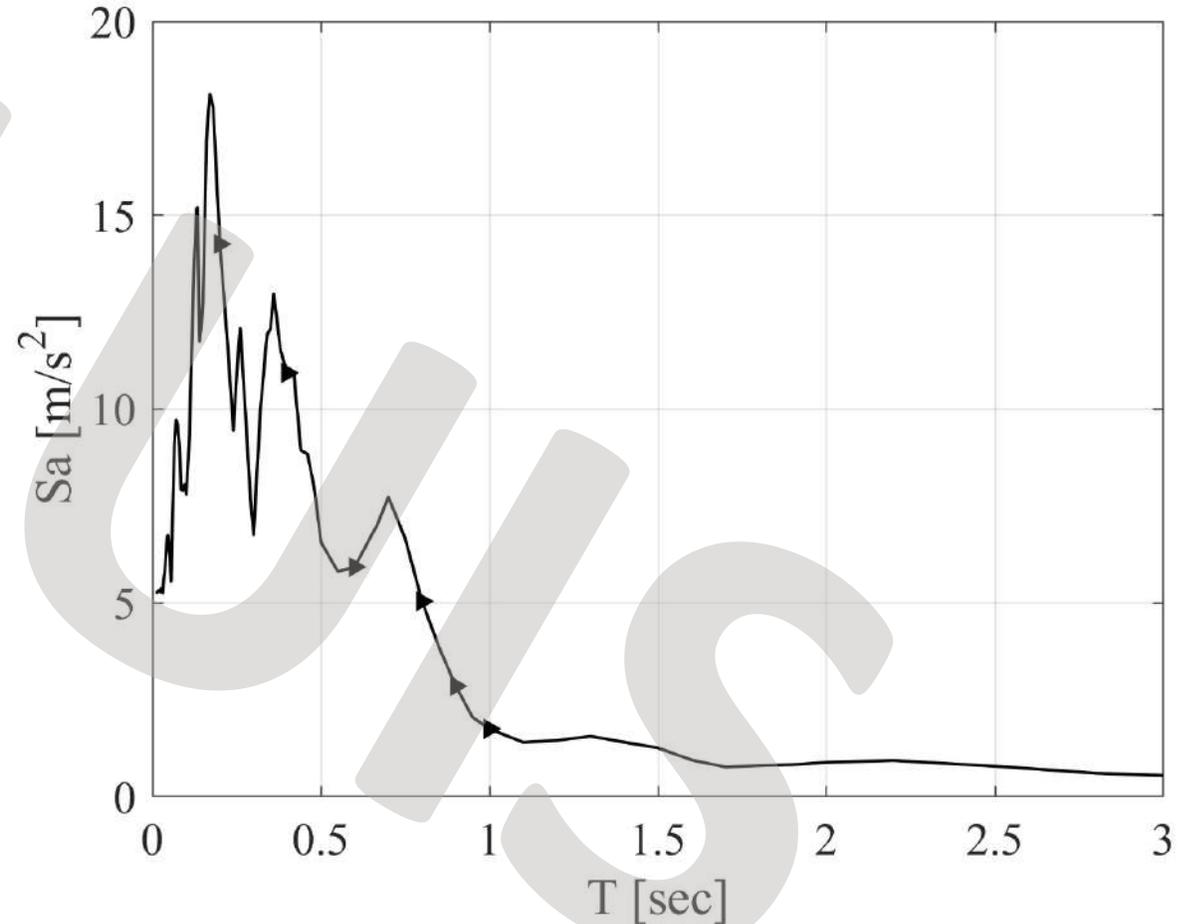
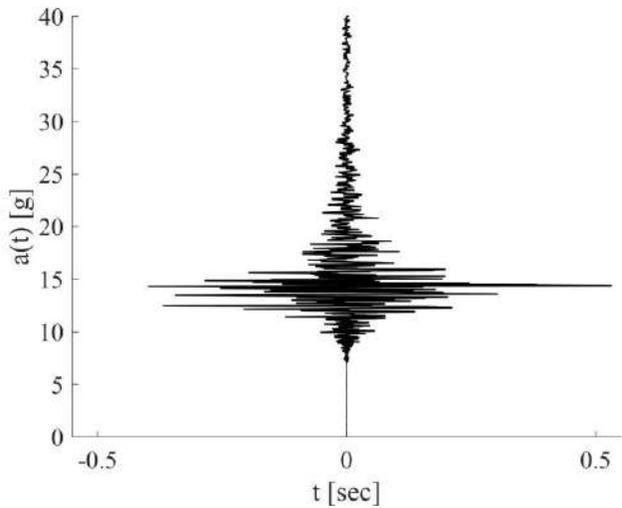
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



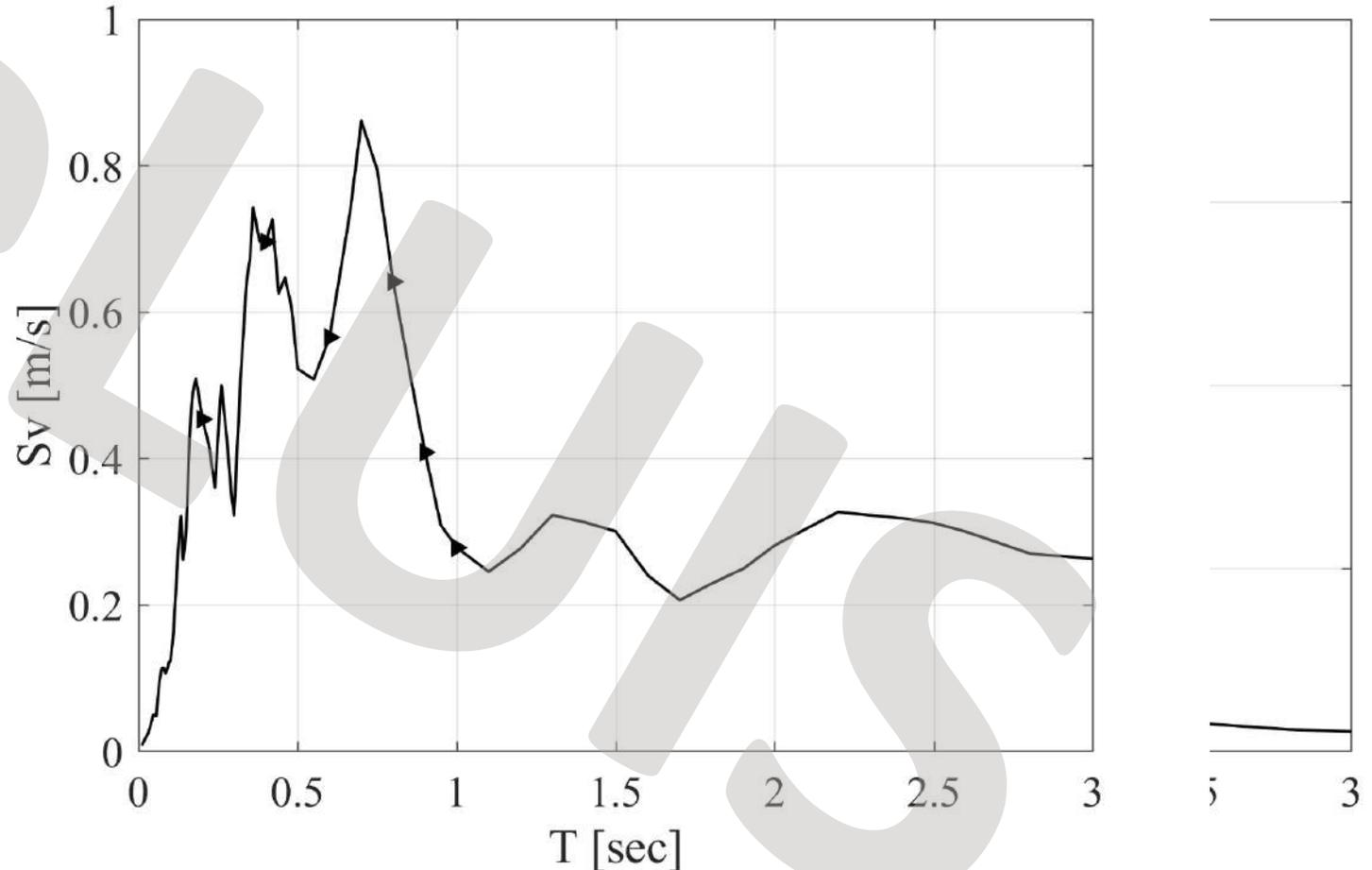
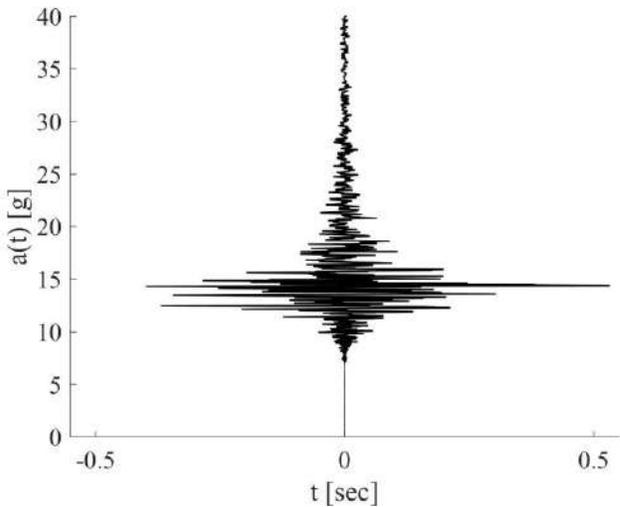
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



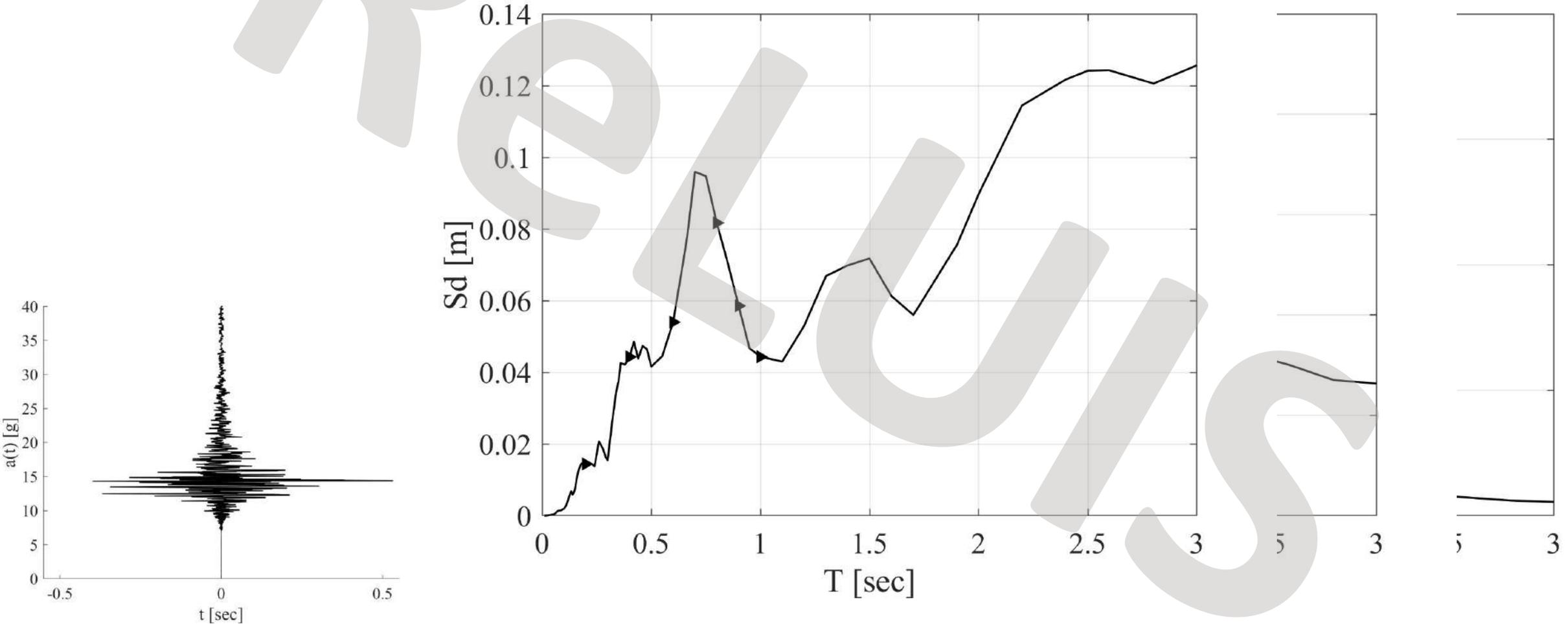
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



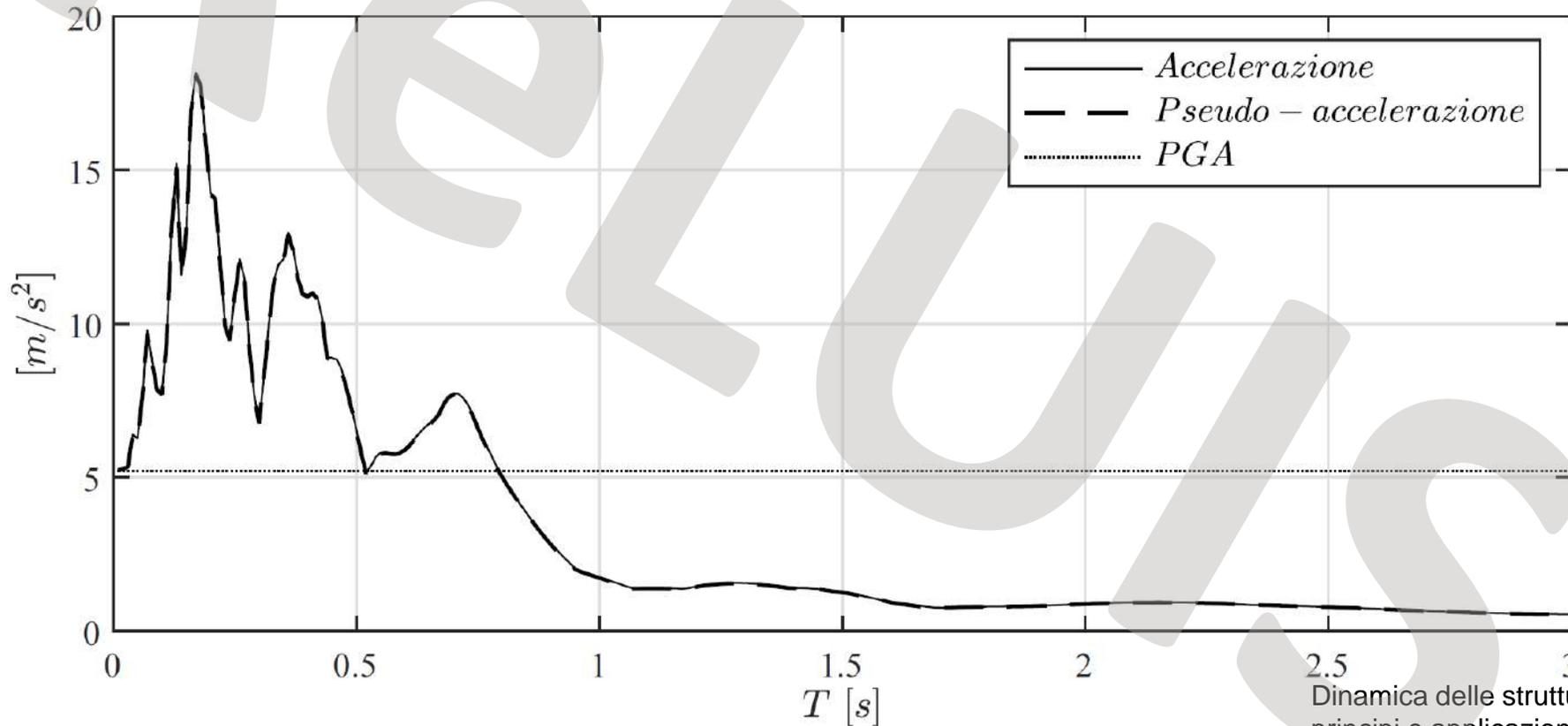
Spettri di risposta di un segnale

Per fissato segnale accelerometrico e smorzamento, si può calcolare il massimo nel tempo della risposta del sistema al variare del periodo di vibrazione. Il luogo dei massimi in funzione del periodo di vibrazione si chiama spettro di risposta in spostamenti del segnale considerato.



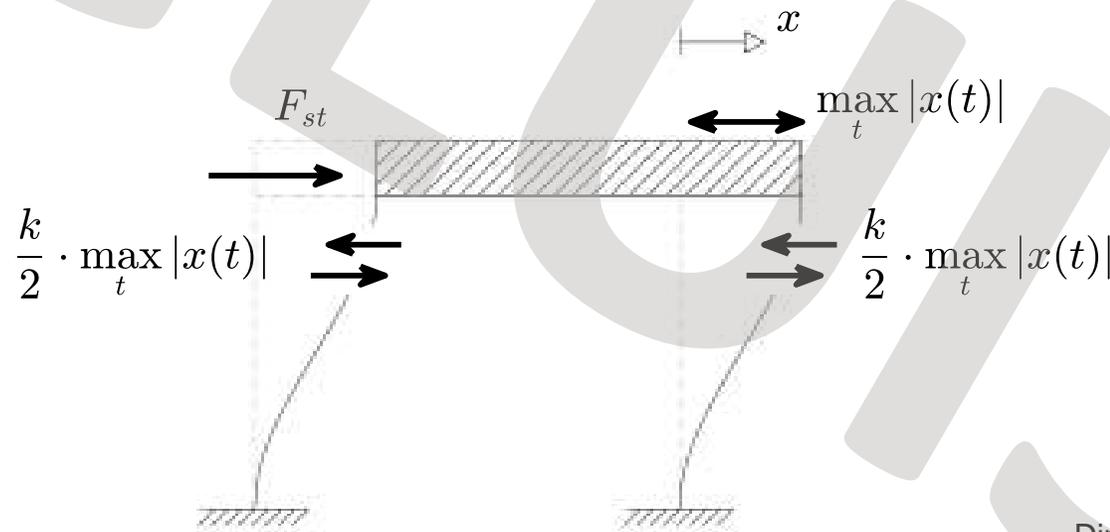
Si definiscono anche gli spettri di risposta in pseudo-accelerazione che, per bassi valori di smorzamento, approssimano gli spettri di risposta in accelerazione

Sovrapposizione spettri accelerazione e pseudo-accelerazione ($\nu = 0.05$) calcolati per lo stesso segnale sismico



La pseudo-accelerazione è molto importante perché è legata alla forza da applicare (e quindi al taglio massimo risultante) staticamente per osservare uno spostamento pari a quello massimo prodotto dal terremoto

$$F_{st} = m \cdot \frac{k}{m} \cdot \max_t |x(t)| = m \cdot \omega^2 \cdot S_d = m \cdot PSA$$

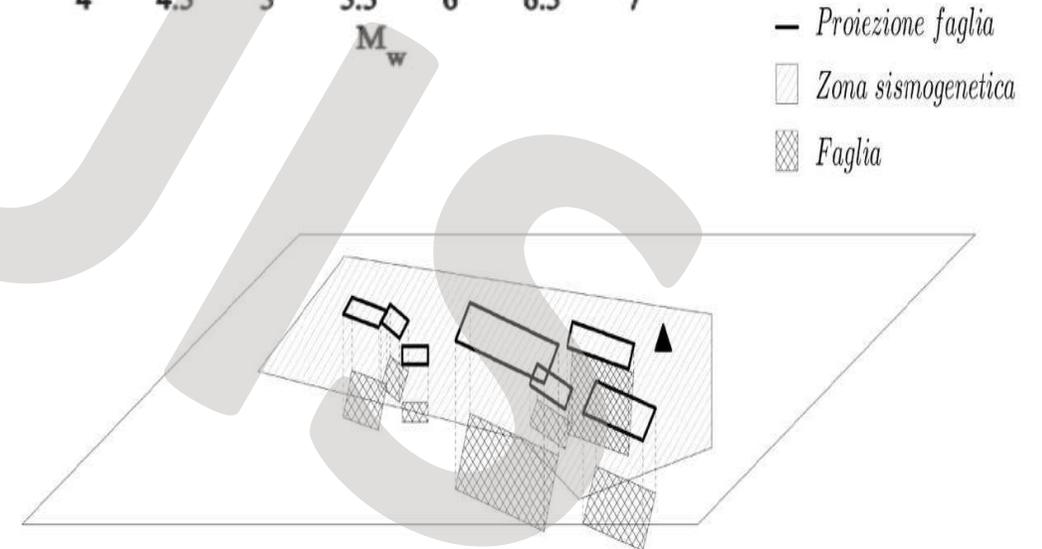
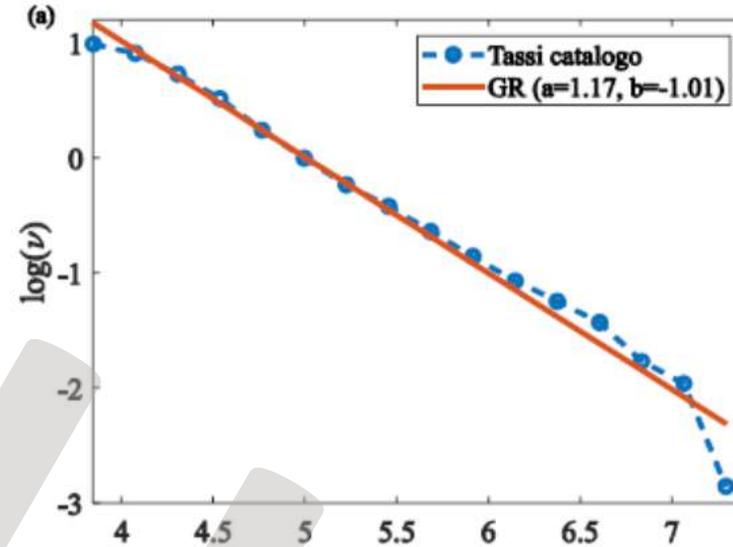
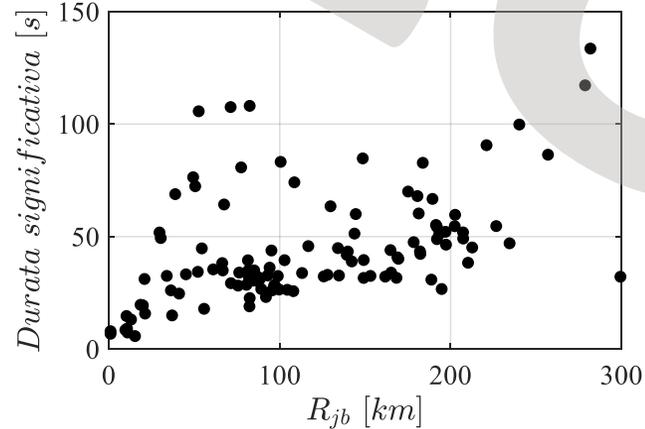
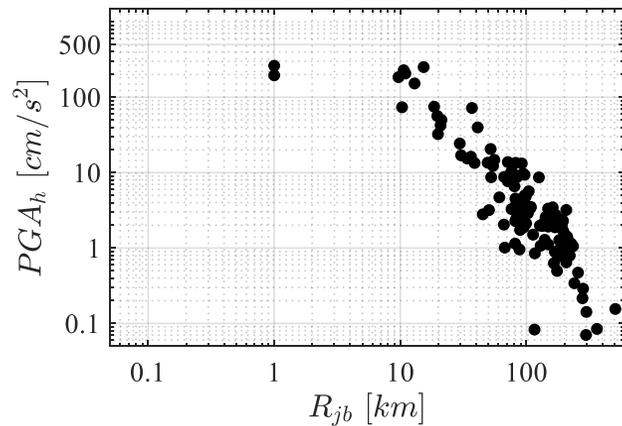


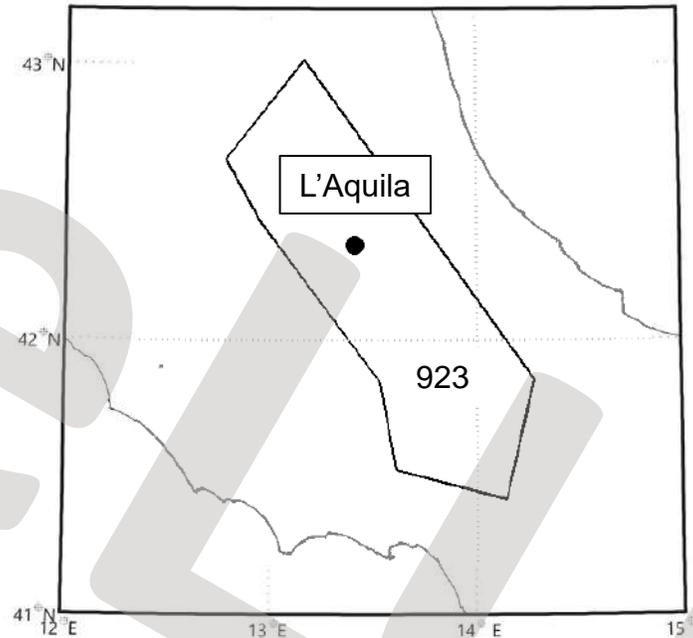
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
 principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli.*
 Copyright © *Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021*

Analisi probabilistica di pericolosità sismica

A partire dai dati raccolti dai terremoti passati, sono stati definiti:

- le zone sismogenetiche,
- il processo di occorrenza dei terremoti alla sorgente
- la legge di proporzionalità tra le magnitudo generate (Gutenberg-Richter)
- le misure di intensità che caratterizzano i segnali accelerometrici

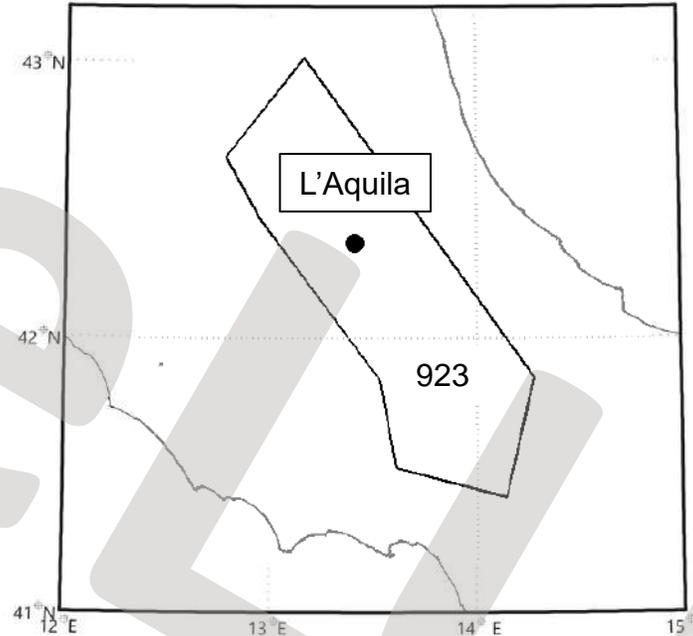




Tasso annuo di superamento di un certo valore di intensità

$$\lambda_{Sa(T) > sa} =$$

Valore di intensità di cui si vuole calcolare il tasso di superamento

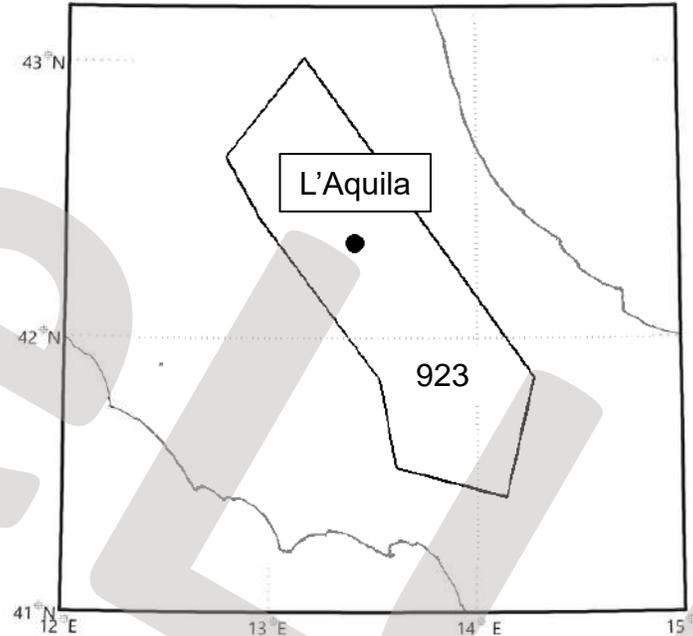


Tasso annuo di superamento di un certo valore di intensità

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot P[Sa(T) > sa / E]$$

Valore di intensità di cui si vuole calcolare il tasso di superamento

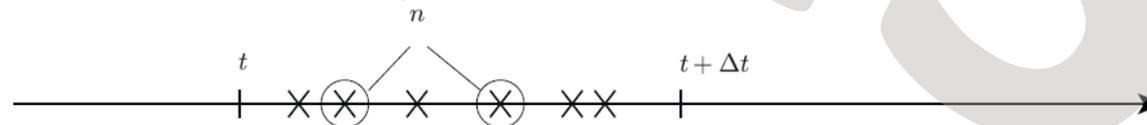
Processo di occorrenza dei terremoti al sito



Tasso annuo di superamento di un certo valore di intensità

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot P[Sa(T) > sa / E]$$

Valore di intensità di cui si vuole calcolare il tasso di superamento



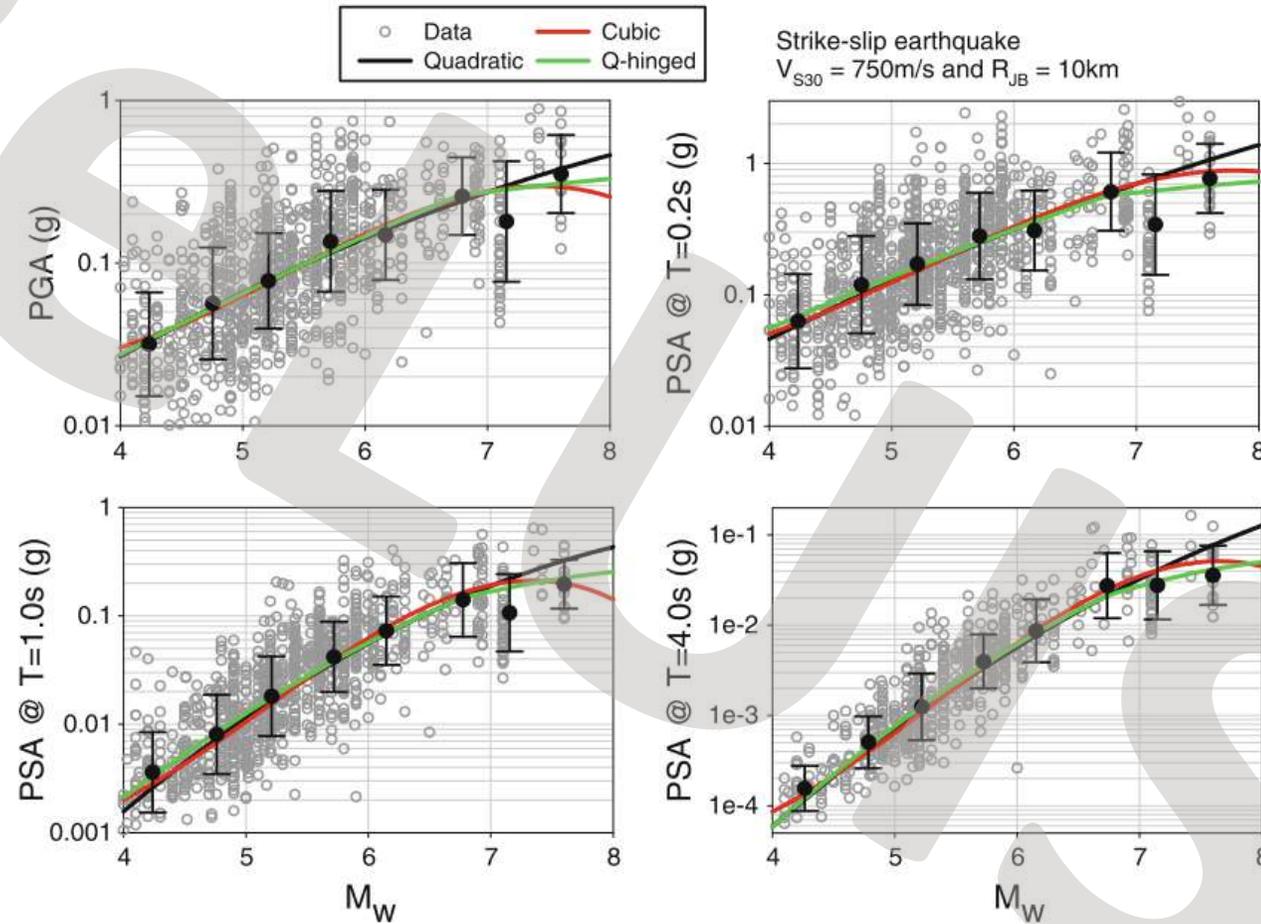
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$

RELUIS

Integrale di pericolosità sismica

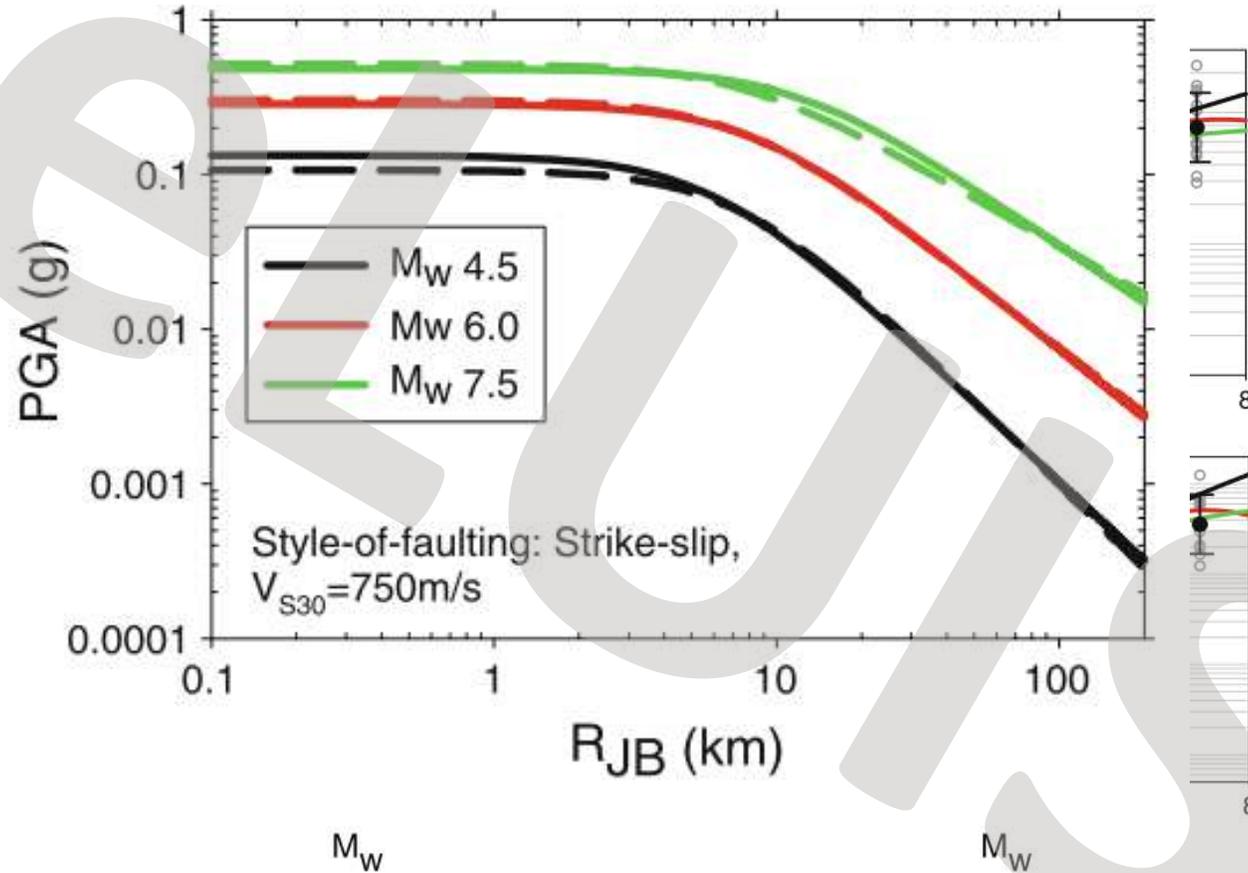
$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer JJ (2014) Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bull Earthq Eng 12:359–387. doi: 10.1007/s10518-013-9461-4

Integrale di pericolosità sismica

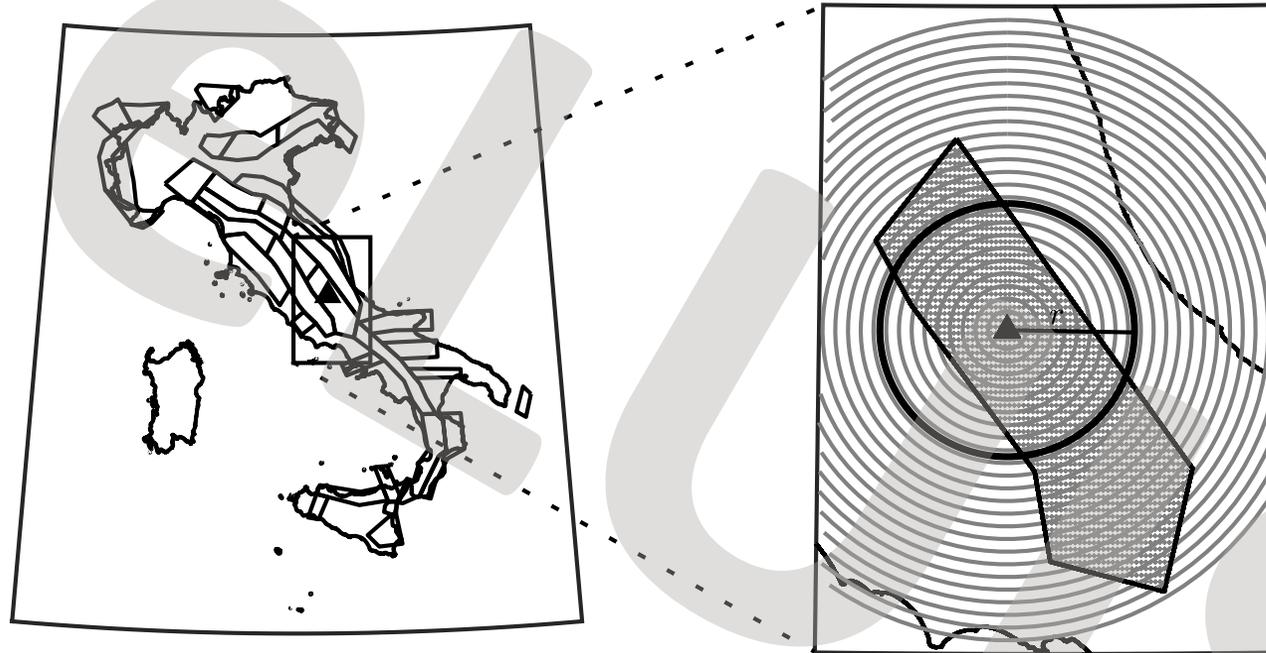
$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer JJ (2014) Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bull Earthq Eng 12:359–387. doi: 10.1007/s10518-013-9461-4

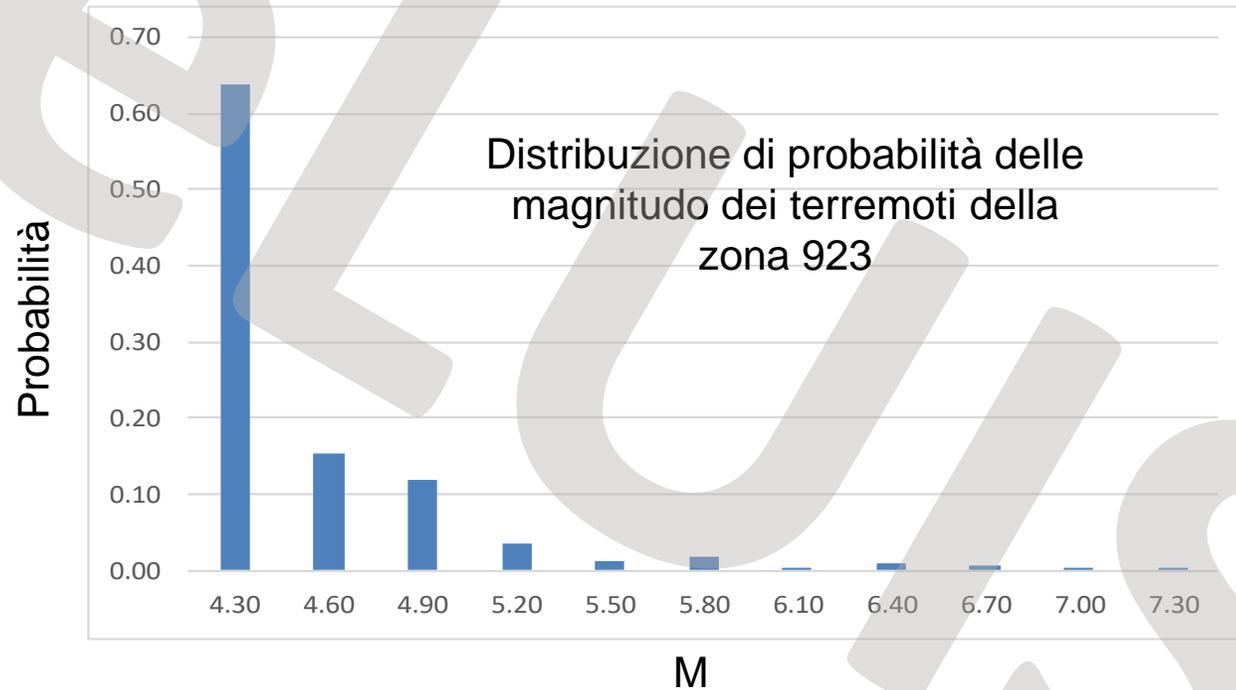
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



Integrale di pericolosità sismica

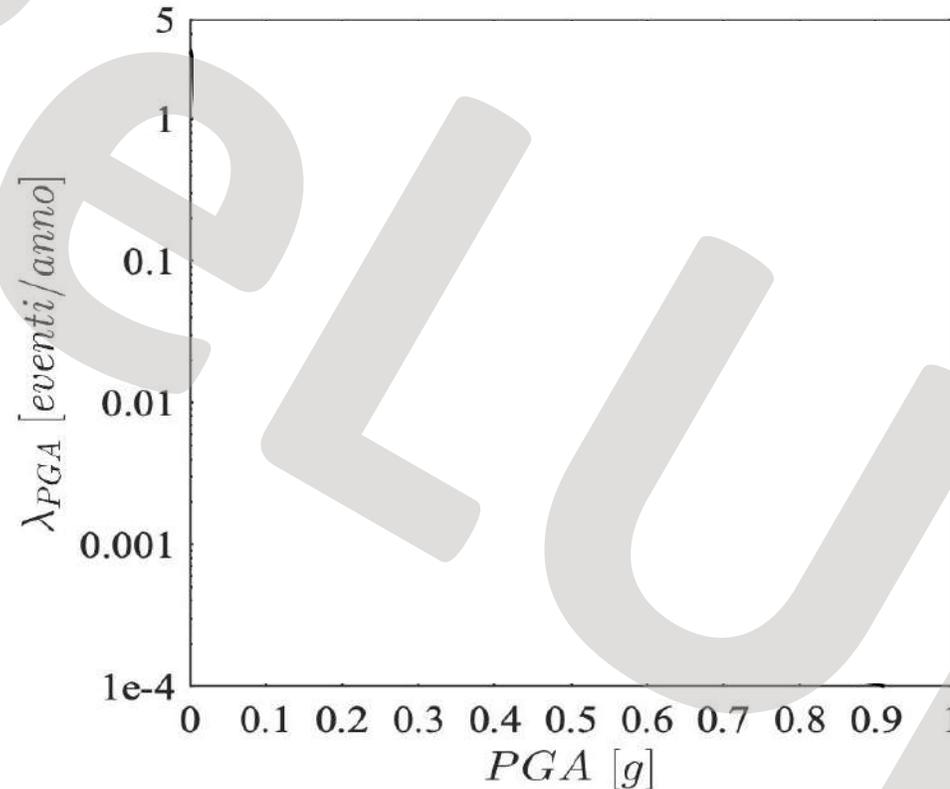
$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



$$\log \nu(M_w) = a - b \cdot (M_w - M_{w,min})$$

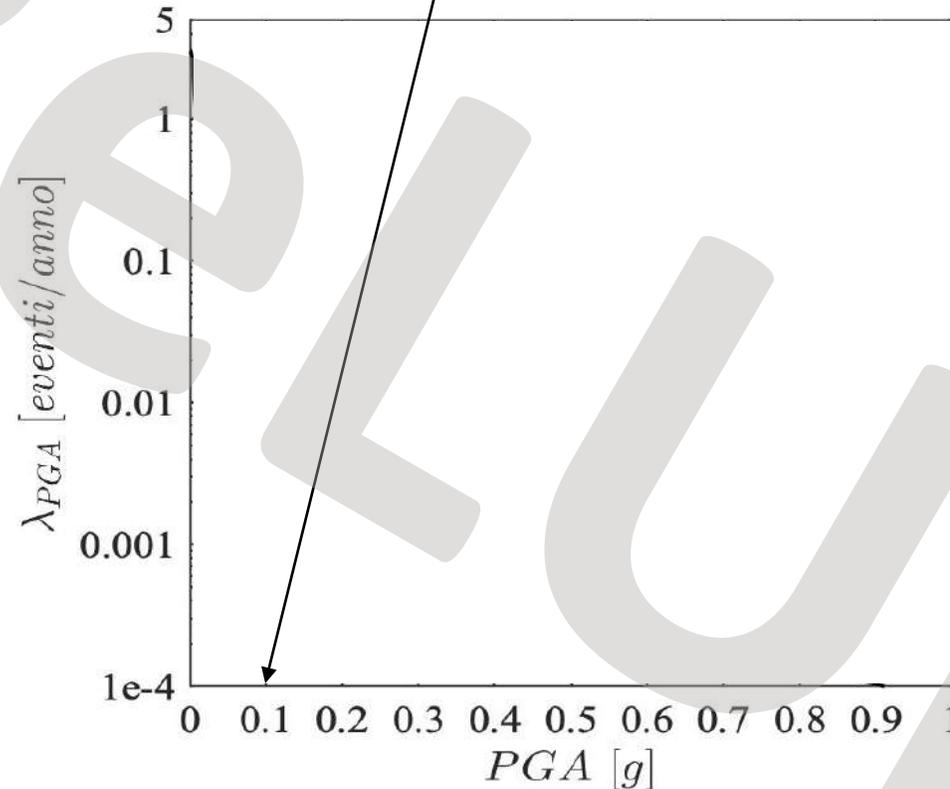
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



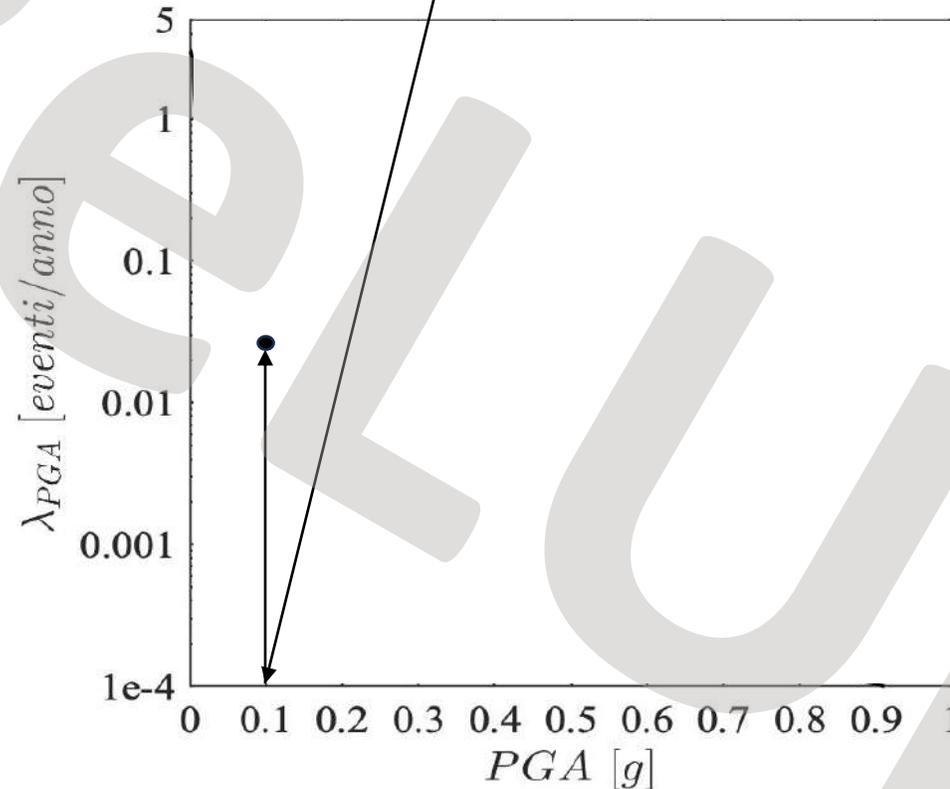
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



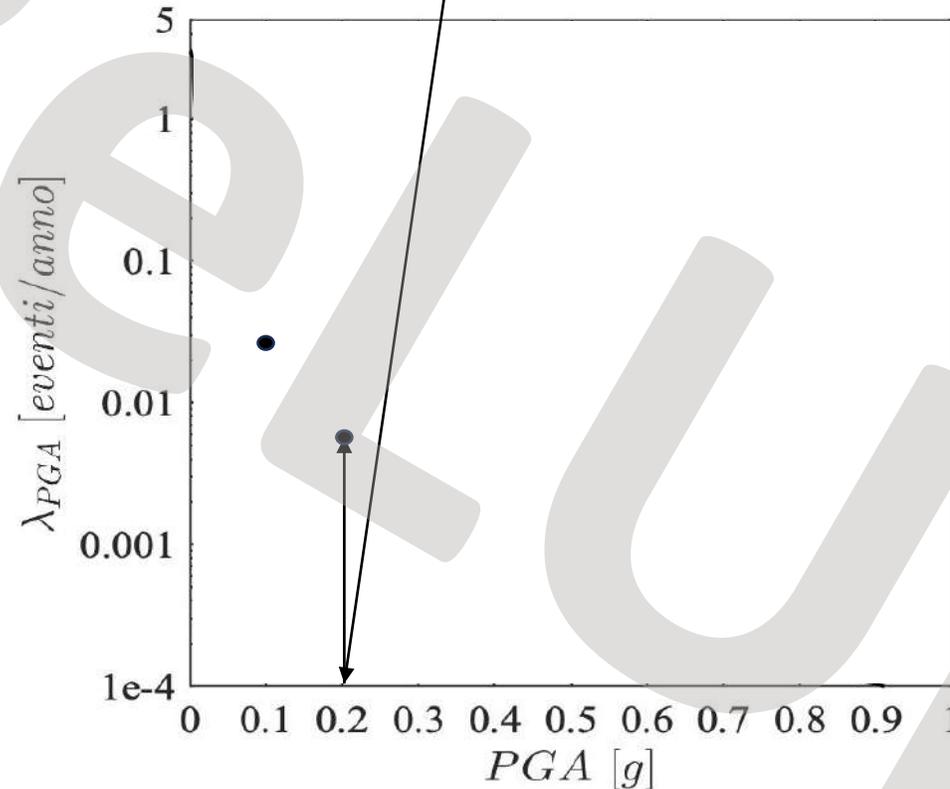
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



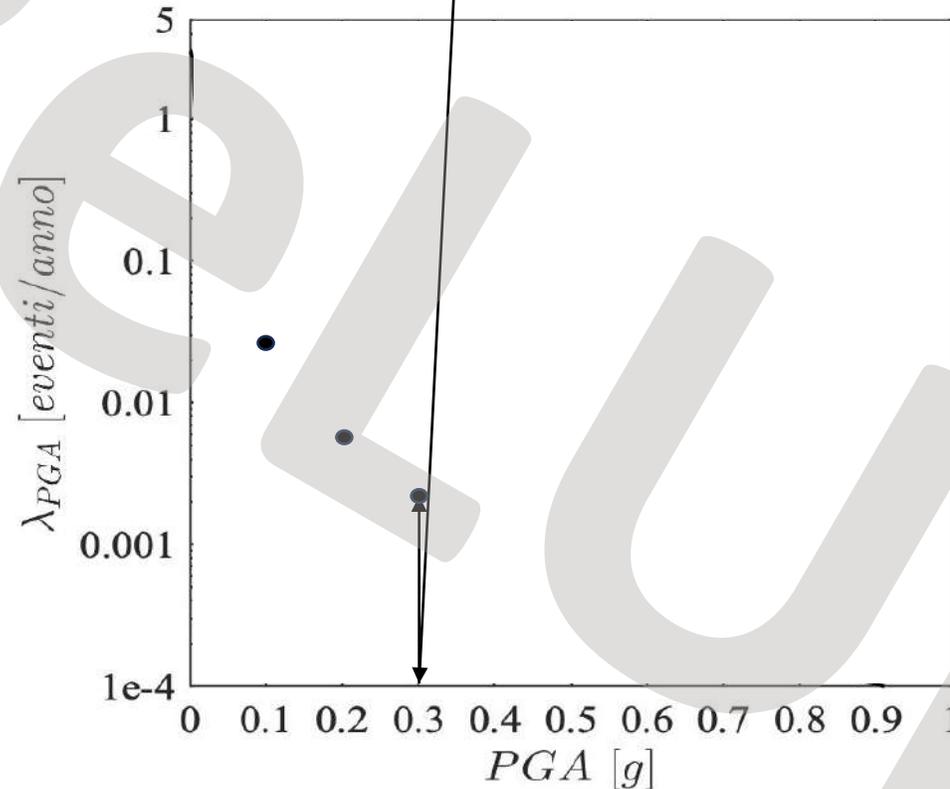
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



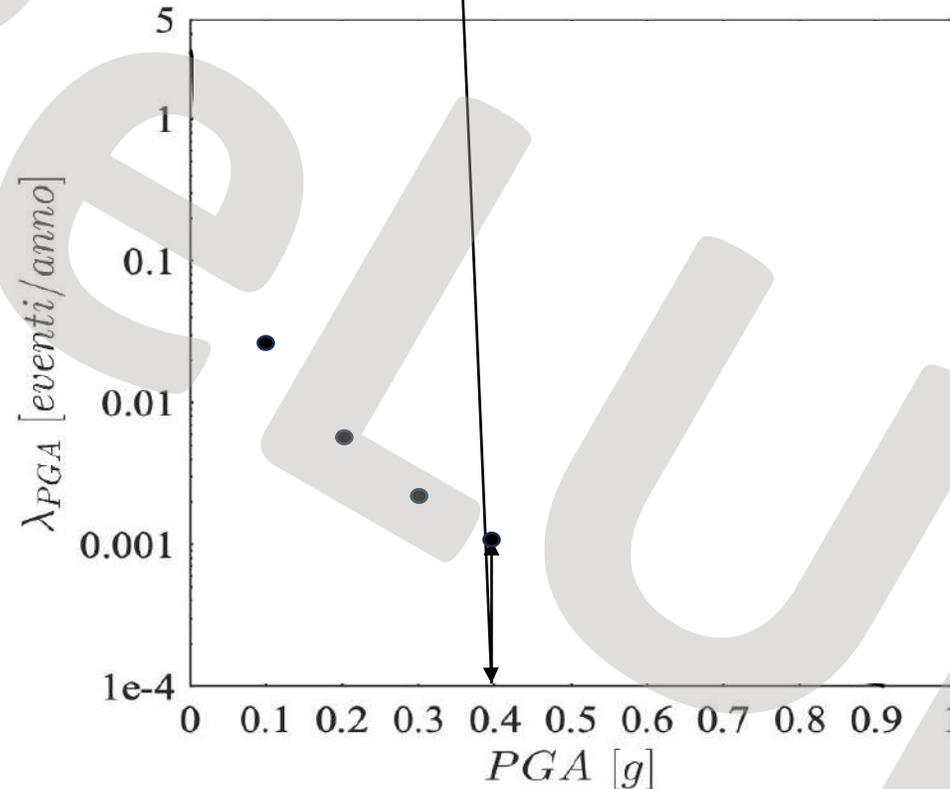
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



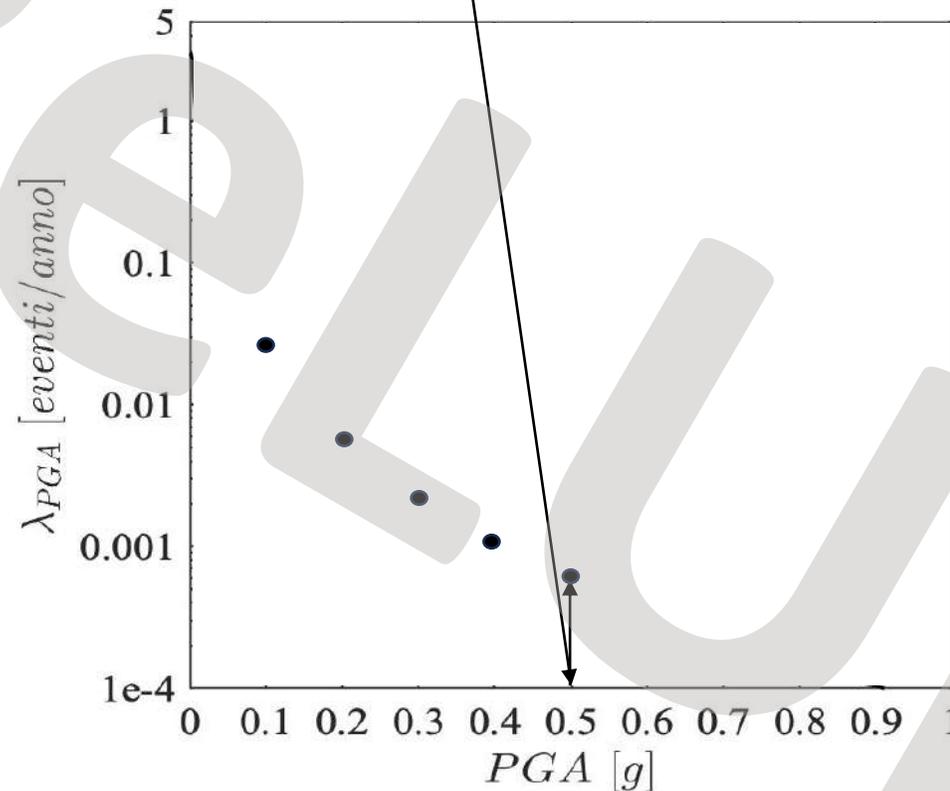
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



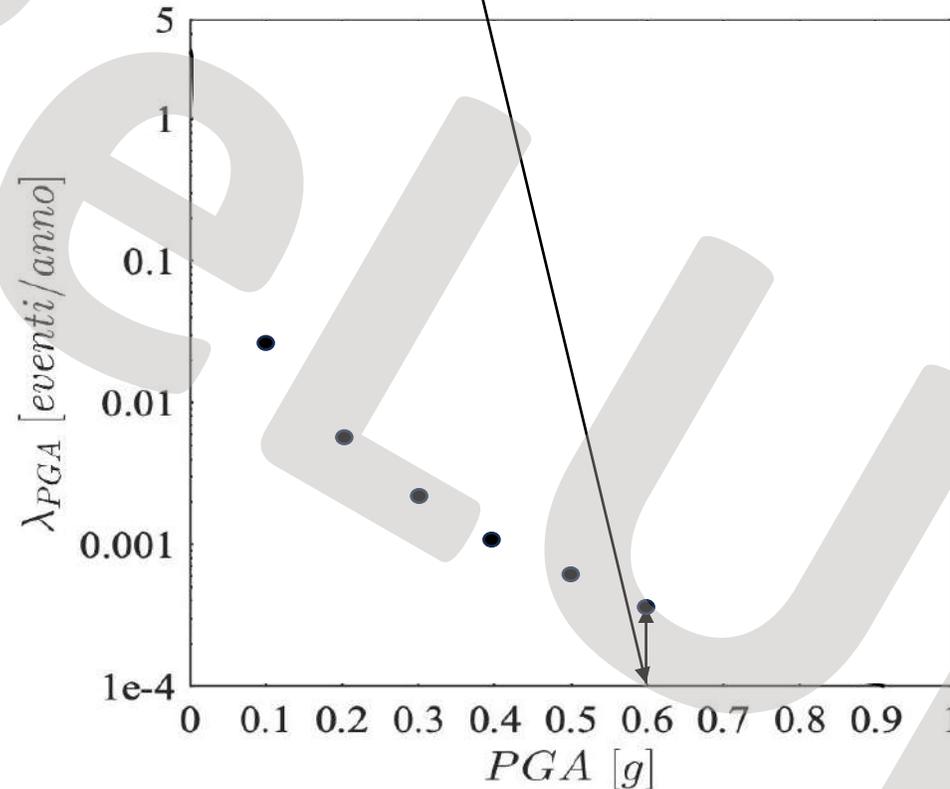
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



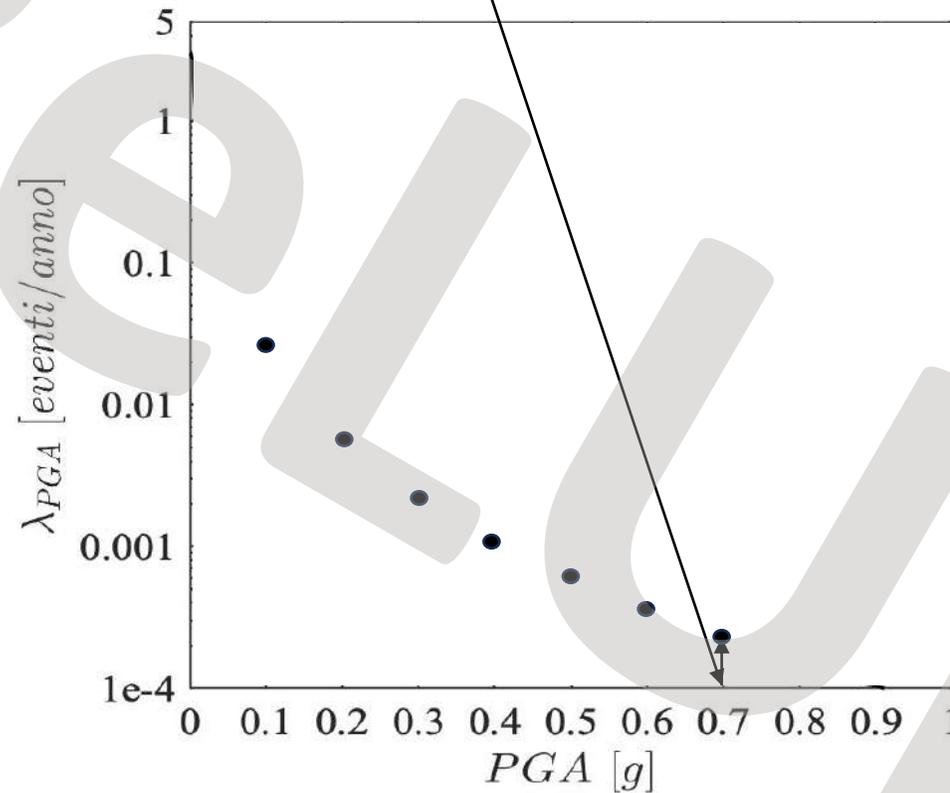
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



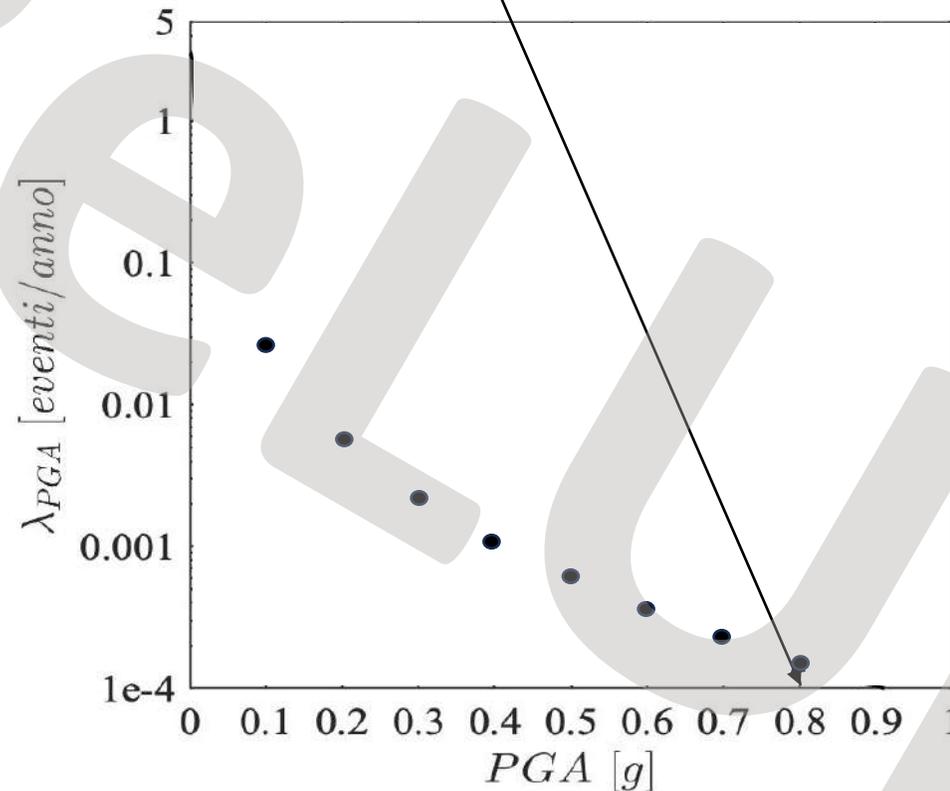
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



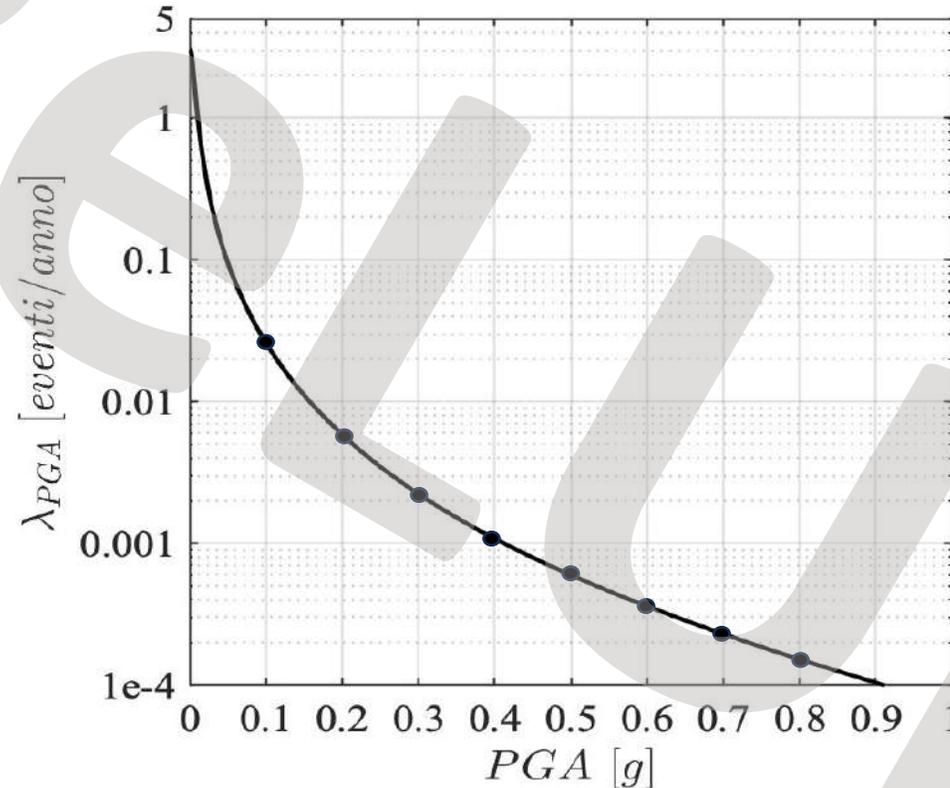
Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



Integrale di pericolosità sismica

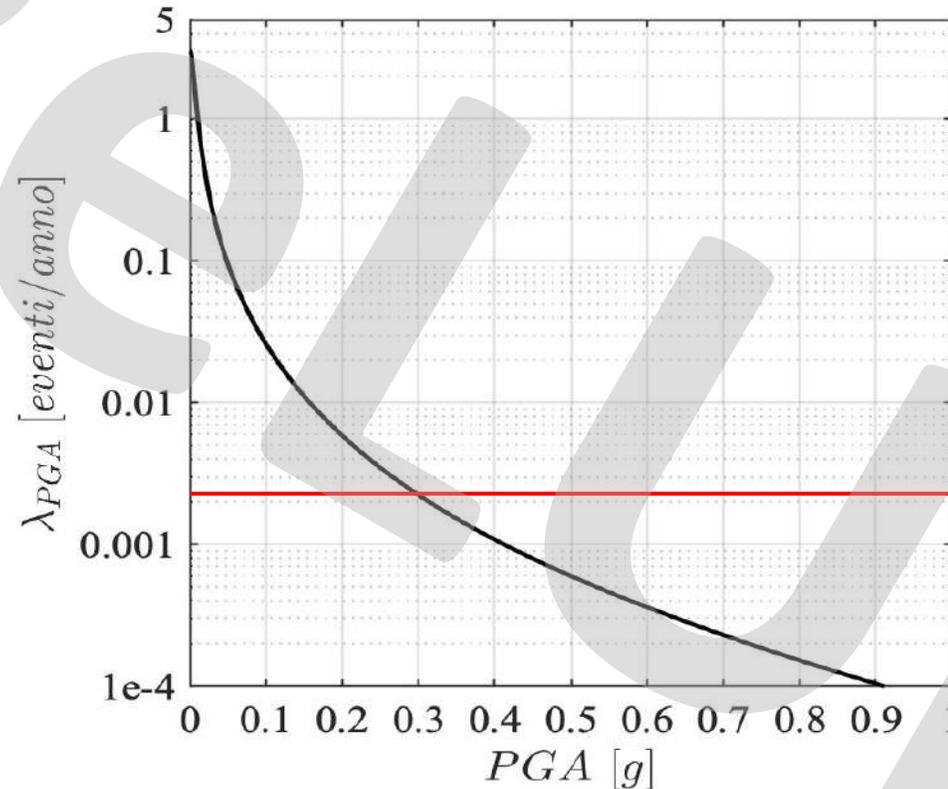
$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



Curve di pericolosità

Integrale di pericolosità sismica

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$

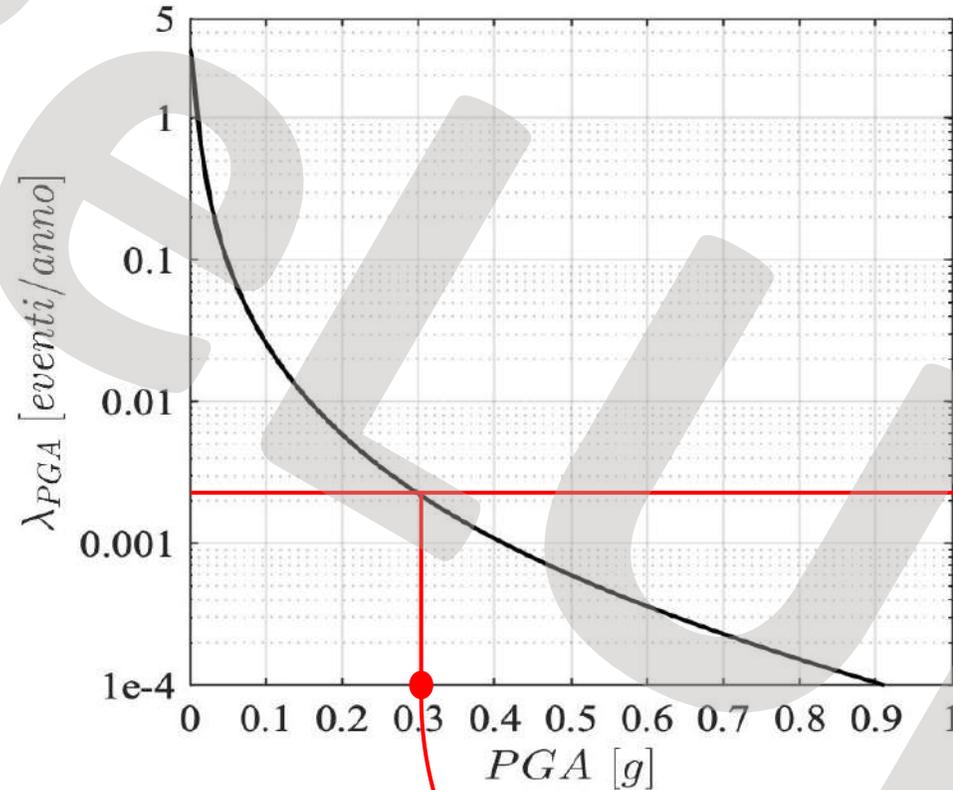


1/475=0.0021

Valore di probabilità pari a 10% in 50 anni

Integrale di pericolosità sismica

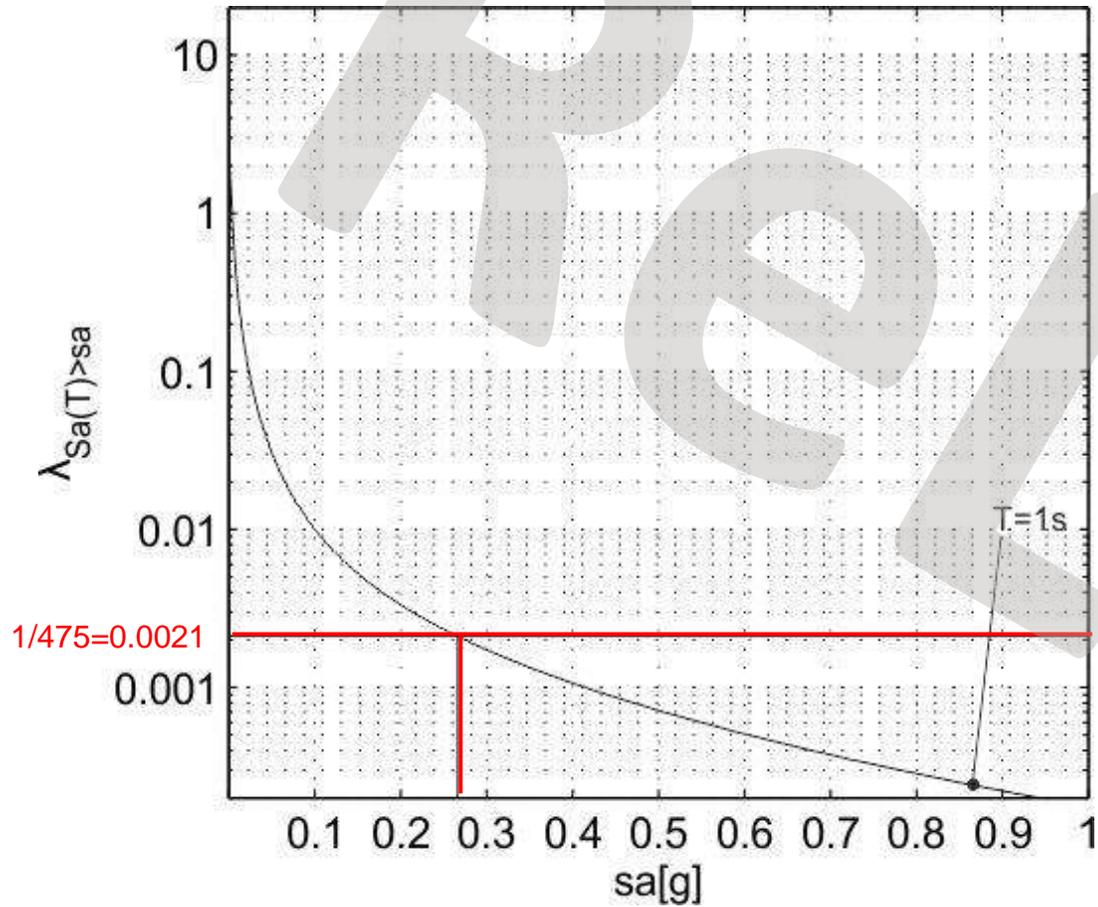
$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \nu \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P[Sa(T) > sa / M = m, R = r] \cdot f_R(r) \cdot f_M(m) \cdot dr \cdot dm$$



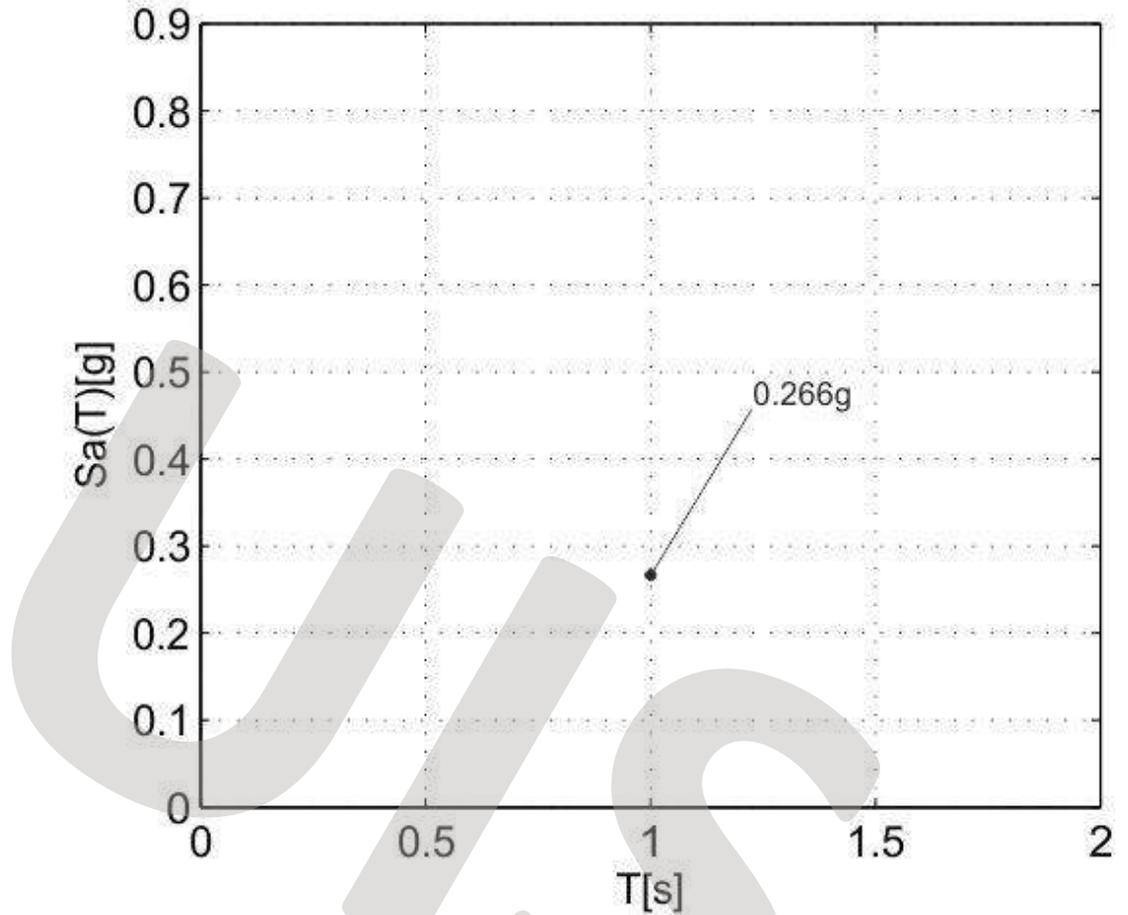
1/475=0.0021

Valore di probabilità pari a 10% in 50 anni

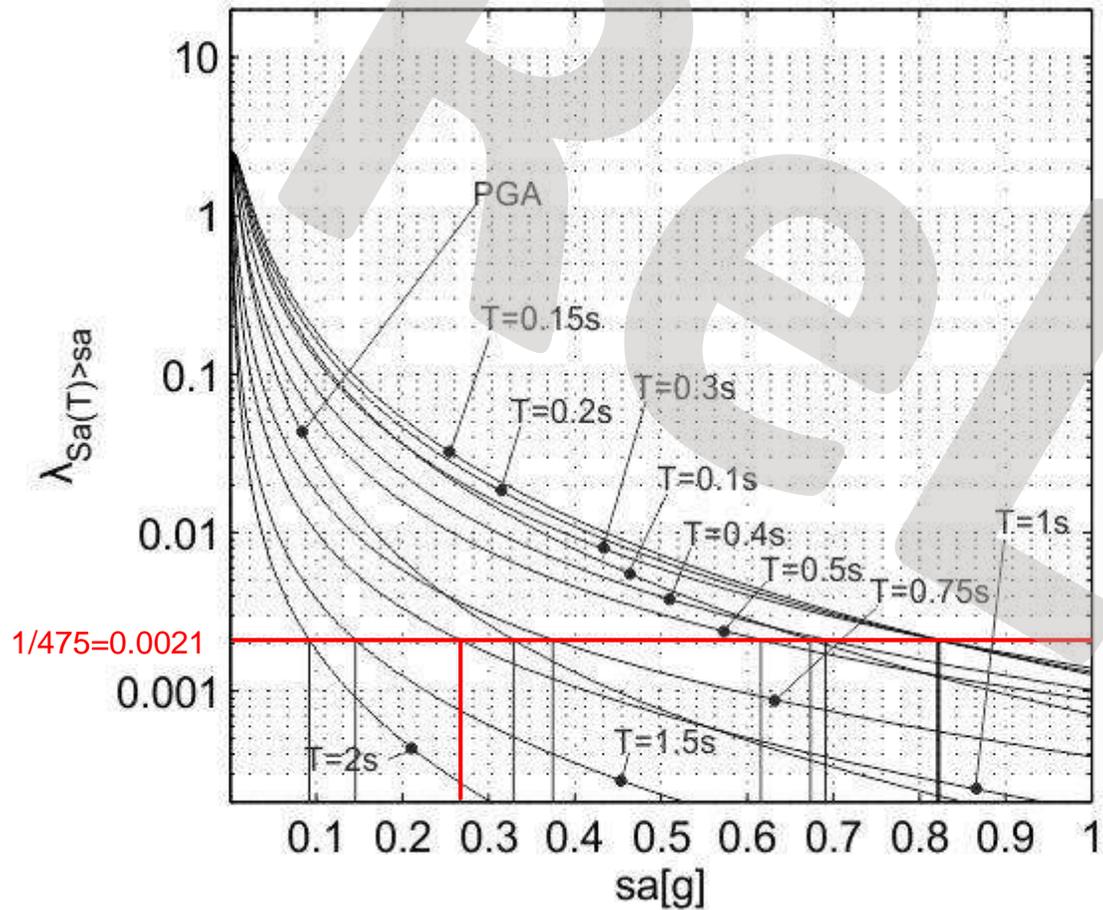
Valore di *PGA* che ha la probabilità pari a 10% di essere superato almeno una volta in 50 anni



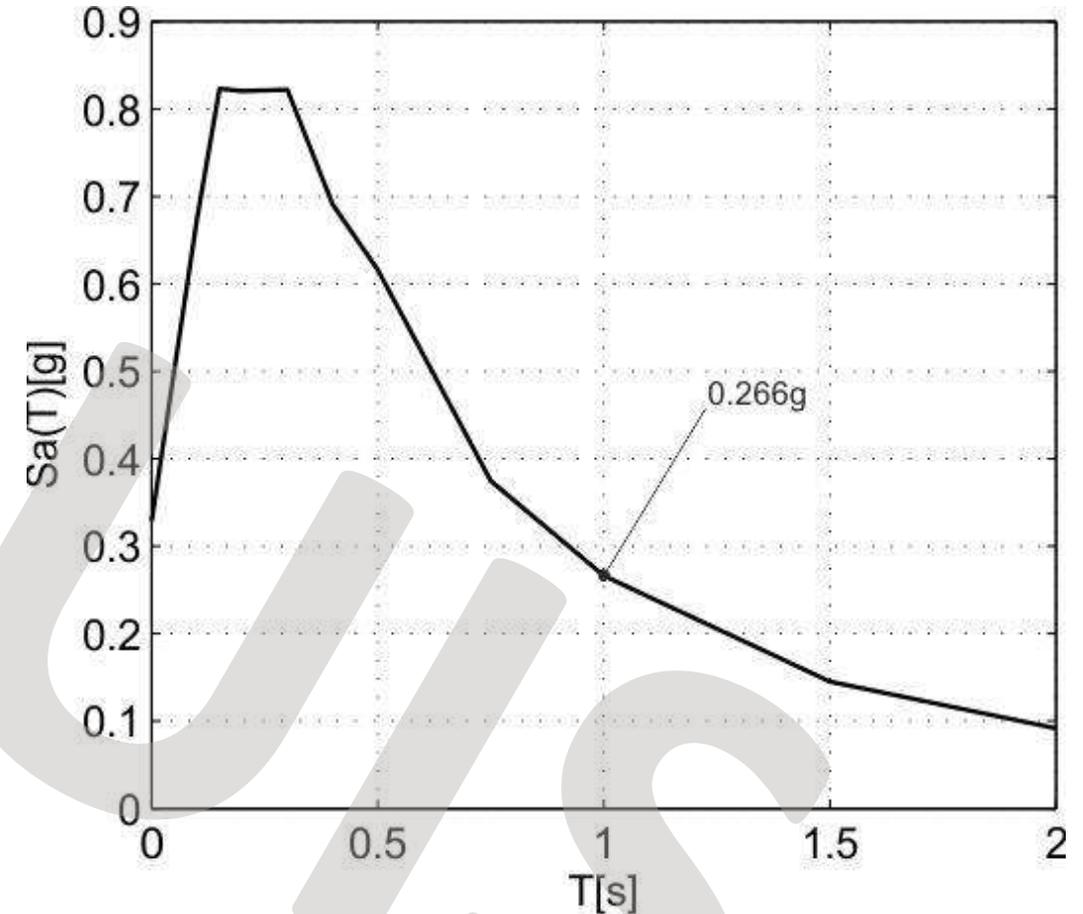
Curve di pericolosità



Ripetendo il calcolo della curva di pericolosità per diverse misure di intensità:



Curve di pericolosità



Spettro a pericolosità uniforme (le cui ordinate sono superate mediamente ogni 475 anni).

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha calcolato la pericolosità sismica di tutto il territorio nazionale considerando:

- 9 probabilità di superamento in 50 anni:

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| P_e (%) | 2 | 5 | 10 | 22 | 30 | 39 | 50 | 63 | 81 |
| Tr (anni) | 2475 | 975 | 475 | 201 | 140 | 101 | 72 | 50 | 30 |

- 10 periodi strutturali:

| | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ts (sec) | 0.0 (PGA) | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
|----------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Basandosi sui risultati dell'INGV, la normativa italiana fornisce gli spettri di progetto sostanzialmente equivalenti agli spettri ad hazard uniforme (UHS) calcolati per oltre 10000 punti.



I dati *online* della pericolosità sismica in Italia

Mappe dinamiche

-  Mappe interattive della pericolosità sismica (*WebGis*)
-  Interactive Maps of Seismic Hazard (*WebGis*)

Mappe statiche e download dati

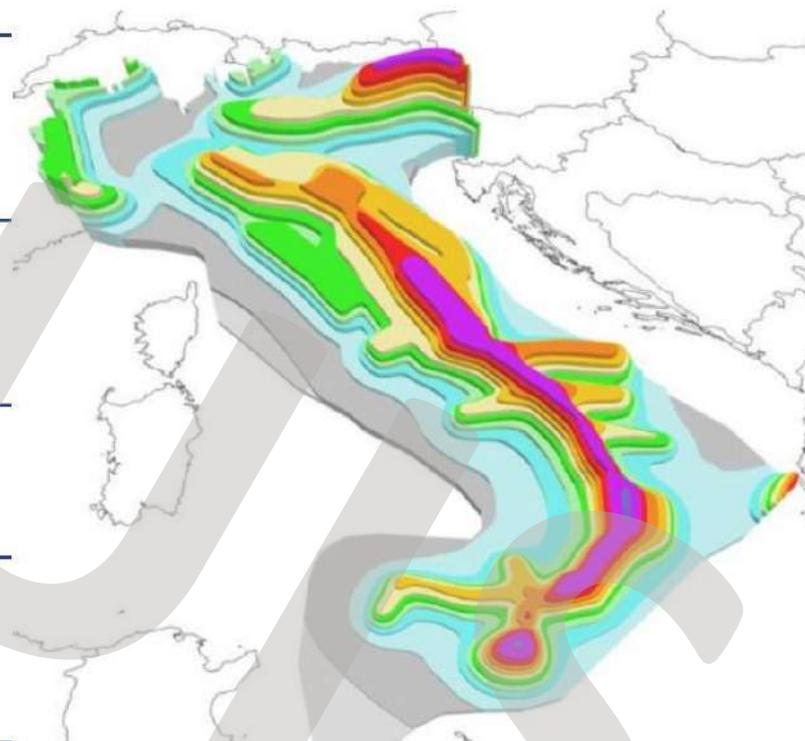
- PGA per varie probabilità di eccedenza in 50 anni
- Accelerazioni spettrali per varie probabilità di eccedenza in 50 anni

Norme Tecniche per le Costruzioni

- DM 14/01/2008 - Allegato A

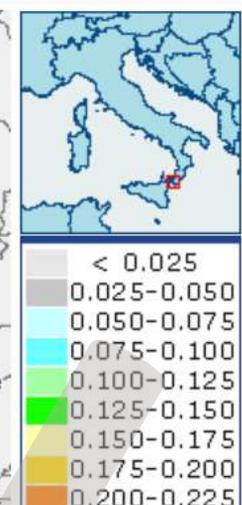
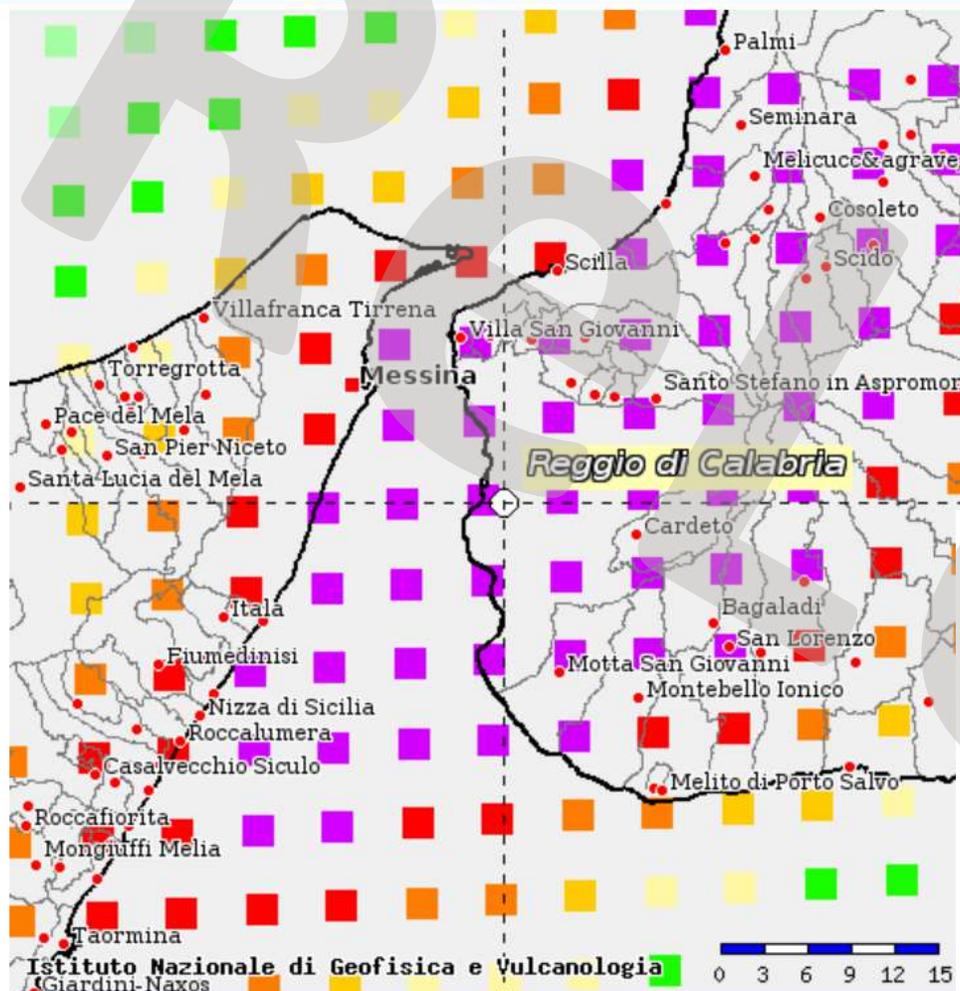
Links

- Progetto INGV-DPC S1
- zonesismiche.mi.ingv.it



<http://esse1.mi.ingv.it/>

Mappe interattive di pericolosità sismica



Strumenti

- Ritorna alla mappa iniziale
- Ridisegna mappa
- Zoom In
- Zoom Out
- Ricentra sul punto
- Grafico sul punto griglia
- Grafico di disaggregazione

Navigazione

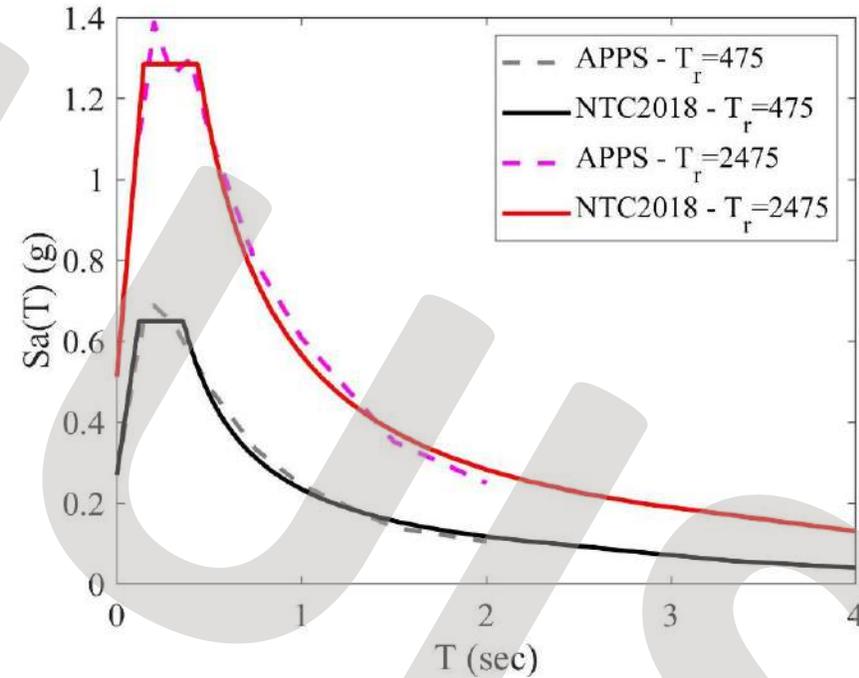
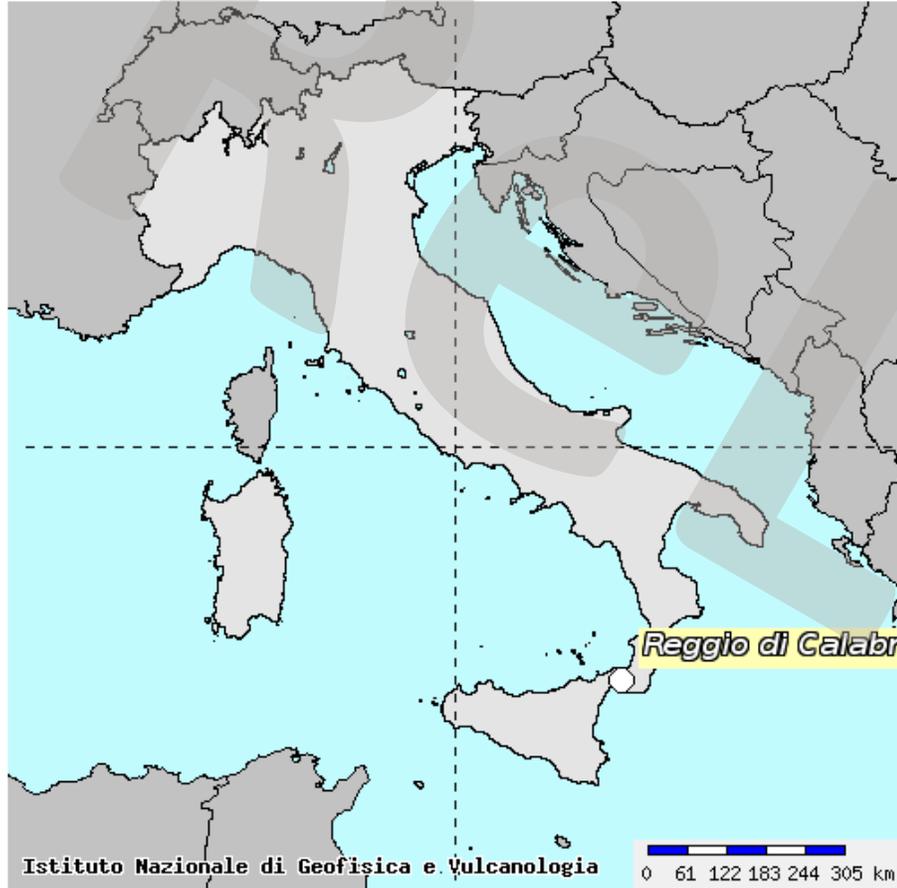
Scala:

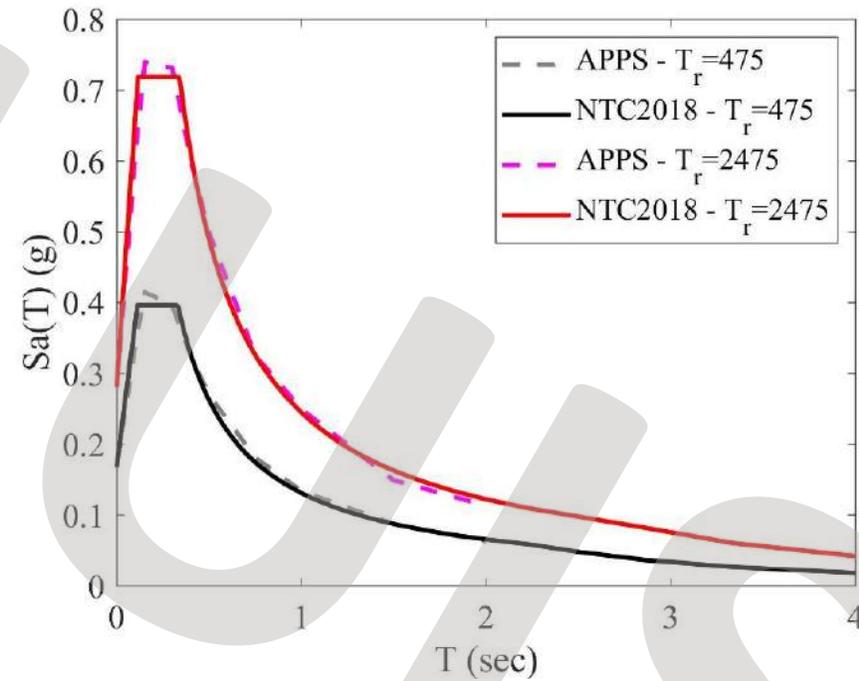
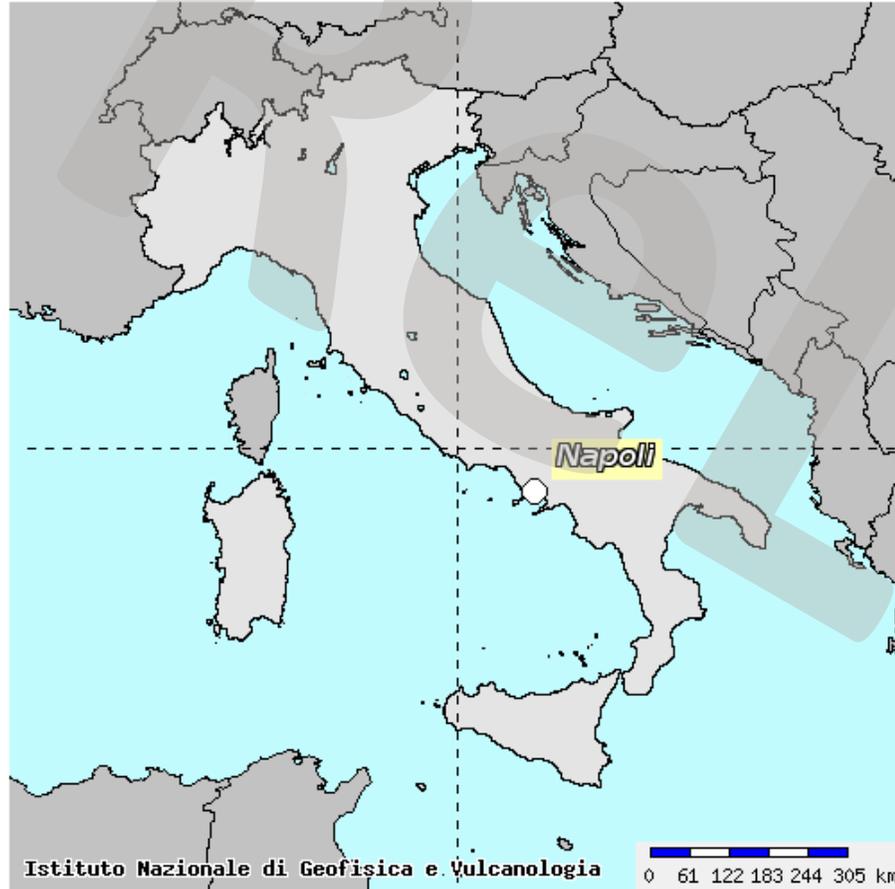
| Frequenza annuale di superamento | a(g) (Coordinate del punto lat: 38.1136, lon: 15.6459, ID: 45211) | | |
|----------------------------------|--|----------------|----------------|
| | 16° percentile | 50° percentile | 84° percentile |
| 0.0004 | 0.4500 | 0.5120 | 0.6003 |
| 0.0010 | 0.3221 | 0.3626 | 0.4099 |
| 0.0021 | 0.2337 | 0.2697 | 0.2944 |
| 0.0050 | 0.1505 | 0.1825 | 0.2000 |
| 0.0071 | 0.1227 | 0.1530 | 0.1645 |
| 0.0099 | 0.1012 | 0.1296 | 0.1371 |
| 0.0139 | 0.0822 | 0.1087 | 0.1139 |
| 0.0200 | 0.0661 | 0.0896 | 0.0929 |
| 0.0333 | 0.0477 | 0.0667 | 0.0683 |

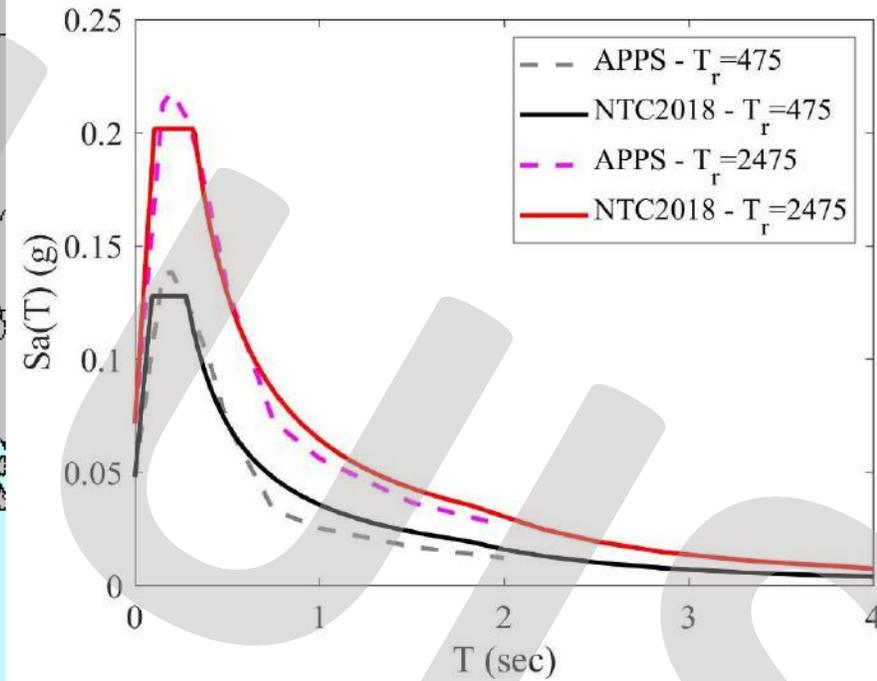
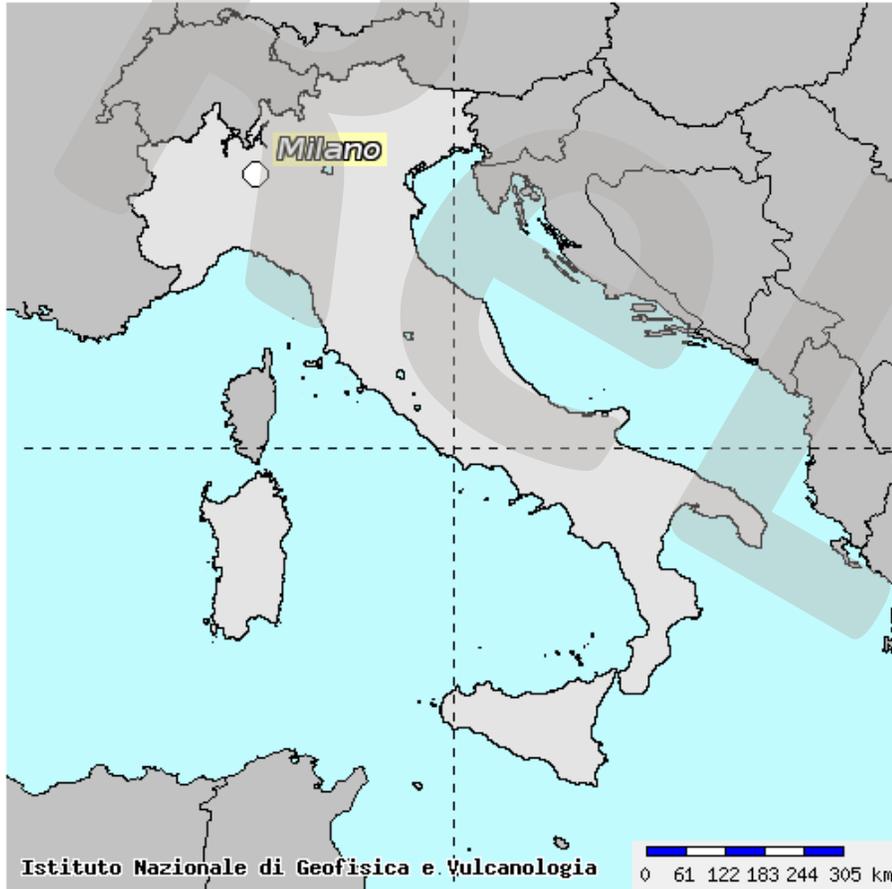
$$\begin{aligned}
 0 \leq T < T_B & \quad S_o(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & \quad S_o(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \\
 T_C \leq T < T_D & \quad S_o(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & \quad S_o(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)
 \end{aligned}$$

| Stati Limite | P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R | |
|---------------------------|---|-----|
| Stati limite di esercizio | SLO | 81% |
| | SLD | 63% |
| Stati limite ultimi | SLV | 10% |
| | SLC | 5% |

$$T_R = - V_R / \ln(1 - P_{V_R}) = - C_U V_N / \ln(1 - P_{V_R})$$







Disaggregazione della pericolosità sismica

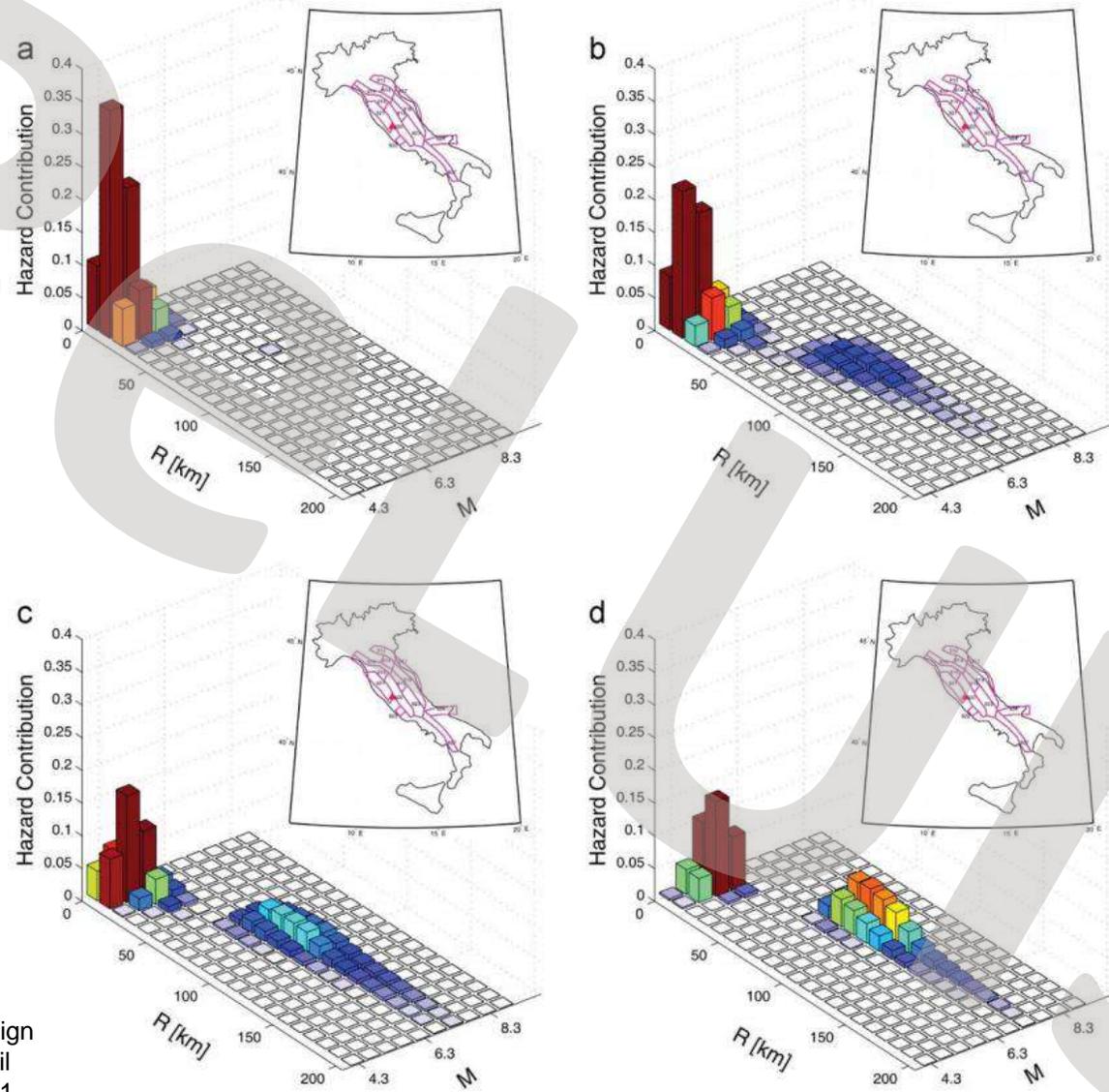
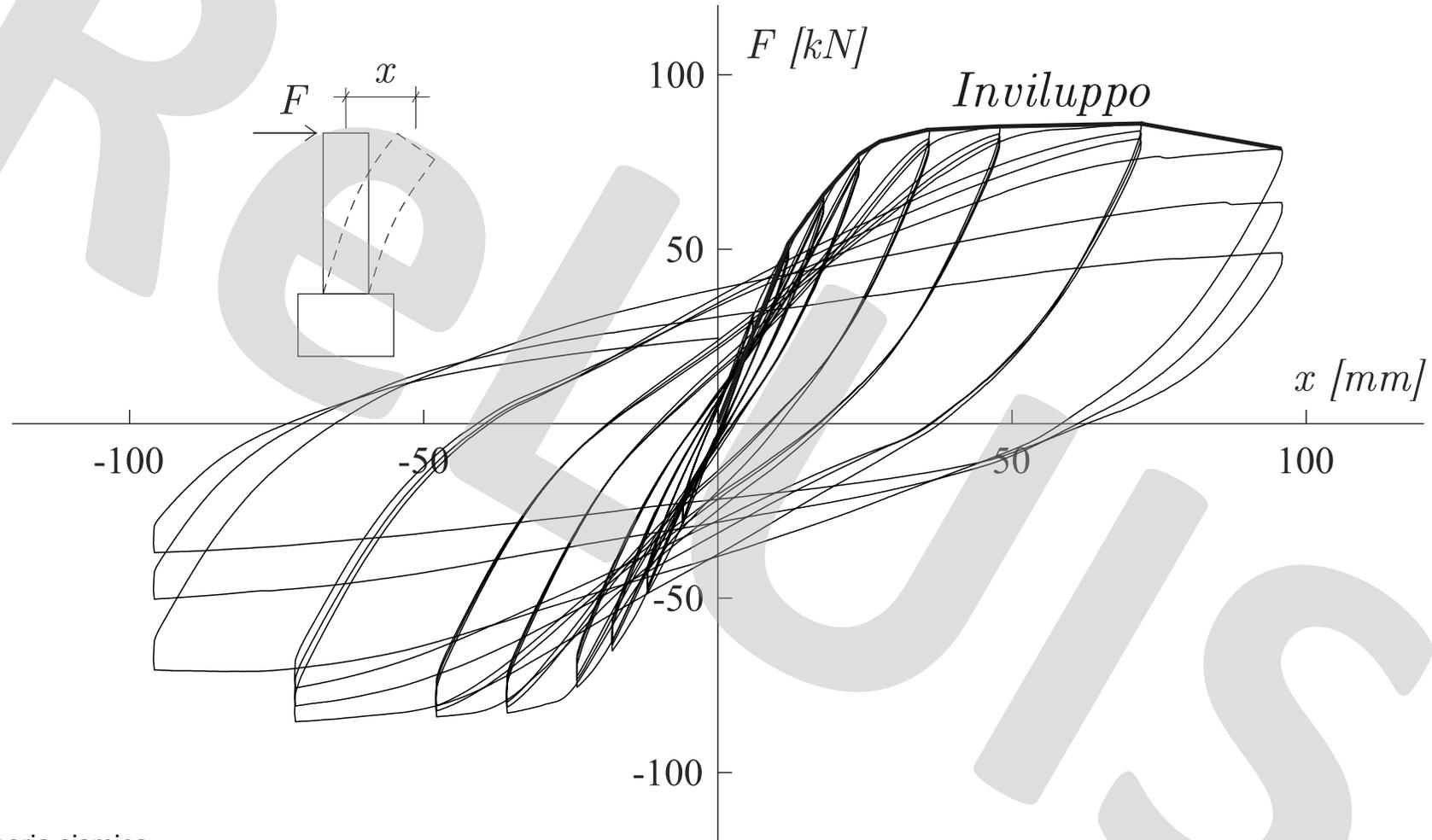


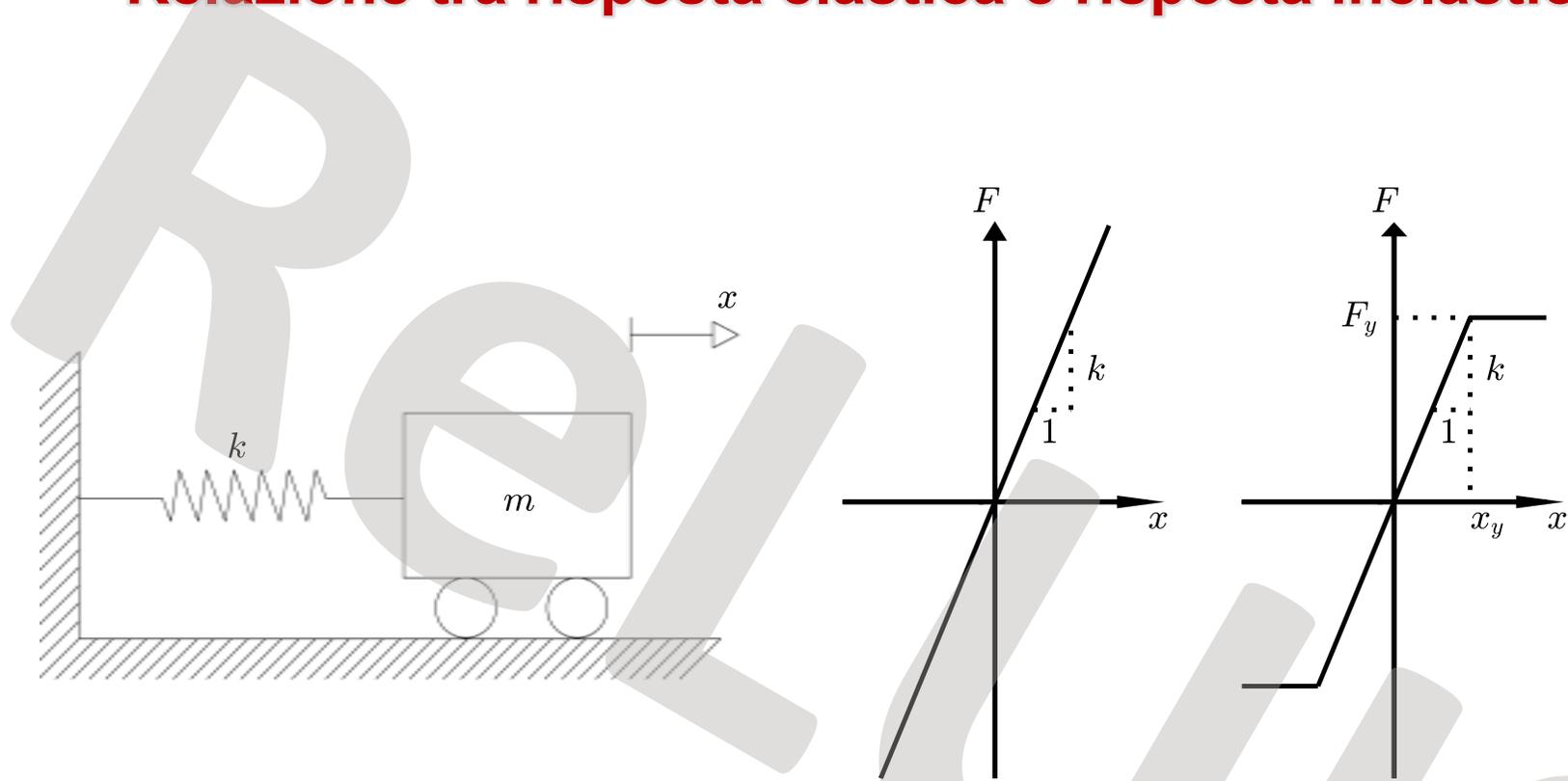
Fig. 14. Disaggregation for Viterbo and $T_r=50$ yr: PGA (a), $T=0.5$ s (b), $T=1$ s (c) and $T=2$ s (d).

Modulo II - Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

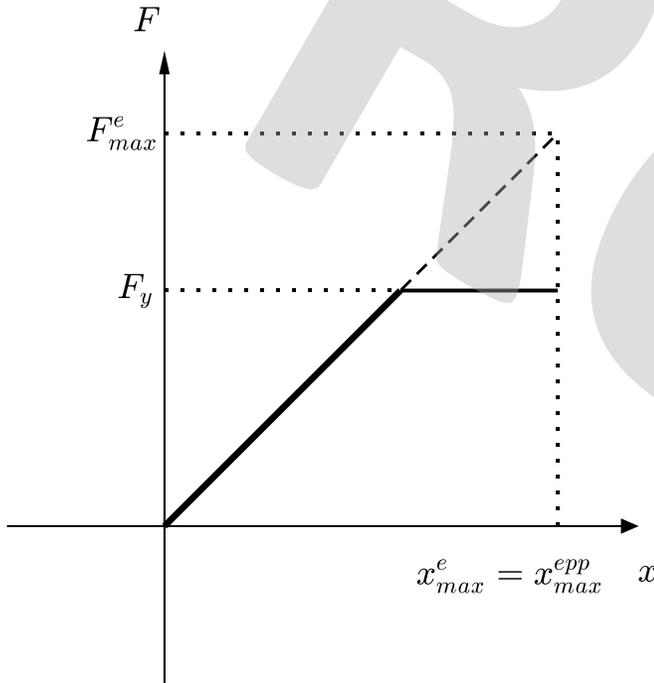
Lezione 1 - Il rischio sismico dei ponti esistenti: basi teoriche

Iervolino I, Chioccarelli E, Convertito V. Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2011;31:1212–31. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.05.001>.



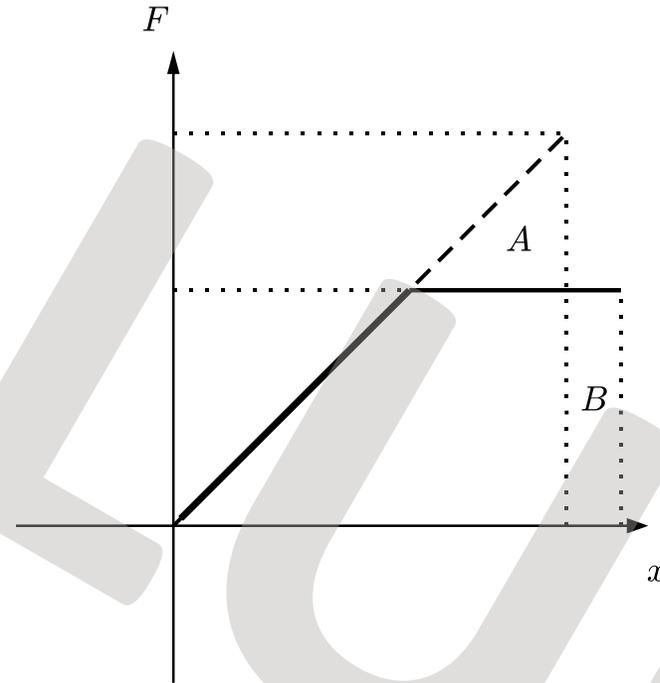


Oscillatore semplice (sinistra) a comportamento indefinitamente elastico (centro) ed elastico-perfettamente-plastico (destra).



Rappresentazione dell'eguaglianza degli spostamenti nell'ipotesi che valga nel singolo evento sismico

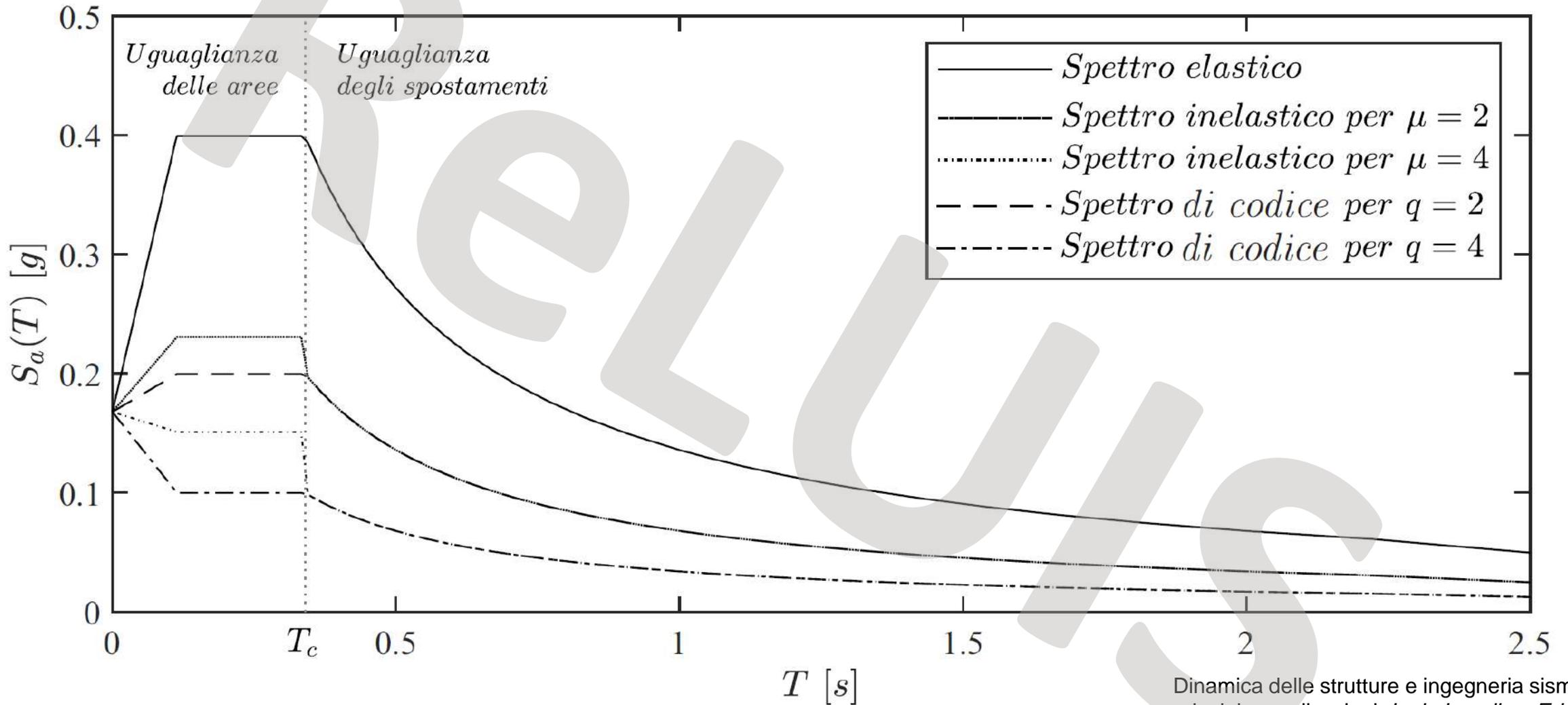
$$T \geq T^*$$



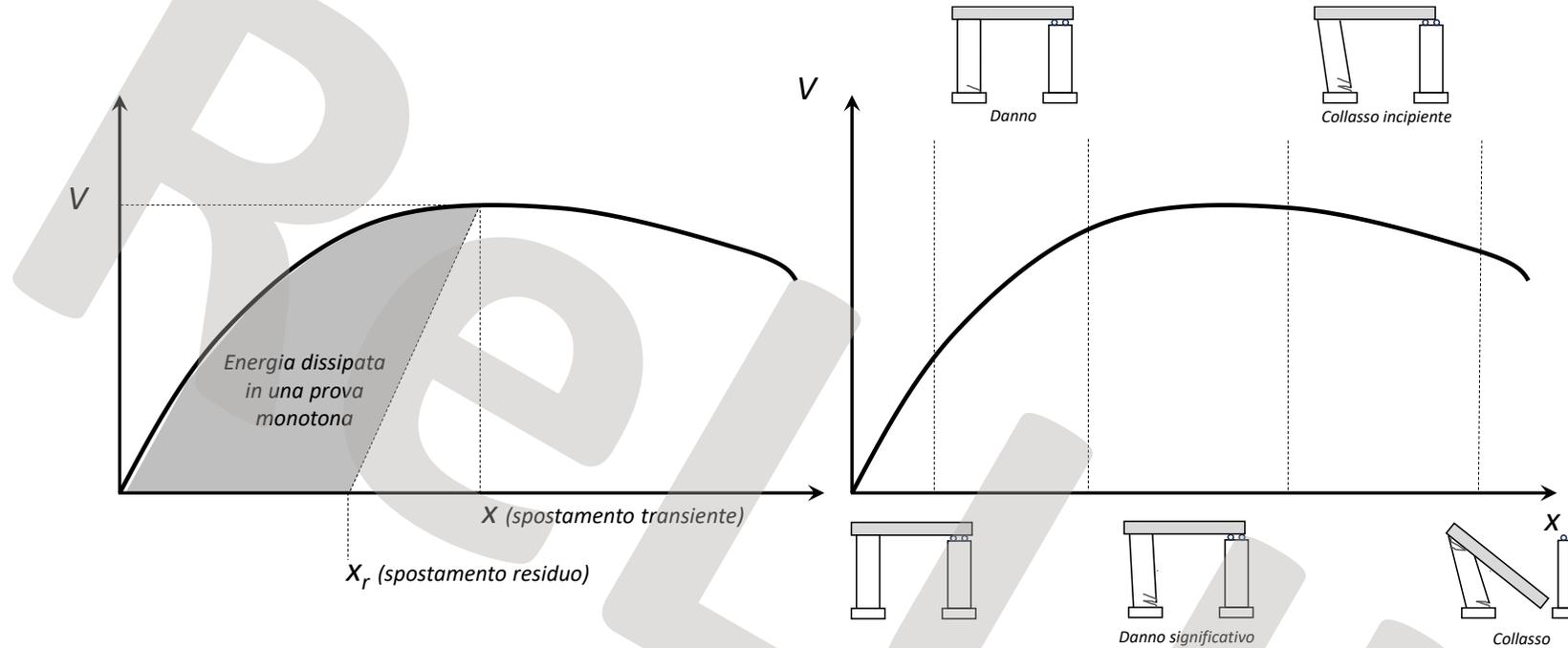
Rappresentazione dell'eguaglianza delle aree nell'ipotesi che valga nel singolo evento sismico

$$T < T^*$$

$$\begin{cases} T \geq T^* \Rightarrow F_y = \frac{F_{max}^e}{\mu} \\ T < T^* \Rightarrow F_y = \frac{F_{max}^e}{\sqrt{2 \cdot \mu - 1}} \end{cases}$$



Obiettivi prestazionali per le strutture in zona sismica



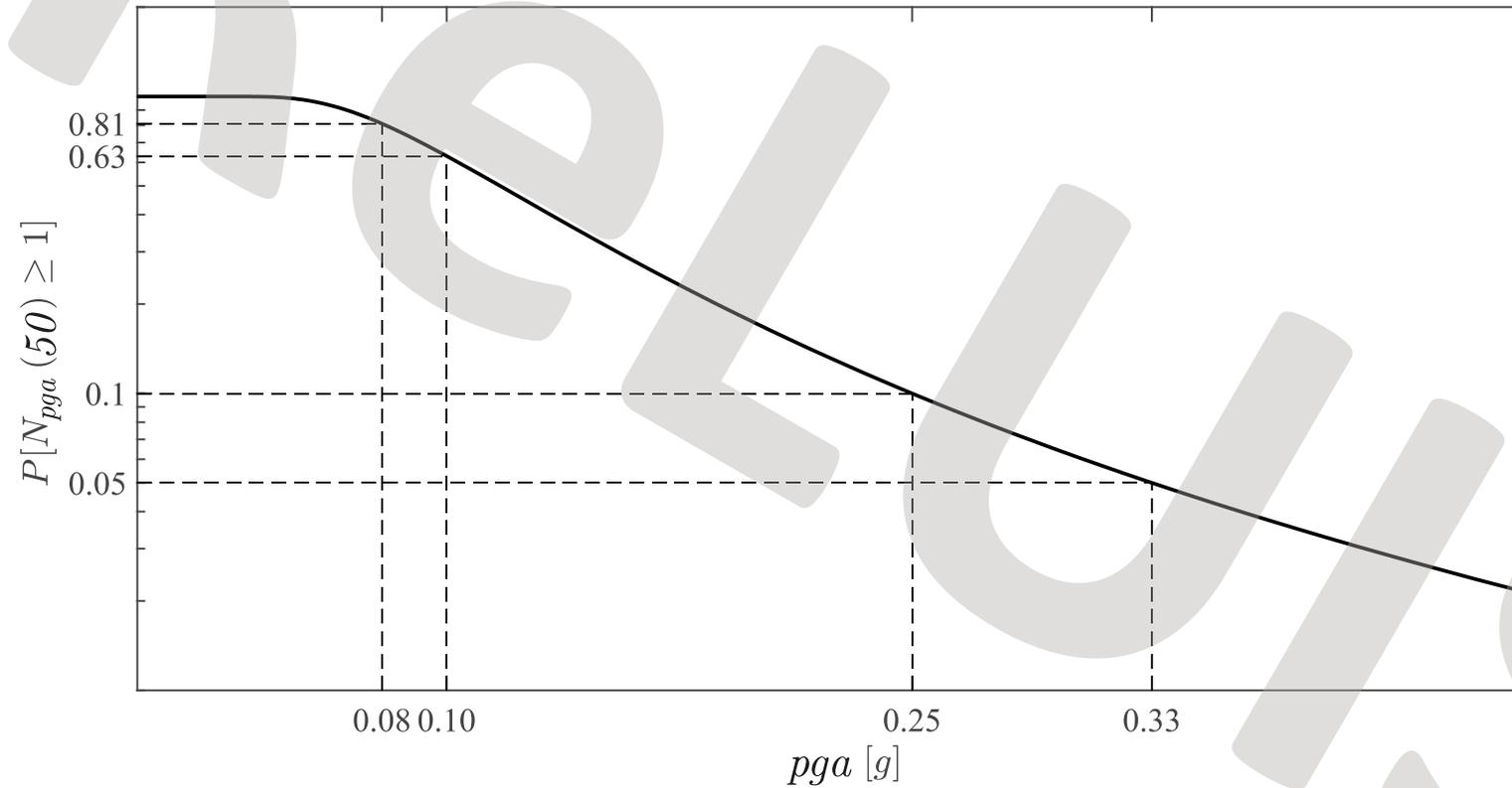
Prestazioni da non violare per la costruzione soggetta al terremoto di progetto

| Frequenza del terremoto di progetto al sito di costruzione | Prestazioni da non violare per la costruzione soggetta al terremoto di progetto | | | |
|--|---|------------------|----------------------|---------------------|
| | Operatività | Danno riparabile | Danno non riparabile | Collasso incipiente |
| Frequente (e.g., periodo di ritorno 30 anni) | ● | ✘ | ✘ | ✘ |
| Occasionale (e.g., periodo di ritorno 50 anni) | ■ | ● | ✘ | ✘ |
| Raro (e.g., periodo di ritorno 475 anni) | ▲ | ■ | ● | ✘ |
| Molto raro (e.g., periodo di ritorno 975 anni) | | ▲ | ■ | ● |

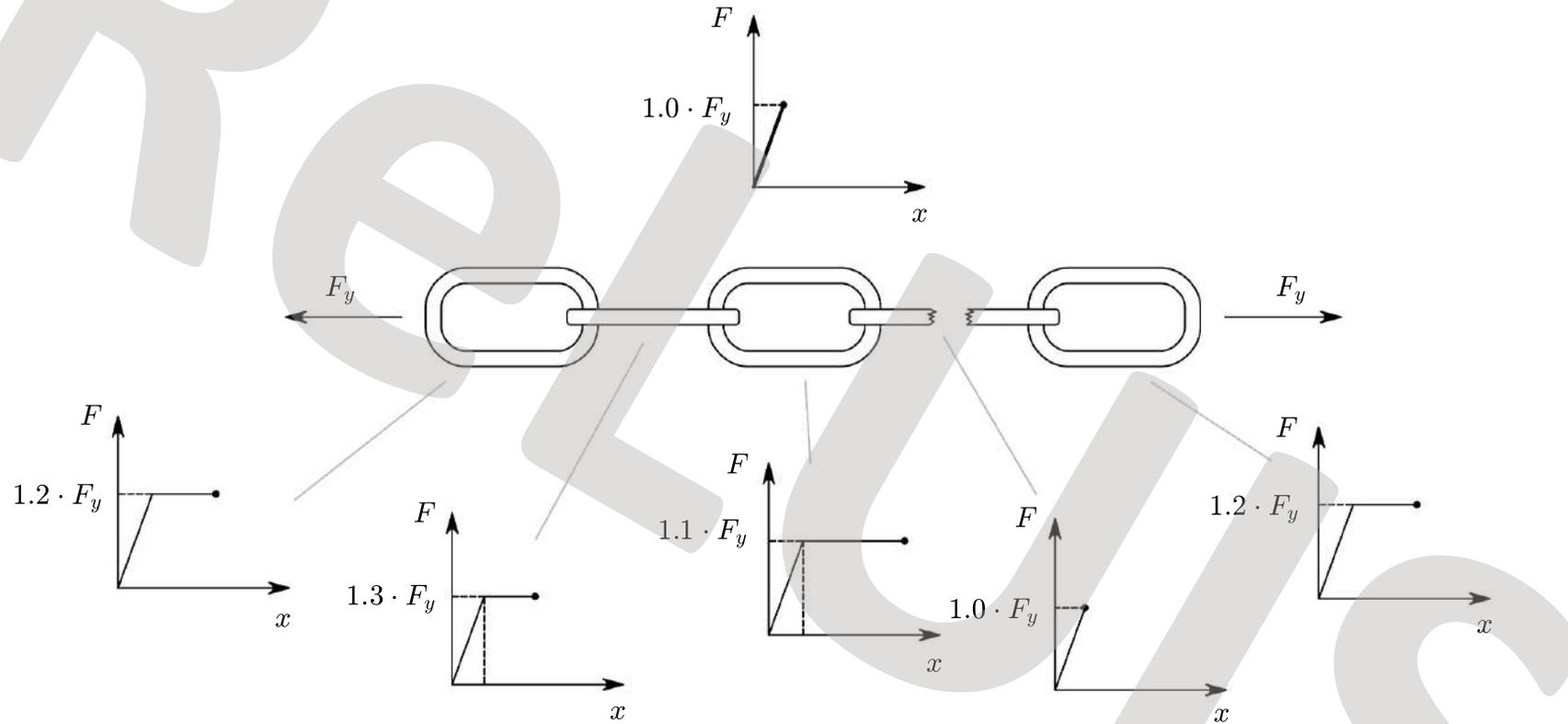
Obiettivi ammissibili per costruzioni: ● ordinarie, ■ strategiche, ▲ critiche.

✘ Obiettivi inammissibili (irrazionali).

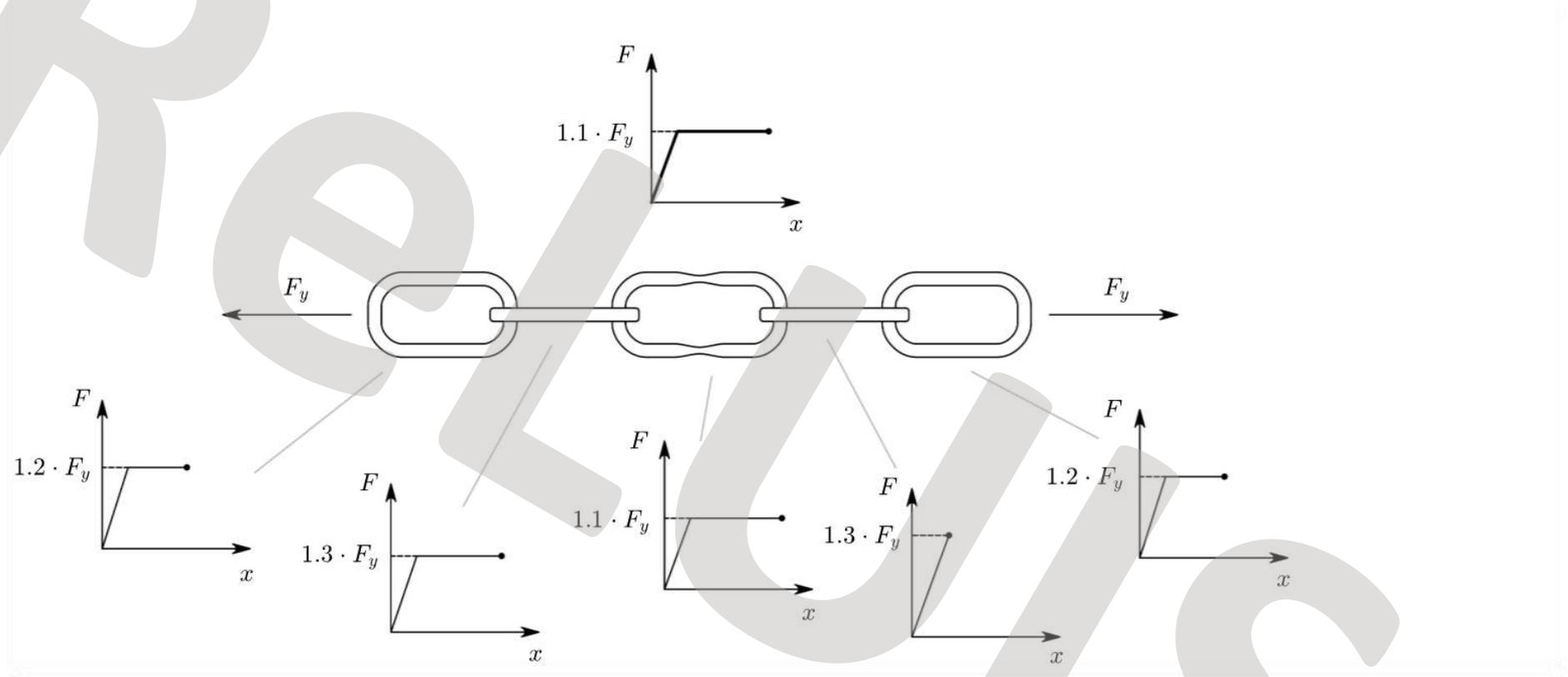
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, Iunio Iervolino, Ed. Hoepli. Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021



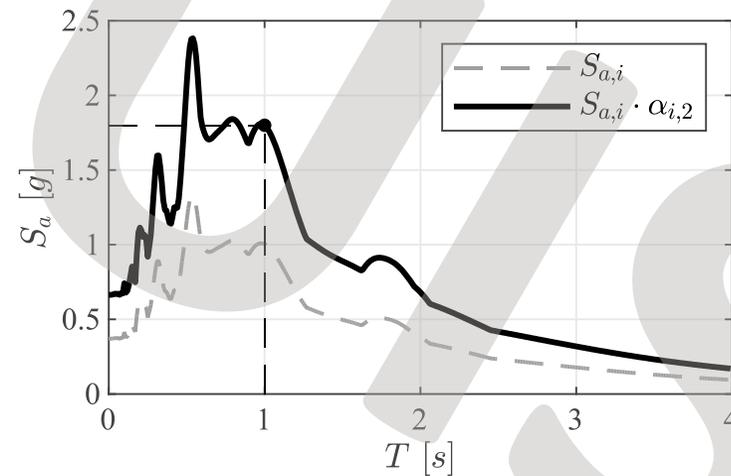
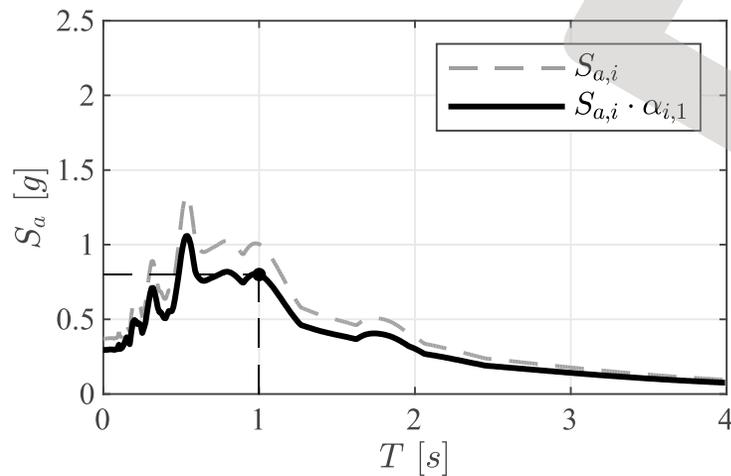
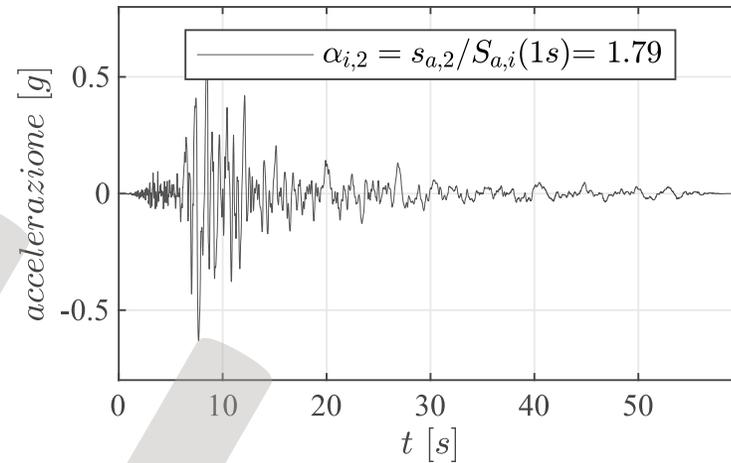
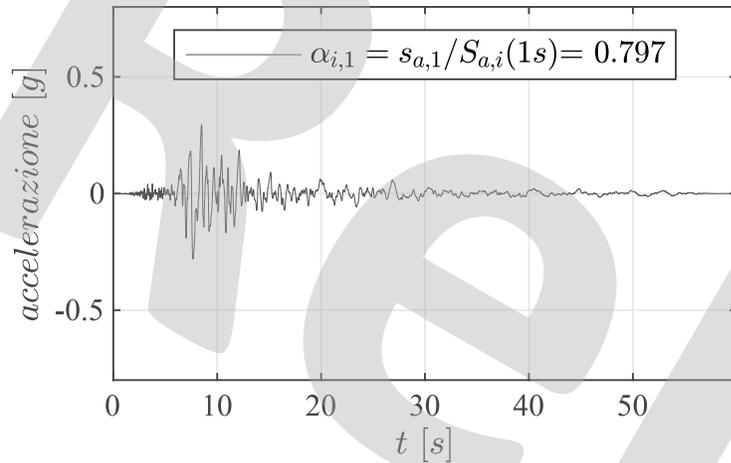
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli.*
Copyright © *Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021*



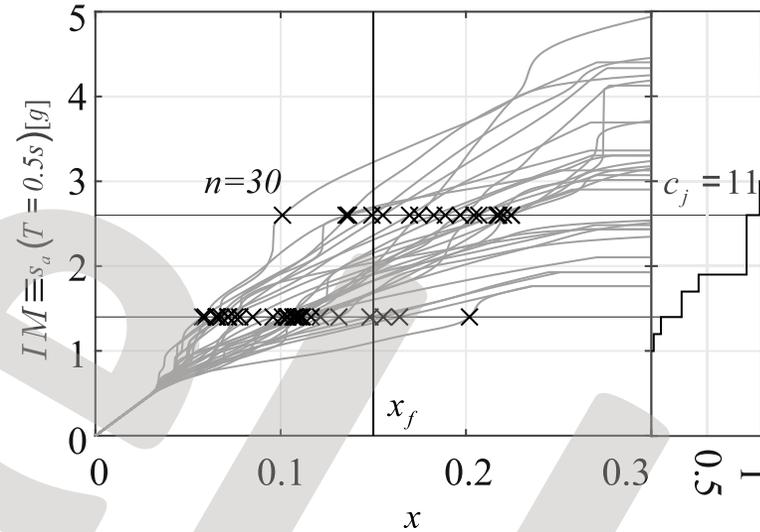
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
 principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli.
 Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021



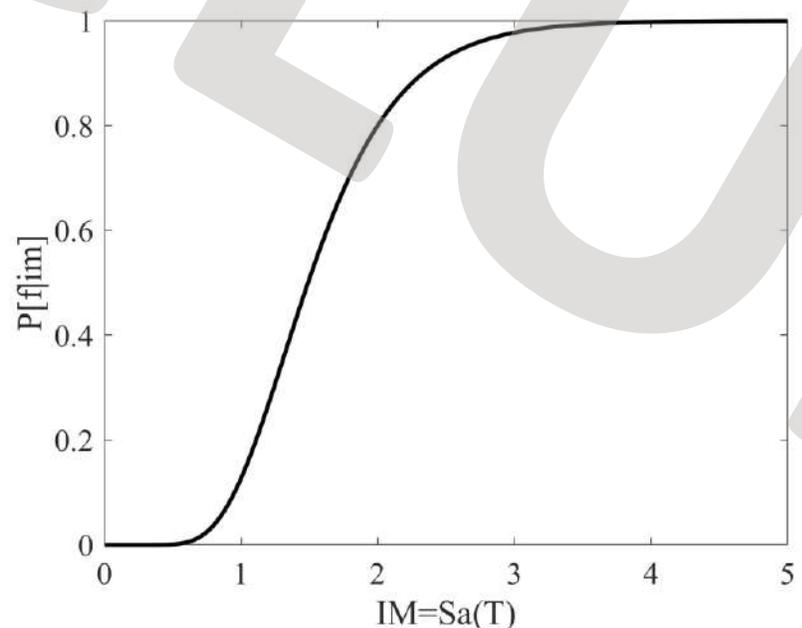
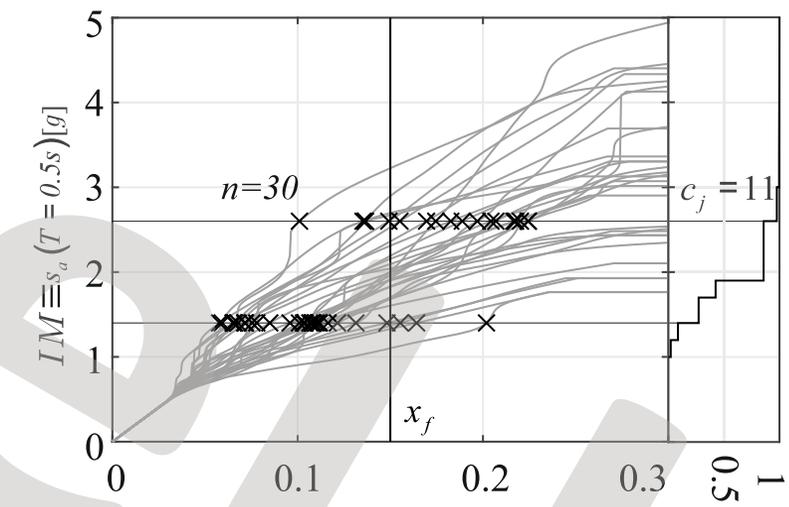
Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
 principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli.*
 Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021



Curve di fragilità



Curve di fragilità



Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
principi e applicazioni, *Iunio Iervolino, Ed. Hoepli.*
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

Confronto tra perdite dovute a terremoti di paragonabile energia rilasciata alla sorgente in due nazioni diverse

| | Magnitudo | Vittime | Perdite economiche |
|-----------------------------|-----------|------------|--|
| Port-au-Prince (Haiti) 2010 | 7.0 | > 200,0000 | ~ 6 miliardi di dollari ¹ |
| Kobe (Giappone) 1995 | 6.9 | ~ 6,000 | > 100 miliardi di dollari ² |

*Analisi di pericolosità
sismica*



*Valutazione del (la
derivata di) tasso di
superamento della misura
di intensità al sito della
costruzione*

1

*Modellazione sismica
della costruzione*



*Valutazione della
prestazione strutturale (e
non strutturale) per
ciascun dato valore
dell'intensità sismica*

2

*Modellazione del danno a seguito
della prestazione sismica*



*Valutazione del danno
strutturale (e non
strutturale) per ciascun
della risposta strutturale (e
non strutturale)*

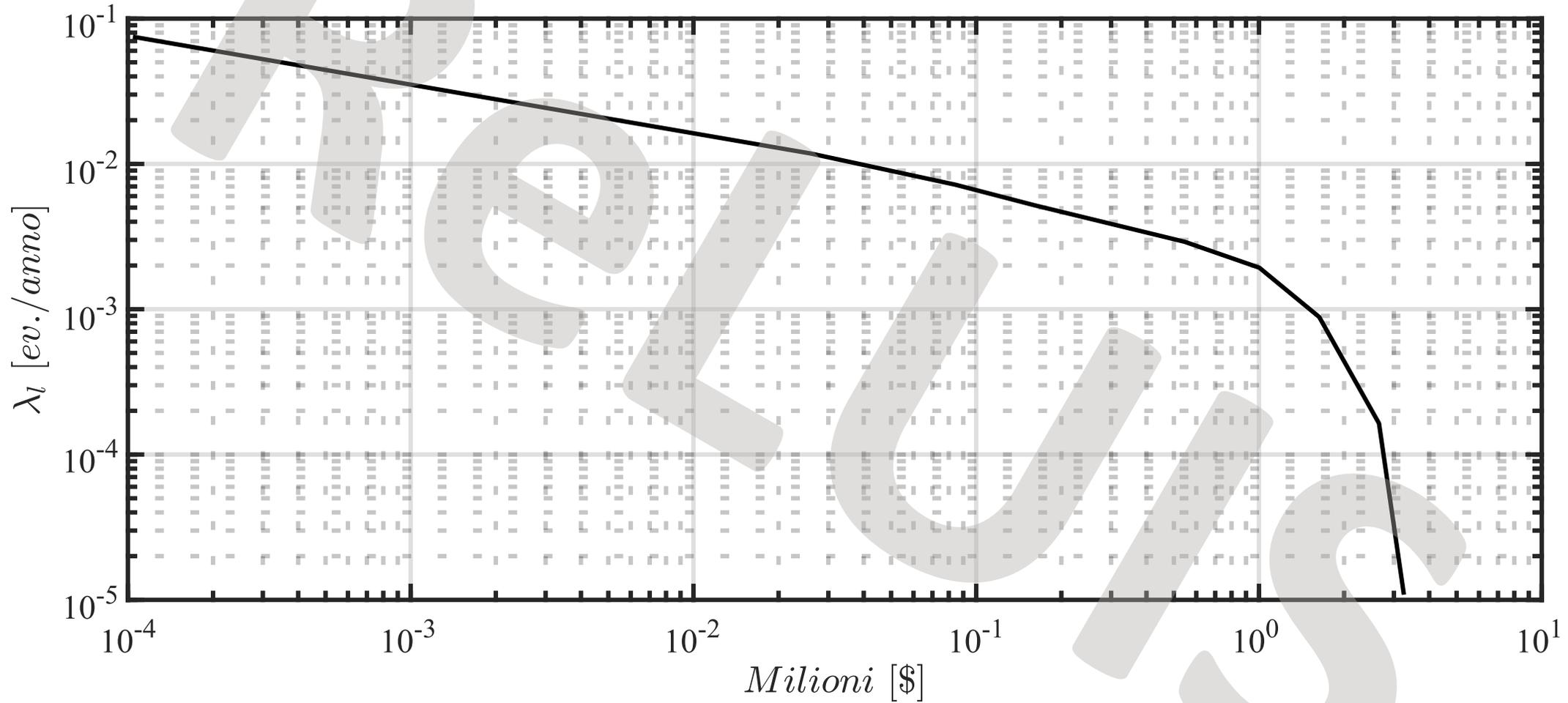
3

*Valutazione, economica
e non, delle conseguenze*

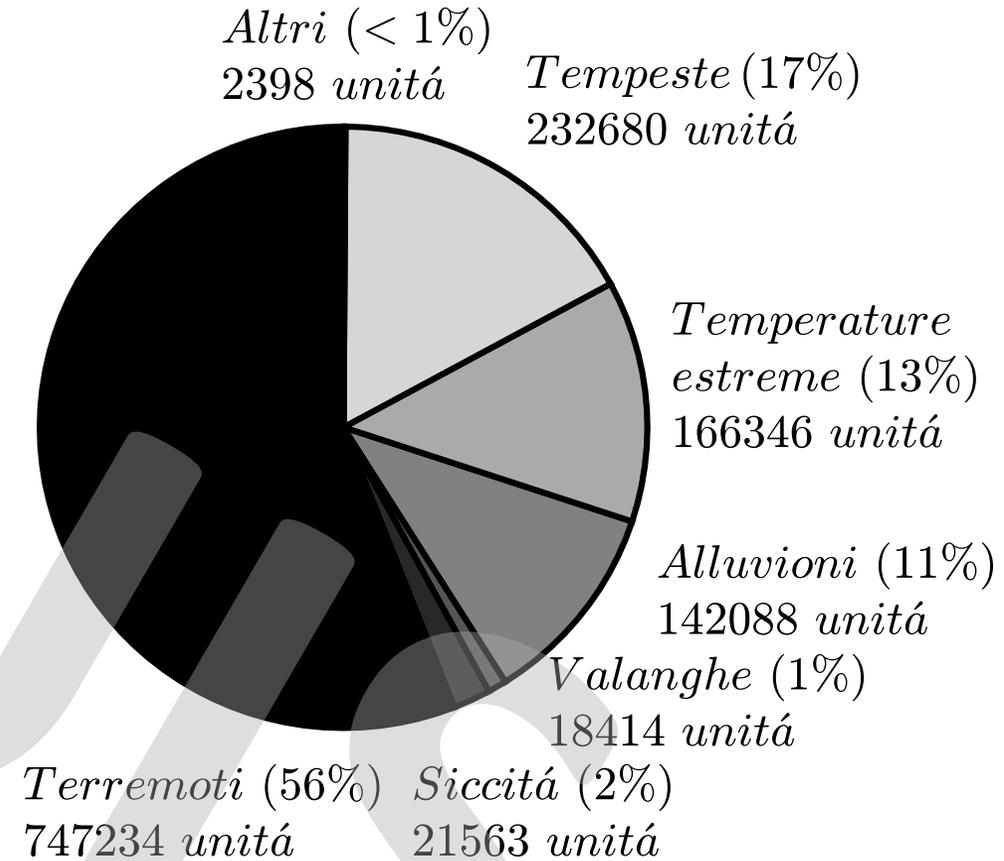
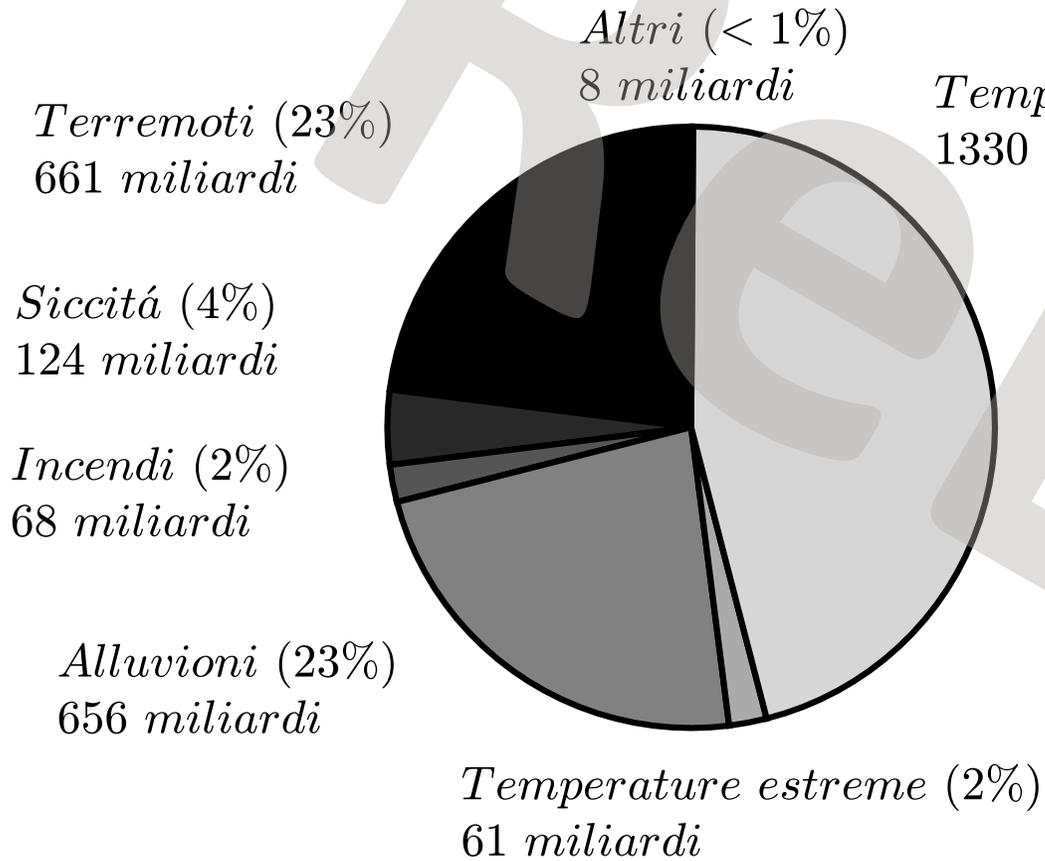


*Costi diretti (danno a
cose e persone) e
indiretti (costo delle
interruzioni)*

4

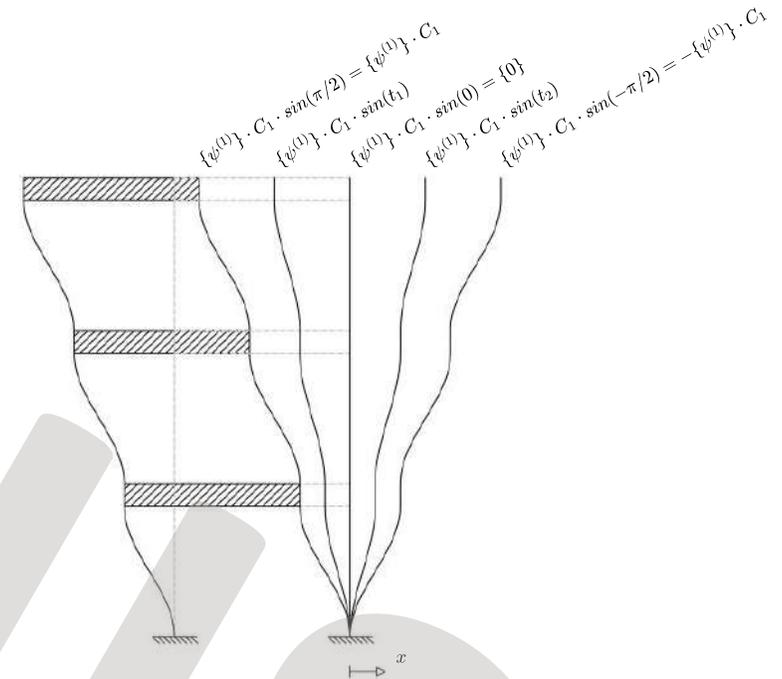
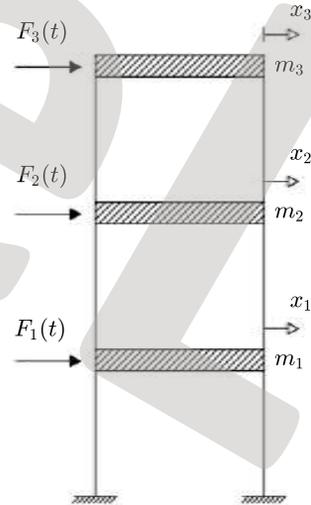
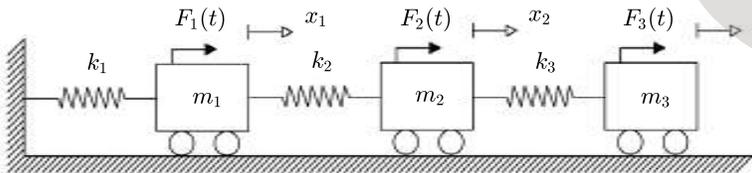


Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli.
Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021



Importanza relativa dei terremoti tra gli eventi naturali nel ventennio 1998-2017 per quanto riguarda le perdite economiche in miliardi di dollari americani (sinistra) e le vittime (destra).

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli. Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021



Di LorenzoG93 - Opera propria, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=137832704>

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica –
 principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli.
 Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021