

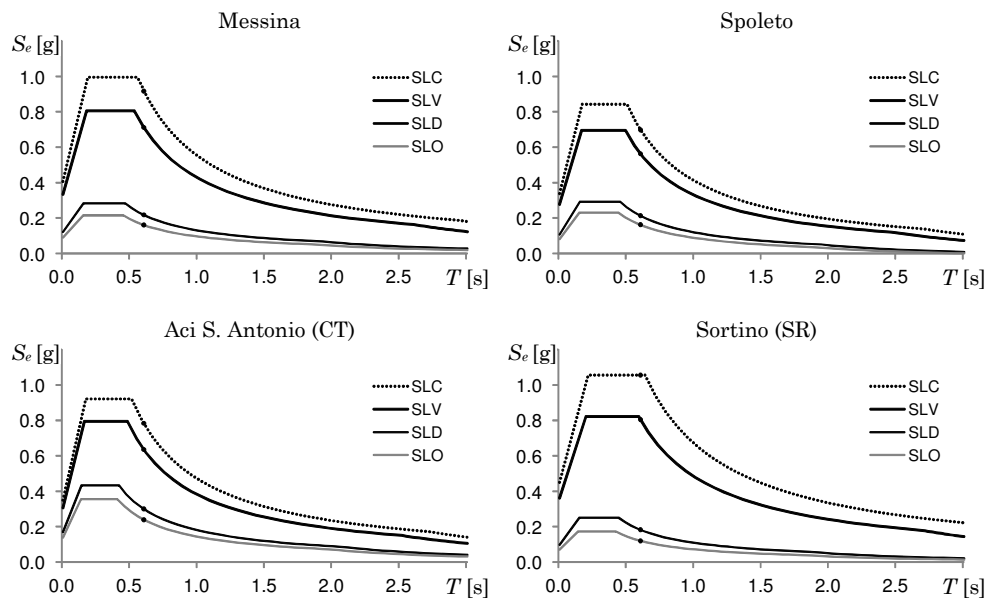


Fig. 6. Spettri di risposta elastica per differenti siti (suolo di categoria C)

rente per un terremoto con basso periodo di ritorno, e questo deve essere tenuto in conto opportunamente nella fase di progettazione.

4.4. Spettri di risposta elastica – EC8(2022)

Categorie di terreno e condizioni topografiche

La più recente versione dell'Eurocodice 8 definisce sei (anziché cinque) categorie di sottosuolo, classificate in base alla velocità equivalente ma anche alla profondità dello strato di terreno compatto (cioè con $V_s \geq 800$ m/s). Per individuarle si fa riferimento alla Tab. 12. Anche se, approssimativamente, i sottosuoli A, B, C corrispondono a quelli delle NTC, si nota che i limiti relativi alla velocità delle onde di taglio sono un po' diversi; inoltre, risultano non classificabili

Tab. 12. Caratterizzazione delle categorie di sottosuolo, per EC8(2022)

	Terreno	compatto	medio	soffice
Profondità dello strato roccioso	$V_{s,H}$	400 m/s < $V_{s,H}$ < 800 m/s	250 m/s < $V_{s,H}$ ≤ 400 m/s	150 m/s ≤ $V_{s,H}$ < 250 m/s
	H_{800}			
molto superficiale	$H_{800} \leq 5$ m	A	A	E
superficiale	$5 \text{ m} < H_{800} \leq 30$ m	B	E	E
intermedio	$30 \text{ m} < H_{800} \leq 100$ m	B	C	D
profondo	$H_{800} > 100$ m	B	F	F

(nel senso che occorre uno studio specifico per valutarne la pericolosità sismica) i terreni con $V_{s,H}$ inferiore a 150 m/s (mentre per le NTC il limite è 100 m/s). Inoltre, il riferimento alla profondità del terreno compatto può modificare in maniera significativa la classificazione. Un confronto in termini di spettri di risposta è riportato più avanti. Non cambia invece la classificazione delle categorie topografiche.

Spettri di risposta elastica

La nuova versione dell'Eurocodice 8, parte 1-1: Regole generali e azione sismica, presenta, rispetto alla versione corrente, rilevanti differenze (formali) nella descrizione dello spettro di risposta elastica in termini di accelerazioni (Fig. 7). Cambiano, infatti, i tre parametri base, a partire dai quali si possono ricavare tutti gli altri parametri necessari per descrivere analiticamente lo spettro per suolo di tipo A (roccia). I nuovi parametri sono:

- S_α ordinata del tratto ad accelerazione costante (intervallo $T_B - T_C$) per smorzamento $\xi = 5\%$;
- S_β ordinata corrispondente al periodo $T_\beta = 1$ s per smorzamento $\xi = 5\%$;
- F_A rapporto tra l'ordinata del tratto ad accelerazione costante e l'accelerazione del suolo.

Ai primi due parametri viene inoltre aggiunto un pedice RP per indicare il periodo di riferimento (*reference period*) corrispondente ai diversi stati limite da considerare; nel seguito vengono pertanto indicati con $S_{\alpha,RP}$ e $S_{\beta,RP}$.

L'EC8(2022) consente alle singole autorità nazionali di utilizzare valori definiti mediante una specifica mappatura sismica. Di conseguenza, in Italia si potrà sempre fare riferimento ai valori attuali (a_g/g , F_o , T_C^*), ma bisognerà definire come adattarli alla variazione di riferimenti introdotta. A questo proposito, si noti che il parametro F_A coincide con l' F_o delle NTC. Il valore principale di riferimento delle accelerazioni non è più quello al suolo bensì quello corrispondente al tratto ad accelerazione costante. Inoltre, la variazione dello spettro per accelerazioni più alte non è legata a T_C ma al valore dell'accelerazione per

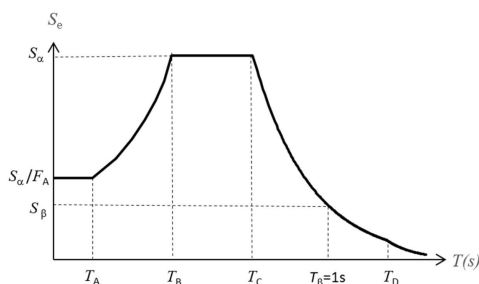


Fig. 7. Spettro di risposta elastica dell'EC8(2022), con periodo T in scala logaritmica; la scala esalta i primi due tratti dello spettro, che altrimenti sarebbero poco visibili

$T=1$ s. Con riferimento al suolo di tipo A e ricordando che per questo suolo $T_C = T_C^*$, si può quindi assumere

$$S_{\alpha,RP} = F_o \alpha_g / g \quad (7 \text{ a})$$

$$S_{\beta,RP} = \frac{F_o \alpha_g / g}{T_C^*} \quad (7 \text{ b})$$

$$F_A = F_o \quad (7 \text{ c})$$

Le espressioni analitiche che descrivono lo spettro di risposta elastico $S_e(T)$ sono sostanzialmente le stesse già descritte per le NTC, modificate per adeguarle ai nuovi parametri di riferimento ma anche al fatto che ricompare il tratto ad accelerazione costante per periodi molto bassi (inferiori a T_A)

$$\text{per } 0 \leq T < T_A \quad S_e(T) = \frac{S_\alpha}{F_A} \quad (8 \text{ a})$$

$$\text{per } T_A \leq T < T_B \quad S_e(T) = \frac{S_\alpha}{T_B - T_A} \left[\eta(T - T_A) + \frac{T_B - T}{F_A} \right] \quad (8 \text{ b})$$

$$\text{per } T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = \eta S_\alpha \quad (8 \text{ c})$$

$$\text{per } T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = \eta \frac{S_\beta T_\beta}{T} \quad (8 \text{ d})$$

$$\text{per } T_D \leq T \quad S_e(T) = \eta T_D \frac{S_\beta T_\beta}{T^2} \quad (8 \text{ e})$$

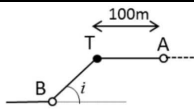
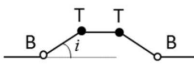
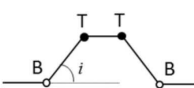
Le espressioni (8) valgono per un qualsiasi periodo di riferimento RP. Per tener conto delle diverse caratteristiche del sottosuolo e topografiche occorre moltiplicare i valori su roccia, $S_{\alpha,RP}$ e $S_{\beta,RP}$, per i coefficienti F_α e F_β (per le categorie di sottosuolo) ed F_T (per le categorie topografiche)

$$S_\alpha = F_\alpha F_T S_{\alpha,RP} \quad S_\beta = F_\beta F_T S_{\beta,RP} \quad (9)$$

Tab. 13. Parametri F_α e F_β per EC8(2022)

Categoria sottosuolo	F_α	F_β
A	1.00	1.00
B	$1.3(1 - 0.1 S_{\alpha,RP}/g)$	$1.6(1 - 0.2 S_{\beta,RP}/g)$
C	$1.6(1 - 0.2 S_{\alpha,RP}/g)$	$2.3(1 - 0.3 S_{\beta,RP}/g)$
D	$1.8(1 - 0.3 S_{\alpha,RP}/g)$	$3.2(1 - S_{\beta,RP}/g)$
E	$2.2(1 - 0.5 S_{\alpha,RP}/g)$	$3.2(1 - S_{\beta,RP}/g)$
F	$1.7(1 - 0.3 S_{\alpha,RP}/g)$	$4.0(1 - S_{\beta,RP}/g)$

Tab. 14. Parametro F_T per EC8(2022)

Categoria topografica	F_T	Schema semplificato*
Superficie pianeggiante, pendii o rilievi isolati, con inclinazione media i inferiore a 15° o altezza < 30 m	1.0	
Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1.20	
Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ < i < 30^\circ$	1.20	
Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1.40	
*I valori di F_T sono riferiti alla sommità (punto T nello schema semplificato). Per punti compresi tra T e B oppure A (che dista 100 m da T), per i quali si assume $F_T = 1$, si considera una variazione lineare di F_T		

I parametri F_α e F_β possono essere ricavati mediante le formule semplificate di Tab. 13 (o altre espressioni in cui compare $V_{s,H}$). Il parametro F_T coincide con il coefficiente S_T delle NTC. Le immagini inserite in Tab. 14 chiariscono come valutarlo in punti intermedi rispetto alla sommità o nel tratto orizzontale di una cresta.

Per completare la descrizione dello spettro occorre definire i valori dei periodi T_A , T_B , T_C , T_D che sono forniti dalle espressioni che seguono

$$T_A = 0.02 \text{ s} \quad (10 \text{ a})$$

$$T_B = \frac{T_C}{\chi}, \text{ ma } 0.05 \text{ s} \leq T_B \leq 0.10 \text{ s} \quad (10 \text{ b})$$

$$T_C = \frac{S_\beta}{S_\alpha} T_\beta \quad (10 \text{ c})$$

$$T_D = 1 + S_{\beta,RP}, \text{ ma } T_D \geq 2 \quad (10 \text{ d})$$

Il valore suggerito per χ è 4, ma è lasciata alle autorità nazionali la possibilità di usare un valore differente. In particolare, nelle attuali NTC viene usato il valore 3, che potrebbe quindi essere mantenuto. Resterebbe forse da discutere, nell'estensione delle nuove norme europee all'Italia, se accettare o omettere i limiti imposti nelle (10 b).

L'espressione (10 d) fornisce valori maggiori di quelli indicati dalle attuali NTC; anche in questo caso è lasciata alle autorità nazionali la possibilità di

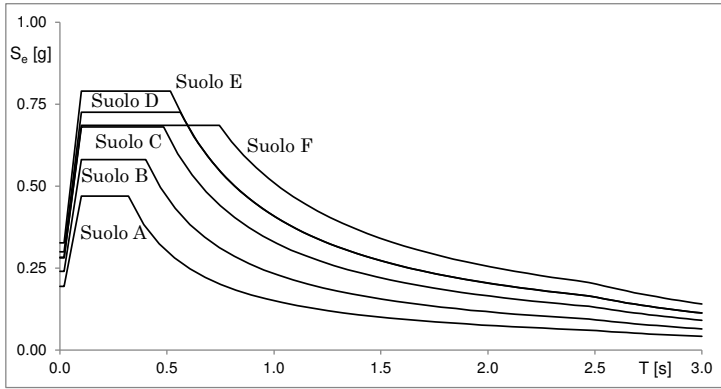


Fig. 8. Spettri di risposta elastici per sisma orizzontale, EC8(2022), SLV
(per $a_g=0.194$ g, $F_o=2.42$, $T_C^*=0.32$ s, $\xi=5\%$)

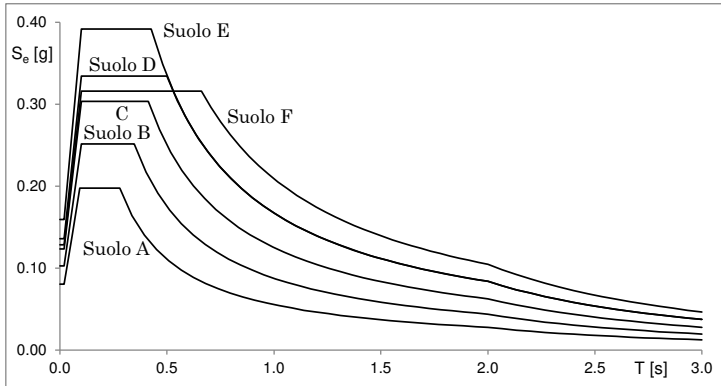


Fig. 9. Spettri di risposta elastici per sisma orizzontale, EC8(2022), SLD
(per $a_g=0.194$ g, $F_o=2.42$, $T_C^*=0.32$ s, $\xi=5\%$)

usare un valore differente, ma la nuova classificazione dei suoli rende problematico applicare le espressioni attuali.

A titolo esemplificativo sono riportati in Fig. 8 gli spettri di risposta elastici per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) forniti dall'EC8(2022) ed in Fig. 9 quelli per lo stato limite di danno (SLD), relativi al sito citato in precedenza (Spoleto). Il confronto con le Fig. 2 e Fig. 3, relative alle NTC, mostra che gli spettri per suolo A sono sostanzialmente coincidenti, a meno di piccole differenze nel tratto iniziale dovute all'inserimento di T_A ed al limite posto a T_B . Quelli relativi ai suoli B e C sono abbastanza simili, mentre gli altri non sono comparabili, anche a causa della nuova classificazione dei sottosuoli.

L'influenza dello smorzamento ξ (espresso in punti percentuali) è considerata ancora mediante il parametro η , che è però espresso con una formula differente, che fornisce sempre, per $\xi = 5\%$ il valore $\eta = 1$.

$$\eta = \sqrt{\left(10 + \frac{T_c (\xi - 5)}{T_c + 30 (T - T_A)}\right)} / (5 + \xi) \quad (11)$$

Confrontando questa espressione con la (6e) si nota che il valore del parametro η ora dipende anche dal periodo T e che non è più riportato il limite inferiore 0.55. La differenza tra i valori forniti da questa espressione e quelli ottenuti con la (6e) è comunque minima.

4.5. Spettri di progetto della normativa

Come già evidenziato nel capitolo 2, la normativa consente di effettuare analisi elastiche lineari (statica oppure modale con spettro di risposta) utilizzando forze di progetto ridotte per tener conto della duttilità locale e globale della struttura. Il coefficiente riduttivo, indicato col simbolo q , è denominato *fattore di comportamento* (dall'inglese, *behaviour factor*) o *fattore di struttura*. In funzione di questo, la normativa fornisce per ciascun tipo di suolo uno spettro di progetto convenzionale, $S_d(T)$, con ordinate ridotte rispetto a quelle dello spettro di risposta elastico. Il passaggio da spettro di risposta elastico a spettro di progetto trova una sostanziale concordanza tra le diverse normative, ad esempio nel dare un minor peso a q per periodi propri inferiori a T_B .

Come criterio generale, si utilizzano le espressioni (3) già descritte per lo spettro elastico, sostituendo in esse il fattore $1/q$ al posto del termine η che rappresenta lo smorzamento. Le espressioni modificate vengono per comodità del lettore ripetute qui

$$\text{per } 0 \leq T < T_B \quad S_d(T) = a_g \frac{S F_o}{q} \left[\frac{T}{T_B} + \frac{q}{F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \quad (12 \text{ a})$$

$$\text{per } T_B \leq T < T_C \quad S_d(T) = a_g \frac{S F_o}{q} \quad (12 \text{ b})$$

$$\text{per } T_C \leq T < T_D \quad S_d(T) = a_g \frac{S F_o}{q} \left(\frac{T_C}{T} \right) \quad (12 \text{ c})$$

$$\text{per } T \geq T_D \quad S_d(T) = a_g \frac{S F_o}{q} \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \quad (12 \text{ d})$$

A queste espressioni viene aggiunta una ulteriore condizione, che pone un limite minimo per l'accelerazione, indipendente dal fattore di struttura

$$S_d(T) \geq 0.2 a_g \quad (12 \text{ e})$$

Queste espressioni valgono anche per l'EC8(2004), con una modifica nella (12 a) per la quale il secondo termine tra parentesi quadre è moltiplicato per $2/3$ (quindi per T tendente a 0 l'accelerazione tende ai due terzi dell'accelerazione

Tab. 15. Valori di α_u/α_1 per strutture regolari in pianta, secondo le NTC (punto 7.4.3.2)

Strutture a telaio o strutture miste equivalenti a telaio	
ad un solo piano	1.1
a più piani ma ad una sola campata	1.2
a più piani e più campate	1.3
Strutture a pareti o strutture miste equivalenti a pareti	
solo due pareti non accoppiate per ogni direzione	1.0
più pareti non accoppiate	1.1
pareti accoppiate o strutture miste equivalenti a pareti	1.2

Tab. 16. Valori di K_R , secondo le NTC (punto 7.3.1)

Tipologia	
Strutture regolari	1.0
Strutture non regolari	0.8

flessione. Questo fattore potrebbe essere calcolato mediante un'analisi statica non lineare, purché si assuma un valore non maggiore di 1.5. Più comunemente si utilizzano i valori indicati in Tab. 15, validi per strutture regolari in pianta. Per strutture non regolari in pianta la normativa suggerisce di utilizzare un valore di α_u/α_1 pari alla media tra 1.0 ed i valori consentiti per strutture regolari.

Il secondo termine, K_R , è un fattore riduttivo che tiene conto della regolarità in altezza della struttura (Tab. 16). Una forte disuniformità della distribuzione di masse, rigidzze e resistenze lungo l'altezza potrebbe portare, superato il limite elastico, ad un comportamento diverso da quello previsto col calcolo lineare ed aumentare il rischio della formazione di cerniere plastiche nei pilastri di un singolo piano, con conseguente riduzione della duttilità globale. I criteri con i quali valutare la regolarità della struttura sono discussi criticamente nel paragrafo 7.

Nuova normativa europea, EC8(2022)

L'EC8(2022) riporta le indicazioni generali relative al fattore di comportamento per strutture in c.a. al punto 6.4.1 della parte 1.1 e quelle specifiche per strutture in c.a. nel paragrafo 10 della parte 1.2. L'elenco delle tipologie strutturali è sostanzialmente lo stesso, a meno di qualche variazione:

- La *struttura torsionalmente deformabile* non compare più esplicitamente come tipologia a sé stante, ma vengono fornite indicazioni per identificare un comportamento di questo tipo per qualsiasi tipologia⁹ e penalizzarlo con una riduzione del fattore corrispondente a quella tipologia q ;

⁹ Le indicazioni per classificare una struttura come torsionalmente deformabile sono riportate in EC8-1-2(2022), punto 4.4.3.

- Nel riferimento alla *struttura a pareti estese* viene eliminata la dizione “debolmente armate”;
- Viene inserita una nuova tipologia, *struttura a soletta piana* (in inglese *flat slab structure*), che nasce dalla diffusione di strutture nelle quali non esistono più travi e l’impalcato scarica direttamente sui pilastri (forse per aggirare i limiti imposti dalle norme sismiche per la larghezza delle travi a spessore).

Il fattore di comportamento q è calcolato come prodotto di tre termini

$$q = q_R q_S q_D \quad (14)$$

- Il termine q_R tiene conto della sovraresistenza dovuta ad una ridistribuzione dell’azione sismica nelle strutture iperstatiche e dipende quindi dalla tipologia strutturale.
- Il termine q_S tiene conto della sovraresistenza dovuta ad altre cause (ad esempio, alla maggior resistenza reale dei materiali rispetto ai valori utilizzati nel progetto).
- Il termine q_D tiene conto della capacità di deformazione plastica che porta a dissipazione di energia.

Per il termine q_S si utilizza normalmente il valore 1.5 (salvo possibili indicazioni per casi particolari). Questo è, in particolare, il valore ammesso per strutture non dissipative, per le quali deve essere $q_R = 1$ e $q_D = 1$ perché queste strutture non devono arrivare alla fase di ridistribuzione, anche se iperstatiche, e non devono dissipare energia. I valori da utilizzare per q_R e q_D ed il valore complessivo di q sono riportati in Tab. 18, per le varie tipologie e in maniera differenziate per le classi di duttilità DC2 (media) e DC3 (alta). Le strutture a pendolo inverso, non indicate in tabella, devono essere progettate come non dissipative, usando $q = 1.5$.

Tab. 18. Valori di q_R , q_D e q , secondo l’EC8-1-2(2022), tabella 10.1

Tipologia strutturale		q_R	q_D		q	
			DC2	DC3	DC2	DC3
Strutture a telaio o strutture miste equivalenti a telaio	a più piani e più campate	1.3	1.3	2	2.5	3.9
	a più piani ma ad una sola campata	1.2			2.3	3.6
	ad un solo piano	1.1			2.1	3.3
Idem, con pareti di tamponamento che interagiscono con la struttura		1.1	1.2	1.4	2.0	2.3
Strutture a pareti o strutture miste equivalenti a pareti	equivalenti a pareti	1.2	1.3	2.0	2.3	3.6
	pareti accoppiate	1.2	1.4		2.5	3.6
	pareti non accoppiate	1.0	1.3		2.0	3.0
	pareti estese	--	--		$3.0 k_w$	
Strutture a soletta piana		1.1	1.2	--	2.0	--

Per strutture non regolari in altezza, definite più avanti nel paragrafo 7.2, il termine q_D deve essere ridotto di 0.8 (e quindi anche il fattore di comportamento q complessivo avrà la stessa riduzione). Per strutture torsionalmente deformabili il termine q_R deve essere preso pari a 1; questo porta ad una penalizzazione diversa a seconda della tipologia, ma in genere minore di quella prevista dalle normative attuali. Si noti che, pur essendo la regolarità in pianta citata come obiettivo di una buona progettazione, non esiste più una penalizzazione per le strutture non regolari in pianta.

Confrontando i valori di q di Tab. 18 con quelli di Tab 15 salta subito all'occhio la grande differenza: i nuovi valori sono circa i 2/3 dei precedenti. A parere di chi scrive, questo è legato al problema di modellazione strutturale descritto nel paragrafo 4 del capitolo 1. Fino agli anni '90 del XX secolo i modelli per strutture in c.a. consideravano come momento d'inerzia delle sezioni delle aste i valori nominali ($I = b h^3/12$ per sezioni rettangolari). I valori di q previsti a partire dall'EC8(1994) erano basati su analisi numeriche svolte con questa semplificazione. Nei decenni successivi ci si è invece sempre più convinti dell'opportunità di ridurre la rigidezza per tener conto della fessurazione. Ma contemporaneamente ci si è resi conto che il conseguente aumento di periodo avrebbe portato, per edifici da 4-5 piani in su, a forti riduzioni dell'accelerazione sismica di progetto (dimezzare la rigidezza vuol dire aumentare di oltre il 40% il periodo); nel tratto dello spettro oltre T_C questo implica una riduzione dell'ordinata spettrale pari a circa il 30%. La riduzione di q ora indicata consente di tornare a valori dell'accelerazione di progetto analoghi a quelli usati nel passato.

5. Combinazione dell'azione sismica con le altre azioni

In una struttura soggetta a soli carichi verticali l'impostazione allo stato limite ultimo richiede di considerare presenti carichi permanenti e variabili corrispondenti ad un frattile particolarmente alto, orientativamente il 99.5%. Questi valori, indicati con g_d e q_d (valori di calcolo), sono ottenuti amplificando i valori caratteristici, g_k e q_k , mediante opportuni coefficienti di sicurezza parziali γ_g e γ_q (che per le NCT valgono 1.3 e 1.5). Se sulla stessa struttura si considera agente anche il vento, la norma evidenzia la bassa probabilità di avere contemporaneamente i massimi valori dei carichi variabili verticali e del vento ed impone di considerare al 100% l'azione variabile più gravosa e di ridurre l'altra mediante un coefficiente ψ_0 minore dell'unità.

La verifica allo stato limite ultimo in condizioni sismiche richiede ulteriori considerazioni, perché il sisma è un evento molto raro. Si esclude quindi, perché estremamente improbabile, la possibilità di avere contemporaneamente sisma e vento forte. Per quanto riguarda i carichi verticali, poi, uno studio probabilistico specifico mostrerebbe che l'entità più probabile dei carichi verticali