

A2 – Azioni sulle costruzioni

(Rev 10/2018)

Le seguenti 'slides' costituiscono solo una base per lo sviluppo delle lezioni e, pertanto, non sostituiscono i testi consigliati

Si definisce *azione* ogni *causa*, o insieme di cause, capace di indurre stati limite in una struttura.

Si definisce *sollecitazione* ogni *effetto* interno (sforzo normale, momento flettente, taglio, torsione) che, a causa di un'azione, si manifesta nella struttura. Più in generale, tra gli effetti interni ricadono anche spostamenti, deformazioni e lesioni.

Le azioni si possono classificare secondo:

Il loro modo di esplicarsi

- *Dirette*: forze concentrate o distribuite, fisse o mobili
- *Indirette localizzate*: spostamenti impressi, cedimenti vincolari
- *Indirette distribuite*: variazioni di temperatura, ritiro, viscosità
- *Degrado endogeno*: alterazione naturale del materiale
- *Degrado esogeno*: alterazione del materiale a seguito di agenti esterni

La risposta strutturale

- *Statiche*: non provocano accelerazioni della struttura o di sue parti
- *Dinamiche*: provocano accelerazioni della struttura o di sue parti
- *Quasi statiche*: azioni dinamiche rappresentabili mediante azioni statiche maggiorate per tener conto del loro effetto dinamico

Tutte le azioni classificate in precedenza si possono ulteriormente suddividere in funzione della loro *variazione di intensità nel tempo*. Esse possono essere:

- *Permanenti (G)*: pesi propri degli elementi strutturali (G_1) e non strutturali (G_2), pressione dell'acqua, azioni indirette causate da ritiro e cedimenti differenziali imposti, pretensione e precompressione (P).
Agiscono durante tutta la vita della costruzione e la loro variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare costanti.
- *Variabili (Q)*: carichi dipendenti dall'uso della costruzione, vento, neve, temperatura
Agiscono sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare molto diversi fra loro nel corso della vita della costruzione.
- *Eccezionali (A)*: incendi, esplosioni, urti, impatti
Si verificano molto raramente nel corso della vita della costruzione, in occasione di quegli eventi che si definiscono incidenti o calamità.
- *Sismiche (E)*: azioni derivanti dai terremoti

Le azioni permanenti principali sono dovute alla **gravità** e riguardano sia gli elementi strutturali (G_1), sia quelli non strutturali (G_2).

Queste azioni sono determinate sulla base dei valori medi dei **pesi per unità di volume** dei materiali e delle **dimensioni geometriche nominali** degli elementi costruttivi.

I valori medi (nominali) dei pesi per unità di volume dei più comuni **materiali** da costruzione possono essere ricavati dalla tabella 3.1.I delle NTC18, qui riportata.

MATERIALI	PESO UNITÀ DI VOLUME [kN/m ³]
Calcestruzzi cementizi e malte	
Calcestruzzo ordinario	24,0
Calcestruzzo armato (e/o precompresso)	25,0
Calcestruzzi "leggeri": da determinarsi caso per caso	14,0 + 20,0
Calcestruzzi "pesanti": da determinarsi caso per caso	28,0 + 50,0
Malta di calce	18,0
Malta di cemento	21,0
Calce in polvere	10,0
Cemento in polvere	14,0
Sabbia	17,0
Metalli e leghe	
Acciaio	78,5
Ghisa	72,5
Alluminio	27,0
Materiale lapideo	
Tufo vulcanico	17,0
Calcere compatto	26,0
Calcere tenero	22,0
Gesso	13,0
Granito	27,0
Laterizio (pieno)	18,0
Legnami	
Conifere e pioppo	4,0 + 6,0
Latifoglie (escluso pioppo)	6,0 + 8,0
Sostanze varie	
Acqua dolce (chiara)	9,81
Acqua di mare (chiara)	10,1
Carta	10,0
Vetro	25,0
Per materiali non compresi nella tabella si potrà far riferimento a specifiche indagini sperimentali o a normative di comprovata validità assumendo i valori nominali come valori caratteristici.	

I **carichi permanenti non strutturali** (G_2) sono costituiti dai pesi di quegli elementi che, pur non svolgendo una funzione strutturale, non sono rimovibili durante la vita di una costruzione, come per esempio quelli relativi a tamponature esterne, divisori interni, massetti, isolamenti, pavimenti, rivestimenti, intonaci, controsoffitti, ...

Anche queste azioni sono determinate sulla base dei valori medi dei **pesi per unità di volume** dei materiali e delle **dimensioni geometriche nominali**.

In particolare, per gli elementi divisori interni le NTC18 specificano (§ 3.1.3):

I tramezzi e gli impianti leggeri degli edifici per abitazioni e per uffici potranno assumersi, in genere, come carichi equivalenti distribuiti, purché i solai abbiano adeguata capacità di ripartizione trasversale.

Per gli orizzontamenti degli edifici per abitazioni e per uffici, il peso proprio di elementi divisori interni potrà essere ragguagliato ad un carico permanente uniformemente distribuito g_2 , purché vengano adottate le misure costruttive atte ad assicurare una adeguata ripartizione del carico. Il carico uniformemente distribuito g_2 potrà essere correlato al peso proprio per unità di lunghezza G_2 delle partizioni nel modo seguente:

- per elementi divisori con $G_2 \leq 1,00$ kN/m : $g_2 = 0,40$ kN/m²;
- per elementi divisori con $1,00 < G_2 \leq 2,00$ kN/m : $g_2 = 0,80$ kN/m²;
- per elementi divisori con $2,00 < G_2 \leq 3,00$ kN/m : $g_2 = 1,20$ kN/m²;
- per elementi divisori con $3,00 < G_2 \leq 4,00$ kN/m : $g_2 = 1,60$ kN/m²;
- per elementi divisori con $4,00 < G_2 \leq 5,00$ kN/m : $g_2 = 2,00$ kN/m².

Gli elementi divisori interni con peso proprio maggiore di 5,00 kN/m devono essere considerati in fase di progettazione, tenendo conto del loro effettivo posizionamento sul solaio.

Azioni variabili

I *carichi variabili* o *sovraccarichi* sono quelli legati alla destinazione d'uso della costruzione. Possono essere costituiti da:

- carichi verticali distribuiti q_k [kN/m²]
- carichi verticali concentrati Q_k [kN]
- carichi orizzontali distribuiti H_k [kN/m]

I loro *valori caratteristici* sono riportati nella tabella 3.1.II delle NTC18, qui riportata.

Si ricorda che il valore caratteristico Q_k di un'azione variabile è definito come il frattile inferiore al 95% della sua distribuzione statistica, che corrisponde al valore che ha una probabilità del 95% di non essere superato.

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici. Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	≥ 6,00 —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 — —	1,20 — —	1,00 — —
* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati				
** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso				

Il **vento**, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio, provocando effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono assunte di tipo pseudo-statiche equivalenti.

La definizione delle azioni dovute al vento è basata sulla valutazione della sua velocità nel sito della costruzione. Per altitudini inferiori a 1500 m s.l.m. la **velocità di riferimento** è data dalla relazione

$$v_b = v_{b,0} \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a (a_s - a_0) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

dove a_s è l'altitudine in metri sul livello del mare del sito dove sorge la costruzione, mentre i valori degli altri parametri sono forniti dalla Norma:

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,010
2	Emilia Romagna	25	750	0,015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,020
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,020
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,015
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,020
7	Liguria	28	1000	0,015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,010
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,020



La *pressione del vento* è data dalla relazione:

$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

dove q_b è la *pressione cinetica* di riferimento

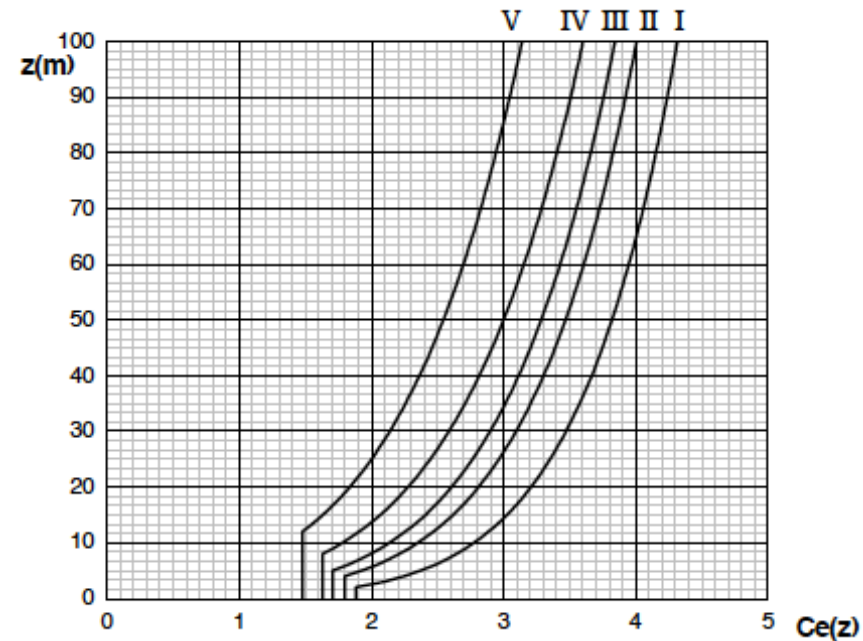
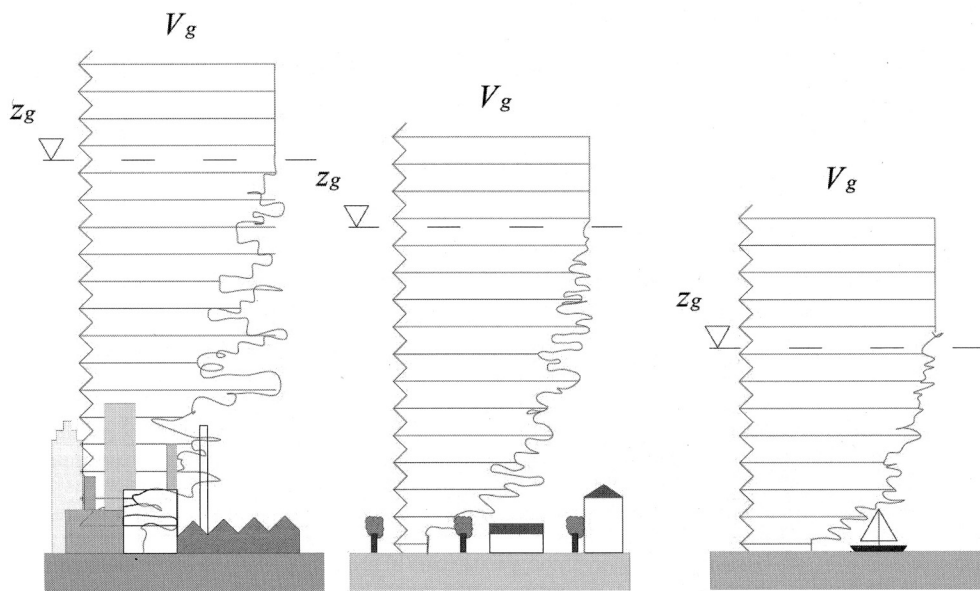
$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

in cui ρ è densità dell'aria pari a $1,25 \text{ kg/m}^3$ e v_b la velocità di riferimento, mentre c_e , c_p e c_d sono rispettivamente i coefficienti di esposizione, di forma e dinamico.

Il *coefficiente di forma* c_p , funzione della geometria della costruzione e del suo coefficiente di resistenza aerodinamica c_x , può essere ricavato da prove sperimentali o da opportuna documentazione.

Il *coefficiente dinamico* c_d tiene in conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alla risposta dinamica della struttura. Può essere assunto pari a uno nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza e i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

Il *coefficiente di esposizione* c_e dipende dall'altezza rispetto al suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. Infatti, come si nota dalle figure seguenti, la velocità del vento è influenzata in maniera complessa dalla scabrezza non uniforme del terreno.



Per il procedimento del calcolo del coefficiente di esposizione si rimanda al paragrafo 3.3.7 delle NTC18.

Quando un edificio viene colpito dal vento, i valori della pressione variano da zona a zona.

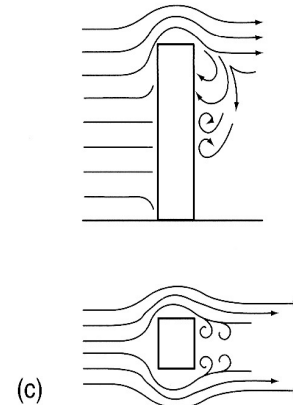
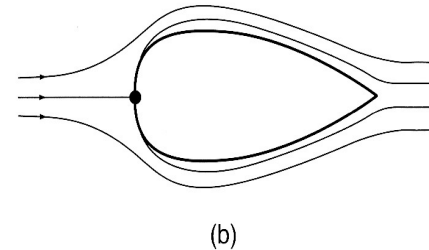
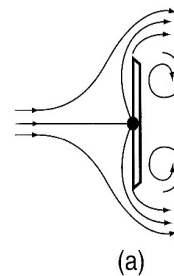
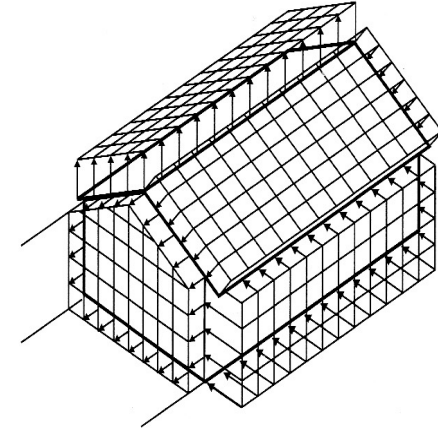
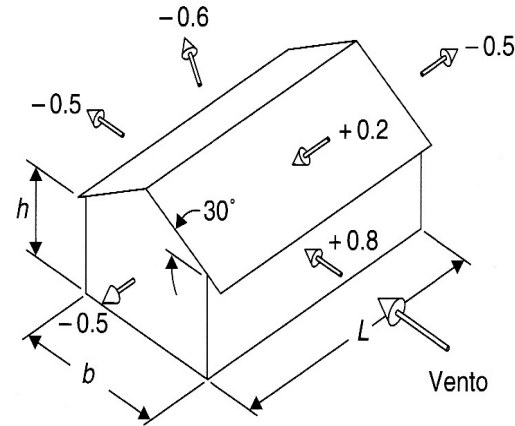
Le pressioni saranno positive nelle parti sopravento, negative in quelle sottovento. Anche la copertura presenterà pressioni diverse in funzione dell'angolo di inclinazione.

La pressione del vento dipende anche dalla rugosità delle superfici.

Per strutture alte si può avere il distacco di vortici alternati nelle parti sottovento.

Questo fenomeno, che può essere attenuato scegliendo opportunamente la forma della sezione trasversale, può provocare l'insorgere di azioni trasversali alla direzione del vento.

In edifici alti, le oscillazioni causate dal vento possono essere mitigate attraverso l'impiego di dispositivi per la dissipazione di energia.



Il *carico da neve* si considera agente verticalmente e si riferisce alla proiezione orizzontale della superficie della copertura.

Il suo valore dipende dalla zona geografica, dall'altitudine del sito e dalle condizioni locali di clima e di esposizione.

Per la sua valutazione le Norme forniscono la relazione:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_E \cdot C_t$$

dove:

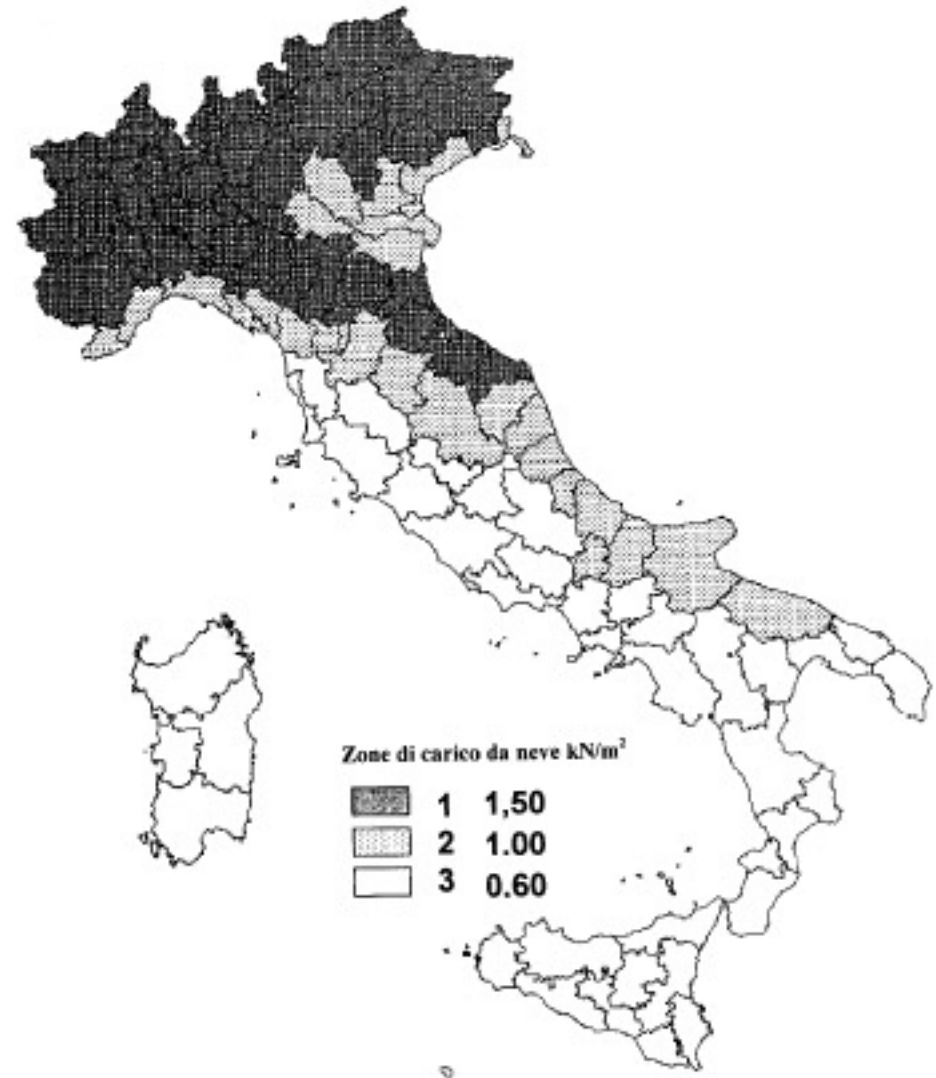
q_s = carico della neve sulla copertura [kN/m²]

q_{sk} = valore di riferimento al suolo [kN/m²]

μ_i = coefficiente di forma della copertura

C_E = coefficiente di esposizione

C_t = coefficiente termico



Valori di q_{sk} per altitudini inferiori a 200 m. Per altitudini superiori le NTC18 forniscono formule correttive.

Il *coefficiente di forma* dipende dall'angolo formato dalla falda con l'orizzontale, così come indicato nella tabella 3.4.II delle NTC08:

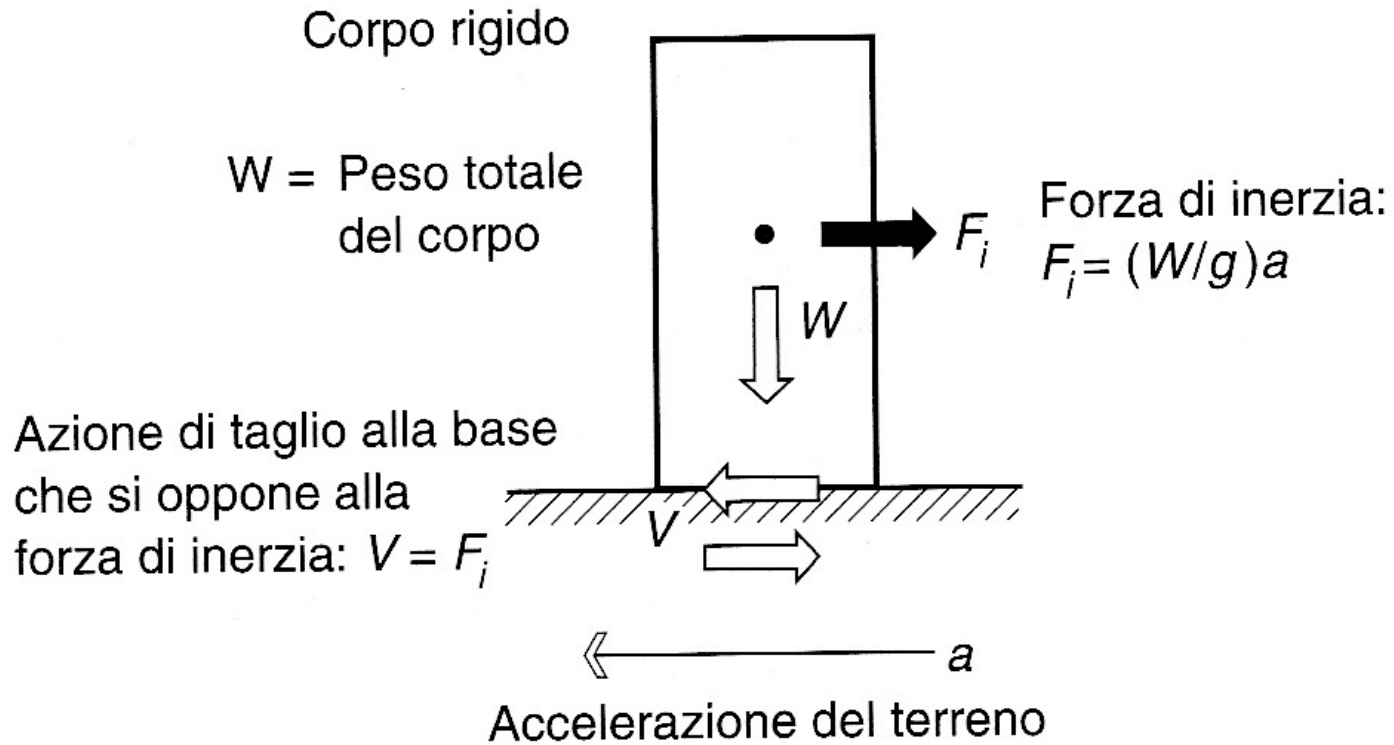
Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Il *coefficiente di esposizione* dipende dalle caratteristiche del sito. Valori consigliati sono riportati nella tabella 3.4.I delle NTC08:

Topografia	Descrizione	C_E
Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti.	0,9
Normale	Aree in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi.	1,0
Riparata	Aree in cui la costruzione considerata è sensibilmente più bassa del circostante terreno o circondata da costruzioni o alberi più alti	1,1

Il *coefficiente termico* tiene conto della riduzione del carico da neve per il suo scioglimento dovuto alla perdita di calore della costruzione. In assenza di documenti e studi specifici deve essere assunto $C_t = 1$.

Azione sismica



Altre azioni

Per la valutazioni delle azioni dovute al *sisma*, a *variazioni di temperatura*, a *incendi*, a *esplosioni* e a *urti*, si rimanda al capitolo 3 delle NTC18.

In generale, su una costruzione possono agire simultaneamente carichi variabili di diversa natura, ciascuno con una diversa probabilità.

Pertanto i loro valori caratteristici Q_{kj} devono essere combinati insieme in maniera opportuna. Le Norme indicano con Q_{k1} l'azione variabile considerata dominante e con Q_{k2}, Q_{k3}, \dots quelle che possono agire contemporaneamente.

Le azioni variabili vengono combinate con i coefficienti ψ_{0j}, ψ_{1j} e ψ_{2j} , i cui valori sono riportati nella tabella 2.5.I delle NTC18 per gli edifici civili e industriali.

Categoria/Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Con riferimento alla durata percentuale relativa ai livelli di intensità dell'azione variabile, si definiscono:

- **valore quasi permanente** $\psi_{2j} Q_{kj}$: la media della distribuzione dell'intensità che ha la probabilità del 50% di essere superata nel periodo di riferimento
- **valore frequente** $\psi_{1j} Q_{kj}$: il valore del frattile inferiore al 95% della distribuzione dell'intensità, che, così combinato, ha la probabilità del 10% di essere superato nel periodo di riferimento
- **valore raro (o di combinazione)** $\psi_{0j} Q_{kj}$: il valore di durata breve, ma ancora significativa nei riguardi della probabilità di concomitanza con altre azioni variabili che, così combinato, ha la probabilità del 5% di essere superato nel periodo di riferimento

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Il *valore di calcolo* per una generica azione, permanente o variabile, è dato dalla relazione

$$F_d = \gamma_F \cdot \psi \cdot F_k$$

dove

- F_k è il valore caratteristico (o nominale) dell'azione
- ψ è il coefficiente di combinazione, pari a 1,00 oppure a ψ_{0j} , ψ_{1j} o ψ_{2j}
- γ_F è il coefficiente parziale di sicurezza, che tiene conto di possibili variazioni dell'entità dell'azione dal suo valore rappresentativo

Per la *verifica agli stati limite ultimi* (SLU) si considera la *combinazione fondamentale*:

$$F_d = \gamma_{G1} G_1 + \gamma_{G2} G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} + \gamma_{Q3} \psi_{03} Q_{k3} + \dots$$

con l'ovvio significato dei simboli. I valori dei coefficienti parziali di sicurezza, così come indicati nelle NTC18, sono riportati nella seguente tabella.

Carichi permanenti strutturali	<u>favorevoli</u>	γ_{G1}	0,9
	<u>sfavorevoli</u>		1,1
Carichi permanenti non strutturali	<u>favorevoli</u>	γ_{G2}	0,8
	<u>sfavorevoli</u>		1,5
Carichi variabili	<u>favorevoli</u>	γ_{Qi}	0,0
	<u>sfavorevoli</u>		1,5

Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti strutturali ($\gamma_{G2} = \gamma_{G1}$). Si pone inoltre sempre $\gamma_P = 1$.

La **combinazione fondamentale** si può quindi scrivere nella forma semplificata:

$$F_d = \gamma_G (G_1 + G_2) + P + \gamma_Q \left(Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} Q_{kj} \right)$$

Per le *verifiche agli stati limite di esercizio* (SLE) si considerano le seguenti combinazioni:

- **Combinazione caratteristica (rara)**, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili, quando consentite

$$F_d = G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} Q_{kj}$$

- **Combinazione frequente**, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio reversibili

$$F_d = G_1 + G_2 + P + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} Q_{kj}$$

- **Combinazione quasi permanente**, generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine

$$F_d = G_1 + G_2 + P + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} Q_{kj}$$

Per le *verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio* connessi all'*azione sismica E* si considera la seguente combinazione:

$$F_d = E + G_1 + G_2 + P + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} Q_{kj}$$

Esempio 1. Si determini il valore del massimo momento flettente negativo da usare per verifiche allo stato limite ultimo ed agli stati limite di esercizio di un solaio a due campate, di luce 5.50 m e 4.50 m; i valori caratteristici dei carichi sono: peso proprio 2.5 kN/m², massetto, pavimento e intonaco 1.3 kN/m², incidenza tramezzi 1.2 kN/m², carichi variabili (per abitazione) $q_k=2.0$ kN/m².

Ipotizzo che massetto, pavimento e intonaco siano compiutamente definiti. L'incidenza tramezzi è invece chiaramente un valore forfetario. Si ha quindi $g_{1k} = 3.8$ kN/m², $g_{2k} = 1.2$ kN/m². I valori di calcolo per verifiche allo SLU sono ottenuti amplificando i valori caratteristici mediante i coefficienti γ_G e γ_Q

$$g_{1d} = 1.1 \times 3.8 = 4.18 \text{ kN/m}^2 \qquad g_{2d} = 1.5 \times 1.2 = 1.8 \text{ kN/m}^2$$

$$q_d = 1.5 \times 2.0 = 3.0 \text{ kN/m}^2$$

Il massimo momento negativo all'appoggio centrale si ottiene applicando il carico massimo in entrambe le campate (Fig. 1). Per la verifica allo SLU si ha

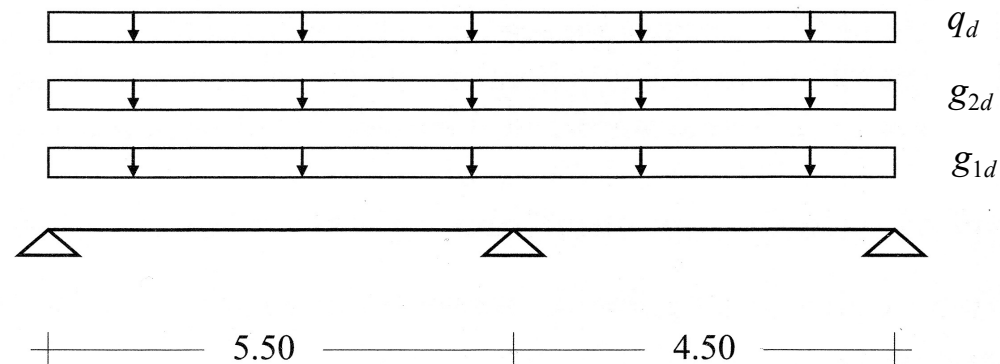


Fig. 1. Schema geometrico e carichi (caratteristici) del solaio

$$q = 4.18 + 1.8 + 3.0 = 8.98 \text{ kN/m}^2$$

e risolvendo lo schema di trave continua si ottiene nell'appoggio centrale

$$M = -28.90 \text{ kNm}$$

Per la verifica allo stato limite di esercizio, combinazione rara, occorre considerare i valori caratteristici dei carichi, senza alcun incremento o riduzione. Si ha quindi

$$q = 3.8 + 1.2 + 2.0 = 7.0 \text{ kN/m}^2$$

$$M = -22.53 \text{ kNm}$$

Si noti che questi valori dei carichi e del momento sono gli stessi che si avevano con il metodo delle tensioni ammissibili. Rispetto a questi la verifica allo SLU usa quindi valori che sono, in questo caso, maggiori di quasi il 40%.

Per la combinazione frequente e quella quasi permanente occorre invece ridurre il carico variabile, rispettivamente mediante il coefficiente $\psi_1 = 0.5$ e $\psi_2 = 0.3$, ottenendo così per la combinazione frequente

$$q = 3.8 + 1.2 + 0.5 \times 2.0 = 6.0 \text{ kN/m}^2$$

$$M = -19.31 \text{ kNm}$$

e per quella quasi permanente

$$q = 3.8 + 1.2 + 0.3 \times 2.0 = 5.4 \text{ kN/m}^2$$

$$M = -18.03 \text{ kNm}$$

Esempio 2. Con riferimento al solaio dell'esempio precedente, si determini il valore del massimo momento flettente positivo nella prima campata da usare per verifiche allo stato limite ultimo ed agli stati limite di esercizio.

Il massimo momento positivo nella prima campata si ottiene applicando in essa il carico massimo e nell'altra il carico minimo, cioè peso proprio ed altri carichi permanenti compiutamente definiti ma non l'incidenza tramezzi (Fig. 2). Per lo SLU

$$q_{1d} = 4.18 + 1.8 + 3.0 = 8.98 \text{ kN/m}^2 \qquad q_{2d} = 0.9 \times 3.8 = 3.42 \text{ kN/m}^2$$

e risolvendo lo schema di trave continua si ottiene come massimo momento positivo nella prima campata il valore

$$M = 23.63 \text{ kNm}$$

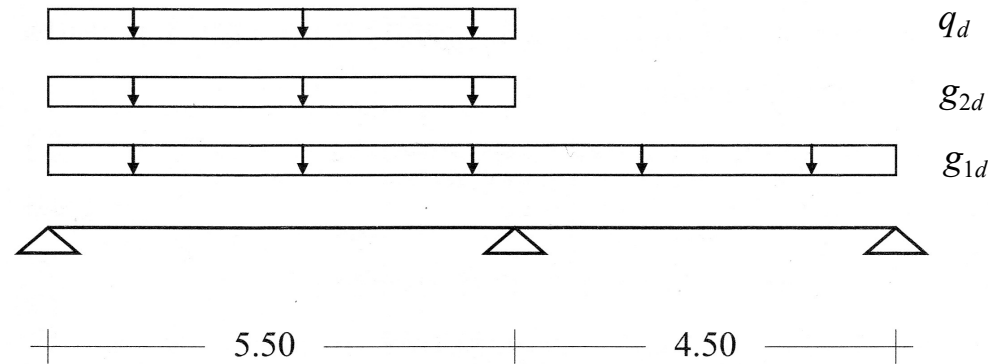


Fig. 2. Carichi del solaio che rendono massimo il momento nella prima campata

Per la verifica allo stato limite di esercizio, combinazione rara, occorre considerare i valori caratteristici dei carichi. I carichi nelle campate sono quindi

$$q_1 = 3.8 + 1.2 + 2.0 = 7.0 \text{ kN/m}^2 \qquad q_2 = 3.8 \text{ kN/m}^2$$

ed il massimo momento positivo nella prima campata vale

$$M = 17.87 \text{ kNm}$$

Per la combinazione frequente e per quella quasi permanente si ha infine, rispettivamente

$$q_1 = 6.0 \text{ kN/m}^2 \qquad q_2 = 3.8 \text{ kN/m}^2 \qquad M = 15.06 \text{ kNm}$$

$$q_1 = 5.6 \text{ kN/m}^2 \qquad q_2 = 3.8 \text{ kN/m}^2 \qquad M = 13.94 \text{ kNm}$$

Esempio 3. Si consideri lo stesso schema di solaio degli esempi precedenti, con carichi permanenti compiutamente definiti $g_{1k}=3.8 \text{ kN/m}^2$. In questo caso si tratta di una terrazza adibita a ristorante, edificata a quota inferiore a 1000 m, su cui possono agire quindi due distinti carichi variabili: quello da ristorante $q_{1k}=3.0 \text{ kN/m}^2$ e il carico da neve $q_{2k}=1.2 \text{ kN/m}^2$. Si determini il valore del massimo momento flettente negativo da usare per verifiche allo stato limite ultimo ed agli stati limite di esercizio.

I valori di calcolo dei carichi per lo SLU sono

$$g_{1d} = 1.1 \times 3.8 = 4.18 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{1d} = 1.5 \times 3.0 = 4.5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{2d} = 1.5 \times 1.2 = 1.8 \text{ kN/m}^2$$

Poiché i due carichi variabili sono analoghi (entrambi carichi distribuiti) è immediato individuare quale è il più gravoso, da assumere come carico principale. Si noti però che la scelta potrebbe essere diversa a seconda della combinazione che si considera, perché in essa si deve tener conto dei coefficienti ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 , che dipendono dal tipo di carico. In questo caso si ha

ristorante (cat. C)	$q_{1k}=3.0 \text{ kN/m}^2$	$\psi_0 = 0.7$	$\psi_1 = 0.7$	$\psi_2 = 0.6$
neve (quota $\leq 1000 \text{ m}$)	$q_{2k}=1.2 \text{ kN/m}^2$	$\psi_0 = 0.5$	$\psi_1 = 0.2$	$\psi_2 = 0.0$

Nell'esempio, il primo carico variabile ha sia un valore caratteristico maggiore che coefficienti ψ più grandi ed è quindi da considerare sempre come carico principale. Per le diverse verifiche si ottengono i valori qui riportati.

Verifiche allo stato limite ultimo

Si usano i valori di calcolo, ma il carico da neve è ridotto con ψ_0 . Si ha

$$q = 4.18 + 4.5 + 0.5 \times 1.8 = 9.58 \text{ kN/m}^2 \qquad M = -30.83 \text{ kNm}$$

Verifiche allo stato limite di esercizio, combinazione rara

Si usano i valori caratteristici e il carico da neve è ridotto con ψ_0 . Si ha

$$q = 3.8 + 3.0 + 0.5 \times 1.2 = 7.4 \text{ kN/m}^2 \qquad M = -23.82 \text{ kNm}$$

Verifiche allo stato limite di esercizio, combinazione frequente

Si usano i valori caratteristici, riducendo il carico variabile principale con ψ_1 ed il secondario con ψ_2 . Si ha

$$q = 3.8 + 0.7 \times 3.0 + 0 \times 1.2 = 5.9 \text{ kN/m}^2 \qquad M = -18.99 \text{ kNm}$$

Si noti che in questo caso assumere come principale il carico da neve avrebbe portato ad un valore solo di poco minore

$$q = 3.8 + 0.6 \times 3.0 + 0.2 \times 1.2 = 5.84 \text{ kN/m}^2 \qquad M = -18.80 \text{ kNm}$$

Verifiche allo stato limite di esercizio, combinazione quasi permanente

Si usano i valori caratteristici, riducendo tutti i carichi variabili con ψ_2 . Si ha

$$q = 3.8 + 0.6 \times 3.0 + 0 \times 1.2 = 5.6 \text{ kN/m}^2 \qquad M = -18.03 \text{ kNm}$$

Esempio 4. Si consideri una trave ad unica campata, che funge da copertura di un capannone e sostiene anche un carico sospeso. Su di essa agiscono un carico permanente g_{1k} e tre carichi variabili indipendenti, due uniformemente distribuiti, q_{1k} e q_{2k} , ed uno concentrato, Q_{3k} . I valori dei carichi e dei coefficienti ψ sono indicati in figura 3. Si determini il valore del massimo momento flettente positivo da usare per verifiche allo stato limite ultimo ed agli stati limite di esercizio.

Negli esempi precedenti la scelta del carico variabile principale è stata immediata, o addirittura non necessaria perché ne agiva uno solo. Il caso in esame è particolarmente complesso, perché il momento prodotto dai carichi distribuiti è calcolato con espressioni diverse da quelle utilizzate per il carico concentrato. È quindi opportuno prendere di volta in volta uno dei tre carichi variabili come carico principale.

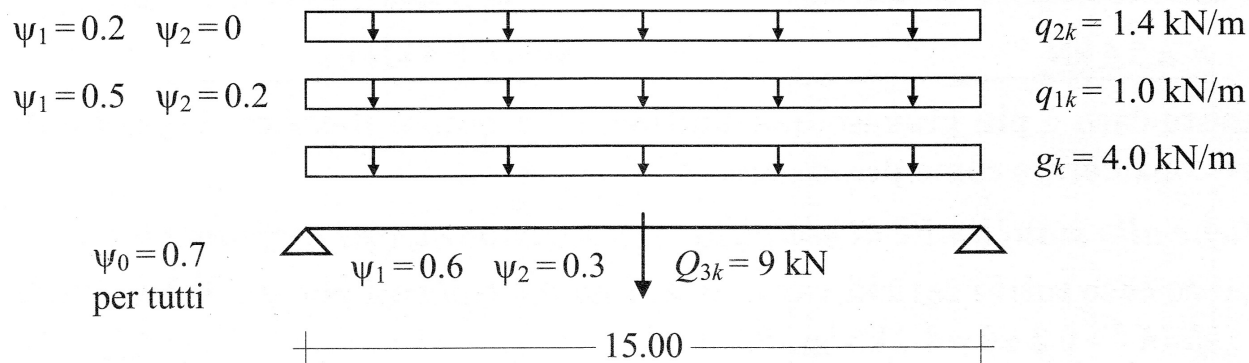


Fig. 3. Schema geometrico e carichi della trave di copertura

Verifiche allo stato limite ultimo

Tra i due carichi distribuiti è maggiore il secondo. Se si considera questo come carico principale si ha

$$q = 1.1 \times 4.0 + 1.5 \times (1.4 + 0.7 \times 1.0) = 7.55 \text{ kN/m}$$

$$F = 1.5 \times 0.7 \times 9 = 9.45 \text{ kN}$$

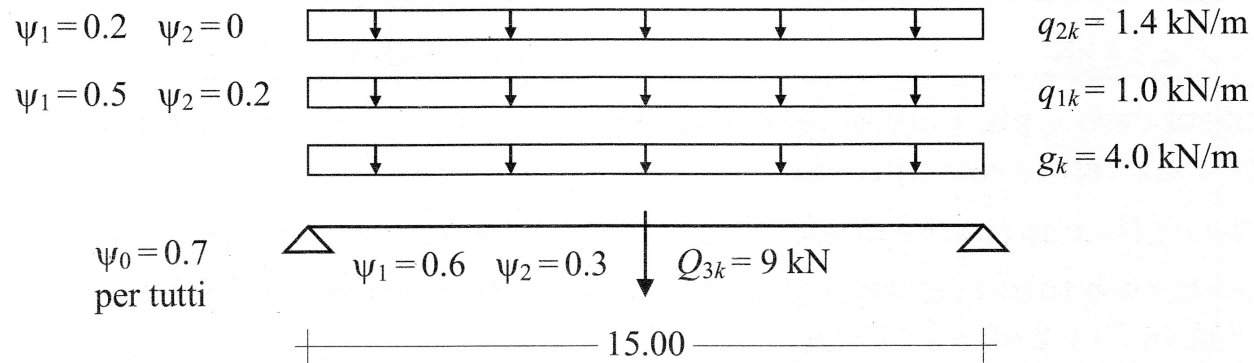


Fig. 3. Schema geometrico e carichi della trave di copertura

$$M = \frac{q l^2}{8} + \frac{F l}{4} = \frac{7.55 \times 15^2}{8} + \frac{9.45 \times 15}{4} = 247.8 \text{ kNm}$$

Se si considera come carico principale la forza concentrata si ha

$$q = 1.1 \times 4.0 + 1.5 \times (0.7 \times 1.4 + 0.7 \times 1.0) = 6.92 \text{ kN/m}$$

$$F = 1.5 \times 9 = 13.5 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q l^2}{8} + \frac{F l}{4} = \frac{6.92 \times 15^2}{8} + \frac{13.5 \times 15}{4} = 245.3 \text{ kNm}$$

Il primo valore è il più gravoso e verrà utilizzato per la verifica della struttura.

Verifiche allo stato limite di esercizio, combinazione rara

Se si considera come carico principale il secondo si ha

$$q = 4.0 + 1.4 + 0.7 \times 1.0 = 6.1 \text{ kN/m}$$

$$F = 0.7 \times 9 = 6.3 \text{ kN}$$

$$M = 195.2 \text{ kNm}$$

Se si considera come carico principale il terzo si ha

$$q = 4.0 + 0.7 \times 1.4 + 0.7 \times 1.0 = 5.68 \text{ kN/m}$$

$$F = 9 \text{ kN}$$

$$M = 193.5 \text{ kNm}$$

Anche in questo caso è più gravoso il primo valore.

Verifiche allo stato limite di esercizio, combinazione frequente

Tenendo conto dei valori di ψ indicati, si ha

$$\psi_1 q_{1k} = 0.5 \times 1.0 = 0.5 \text{ kN/m}$$

$$\psi_2 q_{1k} = 0.2 \times 1.0 = 0.2 \text{ kN/m}$$

$$\psi_1 q_{2k} = 0.2 \times 1.4 = 0.28 \text{ kN/m}$$

$$\psi_2 q_{2k} = 0.0 \times 1.4 = 0.0 \text{ kN/m}$$

$$\psi_1 Q_{3k} = 0.6 \times 9 = 5.4 \text{ kN}$$

$$\psi_2 Q_{3k} = 0.3 \times 9 = 2.7 \text{ kN}$$

Si vede che in questo caso è più gravoso, anche se di poco, considerare come principale il primo tra i due carichi distribuiti, perché $\psi_1 q_{1k} + \psi_2 q_{2k}$ è maggiore di $\psi_2 q_{1k} + \psi_1 q_{2k}$. Si ha così

$$q = 4.0 + 0.5 + 0.0 = 4.5 \text{ kN/m}$$

$$F = 2.7 \text{ kN}$$

$$M = 136.7 \text{ kNm}$$

Se si considera come carico principale il terzo si ha

$$q = 4.0 + 0.2 + 0 = 4.2 \text{ kN/m}$$

$$F = 5.4 \text{ kN}$$

$$M = 138.4 \text{ kNm}$$

In questo caso è più gravoso quest'ultimo ed è quindi il carico sospeso a dover essere considerato come principale.

Verifiche allo stato limite di esercizio, combinazione quasi permanente

In questo caso tutti i carichi variabili vanno moltiplicati per ψ_2 . Si ha quindi

$$q = 4.0 + 0.2 + 0 = 4.2 \text{ kN/m}$$

$$F = 2.7 \text{ kN}$$

$$M = 128.3 \text{ kNm}$$

Riferimenti bibliografici

D.M. 17 gennaio 2018. *Norme tecniche per le costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8, 2018, (NTC18).

D.M. 14 gennaio 2008. *Norme tecniche per le costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, 2008, (NTC08).

Circolare 2 febbraio 2009 n. 617. *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. 14 gennaio 2008, approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Gherzi Aurelio, *Il cemento armato* (seconda edizione), Dario Flaccovio Editore, 2010.

Mezzina Mauro (a cura di), *Fondamenti di Tecnica delle Costruzioni*, Città Studi Edizioni, 2013.