

*ing. angelo
biondi*



Portanza delle Fondazioni

WWW.ANGELOBIONDI.COM

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

N.T.C. 2008, Capitolo 6.4 - OPERE DI FONDAZIONE

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di **stato limite ultimo**, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi delle fondazioni superficiali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della **resistenza del terreno** (SLU tipo GEO) e al raggiungimento della **resistenza degli elementi strutturali** (SLU tipo STR) che compongono la fondazione stessa.

Non è più consentita la verifica alle tensioni ammissibili (elastica)

$\sigma_{t,\max}$ = massima tensione sul terreno

$\bar{\sigma}_t$ = tensione ammissibile terreno


$$\sigma_{t,\max} \leq \bar{\sigma}_t$$

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

N.T.C. 2008, Capitolo 6.4 - OPERE DI FONDAZIONE

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di **stato limite ultimo**, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi delle fondazioni superficiali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della **resistenza del terreno** (SLU tipo GEO) e al raggiungimento della **resistenza degli elementi strutturali** (SLU tipo STR) che compongono la fondazione stessa.

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno
 - collasso per scorrimento sul piano di posa
 - stabilità globale

- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Per le diverse combinazioni di carico deve risultare:

$$E_d \leq R_d$$

Effetto delle azioni

$$E_d = \gamma_E E \left\{ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right\}$$

Resistenza

$$R_d = \gamma_R R \left\{ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right\}$$

Azioni e resistenza dipendono da:

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Per le diverse combinazioni di carico deve risultare:

$$E_d \leq R_d$$

Effetto delle azioni

$$E_d = \gamma_E E \left\{ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right\}$$

Resistenza

$$R_d = \gamma_R R \left\{ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right\}$$

Azioni e resistenza dipendono da: **azioni esterne**

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Per le diverse combinazioni di carico deve risultare:

$$E_d \leq R_d$$

Effetto delle azioni

$$E_d = \gamma_E E \left\{ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right\}$$

Resistenza

$$R_d = \gamma_R R \left\{ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right\}$$

Azioni e resistenza dipendono da: **proprietà dei materiali**

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Per le diverse combinazioni di carico deve risultare:

$$E_d \leq R_d$$

Effetto delle azioni

$$E_d = \gamma_E E \left\{ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right\}$$

Resistenza

$$R_d = \gamma_R R \left\{ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right\}$$

Azioni e resistenza dipendono da: **geometria**

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Per le diverse combinazioni di carico deve risultare:

$$E_d \leq R_d$$

Effetto delle azioni

$$E_d = \gamma_E E \left\{ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right\}$$

Resistenza

$$R_d = \gamma_R R \left\{ \gamma_F F_k ; \frac{X_k}{\gamma_M} ; a_d \right\}$$

Azioni e resistenza dipendono da: **coefficienti parziali**



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Si possono adottare in alternativa due diversi approcci progettuali

Approccio 1

Si adottano due diverse combinazioni dei coefficienti parziali da applicare alle azioni (A) ai materiali (M) ed alla resistenza globale del sistema (R)

Combinazione 1: (A1+M1+R1)

Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2

Si adottano un'unica combinazioni dei coefficienti parziali da applicare alle azioni (A) ai materiali (M) ed alla resistenza globale del sistema (R)

Combinazione 1: (A1+M1+R3)

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Approccio 1

Combinazione 1: $(A1+M1+R1)$

Combinazione 2: $(A2+M2+R2)$

Approccio 2

Combinazione 1: $(A1+M1+R3)$

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Approccio 1

Combinazione 1: (A1+M1+R1)

Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2

Combinazione 1: (A1+M1+R3)

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
<i>Tangente dell'angolo di resistenza al taglio</i>	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
<i>Coesione efficace</i>	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
<i>Resistenza non drenata</i>	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
<i>Peso dell'unità di volume</i>	γ	γ_γ	1,0	1,0

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Verifiche allo SLU

Approccio 1

Combinazione 1: (A1+M1+R1)

Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2

Combinazione 1: (A1+M1+R3)

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali.

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,8$	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$	$\gamma_R = 1,1$



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali

Per la valutazione della capacità portante delle fondazioni possono essere utilizzate:

- le formule d'interazione (M, N, H) dell'ANNESSE F dell'EC 8 Parte 5
- altre formule d'interazione (M, N, H) disponibili in letteratura
- la formula generale di Brinch-Hansen



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\text{lim}} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \\ + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\text{lim}} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c +$$
$$+ \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

contributo sovraccarico

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\text{lim}} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

contributo coesione

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\text{lim}} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c +$$
$$+ \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

contributo attrito



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\text{lim}} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \\ + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

Fondazioni su pali

$$q_{\text{lim}} = q_{\text{punta}} + q_{\text{lat}} - P_{\text{pal}} - P_{\text{attr}}$$

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\lim} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \\ + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

Fondazioni su pali

$$q_{\lim} = q_{\text{punta}} + q_{\text{lat}} - P_{\text{pal}} - P_{\text{attr}}$$

→ resistenza alla punta



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\lim} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \\ + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

Fondazioni su pali

$$q_{\lim} = q_{punta} + q_{lat} - P_{pal} - P_{attr}$$

→ portanza laterale

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\lim} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \\ + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

Fondazioni su pali

$$q_{\lim} = q_{\text{punta}} + q_{\text{lat}} - \boxed{P_{\text{pal}}} - P_{\text{attr}}$$

→ peso del palo

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Capacità portante della fondazione

Fondazioni superficiali (Brinch-Hansen)

$$q_{\text{lim}} = q \cdot N_q \cdot \Psi_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot s_q + c \cdot N_c \cdot \Psi_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot g_c \cdot s_c + \\ + \frac{1}{2} \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma$$

Fondazioni su pali

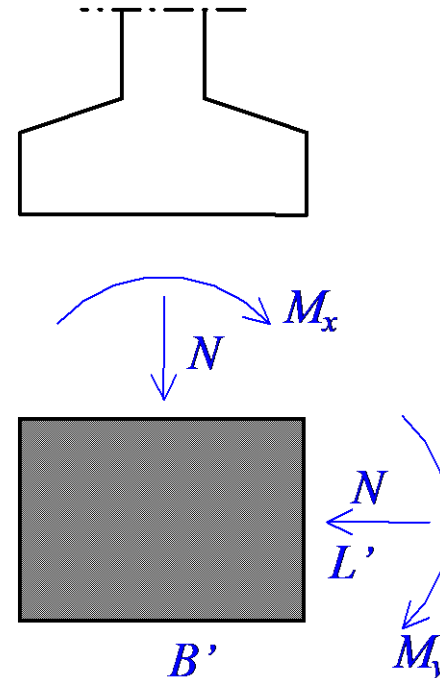
$$q_{\text{lim}} = q_{\text{punta}} + q_{\text{lat}} - P_{\text{pal}} - P_{\text{attr}}$$

→ contributo attrito

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Formula generale di Brinch-Hansen

Si considera un'impronta efficace della fondazione ridotta rispetto a quella reale



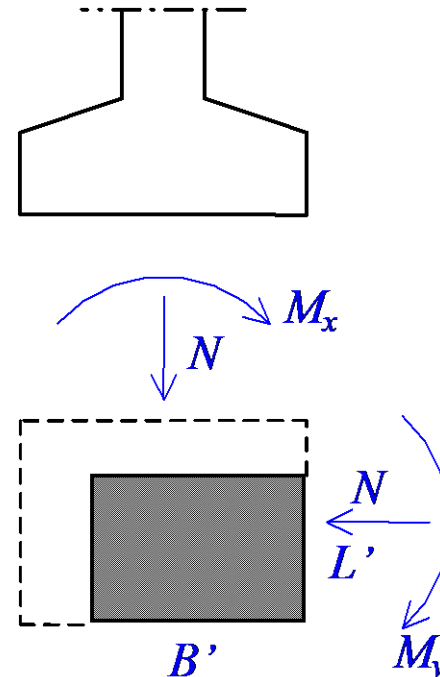
PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Formula generale di Brinch-Hansen

Si considera un'impronta efficace della fondazione ridotta rispetto a quella reale

$$\left\{ \begin{array}{l} B' = B - 2e_y \quad e_y = \frac{M_x}{N} \\ L' = L - 2e_x \quad e_x = \frac{M_y}{N} \end{array} \right.$$

La riduzione dell'area di impronta è legata alle eccentricità dei carichi ed ha lo scopo di simulare la non resistenza a trazione del terreno





PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Formula generale di Brinch-Hansen: **limiti**

- Il **comportamento non lineare** e la non resistenza a trazione del terreno sono tenuti in conto in **forma approssimata**
- Permette la valutazione della portanza dei **singoli elementi strutturali** di fondazione e non dell'intero sistema di fondazione nella sua globalità
- Può essere applicata solo a plinti, diretti o su pali, ed a travi rovesce ma **non alle platee di fondazione**, per le quali non è corretto operare una riduzione della superficie di impronta



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto

Il metodo di verifica proposto consiste nella valutazione del coefficiente di sicurezza dell'insieme terreno-fondazione

$$\lambda_u = \frac{R_d}{E_d}$$

R_d = Resistenza
 E_d = Effetto delle azioni

A tale scopo è condotta un'analisi non lineare sulla sottostruttura di fondazione estrapolata dall'intero sistema strutturale



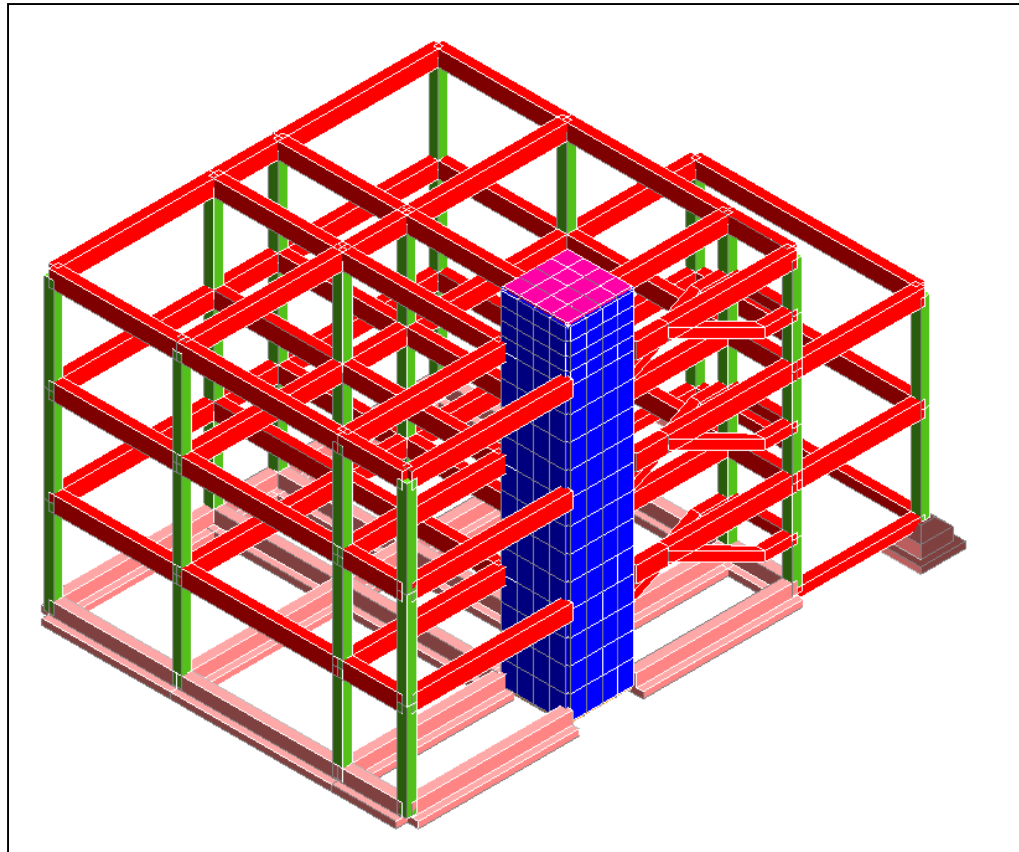
PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

È composta da tutti gli elementi strutturali a contatto con il suolo (travi rovesce, platee, plinti) e da quelli, non di fondazione, che giacciono sul piano di posa degli elementi di fondazione

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

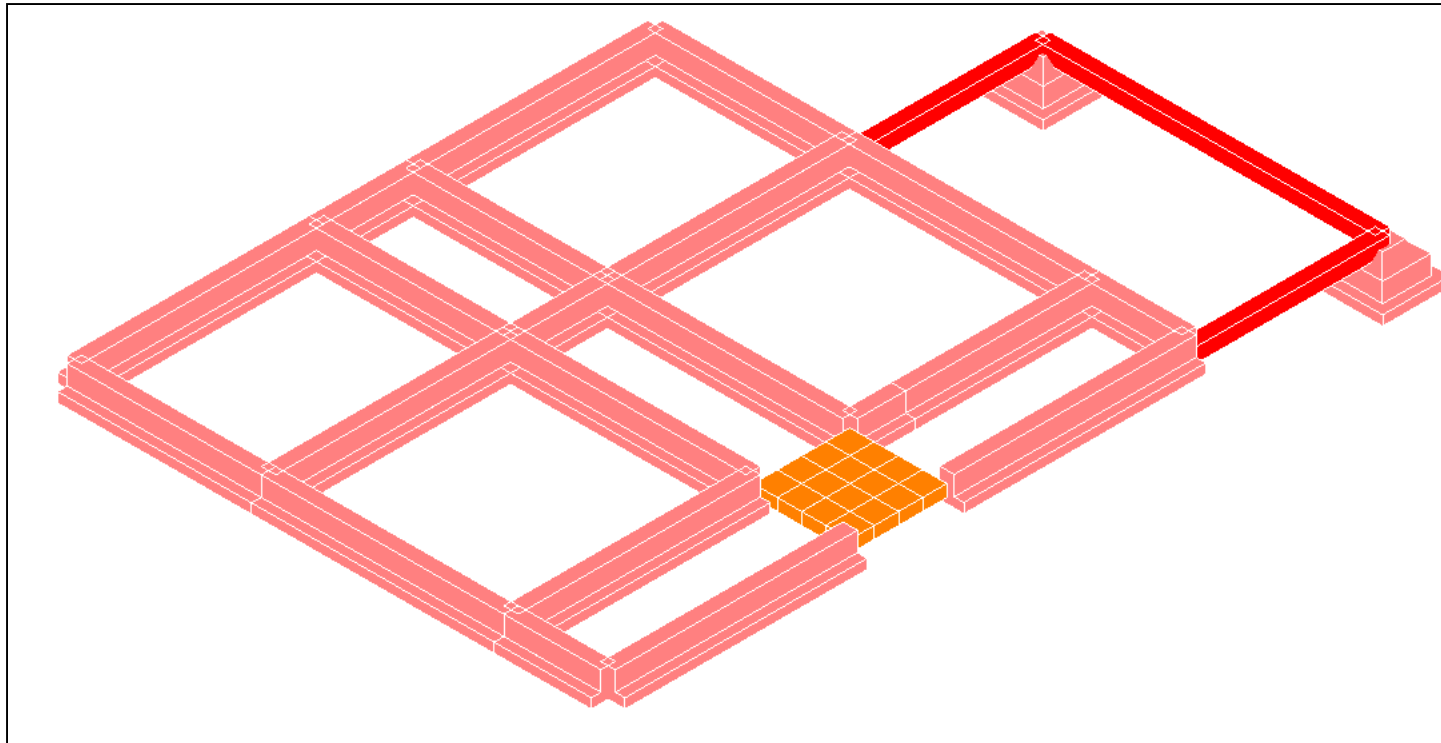
Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione



Modello intero sistema strutturale

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione



Sottostruttura di fondazione

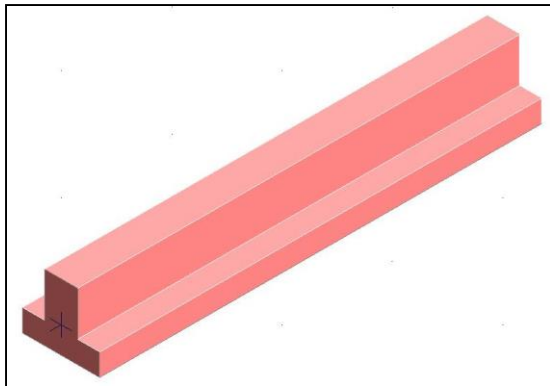
PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

Tutti gli elementi della sottostruttura di fondazione sono modellati a comportamento elastico lineare

Gli elementi di fondazione sono schematizzati come poggianti su un letto di molle a comportamento non lineare

Travi rovesce



Elemento strutturale



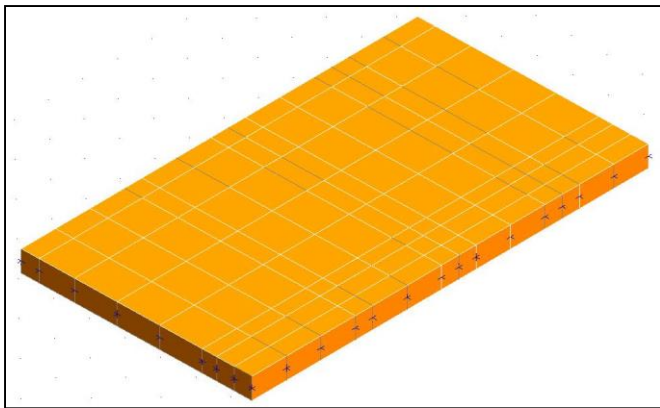
Schema statico

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

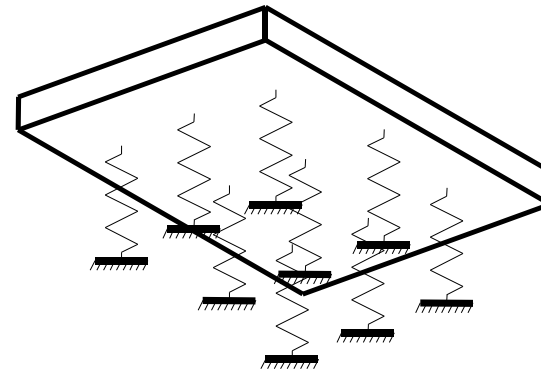
Tutti gli elementi della sottostruttura di fondazione sono modellati a comportamento elastico lineare

Gli elementi di fondazione sono schematizzati come poggianti su un letto di molle a comportamento non lineare



Elemento strutturale

Platee



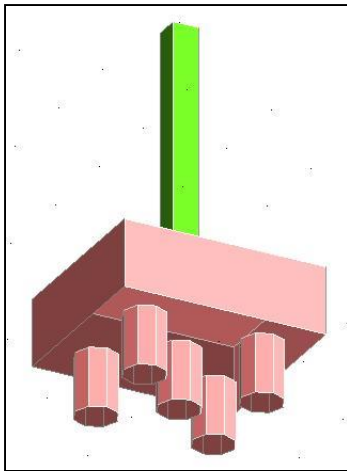
Schema statico

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

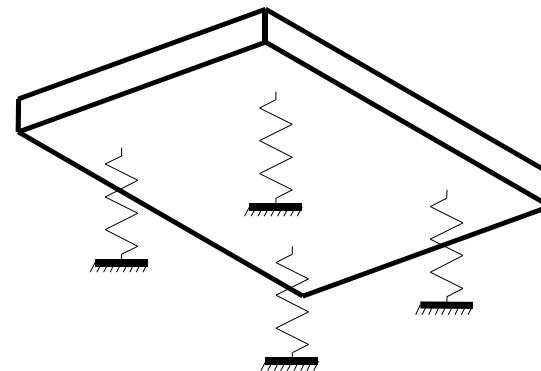
Tutti gli elementi della sottostruttura di fondazione sono modellati a comportamento elastico lineare

Gli elementi di fondazione sono schematizzati come poggianti su un letto di molle a comportamento non lineare



Elemento strutturale

Plinti



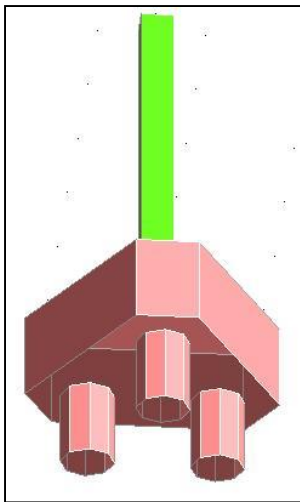
Schema statico

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

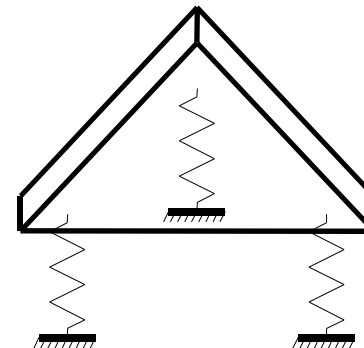
Tutti gli elementi della sottostruttura di fondazione sono modellati a comportamento elastico lineare

Gli elementi di fondazione sono schematizzati come poggianti su un letto di molle a comportamento non lineare



Elemento strutturale

Plinti



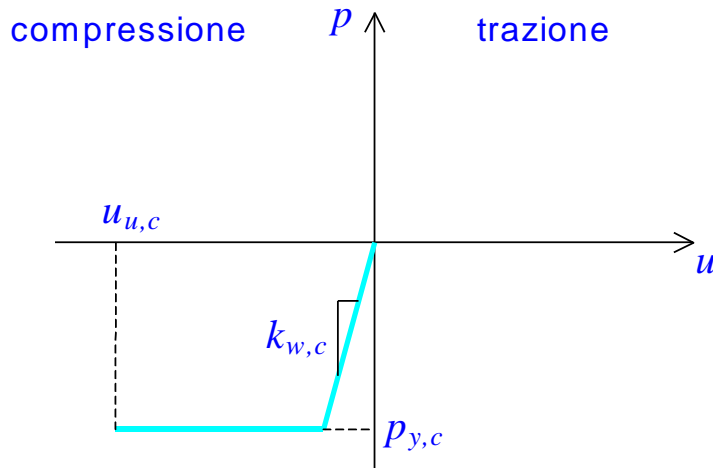
Schema statico

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

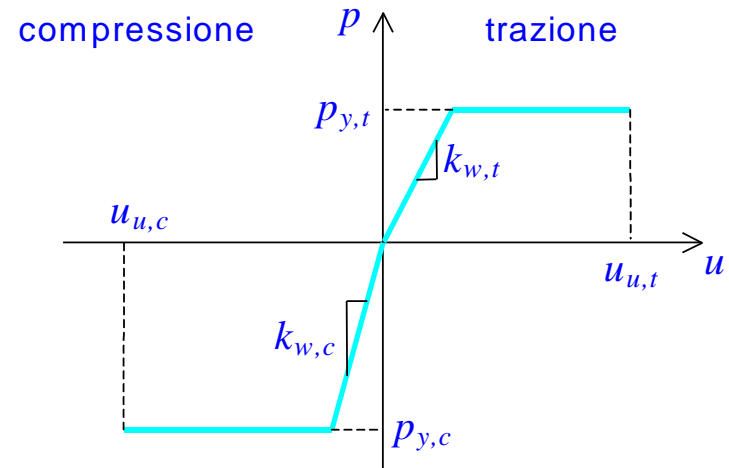
Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

I legami costitutivi forza-spostamento ($p-u$) delle molle sono di tipo non lineare

Fondazioni superficiali



Fondazioni profonde





PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: sottostruttura di fondazione

Per le fondazioni superficiali la rigidezza iniziale $k_{w,c}$ del legame è valutata a partire dalla costante di Winkler del terreno

Per le fondazioni profonde la rigidezze iniziali $k_{w,c}$ e $k_{w,t}$ sono valutate tenendo conto delle caratteristiche del terreno e della geometria del palo

Le forze di limite elastico $p_{y,c}$ e $p_{y,t}$ sono dedotte dai valore della capacità portante ultima calcolata con le normali teorie di Brinch-Hansen e Vesic non effettuando però la riduzione della superficie di impronta efficace di contatto fra fondazione e terreno

Gli spostamenti ultimi $u_{u,c}$ ed $u_{u,t}$ sono fissati sulla base di valori teorico-sperimentali riportati nella letteratura tecnica



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: analisi

Sulla sottostruttura di fondazione è applicato un **sistema di forze nodali** determinate come gli scarichi in fondazione derivanti dalla sovrastruttura

L'analisi è condotta facendo **crescere monotonamente** le forze applicate sulla sottostruttura di fondazione fino al raggiungimento di uno stato limite geotecnico o strutturale

La procedura è ripetuta **per tutte le combinazioni di carico** previste, e consente la determinazione del moltiplicatore a rottura dei carichi, che ovviamente coincide con il coefficiente di sicurezza



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: verifiche

Sono tenuti in conto gli SLU tipo GEO (meccanismi di collasso determinati dalla crisi del terreno) e tipo STR (meccanismi di collasso determinati dalla crisi degli elementi strutturali)

SLU tipo GEO

- crisi per perdita dell'equilibrio (il suolo risulta interamente plasticizzato e non è più in grado di equilibrare incrementi delle forze applicate)
- crisi per eccesso di abbassamento (sotto le forze applicate lo spostamento attinge ad un valore ultimo u_u)

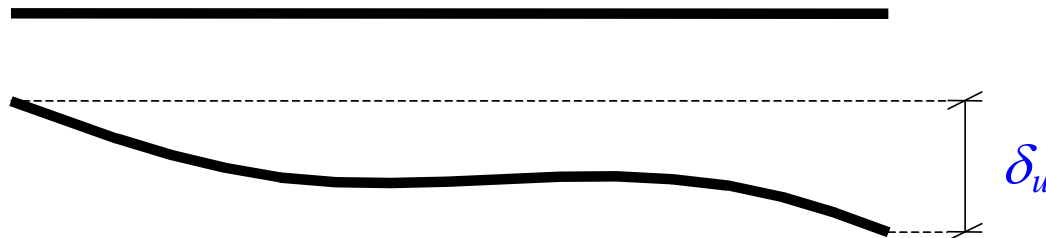
PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: verifiche

Sono tenuti in conto gli SLU tipo GEO (meccanismi di collasso determinati dalla crisi del terreno) e tipo STR (meccanismi di collasso determinati dalla crisi degli elementi strutturali)

SLU tipo STR

- crisi per eccesso di spostamento relativo (sotto le forze applicate lo spostamento relativo fra i nodi di un elemento strutturale attinge ad un valore ultimo δ_u)





PORTANZA DELLE FONDAZIONI

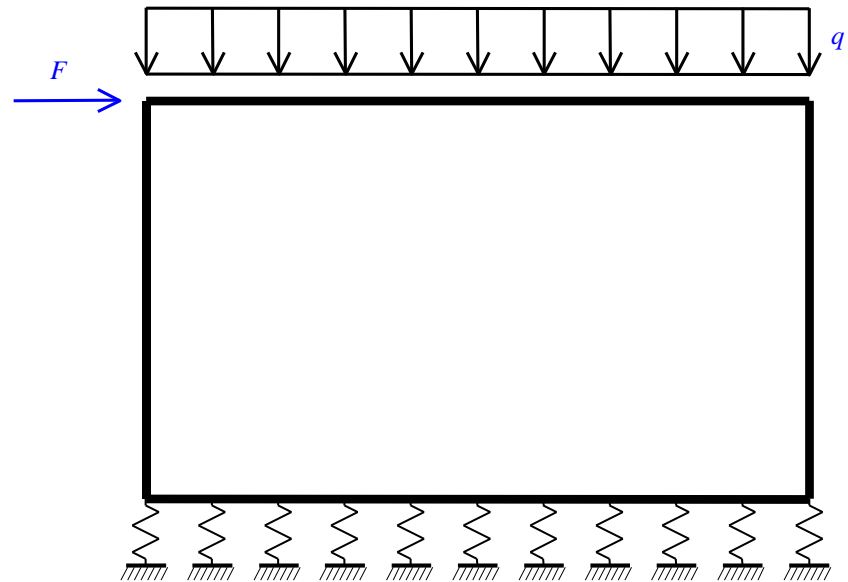
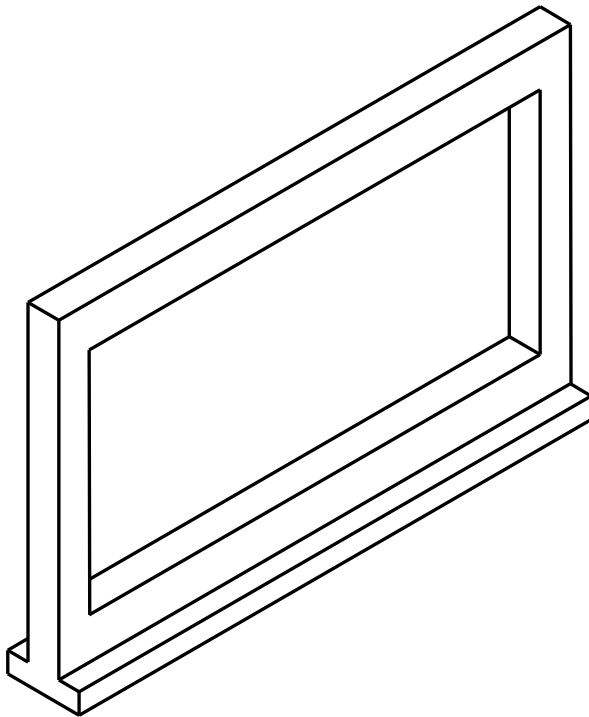
Nuovo approccio proposto: accuratezza

Sono state eseguite prove di validazione della procedura descritta analizzando singoli elementi strutturali di fondazione e sistemi di fondazione composti

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

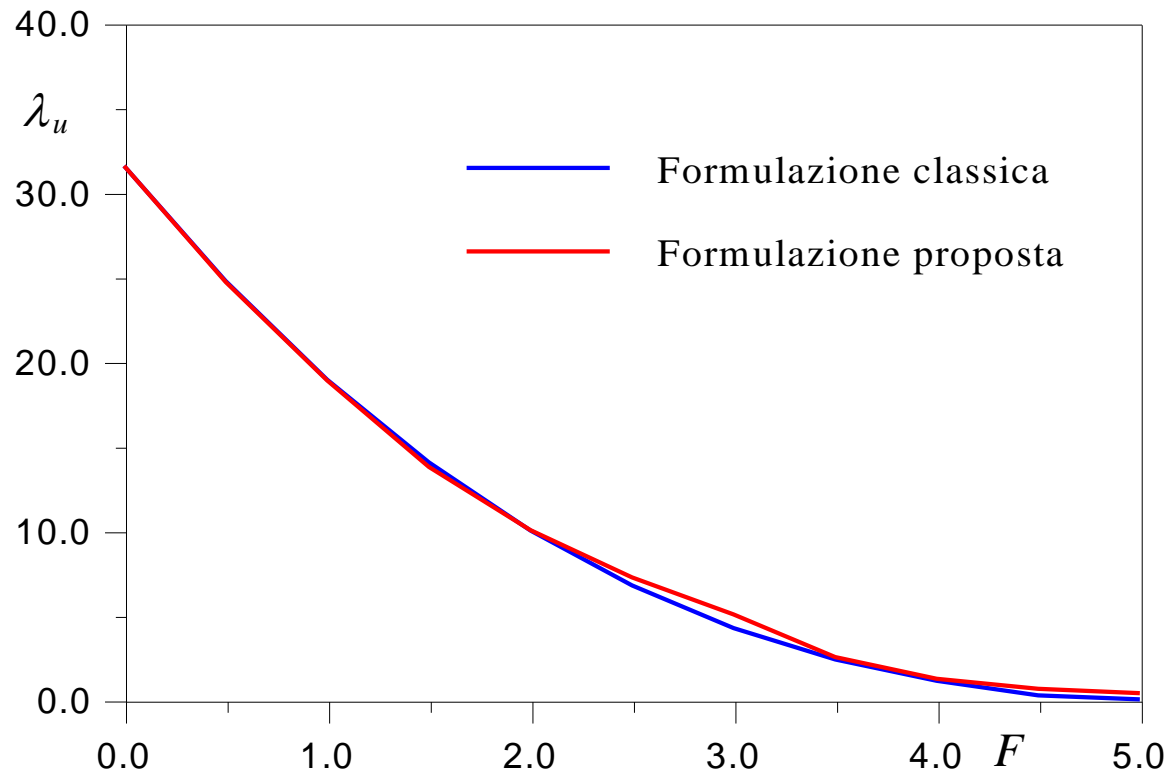
Trave rovescia telaio ad una campata



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

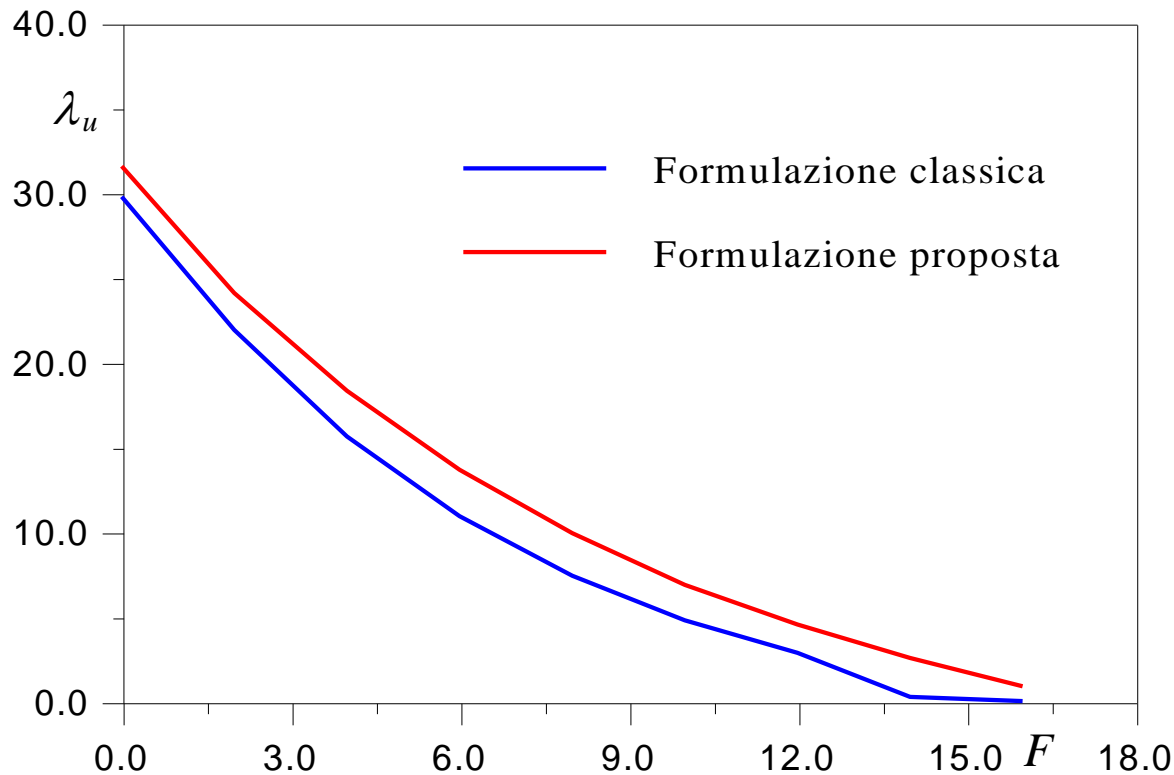
Trave rovescia telaio ad una campata



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

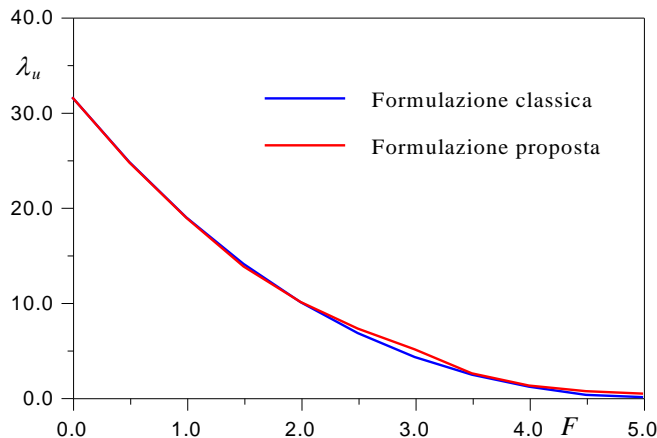
Trave rovescia telaio a tre campate



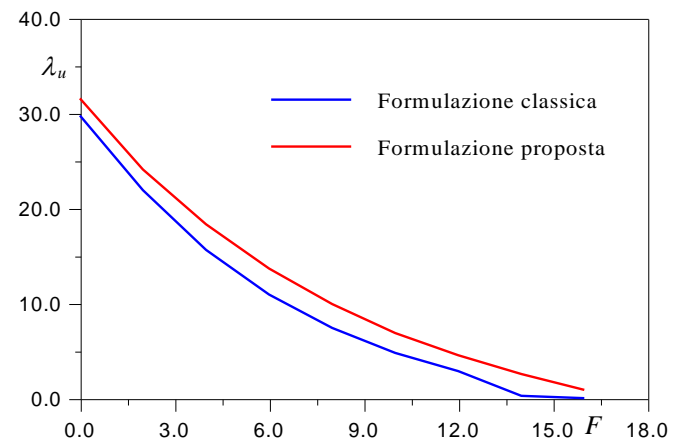
PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

Telaio ad una campata



Telaio a tre campate

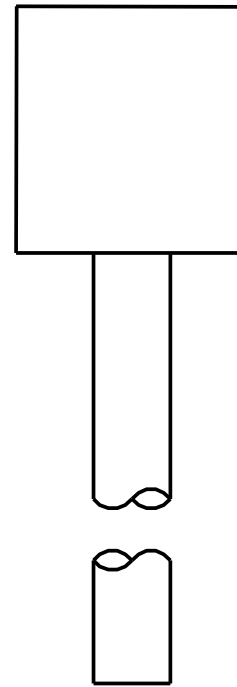
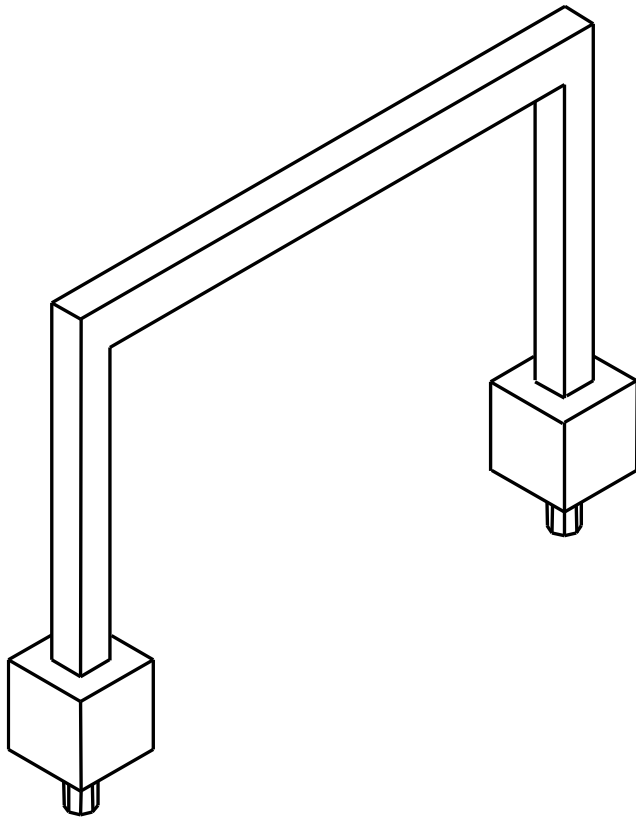


Nel caso di una singola asta si ha un pressoché perfetto accordo fra le formulazioni classica e proposta. Nel caso di più aste la formulazione proposta fornisce un coefficiente di sicurezza maggiore perché è in grado di cogliere gli effetti della redistribuzione delle tensioni sul terreno

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

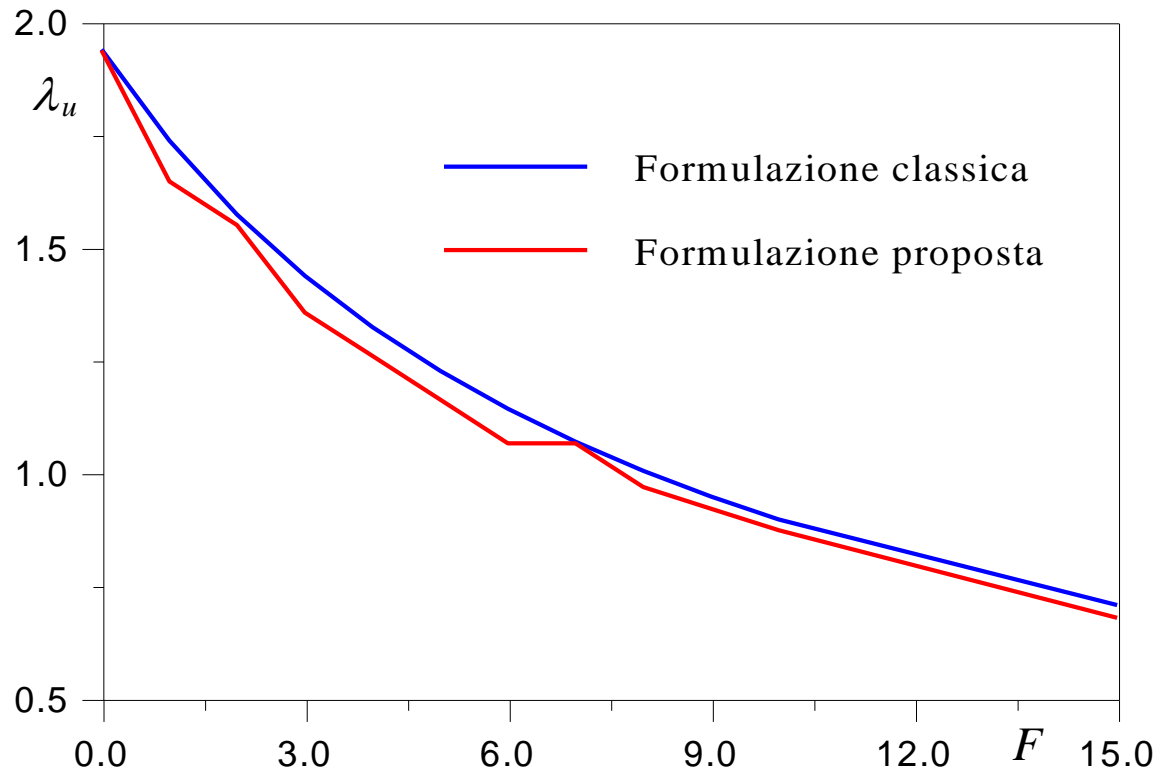
Plinti telaio ad una campata



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

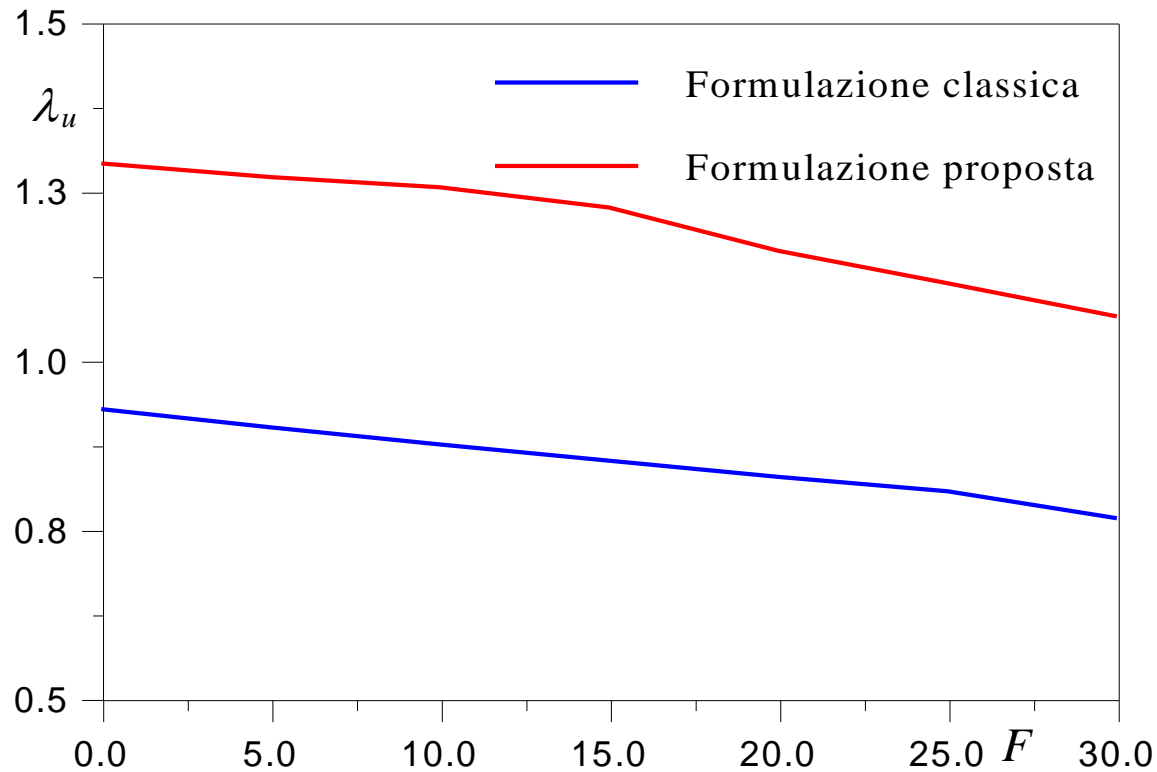
Plinti telaio ad una campata



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

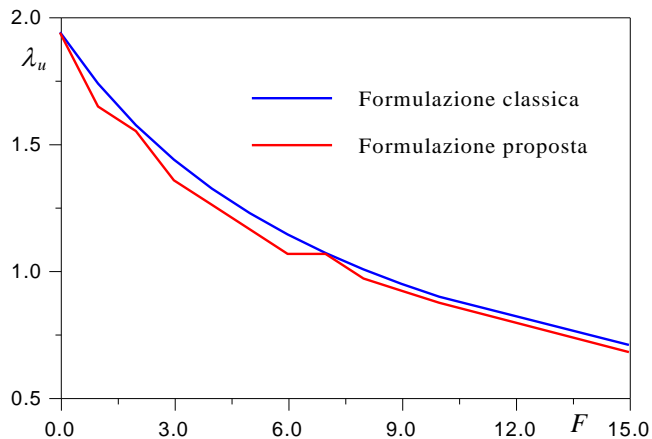
Plinti telaio a tre campate



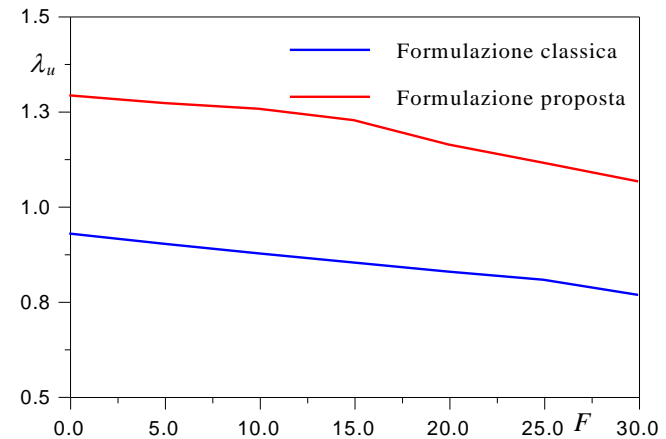
PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

Telaio ad una campata



Telaio a tre campate

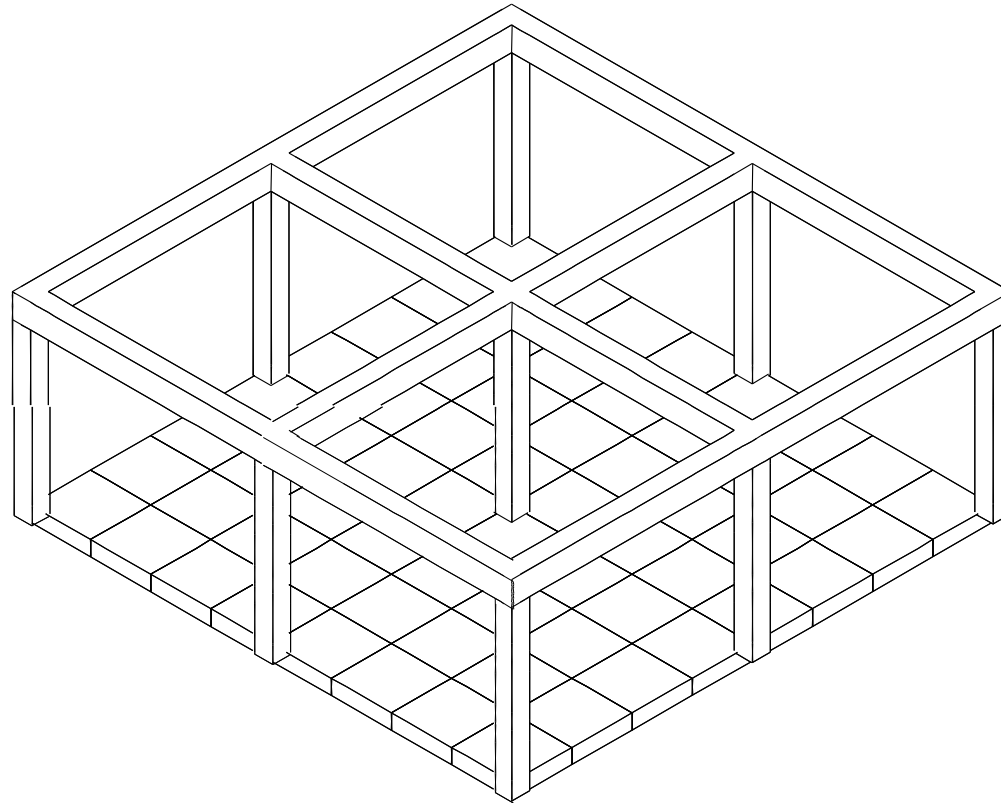


Nel caso di una singola asta si ha un pressoché perfetto accordo fra le formulazioni classica e proposta. Nel caso di più aste la formulazione proposta fornisce un coefficiente di sicurezza maggiore perché è in grado di cogliere gli effetti della redistribuzione delle tensioni sul terreno

PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

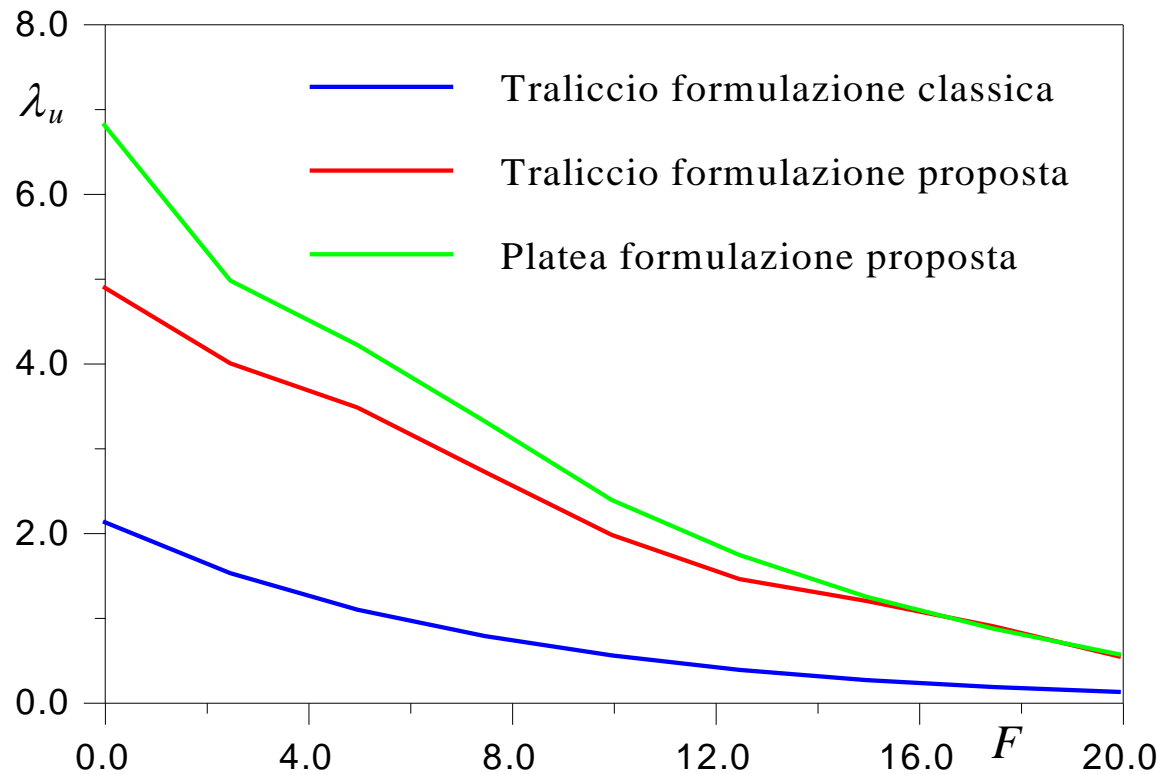
Platea di fondazione



PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: accuratezza

Platea di fondazione





PORTANZA DELLE FONDAZIONI

Nuovo approccio proposto: vantaggi

- il sistema di fondazione è studiato nella sua **globalità** e non analizzando singolarmente gli elementi strutturali che lo compongono
- si riesce a tenere conto degli effetti della **ridistribuzione delle tensioni** sul suolo di fondazione
- si riesce a tenere conto della non **resistenza a trazione** del terreno senza ricorrere a riduzioni (fortemente approssimate) dell'impronta efficace della fondazione
- non interviene alcuna complicazione nello studio di elementi di fondazione bidimensionali (**platee di fondazione**)

www.angelobiondi.com