

Gli approcci di progetto dell'EC7-1 per la progettazione geotecnica in Germania

Norbert Vogt,* Bernd Schuppener,** Anton Weißenbach***

Presentazione

La pubblicazione definitiva dell'Eurocodice 7 parte 1 risale all'anno 2004; da allora i paesi membri della Comunità Europea si sono attivati per adeguare le normative tecniche sulle costruzioni ai principi ed alle metodologie introdotte dal nuovo documento europeo. Di questi paesi, la Germania, insieme alla Francia e all'Inghilterra, è fra i primi ad introdurre operativamente l'Eurocodice 7 come metodologia per la progettazione geotecnica e per questo ha aggiornato la norma DIN 1054 introducendo l'impiego delle verifiche secondo il metodo agli stati limite, con i coefficienti di sicurezza parziali anziché globali.

Come previsto dal sistema degli Eurocodici, ogni paese può definire autonomamente una serie di variabilità del codice per tenere conto delle abitudini progettuali locali e per rispettare il livello di sicurezza fissato dalle norme nazionali. Nel caso dell'Eurocodice 7, le variabilità riguardano le possibili metodologie per verificare la sicurezza delle costruzioni con il metodo degli stati limite ed i valori dei fattori parziali di sicurezza da applicare nelle diverse situazioni di progetto.

L'idea di avviare un confronto aperto fra i modi di applicare l'EC7 nei vari paesi è dunque particolarmente felice ed è per questo che sono lieto di introdurre un primo lavoro in questo senso sulla Rivista Italiana di Geotecnica, su esplicita richiesta del presidente della Commissione SC7 europea, Bernd Schuppener. Considerato l'attuale momento di grande cambiamento che nel nostro paese si sta verificando proprio nel campo della normativa tecnica sulle costruzioni, e in particolare nella normativa geotecnica, questa occasione di confronto è particolarmente utile e stimolante sia per gli aspetti specificatamente tecnici sia per quelli relativi alle scelte di un paese che, di fronte ad un documento normativo pensato per uniformare le pratiche progettuali a livello europeo, tende comunque a far di tutto per conservare le proprie consuetudini progettuali.

L'articolo presentato si riferisce solo al progetto delle fondazioni superficiali ma chiaramente evidenzia l'approccio tedesco al cambiamento normativo conseguente all'EC7-1. Con l'approccio tedesco, tutte le scelte sugli approcci e sui valori dei coefficienti parziali di sicurezza, si basano sul presupposto di non introdurre con l'EC7 alcuna variazione, né in diminuzione né in aumento, del livello di sicurezza già vigente in Germania da oltre 70 anni. Inoltre, fra le metodologie operative disponibili in EC7, vengono preferite quelle che comportano la minima variazione possibile delle consuetudini progettuali largamente condivise e sperimentate negli anni.

Per soddisfare queste prescrizioni, in Germania è stato però introdotto un modo molto particolare e, a mio personale giudizio, non del tutto coerente con l'EC7, di effettuare le verifiche agli stati limite ultimi per le fondazioni superficiali. L'approccio alla progettazione fissato nella DIN 1054 si chiama DA2* e, letteralmente, è una variante abbreviata del "design approach 2" dell'EC7. Il metodo tedesco prevede di effettuare la verifica di un particolare stato limite attraverso il confronto fra gli effetti complessivi delle azioni e le resistenze. In questo modo, contrariamente a quello che è richiesto dall'approccio DA2, la valutazione separata degli effetti delle azioni favorevoli e sfavorevoli, non è garantita. Così ad esempio, nelle verifiche a scorrimento delle fondazioni dirette, nella determinazione della resistenza per attrito sulla superficie di scorrimento, con la variante tedesca DA2*, si considera anche l'effetto di un carico verticale variabile favorevole mentre, con l'approccio DA2, al carico verticale variabile favorevole deve essere applicato un fattore parziale nullo. Inoltre, anche nelle verifiche di portanza a carico verticale, in presenza di azioni eccentriche sulle fondazioni, la condizione critica per il dimensionamento della fondazione potrebbe essere quella con il minor valore delle azioni verticali, perché a causa dell'aumento dell'eccentricità, la dimensione della base reagente viene ad essere minimizzata. Con il DA2* invece, la base reagente risulta determinata in base al valore caratteristico delle azioni, tenendo conto di tutte le azioni verticali, anche quelle favorevoli, che portano certamente ad una riduzione dell'eccentricità.

G. Scarpelli

Università Politecnica delle Marche,
Vice Chairman della commissione SC7

* Technical University of Munich, Centre for Geotechnical Engineering, Germany

** Federal Waterways Engineering and Research Institute, Karlsruhe, Germany.

***Norderstedt near Hamburg, Germany

1. Introduzione

Con l'introduzione dell'Eurocodice 7, Progettazione Geotecnica, parte 1, Regole Generali (EC7-1), i paesi membri della Comunità Europea dovranno prendere due importanti decisioni per il dimensionamento delle opere di ingegneria geotecnica. Tre differenti approcci sono indicati nell'Eurocodice e ciascun paese potrà scegliere quello che rappresenta meglio le tradizioni nazionali. Inoltre, i vari paesi dovranno indicare i valori dei coefficienti parziali da adottare, nel rispetto dei livelli di sicurezza imposti a livello nazionale. Le due scelte, quella dell'approccio ed i valori dei coefficienti, devono però essere inquadrare in un unico contesto, in quanto le varie opzioni sono fra loro interdipendenti. Come verrà illustrato nella sezione 3, la scelta dell'approccio e dei valori dei coefficienti parziali in Germania è stata presa in modo da mantenere il livello di sicurezza implicito nell'uso del metodo del coefficiente di sicurezza globale, da sempre utilizzato con successo nella progettazione geotecnica nel nostro paese; in altri termini, un progetto geotecnico con l'EC7 dovrà condurre ad opere delle stesse dimensioni di quelle progettate con il metodo del coefficiente globale finora utilizzato. Nel presente lavoro viene illustrato l'approccio di progetto scelto in Germania attraverso il confronto tra i possibili dimensionamenti che si ottengono per il caso di una fondazione a trave rovescia applicando i tre approcci previsti dall'Eurocodice. Si dimostra che l'approccio di progetto definito come DA2*, dove i fattori parziali vengono applicati solo al termine del processo di calcolo, al momento della verifica della condizione limite, non solo riproduce al meglio il dimensionamento della fondazione che si aveva con il tradizionale ed affidabile metodo del fattore di sicurezza globale, ma produce una progettazione dove i costi risultano minimizzati.

L'introduzione dell'EC7-1 è attualmente un problema discusso singolarmente in ogni paese membro. Noi autori siamo dell'opinione che questo problema debba essere discusso non solo da ogni paese ma in un ambito più europeo. Per questo motivo quest'articolo viene pubblicato nelle riviste di geotecnica di altri paesi europei nelle rispettive lingue nazionali includendo in qualche caso specifici commenti a carattere nazionale.

2. Verifiche allo stato limite ultimo nell'ingegneria geotecnica

2.1. Generalità

Con l'introduzione degli Eurocodici, le verifiche agli stati limite ultimi per tutte le costruzioni in Europa potranno essere condotte in futuro, con una stessa metodologia di calcolo. In particolare, ogni parte di una struttura, dell'interfaccia terreno-strut-

tura o del terreno dovrà essere verificata nei confronti della relazione:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

che stabilisce che il valore di progetto dell'effetto di una azione deve risultare minore dei valori di progetto della capacità portante o della resistenza.

L'impiego dell'equazione (1), implica l'esistenza di una netta separazione fra effetti delle azioni e delle resistenze. Tale separazione è reale in vari settori dell'ingegneria strutturale; d'altra parte, nell'ingegneria geotecnica, sono molti i casi in cui non è possibile distinguere nettamente fra effetti delle azioni e capacità portante. Ad esempio, la spinta attiva delle terre dipende dalla resistenza al taglio o dalle resistenze lungo la superficie di rottura che limita il cuneo di spinta. In altri casi la resistenza del terreno dipende dall'intensità dell'azione. Per esempio la resistenza allo scorrimento è determinata dall'effetto dell'azione dovuta alla componente verticale della risultante delle pressioni di contatto. Un'altra difficoltà per l'applicazione dell'equazione (1) discende dalla circostanza che esistono due modi completamente diversi di introdurre i fattori parziali di sicurezza in ingegneria geotecnica.

Nel primo modo, i valori di progetto E_d e R_d sugli effetti delle azioni geotecniche e delle resistenze possono essere determinati secondo il cosiddetto metodo della fattorizzazione dei parametri geotecnici. In questo metodo, dove i fattori parziali sono applicati ai parametri caratteristici ϕ_k' e c_k' , il valore di progetto del coefficiente di attrito, $\tan\phi_d'$, si determina dividendo il valore caratteristico del coefficiente di attrito $\tan\phi_k'$ per il fattore parziale dell'attrito, γ_{ϕ} ; analogamente la coesione di progetto c_d' si ottiene dividendo il valore caratteristico della coesione c_k' per il fattore parziale relativo alla coesione γ_c .

Risulta quindi:

$$\tan\phi_d' = \tan\phi_k' / \gamma_{\phi} \quad (2)$$

$$c_d' = c_k' / \gamma_c \quad (3)$$

ed i valori di progetto delle azioni geotecniche e delle resistenze E_d ed R_d da introdurre nell'equazione (1) si ottengono dai valori di progetto dei parametri c_d' e ϕ_d' .

Nel secondo modo, si considera il metodo della fattorizzazione delle azioni e delle resistenze. In questo metodo i valori caratteristici delle azioni, dei loro effetti e delle resistenze del terreno F_k , E_k ed R_k si ottengono direttamente dai valori caratteristici dei parametri geotecnici ϕ_k' e c_k' . I valori di progetto degli effetti delle azioni geotecniche E_d (sforzi, forze interne e momenti) e delle resistenze si ricavano invece applicando i fattori parziali γ_E e γ_R ai valori caratteristici prima calcolati. In altri termini:

Tab. I – Valori raccomandati dei fattori parziali per il progetto di fondazioni superficiali e pendii in accordo con l'Allegato A di EC7-1.

Tab. I – Recommended values of partial factors for the design of shallow foundations and slopes in accordance with Annex A of EC 7-1.

Approccio di progetto		Azioni o effetto delle azioni		Resistenza del terreno
		dalla struttura	dal terreno	
DA 1	Comb. 1	$\gamma_G = 1.35; \gamma_{G,inf} = 1.00; \gamma_Q = 1.50$		$\gamma_R = \gamma_{\varphi'} = \gamma_{c'} = \gamma_{cu} = 1.0$
	Comb. 2	$\gamma_G = 1.00; \gamma_Q = 1.30$	$\gamma_{\varphi'} = \gamma_{c'} = 1.25; \gamma_{cu} = 1.4; \gamma_R = 1.0$	
DA 2, DA 2*		$\gamma_G = 1.35; \gamma_{G,inf} = 1.00; \gamma_Q = 1.50$		$\gamma_{R,e} = \gamma_{R,v} = 1.40; \gamma_{R,h} = 1.10$ $\gamma_{\varphi'} = \gamma_{c'} = \gamma_{cu} = 1.0$
DA 3		$\gamma_G = 1.35; \gamma_{G,inf} = 1.00;$ $\gamma_Q = 1.50$	$\gamma_{\varphi'} = \gamma_{c'} = 1.25; \gamma_{cu} = 1.4; \gamma_R = 1.0$	
$\gamma_{R,c}$: fattori parziali per la resistenza passiva $\gamma_{R,v}$: fattori parziali per la capacità limite $\gamma_{R,h}$: fattori parziali per la resistenza a scorrimento				

$$E_d = E_k \gamma_E \quad (4)$$

$$R_d = R_k / \gamma_R \quad (5)$$

L'esistenza di questa doppia possibilità costituisce la ragione per la quale in EC7-1 sono previsti tre diversi approcci per le verifiche agli stati limite per la progettazione geotecnica. Ogni nazione potrà stabilire l'impiego di uno o anche più approcci nelle verifiche dei diversi stati limite. Inoltre, ciascun paese dovrà definire i valori numerici dei coefficienti parziali da applicare per ogni particolare approccio, nell'ambito del proprio annesso nazionale all'EC7-1. I tre approcci di progetto si differenziano fra loro per come vengono distribuiti i fattori parziali fra azioni geotecniche e resistenze (vedi Tab. I). Per le azioni o gli effetti delle azioni, si fa inoltre distinzione fra azioni che provengono dalle strutture e azioni che provengono dal terreno.

2.2. Approccio di progetto DA1

Nell'approccio di progetto DA1 si devono analizzare due diverse combinazioni di fattori parziali. La combinazione 1 coincide con il caso B nella pre-norma EC7-1 ed ha per obiettivo la sicurezza nei confronti delle possibili deviazioni delle azioni dai loro valori caratteristici. Nella Combinazione 1, fattori parziali maggiori di 1 vengono applicati alle azioni permanenti e variabili che provengono dalle strutture e dal terreno. Valori raccomandati sono: $\gamma_G = 1.35$ per azioni permanenti non favorevoli, $\gamma_{G,inf} = 1.00$ per azioni permanenti favorevoli e $\gamma_Q = 1.5$ per le azioni variabili, coerentemente con i valori utilizzati in altri settori dell'ingegneria strutturale e con quanto prescritto nell'Eurocodice EC1: Azioni sulle strutture.

Invece, le resistenze del terreno sono valutate con i valori caratteristici dei parametri e quindi assegnando a $\gamma_{\varphi'}$, $\gamma_{c'}$ e γ_{cu} tutti valori unitari; sono unitari anche i valori dei fattori parziali sulle resistenze.

La combinazione 2 dell'Approccio DA1 coincide con il caso C della pre-norma ed ha per obiettivo la sicurezza rispetto ai valori caratteristici e rispetto alle incertezze del modello di calcolo. Con esso si as-

sume che le azioni permanenti siano coincidenti con i valori attesi e che le azioni variabili possano deviare leggermente dai valori caratteristici. Così i fattori parziali $\gamma_{\varphi'}$, $\gamma_{c'}$, con valori numerici di 1.25, e γ_{cu} , con valore 1.4, vengono applicati ai valori caratteristici dei parametri geotecnici, mentre le azioni permanenti che provengono dalle strutture sono prese con il loro valore caratteristico. Poiché i fattori parziali sono applicati ai valori rappresentativi delle azioni e ai valori caratteristici dei parametri di resistenza del terreno all'origine, tutto il calcolo viene eseguito con i valori di progetto delle azioni e delle resistenze. È implicito che delle due combinazioni, quella che fornisce le dimensioni maggiori per la fondazione diventa rilevante per il progetto secondo l'approccio DA1.

2.3. Approccio di progetto DA2 e DA2*

Con l'approccio di progetto DA2 è richiesta una sola verifica, salvo in particolari situazioni quando, per tenere conto di azioni favorevoli e sfavorevoli, si devono considerare diverse combinazioni di fattori parziali. Nel DA2, i fattori parziali da applicare alle azioni geotecniche o ai loro effetti sono gli stessi di quelli che si applicano alle azioni strutturali, cioè $\gamma_G = 1.35$, $\gamma_{G,inf} = 1$, $\gamma_Q = 1.5$. Per la resistenza del terreno sono invece indicati i fattori riportati in tabella I.

Ci sono due modi distinti di condurre la verifica secondo il DA2. Nell'approccio di progetto denominato DA2 da FRANK *et al.* [2004] i fattori parziali si applicano alle azioni caratteristiche sin dall'inizio del calcolo, in modo che tutte le valutazioni vengano condotte con le azioni di progetto. In contrasto, FRANK *et al.* [2004] definiscono un approccio di progetto DA2* in cui tutto il calcolo viene condotto con i valori caratteristici e i fattori parziali vengono applicati solo alla fine del procedimento, quando si effettua la verifica della condizione limite. Con tale procedimento si ricavano i valori caratteristici delle forze interne e dei momenti nella struttura di fondazione che possono essere così utilizzati anche per le verifiche di funzionalità.

2.4. Approccio di progetto DA3

Anche con questo approccio è richiesta una sola verifica. I fattori parziali che si applicano alle azioni strutturali sono gli stessi del DA2. Invece, per le azioni e le resistenze relative al terreno, i fattori parziali sono applicati ai parametri geotecnici ϕ' , c' , c_u . Il valore suggerito per $\gamma_{\phi'}$, $\gamma_{c'}$ è 1.25 e 1.4 per γ_{c_u} . Tutti i fattori parziali sono applicati all'inizio del procedimento. In tal modo con il DA3 il calcolo viene condotto con i valori di progetto delle azioni e delle resistenze.

3. Principi per la scelta dell'approccio di progetto e i fattori parziali

La tradizione normativa tedesca per l'ingegneria geotecnica risale a più di 70 anni fa. La prima edizione della DIN 1054 "Linee guida per i carichi ammissibili sul terreno nelle costruzioni" è stata pubblicata nel 1934. Da allora, le norme geotecniche sono state continuamente ottimizzate per raggiungere l'attuale livello di qualità. Il grado di sicurezza implicito nell'uso del concetto di coefficiente di sicurezza globale è risultato adeguato ed i valori adottati per i fattori di sicurezza hanno reso possibile una progettazione geotecnica sicura ed economica.

La commissione per la Normativa Tecnica delle Costruzioni per l'Ingegneria Civile dell'Istituto Tedesco per la Normativa, DIN, ha quindi deciso, nel 1998, che ogni incremento di costo nelle costruzioni prodotto dall'introduzione di nuove norme avrebbe dovuto essere pienamente giustificato. Poiché la Normativa precedente risultava ben sperimentata ed applicata, la decisione è stata quella di mantenere il livello di sicurezza adottato con il coefficiente di sicurezza globale, e di adattare la normativa esistente per introdurre l'uso dei coefficienti parziali di sicurezza secondo gli Eurocodici. Con tale ipotesi di lavoro, la scelta degli approcci di progetto e dei valori dei fattori parziali di sicurezza avrebbe dovuto necessariamente portare a progettare con l'EC7-1 fondazioni con dimensioni più o meno identiche a quelle dimensionate con la normativa esistente. In caso contrario, notevoli avrebbero potuto essere le difficoltà da superare per far accettare la nuova normativa nel Paese. Ad esempio si è voluto evitare che una struttura esistente richiedesse di essere rinforzata o sottofondata per soddisfare nuovi criteri di sicurezza, mentre tutto ciò sarebbe risultato non necessario con la norma esistente.

Stabilito il principio di conservare l'attuale livello di sicurezza delle costruzioni in Germania, si è quindi proceduto a determinare i fattori parziali per le azioni geotecniche e per le resistenze facendo riferimento agli approcci di progetto DA2 e DA2* e ripartendo la sicurezza globale parte sulle azioni e parte sulle resistenze, attraverso la seguente equazione:

$$\gamma_R \cdot \gamma_{G/Q} \cong \gamma_{GLOB} \quad (6)$$

dove γ_R è il fattore parziale per le resistenze del terreno, $\gamma_{G/Q}$ è un fattore parziale medio per gli effetti delle azioni permanenti e variabili e γ_{GLOB} è il consueto fattore globale di sicurezza.

Per quanto riguarda i fattori parziali sulle azioni permanenti e variabili, la scelta tedesca è stata quella di impiegare i valori già adottati negli altri campi dell'ingegneria strutturale ($\gamma_G = 1.35$ e $\gamma_Q = 1.5$). Questi valori numerici sono stati stabiliti dagli ingegneri strutturali ed è certamente discutibile se effettivamente rappresentino le incertezze tipiche dell'ingegneria geotecnica. Ciò nonostante, per ragioni di opportunità, la commissione per la normativa geotecnica ha ritenuto più importante uniformare i valori dei coefficienti parziali di sicurezza in tutti i campi dell'ingegneria civile piuttosto che avere fattori parziali specifici per la geotecnica.

Poiché in ingegneria geotecnica le azioni permanenti sono dominanti rispetto a quelle variabili si è adottato un valore medio pesato $\gamma_{G/Q} = 1.4$ da cui poi calcolare a ritroso i fattori parziali delle resistenze γ_R per le diverse verifiche; in particolare, dall'equazione (6), risulta:

$$\gamma_R \cong \gamma_{GLOB} / \gamma_{G/Q} \quad (7)$$

Ad esempio, con il valore $\gamma_{GLOB} = 2$ utilizzato in Germania per la verifica della capacità portante si ottiene $\gamma_R \cong 2 / 1.4 \cong 1.4$. Analogamente, sono stati ricavati tutti gli altri fattori per le resistenze.

4. Confronto con gli approcci di progetto dell'EC7-1: progettazione comparata

4.1. Un esempio di progettazione comparata

Per confrontare fra loro gli approcci di progetto si fa riferimento ad un caso semplice di fondazione a trave rovescia (Fig. 1), analizzando la verifica di capacità portante. Assumendo un carico caratteristico V_k , il carico variabile orizzontale H_k viene fatto crescere per determinare il corrispettivo valore caratteristico della larghezza di fondazione B_k . Inoltre si considera che il carico orizzontale sia applicato con braccio 4 m per ricavare il valore caratteristico del momento ribaltante $M_k = 4 H_k$ alla base della fondazione. Nei calcoli si considerano i seguenti valori:
 Approfondimento: $d = 1.0$ m
 Carico verticale permanente: $V_k = 400$ kN/m
 Peso di volume del terreno $\gamma_1 = \gamma_2 = 19$ kN/m³
 Angolo di resistenza al taglio $\phi_k = 32.5^\circ$
 Attrito all'interfaccia $\delta = 2/3 \phi_k$.

4.2 Approccio di progetto DA1

Nella combinazione 1 non è noto a priori se l'azione verticale permanente V_k debba essere considerata come favorevole o sfavorevole; devono perciò essere analizzati 2 casi: nel primo si sceglie un fattore parziale $\gamma_{G;inf} = 1$; nel secondo si prende $\gamma_G = 1.35$. Il risultato del calcolo (verifica della ca-

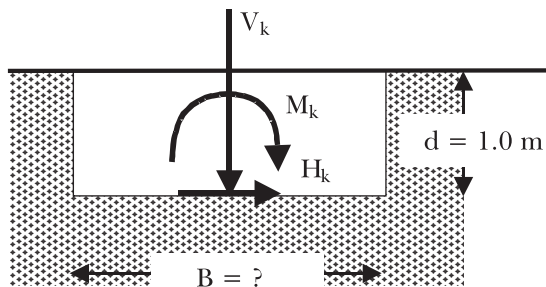


Fig. 1 – Esempio di progetto di una fondazione a trave rovescia.

Fig. 1 – Example of the design of a strip footing.

pacità portante) è illustrato in figura 2. La verifica allo scorrimento diventa determinante quando il valore del rapporto H_k/V_k è uguale o maggiore di 0.24.

Questo risulta in base alla condizione limite sullo scorrimento secondo EC7-1, nell'ipotesi di trascurare la resistenza passiva al lato della fondazione e tenendo conto del fatto che la componente verticale V_d della risultante delle forze sulla base della fondazione è un'azione favorevole e, nella verifica allo scorrimento, deve essere considerata con fattore parziale $\gamma_{G;inf}$ pari a 1.

$$H_d = H_k \cdot \gamma_Q \leq R_d = V_d \cdot \tan \delta_s / \gamma_{R;h} = V_k \cdot \gamma_{G;inf} \cdot \tan \delta_s / \gamma_{R;h}$$

$$H_k / V_k \leq \gamma_{G;inf} \cdot \tan \delta_s / (\gamma_{R;h} \cdot \gamma_Q) = 0.24$$

Nella combinazione 2 dell'approccio 1 devono essere applicati i fattori parziali γ_ϕ e γ_c con valore 1.25 ai parametri di resistenza del terreno ed il fattore $\gamma_q = 1.3$ alle azioni variabili, in questo caso costituita dall'azione orizzontale. Si può vedere che in questo esempio, la combinazione 2 conduce ad una base B della fondazione significativamente maggiore della combinazione 1 ed è dunque la condizione di progetto dominante. Facendo il confronto fra i risultati dell'approccio DA1 e quelli che si ottengono con il metodo del coefficiente di sicurezza globale, con valore $\eta = 2$ secondo lo standard della DIN 1054, perché i due metodi forniscano la stessa larghezza della fondazione, l'azione orizzontale deve essere nulla. In tutti gli altri casi, al crescere dell'azione orizzontale la larghezza della fondazione risulta maggiore del 30% circa rispetto al progetto secondo la vecchia normativa.

In conclusione non è possibile mantenere il precedente livello di sicurezza con l'approccio DA1, anche se questo potrebbe risultare comunque vero in alcune particolari combinazioni dei carichi.

4.3. Approccio di progetto DA2

In figura 3 sono presentati i valori di B che si ottengono applicando i fattori parziali delle azioni all'inizio del calcolo. In questo approccio la azioni

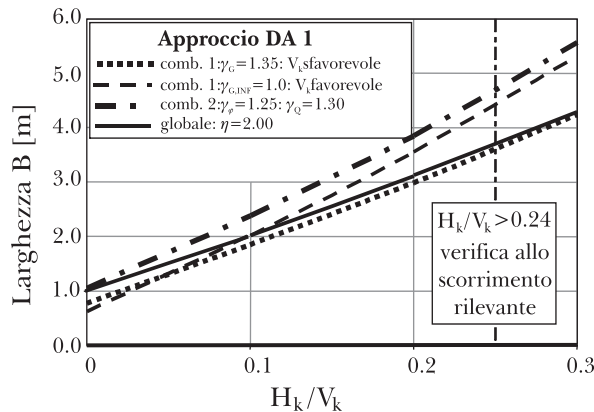


Fig. 2 – Larghezza B di una fondazione a trave rovescia secondo il DA1.

Fig. 2 – Width, B, of the strip footing in Design Approach DA 1.

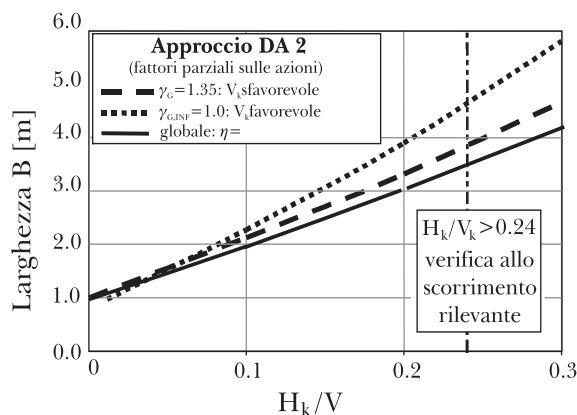


Fig. 3 – Larghezza B di una fondazione a trave rovescia secondo il DA2, dove i fattori parziali sono applicati all'origine del calcolo di stabilità.

Fig. 3 – Width, B, of the strip footing in Design Approach DA 2 where the partial factors are applied to the actions at the beginning of the calculation.

verticali favorevoli diventano rilevanti per il dimensionamento della fondazione quando $H_k/V_k > 0.06$. Dal confronto con il metodo dell'approccio globale, con $\eta = 2$, la larghezza B della fondazione risulta identica solo con carico variabile orizzontale nullo. Con il crescere del carico orizzontale invece, la larghezza della fondazione cresce di oltre il 30% rispetto al dimensionamento attuale.

4.4. Approccio di progetto DA2*

In figura 4 vengono presentati i risultati che si ottengono con l'approccio DA2*, dove i fattori parziali sono applicati ai valori caratteristici degli effetti delle azioni e delle resistenze alla fine del calcolo, quando viene verificata la condizione di stato limite. Si può vedere che l'azione permanente verticale sfavorevole con un fattore parziale $\gamma_G = 1.35$ è sempre rilevante per il dimensionamento e la larghezza ri-



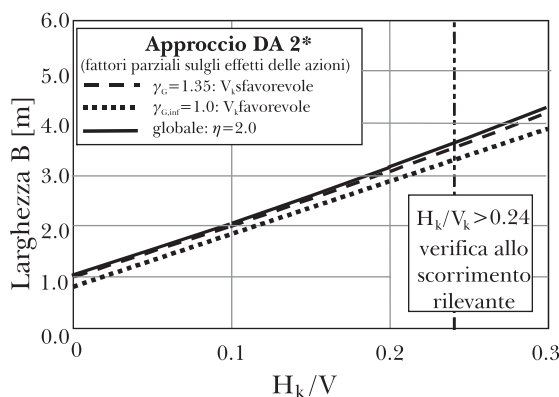


Fig. 4 – Larghezza B di una fondazione a trave rovescia secondo il DA2*, dove i fattori parziali sono applicati agli effetti delle azioni al termine del calcolo.

Fig. 4 – Width, B, of the strip footing in Design Approach DA 2* where the partial factors are applied to the effects of actions at the end of the calculation.

chiesta B è in accordo con quella che risulta dal progetto della fondazione con il metodo del coefficiente globale, con $\eta=2$. In altri termini, con il metodo DA2* il precedente livello di sicurezza globale risulta sempre assicurato.

4.5. Approccio di progetto DA3

Con l'approccio di progetto 3 i fattori parziali vengono applicati ai parametri geotecnici da cui poi si calcolano gli effetti delle azioni e delle resistenze del terreno. Alle azioni che provengono dalla struttura sono invece applicati i fattori parziali utilizzati negli altri approcci. Anche per questo approccio non è chiaro a priori al progettista se gli effetti delle azioni permanenti favorevoli o sfavorevoli risultano rilevanti per il dimensionamento. Pertanto è necessario valutare due casi distinti (Fig. 5). Nell'esempio, il carico verticale favorevole diventa rilevante per un valore del rapporto H_k/V_k maggiore di 0.08. Nel confronto con il metodo del coefficiente di sicurezza globale, assunto $\eta=2$, si ritrova la medesima larghezza di fondazione solo per $H=0$. Con il crescere del carico orizzontale, la larghezza di progetto B tende a crescere oltre il 40% in più rispetto alla larghezza che si ottiene dall'approccio globale. Anche nel caso dell'approccio DA3 pertanto, il precedente livello di sicurezza non può essere conservato.

4.6. Confronto fra gli approcci di progetto DA2 e DA2*

Le ragioni dell'ampia differenza di larghezza B della fondazione, che risulta applicando gli approcci DA2 e DA2*, risiede nella diversa maniera in cui viene calcolata la capacità portante caratteristica nei due casi. Nella procedura DA2*, dove i fattori parziali sono applicati all'atto della verifica della condizione limite, la capacità portante caratteristica si ottiene dai valori caratteristici degli ef-

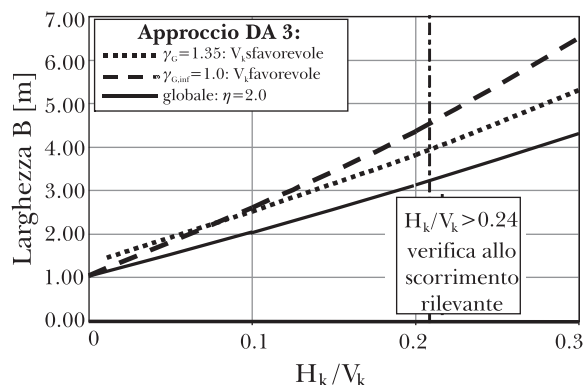


Fig. 5 – Larghezza B di una fondazione a trave rovescia secondo il DA3.

Fig. 5 – Width, B, of the strip footing in Design Approach DA 3.

fetti delle azioni alla base della fondazione, ovvero sia (Fig. 6), per il calcolo della capacità portante caratteristica, si utilizzano i valori caratteristici dell'inclinazione, δ_k , e dell'eccentricità e_k . Nella procedura DA2, dove i fattori parziali vengono applicati all'inizio del calcolo, la capacità portante caratteristica viene calcolata in base ai valori di progetto degli effetti delle azioni alla base della fondazione, e in particolare dal valore di progetto dell'inclinazione dei carichi δ_d e delle eccentricità e_d . Questo è incompatibile con una filosofia della sicurezza razionale e ben strutturata.

Inoltre, poiché il fattore parziale per i carichi variabili γ_Q è maggiore di quello per i carichi permanenti γ_G , l'eccentricità e la tangente dell'inclinazione dell'azione risultante alla base della fondazione che si ottengono con il DA2 risultano sempre maggiori dei corrispondenti valori del DA2* di un fattore $\gamma_Q/\gamma_G=1.5/1.35=1.11$. Questo effetto è anche maggiore se il carico verticale agisce come un carico favorevole e il corrispondente valore di progetto deve essere determinato dal valore $\gamma_G=1$. In tal caso infatti eccentricità ed inclinazione risultano maggiori di un fattore 1.5.

Analogo risultato si ottiene quando si è in presenza di carichi orizzontali e verticali. Applicando il DA2* risulta:

$$e_k = M_k / (V_{Gk} + V_{Qk})$$

$$\tan \delta_k = H_{Qk} / (V_{Gk} + V_{Qk})$$

con il DA2 si ha invece:

$$e_d = M_k \gamma_Q / (V_{G,k} \gamma_G + V_{Q,k} \gamma_Q)$$

$$e_d = M_k (V_{G,k} \gamma_G / \gamma_Q + V_{Q,k}) e_k$$

$$\tan \delta_d = H_{Q,k} \cdot \gamma_Q / (V_{G,k} \cdot \gamma_G + V_{Q,k} \cdot \gamma_Q)$$

$$\tan \delta_d = H_{Q,k} / (V_{G,k} \cdot \gamma_G / V_{Q,k}) \tan \delta_k$$

Anche in questo caso dunque, eccentricità ed inclinazione della risultante agente alla base della fondazione che si ottengono con l'approccio DA2 sono maggiori dei valori corrispondenti con il DA2*;

Tab. II – Stati limite e fattori parziali di DIN 1054 (2005).

Tab. II – Limit states and partial factors of DIN 1054 (2005).

Approccio di progetto		Azioni o effetti delle azioni		Reisistenza del terreno
EC 7-1	DIN 1054	delle strutture	del terreno	
GEO DA 2*	GEO-2: verifica delle fondazioni superficiali, strutture di sostegno, pali e ancoraggi	$\gamma_G = 1.35; \gamma_Q = 1.50$		$\gamma_{R,c} = \gamma_{R,v} = 1.40;$ $\gamma_{R,h} = 1.10$
GEO DA 3	GEO-3: verifica di stabilità dei pendii	$\gamma_G = 1.00; \gamma_Q = 1.30$	$\gamma_{\varphi} = \gamma_c = 1.25$	

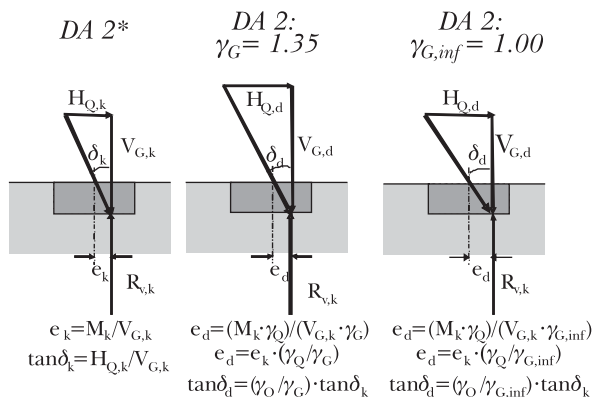


Fig. 6 – Calcolo della capacità portante con gli approcci DA 2 e DA2* in presenza di azioni variabili orizzontali.

Fig. 6 – Determination of the ground bearing resistance for a variable horizontal load in design approaches DA 2* and DA 2.

conseguentemente anche le dimensioni della fondazione risultano maggiori. Questo è particolarmente vero se il carico permanente viene assunto come favorevole e si deve utilizzare il fattore $\gamma_{G,inf} = 1$ invece del fattore $\gamma_G = 1.35$.

Ad un risultato analogo si perviene quando in aggiunta ai carichi verticale e orizzontale permanenti agisce il solo carico variabile verticale e il carico verticale permanente viene considerato come favorevole nell'approccio DA2. Come nel caso precedente, per il DA2* si ottiene:

$$e_k = M_k / (V_{G,k} + V_{Q,k})$$

$$\tan \delta_k = H_{G,k} / (V_{G,k} + V_{Q,k})$$

mentre, per il DA2 risulta:

$$e_d = M_k \cdot \gamma_G / (V_{G,k} \cdot \gamma_{G,inf} + V_{Q,k} \cdot \gamma_Q)$$

$$\tan \delta_d = H_{G,k} \cdot \gamma_G / (V_{G,k} \cdot \gamma_{G,inf} + V_{Q,k} \cdot \gamma_Q)$$

L'eccentricità, e_d , è maggiore di e_k se:

$$(V_{G,k} \cdot \gamma_{G,inf} / \gamma_G + V_{Q,k} \cdot \gamma_Q / \gamma_G) \leq (V_{G,k} + V_{Q,k})$$

$$V_{Q,k} \cdot \gamma_Q / \gamma_G - V_{Q,k} \leq V_{G,k} - V_{G,k} \cdot \gamma_{G,inf} / \gamma_G$$

$$0.11 \cdot V_{Q,k} \leq 0.26 \cdot V_{G,k}$$

$$V_{Q,k} \leq 2.36 V_{G,k}$$

In altri termini, fino a quando il carico verticale variabile $V_{Q,k}$ supera il carico permanente di un fattore 2.36 il valore di progetto dell'eccentricità risulterà uguale o maggiore del valore caratteristico e_k e la tangente δ_d risulterà maggiore o uguale alla $\tan \delta_k$.

Poiché ciò non accade nei casi applicativi, anche da questo risulta che l'approccio DA2 fornisce un dimensionamento più gravoso della fondazione rispetto al DA2*. Volendo pertanto riassumere i risultati ottenuti è quindi possibile concludere che in tutti i casi la fondazione progettata con il DA2 rispetto alla capacità portante risulterà sempre di dimensioni maggiori della corrispondente fondazione dimensionata secondo il DA2*.

D'altra parte si deve osservare che questa circostanza si verifica solo quando la sicurezza rispetto alla capacità portante è rilevante per il progetto della fondazione ed è legata al fatto che la resistenza del terreno dipende dai carichi agenti. Quando ciò non accade, come per il caso del dimensionamento dei pali, degli ancoraggi e delle palancole, i due approcci DA2 e DA2* forniscono lo stesso risultato. Ciò è quello che si verifica nel caso della sicurezza rispetto allo scorrimento sebbene anche in questo caso la resistenza allo scorrimento dipende dal carico verticale alla base della fondazione. In particolare i due approcci forniscono lo stesso risultato in quanto, come evidenziato nel paragrafo 4.2, il carico verticale permanente viene considerato come un carico favorevole nel DA2, sicché il fattore di sicurezza parziale vale $\gamma_{G,inf} = 1$. In questo caso dunque la resistenza allo scorrimento viene determinata con il valore caratteristico V_k dell'azione esattamente come risulta per l'approccio DA2*.

5. La scelta dell'approccio di progetto in Germania

Come il confronto fra gli approcci di progetto ha chiaramente dimostrato, l'approccio DA2* è il solo che consenta di conservare il livello di sicurezza tradizionalmente utilizzato per il progetto delle fondazioni dirette secondo il metodo del coefficiente di sicurezza globale. Al di là di altre importanti obiezioni di carattere teorico sugli altri approcci alla progettazione [WEIßENBACH, 1991 e 1998; SCHUPPENER *et al.*, 1998; WEIßENBACH *et al.*, 1999; e SCHUPPENER & VOGT 2005] è sostanzialmente per questo motivo che la commissione preposta alla normativa in Germania ha imposto l'uso dell'approccio DA2* per la verifica delle strutture di sostegno, delle fondazioni, dei pali e degli ancoraggi in DIN 1054 *Ground - Verification of the safety of earthworks and foundations* [2005].

Con la procedura adottata, in nessun caso risulta necessario distinguere fra azioni permanenti favorevoli e sfavorevoli, se non per il caso di gruppi di pali soggetti a trazione dove i carichi permanenti di compressione sono favorevoli e vanno fattorizzati con un coefficiente $\gamma_{G,inf} = 1$, mentre quelli permanenti di trazione sono sfavorevoli e si applica il fattore parziale $\gamma_G = 1.35$. Con l'eccezione dei casi esposti dunque, le azioni sfavorevoli permanenti e i loro effetti sono sempre considerati rilevanti per il progetto secondo il DA2*. I valori numerici dei fattori parziali indicati nella DIN 1054 sono gli stessi raccomandati dall'Annesso A dell'EC7-1 e riportati in tabella II. Gli stati limite di tipo geotecnico vengono denominati GEO-2 nell'annesso nazionale in quanto vengono verificati per mezzo dell'approccio di progetto DA2.

Per quanto riguarda la verifica di stabilità dei pendii viene invece adottato l'approccio di progetto DA3, DIN 1054 *Ground - Verification of the safety of earthworks and foundations (2005)*, in quanto molto simile al metodo del coefficiente di sicurezza globale da sempre impiegato. Il corrispondente "stato limite geotecnico" viene denominato GEO-3, ma in questo caso non vengono adottati i fattori parziali proposti nell'Annesso A dell'EC7-1. Invece, un fattore $\gamma_G=1$ è utilizzato per le azioni permanenti e un valore $\gamma_Q=1.3$ per quelle variabili, e i fattori parziali da applicare ai parametri geotecnici sono gli stessi di quelli previsti nell'Annesso A all'EC7-1 (Tab. II).

6. Sintesi conclusiva

In Germania la scelta dei fattori parziali e dell'approccio di progetto è stata condotta sulla base del principio di mantenere il livello di sicurezza implicito nell'uso del tradizionale e ben sperimentato metodo del coefficiente di sicurezza globale. Una progettazione eseguita in accordo all'EC7-1 dovrà condurre a opere di sostegno e di fondazione con dimensioni del tutto simili a quelle adottate in passato con la precedente normativa.

Per le verifiche di stabilità dei pendii nel DIN 1054 (2005) viene stabilito di utilizzare l'approccio DA3 che è molto simile al metodo di verifica secondo l'approccio del coefficiente di sicurezza globale. Per quanto riguarda le fondazioni dirette a trave rovescia il confronto fra i dimensionamenti di progetto dimostra che il livello di sicurezza che si aveva con il metodo del coefficiente globale può essere ottenuto solo utilizzando l'approccio di progetto DA2*, dove i fattori parziali vengono applicati al termine del calcolo, contestualmente alla verifica

della condizione di stato limite. Per questo motivo, in Germania, la DIN 1054 (2005) obbliga i progettisti ad adottare l'approccio DA2* nel progetto di muri di sostegno, fondazioni dirette, pali e ancoraggi.

Inoltre il confronto fra gli approcci dimostra che con l'approccio di progetto DA2* si ottiene un dimensionamento efficiente sotto il profilo dei costi delle fondazioni in accordo con il metodo di progetto delle fondazioni dirette adottato con successo da lungo tempo. Gli altri approcci di progetto conducono ad una fondazione diretta con una larghezza oltre il 40% maggiore di quella che si otteneva in precedenza. Di certo questo costituisce un motivo che dovrebbe spingere gli altri paesi ad adottare l'approccio di progetto DA2* nelle rispettive normative.

Bibliografia

- DIN 1054 (2005) – *Ground - Verification of the safety of earthworks and foundations*. Beuth Verlag, Berlin.
- Eurocode 7 (DIN EN 1997-1) (2005) – *Geotechnical Design, Part 1. General Rules*. Beuth-Verlag, Berlin.
- FRANK R., BAUDUIN C., DRISCOLL R., KAVVADAS M., KREBS OVESEN N., ORR T., SCHUPPENER B. (2004) – *Designers' Guide to EN 1997-1, Eurocode 7. Geotechnical design Part 1. General rules*, London, Thomas Telford.
- SCHUPPENER B., WALZ B., WEIßENBACH A., HOCKBERGHAUS K. (1998) – *EC7 – A critical review and a proposal for an improvement: a German perspective*. Ground Engineering, vol. XXXI, n. 10.
- SCHUPPENER B., VOGT N. (2005) – *Favourable and unfavourable actions in the verification of bearing capacity of footings*. Proceedings of International Workshop on Evaluation of Eurocode 7, Dublin, March-April 2005, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College Dublin.
- WEIßENBACH A. (1991) – *Diskussionsbeitrag zur Einführung des probabilistischen Sicherheitskonzeptes im Erd- und Grundbau*. Bautechnik 68 (1991) Heft 3, S. 73-83, Berlin, Ernst & Sohn.
- WEIßENBACH A. (1998) – *Umsetzung des Teilsicherheitskonzeptes im Erd- und Grundbau*. Bautechnik 75 (1998), Heft 9, S. 637-651, Berlin, Ernst & Sohn.
- WEIßENBACH A., GUDEHUS G., SCHUPPENER B. (1999) – *Vorschläge zur Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes in der Geotechnik*. Proposals for the partial safety factor concept in geotechnical engineering, geotechnik-Sonderheft 1999; geotechnik-special issue 1999, Essen, Verlag Glückauf VGE.