

Calcolo di paratie con la Circolare n.7 del C.S.LL.PP.

Le nuove norme tecniche per le costruzioni introdotte nel 2018 e la recente uscita della Circolare C.S.LL.PP. n.7, hanno cambiato anche la modalità di calcolo delle paratie, manufatti in cemento armato o acciaio utilizzati frequentemente per il sostegno di scavi o pendii. In questo documento tecnico si intende chiarire come cambia, nella pratica operativa, l'analisi e la verifica utilizzando un software di calcolo specifico.

Approcci e Combinazioni di calcolo in NTC 2018

Come è noto, la revisione delle norme tecniche del DM 17/01/2018 per le costruzioni nell'ambito geotecnico ha notevolmente semplificato le combinazioni di calcolo, mantenendo l'Approccio DA1, o Completo, basato sulla doppia famiglia STR+GEO, per le sole strutture ad alta interazione con il terreno.

In particolare l'**Approccio DA1** compare ora solo nelle verifiche di stabilità globale dei Pendii naturali [§6.3] e dei Fronti di scavo [§6.8], per le Paratie [§6.5.3.1.2] e per le Opere in sotterraneo [§6.7].

Per tutti gli altri tipi di opera, incluse tutte le fondazioni, si utilizza l'**Approccio DA2** con la combinazione A1+M1+R3. Le relative tabelle dei fattori parziali γ_R riportano infatti il solo valore R3.

Analisi di interazione terreno-struttura in NTC 2018

Le NTC 2018 affrontano la problematica, in precedenza mai affrontata, dell'interazione terreno-struttura. Se ne accenna in due punti: §6.2.4.1.3 e §6.5.3 di cui si riporta uno stralcio.

"6.2.4.1.3 Verifiche strutturali con l'analisi di interazione terreno-struttura

Le analisi finalizzate al dimensionamento strutturale nelle quali si consideri l'interazione terreno-struttura si eseguono con i valori caratteristici dei parametri geotecnici, amplificando l'effetto delle azioni con i coefficienti parziali del gruppo A1."

"6.5.3 Verifiche agli stati limite

Le verifiche eseguite mediante analisi di interazione terreno-struttura o con metodi semplificati devono sempre rispettare le condizioni di equilibrio e congruenza e la compatibilità con i criteri di resistenza del terreno. È necessario inoltre portare in conto la dipendenza della spinta dei terreni dallo spostamento dell'opera."

Con la normativa precedente (NTC 2008) i fattori parziali si applicavano alle azioni, o all'effetto delle azioni, ed ai parametri geotecnici. La variazione di questi ultimi comporta notoriamente varie problematiche, tra cui:

- Variazione delle spinte tra una combinazione e l'altra;
- Variazione delle rigidezze su sistemi non lineari;

- Necessità di ricalcolo in numerose famiglie.

Le NTC 2018, come riportato nel 6.2.4.1.3, consentono invece l'utilizzo dei valori caratteristici dei parametri geotecnici, amplificando a posteriori l'effetto delle azioni trovate. Il testo di quell'articolo è piuttosto stringato e non si trovano indicazioni di dettaglio su vari aspetti operativi, ad esempio su come applicare la fattorizzazione prevista.

Approcci di calcolo nella Circolare n.7

La Circolare C.S.LL.PP. n.7 del 21/01/2019, applicativa del D.M.17/01/2018, contiene considerazioni importanti per l'impiego appropriato dell'Approccio DA1 e degli stati limite STR e GEO.

In particolare, in §C6.2.4.1, viene specificato quanto segue.

"Le verifiche slu di tipo geotecnico (GEO) hanno lo scopo di garantire un adeguato margine di sicurezza nei riguardi della formazione di uno o più meccanismi di collasso del terreno, che eventualmente possono coinvolgere anche gli elementi strutturali. Il controllo si esercita mediante la fattorizzazione delle sole azioni variabili e dei parametri di resistenza nell'approccio DA1-C2 (A2+M2)."

*"Le verifiche slu di tipo strutturale (STR) sono verifiche locali di singole sezioni, nelle quali la sollecitazione dipende dalla rigidità del sistema. Una verifica di questo genere, per opere che interagiscano con il terreno, non può che scaturire da un'analisi d'interazione del sistema terreno-struttura, in cui svolge un ruolo preminente la rigidità di entrambi i componenti del sistema. Nello studio dell'interazione terreno-struttura effettuata con modelli costitutivi non lineari dei terreni, spesso utilizzati nelle analisi numeriche geotecniche, la rigidità del terreno dipende anche dalle caratteristiche di resistenza e sarebbe alterata in presenza di una loro fattorizzazione con coefficienti parziali. Inoltre, in tali analisi, la fattorizzazione dei soli parametri di resistenza modificherebbe il rapporto rigidità-resistenza del terreno alterando la distribuzione delle tensioni di contatto. **Per queste ragioni le analisi d'interazione devono pertanto essere effettuate senza alcuna fattorizzazione di questi parametri, impiegando quindi i loro valori caratteristici.** Anche la fattorizzazione dei carichi non è possibile in queste analisi poiché comporterebbe un'artificiosa alterazione delle condizioni di plasticizzazione del terreno e, conseguentemente, una irrealistica ridistribuzione delle tensioni di contatto. **Le analisi d'interazione devono essere svolte impiegando i valori caratteristici anche delle azioni. Il margine di sicurezza è poi introdotto fattorizzando opportunamente le sollecitazioni risultanti dall'analisi d'interazione.**"*

In questo articolo sono esplicitati sia degli approfondimenti al §6.2.4.1.3 che altre indicazioni. Ad esempio commenta espressamente le problematiche sulle conseguenze della fattorizzazione dei parametri geotecnici.

In riferimento specificatamente alle paratie §C6.5.3.1.2 viene evidenziato quanto segue.

*"Se le analisi sono svolte impiegando codici di calcolo automatico basati sulla discretizzazione del continuo (ad elementi finiti o alle differenze finite) o sui metodi della reazione di sottofondo ("metodi a molle"), **le verifiche SLU di tipo geotecnico e di tipo strutturale scaturiscono da una stessa analisi d'interazione terreno-struttura impiegando, ..., i valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni.**"*

*"Nella verifica nei confronti di meccanismi di rottura che coinvolgono il terreno (GEO), dopo la simulazione di tutte le fasi di scavo, il margine di sicurezza si ricava con un ulteriore passo di calcolo, finalizzato alla **ricerca di un meccanismo di collasso del terreno ed eventualmente nella struttura**, riducendo progressivamente i parametri di resistenza dopo aver incrementato le azioni permanenti non strutturali e le azioni variabili (sovraccarichi) dei coefficienti parziali (γ_{G2} , γ_Q) del gruppo A2."*

“La verifica allo stato limite ultimo nei confronti del raggiungimento della resistenza in una sezione della paratia o in uno degli elementi dell'eventuale sistema di vincoli (puntoni o ancoraggi) (STR) si esegue moltiplicando le sollecitazioni calcolate con l'analisi d'interazione ... per i coefficienti parziali del gruppo A1 (γ_{G1} , γ_{G2} , γ_Q)”.

La Circolare spiega dunque come condurre l'analisi d'interazione terreno-struttura per le paratie, utilizzando i valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni. Inoltre introduce, di fatto, una nuova verifica per lo stato limite GEO: la ricerca di un meccanismo di collasso del terreno.

Implementazione della Circolare n. 7 nel programma BulkCAD

Ora vedremo come sono state recepite le indicazioni della Circolare n.7 in un software dedicato esclusivamente alla verifica delle paratie in cemento armato o acciaio, chiamato Bulkcad di Concrete srl.

Il software permette di scegliere tra due modalità di calcolo distinte nella sezione di *Preferenze di normativa*:

- Con combinazioni di progetto DA1 (§6.5.3.1.2);
- Con combinazioni caratteristiche (secondo circolare §C6.5.3.1.2).

D.M. 17-01-18 (N.T.C.)

Generali | Parametri | Sisma | Verifiche geotecniche

Localizzazione
Padova, via della Pieve 19
Latitudine ED50 45,4055° (45° 24' 20")
Longitudine ED50 11,8836° (11° 53' 1")

Vita nominale (Tab.2.4.I) Opere ordinarie=50 (default)

Classe d'uso (Tab.2.4.II) II

Riepilogo degli stati limite considerati

Stato limite	Pvr(%)	Tr(anni)	Ag/g	Fo
SLD	63	50	0.0366	2.542
SLV	10	475	0.0819	2.639

Metodo di risoluzione FEM

Con combinazioni di progetto DA1 (§6.5.3.1.2)

Con combinazioni caratteristiche (secondo circolare §C6.5.3.1.2)

Ricerca meccanismo di collasso GEO (§C6.5.3.1.2)

Ricerca un meccanismo di collasso del terreno dopo tutte le fasi di scavo (cfr. NTC18 §C6.5.3.1.2).

OK Annulla

Nel primo caso il solutore ad elementi finiti risolve tutte le combinazioni di progetto generate secondo l'approccio progettuale DA1 delle N.T.C. In questa modalità i coefficienti parziali sono applicati direttamente ai parametri geotecnici ed alle azioni. Questa modalità di procedere è utilizzabile quando si desidera valutare il calcolo senza le espresse indicazioni della Circolare n.7.

Nel secondo caso il solutore ad elementi finiti risolve invece delle combinazioni che considerano i valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni, per ricavare da queste le sollecitazioni e gli spostamenti di progetto combinando i risultati secondo la fattorizzazione prescritta in normativa. Questa modalità di procedere è quella indicata nella Circolare n.7 al capitolo C6.5.3.1.2.

Spuntando la casella *Ricerca meccanismo di collasso GEO* vengono inoltre risolte delle combinazioni aggiuntive per la ricerca di un meccanismo di collasso del terreno (GEO) dopo tutte le fasi di scavo, come richiesto dalla circolare esplicativa sempre al § C6.5.3.1.2. Si è deciso di rendere questa analisi opzionale a discrezione del progettista che desidera applicare in modo stringente i dettami della Circolare n.7.

La verifica al meccanismo di collasso GEO è, come già detto, condotta seguendo pedissequamente la Circolare n.7. Tuttavia, il testo non fornisce indicazioni su due aspetti:

- cosa si intenda per collasso;
- come variare i γ_M nella ricerca del collasso.

In Bulkcad quindi si considera come spostamento limite indicatore di collasso quello sufficiente a mobilitare per intero la resistenza passiva in un terreno sciolto per rotazione in testa (cfr. Eurocodice 7 allegato C), e quindi uno spostamento nodale massimo $U_{X_{Max}}=25\%H$ e/o rotazione massima $\theta=15^\circ$.

In relazione alla variazione dei γ_M per la ricerca del collasso si sono adottati dei criteri in modo da far variare proporzionalmente tra loro i tre tipi di fattori parziali del gruppo M2 ($\gamma_{M\phi}$, γ_{Mc} e γ_{Mc_u}).

Conclusioni

Con l'introduzione delle NTC 2018 il legislatore ha ricercato la semplificazione nel calcolo delle opere geotecniche a bassa interazione terreno-struttura (ad esempio fondazioni superficiali e profonde di edifici o muri di sostegno). Per le paratie, ovvero strutture ad alta interazione, è rimasto l'impianto della precedente norma (NTC 2008) con l'onere però di eseguire il calcolo di interazione terreno-struttura con nuova verifica del meccanismo di collasso GEO. L'entrata in vigore della Circolare esplicativa n.7 ha chiarito alcuni punti importanti lasciando purtroppo, per questo genere di strutture, ancora qualche aspetto incerto.

Padova, 4 marzo 2019