

Works governed by soil-structure interaction: the USL design

Opere governate dall'interazione terreno-struttura: il progetto allo SLU

G. Scarpelli¹, V.M.E. Fruzzetti¹, P. Ruggeri¹

¹ *Dipartimento SIMAU, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia*

ABSTRACT: A systematic revision of Eurocodes aimed at improving and simplifying the practice of engineering design is currently underway. Meanwhile, after almost ten years of application, Italy is revising its National Building Code and a general tendency is prevailing that is to prescribe a single design approach for the analysis of geotechnical structures. In most cases, Design Approach 2 is preferred to Design Approach 1, essentially for the benefit of reducing the number of verifications and the similarities with the familiar global safety factor concept. This paper highlights the technical impoverishment implied by such trends especially when soil-structure interaction governs design. / È attualmente in corso un processo di revisione sistematica degli Eurocodici con l'obiettivo di pervenire anche ad una loro semplificazione. Contestualmente, con procedimento autonomo ma correlato, l'Italia sta provvedendo alla revisione della normativa tecnica nazionale e della circolare applicativa; la generale tendenza che si osserva nei lavori preparatori è quella di scegliere un unico approccio progettuale per la verifica delle opere di ingegneria geotecnica tendendo a privilegiare l'Approccio 2 e riducendo al minimo la possibilità d'uso dell'Approccio 1. Tale scelta sembra motivata sia dalla volontà di ridurre gli oneri computazionali - dato che l'Approccio 1 comporta l'esecuzione di due distinte verifiche - sia dalla maggiore affinità dell'Approccio 2 con il metodo più familiare del coefficiente globale di sicurezza. In questa nota si intende mettere in luce l'impoverimento tecnico che tale indirizzo comporta, specialmente nei casi in cui il dimensionamento dell'opera è governato dall'interazione terreno-struttura.

KEYWORDS: Eurocode 7; design approaches; soil-structure interaction / Eurocodice 7, approcci progettuali; interazione terreno-struttura.

1 INTRODUZIONE

È attualmente in corso un processo di revisione sistematica degli Eurocodici, che dovrebbe concludersi nel 2020, con l'esplicito obiettivo di armonizzare e semplificare l'attuale impianto della Norma e di rendere più economico e sostenibile il processo costruttivo nei paesi membri della Comunità. Contestualmente, e con tempi più stringenti, l'Italia sta provvedendo all'approvazione della revisione delle norme tecniche nazionali e della relativa circolare applicativa. I due procedimenti, formalmente autonomi, dovrebbero condurre a risultati coerenti.

In questa nota si vuole discutere di un aspetto della revisione in corso della normativa italiana che, per la progettazione geotecnica, va nella direzione di indicare un unico approccio di verifica in luogo dell'attuale possibilità di scelta tra più approcci a discrezione del progettista. In sostanza nella norma italiana ci si sta orientando per l'utilizzo generalizzato dell'Approccio 2, salvo casi particolari (come le paratie e le gallerie) per i quali è indicato il solo Approccio 1, anche se con modalità applicative non pienamente in linea con l'Eurocodice 7. La prefe-

renza per l'Approccio 2 è probabilmente legata alla maggiore affinità di tale impostazione con il tradizionale metodo del coefficiente globale di sicurezza, nonché al fatto che l'Approccio 2 prevede un'unica verifica, mentre l'Approccio 1 richiede sempre l'esecuzione di due verifiche distinte. Tale orientamento sembra recepire le diffuse critiche mosse da tempo ai nuovi codici secondo cui l'uso di procedure troppo articolate rischia di far perdere quella sensibilità sulla "misura della sicurezza" acquisita dai progettisti attraverso l'uso del coefficiente globale. Pur ritenendo sicuramente condivisibile che l'operazione di revisione, sia europea che nazionale, miri ad una semplificazione dell'intera impalcatura normativa, eliminando quelle fonti di incertezza ed ambiguità connesse alla possibilità di usare approcci alternativi, si vuole porre l'accento sul fatto che l'Approccio 1 è un approccio più completo, che consente di valutare la sicurezza dell'opera da più punti di vista (Simpson, 2007). Viceversa l'unica combinazione prevista dall'Approccio 2 non sempre riesce ad evidenziare le criticità presenti in sistemi complessi, specialmente quando l'interazione terreno-struttura governa il comportamento del sistema. In alcuni

Paesi, fra questi anche l'Italia, si è diffusa l'opinione che per i problemi governati dall'interazione terreno-struttura l'Approccio 1 sia inapplicabile poiché condurrebbe a dimensionamenti fuori misura degli elementi strutturali. La presente nota pone in evidenza i risvolti positivi dell'applicazione dell'Approccio 1 fra cui la maggiore consapevolezza del progettista dei margini rispetto a condizioni di fallimento geotecnico e strutturale.

2 LA NORMATIVA TECNICA

2.1 Il contesto europeo: l'Eurocodice 7

Il Comitato Europeo per la Standardizzazione (CEN), ha emanato un complesso di norme, denominate Eurocodici, con l'obiettivo di armonizzare la normativa tecnica sulle costruzioni nei paesi membri, al fine di rendere effettiva la liberalizzazione nell'esercizio della professione dell'ingegnere e nell'industria delle costruzioni. La filosofia adottata dalla norma è quella del progetto agli stati limite (LSD), che corrisponde ad individuare possibili scenari di progetto con la rispettiva probabilità di accadimento in un predefinito periodo temporale, e nel verificare il comportamento dell'opera in tali situazioni, in termini di capacità resistente e di comportamento esibito. In questo contesto, ogni singola causa di incertezza, sulle azioni, sugli effetti delle azioni, sulle caratteristiche dei materiali, sulle resistenze o sugli schemi di calcolo, viene pesata con un apposito coefficiente, detto appunto coefficiente di sicurezza parziale, il cui valore è proporzionato al grado di incertezza attribuibile al parametro preso in esame e al peso che ogni singolo parametro ha sulla probabilità di fallimento dell'opera.

La progettazione geotecnica è trattata nell'Eurocodice 7 (CEN 2004 - EN1997-1) secondo schemi che all'atto pratico sono risultati piuttosto complessi e che sono la conseguenza della volontà di integrare esigenze anche contrastanti dei diversi paesi europei per salvaguardare le consuetudini progettuali nazionali; il testo vigente prevede infatti tre diversi approcci progettuali alternativi, mentre la prima versione, quella provvisoria (ENV 1997-1), prevedeva un unico approccio progettuale, sostanzialmente coincidente con quello che è oggi indicato come Approccio 1.

Prendendo in considerazione il superamento della resistenza limite o l'eccesso di deformazione negli elementi strutturali (stato limite ultimo tipo STR) e il superamento della resistenza limite o eccesso di deformazione del terreno (stato limite ultimo tipo GEO), le verifiche di sicurezza vengono condotte controllando che gli "Effetti delle azioni di progetto" (E_d) risultino minori, o al più uguali, alle "Resistenze di progetto" (R_d), secondo la disuguaglianza:

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

con:

$$E_d = E(\gamma_F F_k, X_k/\gamma_M, a_d) \quad (2.a)$$

$$E_d = \gamma_E E(F_k, X_k/\gamma_M, a_d) \quad (2.b)$$

$$R_d = R(\gamma_F F_k, X_k/\gamma_M, a_d) / \gamma_R \quad (3)$$

F_k	azioni di progetto caratteristiche
X_k	valori caratteristici dei parametri geotecnici
a_d	geometria di progetto
γ_F	coefficienti parziali sulle azioni
γ_E	coefficienti parziali per gli effetti delle azioni
γ_M	coefficiente parziali per i materiali
γ_R	coefficienti parziali per le resistenze

La (2.a) e la (2.b) mostrano che gli effetti delle azioni di progetto (E_d) possono essere calcolati applicando il coefficiente di sicurezza parziale, o direttamente sulle azioni (γ_F) o sull'effetto delle azioni (γ_E). La disuguaglianza (1) può essere soddisfatta seguendo differenti approcci di progetto, cioè applicando diverse combinazioni dei coefficienti parziali al valore caratteristico delle azioni, γ_F (o agli effetti delle azioni, γ_E), ai parametri del terreno, γ_M e alla resistenza, γ_R . Nella vigente versione i tre approcci prevedono la combinazione ("+") tra azioni (A), materiali (M) e resistenze (R) con le modalità sintetizzate nella Tabella 1. È utile sottolineare che l'impiego di fattori parziali uguali sulle azioni e sugli effetti delle azioni implica l'assunzione di una relazione lineare tra azioni ed effetti delle azioni, ipotesi questa che non sempre corrisponde un margine di sicurezza omogeneo nei vari casi. A questo proposito, EN 1990 "Basis of structural design" (CEN 2002 - EN1990) prevede che quando l'effetto dell'azione cresce più rapidamente dell'azione il coefficiente parziale sia applicato sull'azione; viceversa, se l'effetto dell'azione cresce meno rapidamente dell'azione il coefficiente parziale sia applicato all'effetto dell'azione.

È importante ricordare che una nota al comma 2.4.2 dell'Eurocodice 7 prevede che azioni favorevoli e sfavorevoli attribuibili ad una stessa causa possono essere combinate in un'unica azione alla quale applicare un solo fattore parziale.

Una lettura razionale dei diversi approcci progettuali previsti dalla norma rende possibile classificarli secondo due grandi famiglie:

- metodi LRFD (*load resistance factor design*) in cui i coefficienti parziali sono applicati alle azioni e alle resistenze;
- metodi MFD (*material factor design*) in cui i coefficienti parziali sono applicati ai materiali.

L'Approccio 2, che applica i coefficienti parziali alle azioni e alle resistenze, è tipicamente riconosciuto come un metodo LRFD, mentre l'Approccio 3, che fattorizza solo le azioni provenienti dalle strutture ed i parametri di resistenza del terreno è fondamentalmente un metodo MFD (Schuppener et al., 2009).

L'Approccio 1 include due combinazioni, DA1-1 e DA1-2. Per i pali sottoposti a carichi assiali e per gli ancoraggi DA1 è sempre un metodo LRFD. Per ogni altra opera geotecnica DA1-1 è un particolare caso di LRFD in cui i coefficienti parziali sono applicati alle sole azioni, mentre DA1-2 è un MFD.

I valori numerici dei coefficienti parziali dell'Eurocodice 7 sono stati, almeno inizialmente, calibrati con l'obiettivo di raggiungere una determinata, accettabile ed uniforme affidabilità ("reliability") delle costruzioni. Per gli Eurocodici, si è fatto riferimento al valore di affidabilità β pari a 3.8, che corrisponde alla probabilità di fallimento di $7.2 \cdot 10^{-5}$ in 50 anni (CEN 2002 - EN 1990 Annex C6(1); Calgaro, 2011). Negli anni tale criterio "statisticamente basato" sembra essere stato in buona parte disatteso. Molti Paesi hanno infatti accettato la normativa comunitaria solo a patto di ottenere dimensionamenti delle opere paragonabili a quelli delle rispettive norme nazionali, che per decenni avevano garantito livelli di sicurezza e costi delle opere sostenibili. Questo è stato sicuramente il principio seguito

dall'Italia nella formulazione delle NTC (2008), ma anche dalla Germania, come riportato esplicitamente da Schuppener e Heidaum (2011), i quali ricordano che la tradizione tedesca in tema di norme di ingegneria geotecnica risale al 1934, anno di pubblicazione della prima edizione delle DIN 1054.

2.2 La normativa italiana vigente: NTC 2008

Le NTC 2008 forniscono il quadro tecnico-normativo cogente in Italia per la progettazione delle opere di ingegneria civile; seppure redatte in coerenza con gli Eurocodici non ne possono però rappresentare il formale recepimento.

Infatti, malgrado la pubblicazione degli Annessi Nazionali (DM 31-07-2012), in Italia ci si può riferire agli Eurocodici come pure ad altri documenti tecnici di comprovata validità, solo per gli aspetti non trattati dalla norma nazionale. Da una recente analisi ricognitiva a livello europeo risulta che solo in Italia e in Austria l'Eurocodice non sia direttamente applicabile.

Table 1. Partial factors according to Eurocode 7 for any Design Approach / Coefficienti parziali distinti secondo i diversi approcci progettuali dell'Eurodice 7

		Approccio progettuale 1				Approccio progettuale 2			Approccio progettuale 3						
		DA1-1		DA1-2		DA2			DA3						
		(A1+M1+R1)		(A2+M2 ^(x) +R1/R4)		(A1+M1+R2)			(A1/A2 ^(*) +M2+R3)						
		A1	M1	R1	A2	M2 ^(x)	R1/R4	A1	M1	R2	A1	A2	M2	R3	
AZIONI (A)	Permanente fav.	1			1			1			1	1			
	Permanente sfav.	1,3			1			1,35			1,35	1			
		5													
	Variabile fav.	0			0			0			0	0			
	Variabile sfav.	1,5			1,3			1,5			1,5	1,3			
PARAMETRI GEOTECNICI (M)	$\tan \phi'$		1			1,25			1				1,25		
	c'		1			1,25			1				1,25		
	c_u		1			1,4			1				1,4		
RESISTENZE (R)															
Fondaz. dirette	Cap. portante			1			1			1,4				1	
	Scorrimento			1			1			1,1				1	
Fondaz. prof.	Pali infissi	Resist base		1			1,3			1,1				1	
		Resist lat in compr		1			1,3			1,1				1	
		Resist tot		1			1,3				1,1			1	
		Resist lat in traz.			1,25			1,6			1,15				1,1
	Pali trivellati	Resist base		1,25			1,6				1,1				1
		Resist lat in compr		1			1,3				1,1				1
		Resist tot		1,15			1,5				1,1				1
		Resist lat in traz.		1,25			1,6				1,15				1,1
	Pali elica continua	Resist base		1,1			1,45				1,1				1
		Resist lat in compr		1			1,3				1,1				1
		Resist tot		1,1			1,4				1,1				1
		Resist lat in traz.		1,25			1,6				1,15				1,1
Op. di sostegno	Capacità portante		1			1				1,4				1	
	Scorrimento		1			1				1,1				1	
	Res. a valle		1			1				1,4				1	
Tiranti	Temporanei		1,1			1,1				1,1				1	
	Permanenti		1,1			1,1				1,1				1	
Stab. generale	Resist. terreno		1			1				1,1				1	

A1-A2 coeff. parziali sulle azioni, M1-M2 coeff. parziali sui par. geotecnici, R1-R2-R3 coeff. parziali sulle resistenze; R4 coeff. parziali sulle resistenze per pali caricati assialmente ed ancoraggi, (x) per pali ed ancoraggi si applicano i coeff. parziali M1 (a meno di specifiche situazioni), (*) A1 per azioni strutturali; A2 per azioni che provengono dal terreno

La progettazione geotecnica, secondo le NTC 2008 può essere svolta, per alcune opere, indifferentemente sia con l'Approccio 1 che con l'Approccio 2, mentre l'Approccio 3 non è contemplato per nessuna circostanza. Per alcune opere (ancoraggi e paratie)

viene invece indicato un unico approccio progettuale o addirittura un'unica combinazione di verifica (stabilità generale). In Tabella 2 è presentata una sintesi dei diversi coefficienti parziali indicati dalla norma italiana.

Table 2. Partial factors for design approaches allowed by Italian National Building Code (NTC2008) / Coefficienti parziali distinti secondo gli approcci progettuali consentiti dalle NTC 2008

		Approccio progettuale 1					Approccio progettuale 2				
		DA1-1			DA1-2		DA2				
		(A1+M1+R1)			(A2+M2 ^(x) +R2)		(A1+M1+R3)				
		A1	M1	R1	A2	M2 ^(x)	R2	A1	M1	R3	
AZIONI (A)	Permanente fav.	1			1			1			
	Permanente sfav.	1,3			1			1,3			
	Variabile fav.	0			0			0			
	Variabile sfav.	1,5			1,3			1,5			
PARAMETRI GEOTECNICI (M)	tan ϕ'		1			1,25			1		
	c'		1			1,25			1		
	c_u		1			1,4			1		
RESISTENZE (R)											
Fondaz. dirette	Stab globale						1,1			-	
	Cap. portante			1			1,8			2,3	
	Scorrimento			1			2,3			1,1	
Fondaz. profonde	Stab. globale						1,1			-	
	Carichi trasversali			1			1,6			1,3	
	Pali infissi	Resist base			1			1,45			1,15
		Resist lat in compr			1			1,45			1,15
		Resist tot			1			1,45			1,15
		Resist lat in traz.			1			1,6			1,15
	Pali trivellati	Resist base			1			1,7			1,35
		Resist lat in compr			1			1,45			1,15
		Resist tot			1,15			1,6			1,3
		Resist lat in traz.			1,25			1,6			1,25
	Pali elica continua	Resist base			1,1			1,6			1,3
		Resist lat in compr			1			1,45			1,15
		Resist tot			1,1			1,55			1,25
		Resist lat in traz.			1,25			1,6			1,25
	Op. di sostegno	Stab globale						1,1			-
		Muri di sostegno	Capacità portante			1		1			1,4
Scorrimento					1			1			1,1
Res. a valle					1			1			1,4
Paratie	Altre verifiche			1		1			-		
Tiranti	Temporanei									1,1	
	Permanenti									1,2	
Opere mat.sciolti	Resist. terreno						1,1			-	

A1-A2 coefficienti parziali sulle azioni, M1-M2 coefficienti parziali sui parametri geotecnici, R1-R2-R3 coefficienti parziali sulle resistenze (x) per pali ed ancoraggi si applicano i coefficienti parziali M1

3 PALI SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI E OPERE DI SOSTEGNO

I pali ai carichi trasversali sono un noto tema in cui l'interazione terreno-struttura gioca un ruolo importante ed il cui progetto geotecnico non può prescindere dalla resistenza strutturale del palo. L'Eurocodice 7 sul tema non fornisce molte indicazioni, né sono suggeriti valori per i coefficienti parziali da applicare. La norma europea rimanda agli approcci fondamentali e si limita a suggerire di considerare due meccanismi di collasso, per pali corti o pali lunghi. Il riferimento concettuale del normatore sembra essere quindi la ben nota teoria di Broms (1964), di oltre 50 anni fa. La teoria costituisce un riferimento largamente seguito dalla comunità geotecnica, accademica e professionale; in questo esem-

pio, la tipologia del cinematismo critico, meccanismo di palo corto, intermedio o lungo, quindi il valore del carico trasversale limite, dipendono esplicitamente dalla resistenza strutturale del palo. I codici di calcolo numerico oggi disponibili (sia agli elementi finiti che con curve di trasferimento tipo p-y) permettono di non utilizzare gli abachi di Broms, ma rimane fondamentale il concetto che la resistenza strutturale influenza anche il carico limite geotecnico. Più in generale, il legame fra capacità strutturale e geotecnica esiste per qualunque opera di fondazione. Pensiamo ad una fondazione diretta con trave a T rovescia: il carico limite geotecnico, valutato sulla sezione trasversale della trave, ha senso solo se la trave ha una resistenza sufficiente a mobilitare la

massima reazione per tutta la sua lunghezza prima di raggiungere il collasso strutturale.

Tornando ai carichi trasversali, la mancanza nell'Eurocodice 7 di indicazioni sui fattori parziali sulle resistenze per pali caricati trasversalmente, rende inapplicabile l'Approccio 2, mentre sono teoricamente applicabili l'Approccio 1 e 3. Se l'azione orizzontale proviene dal terreno, l'Approccio 3 coincide con la combinazione DA1-2, se invece si tratta di azioni orizzontali di diversa provenienza, l'Approccio 3 fornisce risultati diversi. C'è da notare che mentre per i pali soggetti a carico assiale l'Eurocodice 7 indica l'applicazione di coefficienti parziali M1 anche nella combinazione DA1-2, niente viene specificato per i pali soggetti a carico trasversale. Questo sembra condurre all'uso di coefficienti parziali M2 per la combinazione DA1-2, come è prescritto per le paratie sia dall'Eurocodice 7 che dalle NTC. D'altra parte i meccanismi di rottura di

Broms chiamano in causa la resistenza passiva del terreno e, in molte circostanze, l'analisi di pali soggetti a carico orizzontale è molto simile a quella che si deve eseguire per le paratie. Pensiamo ad esempio ad una piastra utilizzata come elemento di contrasto di un'opera di sostegno. Se tale elemento venisse realizzato con pali corti ad interasse ravvicinato, il funzionamento geotecnico sarebbe molto simile a quello di una paratia. Analogamente, una paratia di contrasto strutturalmente debole sarebbe equivalente allo schema di Broms a pali lunghi (vedi Figura 2). Sembrerebbe quindi logico e coerente utilizzare, per il progetto di pali a carichi orizzontali, metodi MFD. Secondo le NTC 2008, invece, la progettazione dei pali ai carichi orizzontali, che può avvenire sia utilizzando l'Approccio 1 che Approccio 2 con parametri geotecnici in ogni caso non fattorizzati (M1), si differenzia in maniera sostanziale da quella delle paratie.

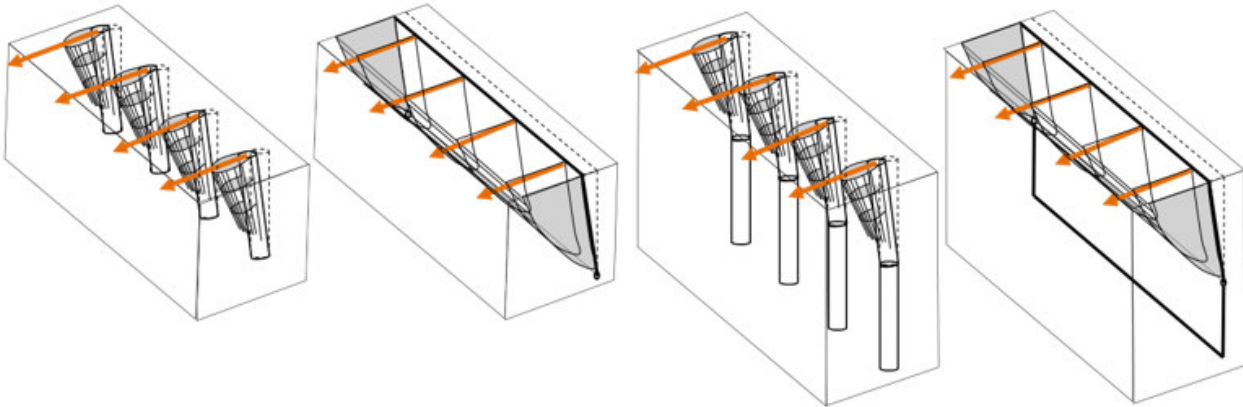


Figure 2. Comparison among failure mechanisms of piles under transversal loads and retaining walls: without (left) and with structural failure (right) / Confronto tra i cinematismi critici di pali a carichi orizzontali e paratie: senza rottura strutturale (a sx) e con rottura strutturale (a dx)

e paratie sono opere di sostegno flessibili per le quali l'equilibrio è assicurato principalmente dalla resistenza del volume di terreno posto innanzi l'opera e da eventuali ancoraggi e puntoni. In linea generale sono opere iperstatiche e pertanto l'interazione terreno-struttura gioca un ruolo importante nel definire le sollecitazioni e la sicurezza dell'opera. L'analisi statica delle paratie si esegue con ipotesi semplificative che permettono di rendere isostatica la struttura così da dimensionarla tramite semplici equazioni di equilibrio. È opportuno sottolineare che i risultati ottenuti con il noto metodo dell'estremo libero sono significativi quando la lunghezza della paratia è la minima sufficiente all'equilibrio, ovvero in una configurazione geometrica che rispetti equilibrio e congruenza. Viceversa se la lunghezza di infissione è superiore al minimo è necessario fare un'ipotesi anche sulla distribuzione degli sforzi orizzontali, assumendo che la resistenza passiva non sia integralmente mobilitata; in questo caso, se permane l'ipotesi di distribuzione triangolare degli sforzi orizzontali, i risultati sono approssimati e funzione delle rigidità relative paratia-terreno (Rowe, 1952).

Il confronto tra i dimensionamenti ottenuti con i diversi approcci dell'Eurocodice 7, utilizzando il

metodo dell'estremo libero, è ampiamente discusso in letteratura (Bond ed Harris, 2008; Bond et al., 2013). In particolare, il confronto tra le sollecitazioni ottenute dalle due combinazioni dell'Approccio 1, almeno per le paratie mono-ancorate, fornisce risultati simili, a patto di eseguire i calcoli sempre con la lunghezza minima di equilibrio per ogni combinazione considerata. La variazione della geometria del modello di analisi al variare delle combinazioni analizzate pone però alcune difficoltà. Chi si oppone a queste modalità applicative della norma rileva che la variazione dello schema geometrico è una complicazione non necessaria, considerando il diffuso utilizzo di codici numerici in grado di considerare esplicitamente l'interazione terreno struttura, stimare le resistenze del terreno effettivamente mobilitate e mantenere fissa la geometria dell'opera.

Le NTC2008 prevedono per l'analisi delle paratie l'impiego del solo Approccio 1, con lo svolgimento di due analisi, una per la combinazione DA1-1 ed una per la combinazione DA1-2, prescindendo dal metodo di calcolo utilizzato, che si tratti di quelli semplificati come il metodo dell'estremo libero o di strumenti numerici sofisticati. Nei due scenari considerati si deve verificare che per l'opera esistano

tutti i margini richiesti, sia per gli SLU strutturali sia per quelli geotecnici. La circolare applicativa sembra però suggerire di utilizzare per il dimensionamento strutturale le sollecitazioni provenienti dalla sola combinazione DA1-1 (indicata in NTC2008 anche come combinazione STR). Tale indicazione sarebbe giustificata da una presunta non significatività delle sollecitazioni provenienti dalla combinazione DA1-2 (che prevede la fattorizzazione dei parametri di resistenza del terreno) specialmente nel caso di utilizzo di codici numerici di calcolo che tengono conto dell'interazione terreno struttura. Tale concetto viene ulteriormente rafforzato nella bozza di revisione della normativa italiana. Infatti, in tale documento, è stato introdotto un paragrafo nel quale si afferma che *“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”*. Ne risulta pertanto che le sollecitazioni di progetto saranno funzione del metodo di calcolo utilizzato: se si useranno metodi semplici (come l'equilibrio limite) la sollecitazione di progetto è la più gravosa tra le due combinazioni dell'Approccio 1, se si utilizzeranno metodi più sofisticati (metodi numerici, FEM, FD, modello a molle equivalenti) si farà riferimento alla sola sollecitazione proveniente dalla combinazione DA1-1.

L'esperienza maturata dagli scriventi attraverso l'analisi di opere di sostegno flessibili in molti casi applicativi, almeno per il caso di paratie mono ancorate, non indica affatto l'esistenza di una tale problematica; al contrario le caratteristiche di sollecitazione ed i tiri all'ancoraggio che derivano dalle due combinazioni dell'Approccio 1 sono sempre risultati tra loro paragonabili. Le varie condizioni al contorno, specialmente l'entità dei sovraccarichi di superficie e le caratteristiche stratigrafiche dei terreni, rendono a volte dimensionante la combinazione DA1-1 e a volte la combinazione DA1-2. Nel rispetto dei principi progettuali sanciti dall'Eurocodice 7, il progetto appare così, analizzato e valutato da più punti di vista, con un arricchimento della consapevolezza del progettista sugli effetti dello sbilanciamento delle azioni o della incertezza sulle caratteristiche geotecniche.

La presunta non significatività delle sollecitazioni strutturali risultanti dall'impiego della combinazione DA1-2 è motivata assimilando in modo riduttivo i metodi MFD a verifiche meramente geotecniche, analoghe alle verifiche di stabilità generale che si conducono per le opere sui pendii, e pertanto non utilizzabili per la valutazione delle sollecitazioni nelle strutture. Tale punto di vista, oltre a non essere condivisibile, non è neanche in accordo con l'Eurocodice 7 che infatti in nessun modo indica di non considerare le sollecitazioni provenienti da analisi tipo MFD; al contrario prevede il dimensiona-

mento delle paratie e di tutte le altre strutture geotecniche anche con l'Approccio 3, che ha un'unica combinazione di tipo MFD da cui ovviamente è necessario ricavare anche le sollecitazioni strutturali. Verifiche di progetto delle opere e verifiche di stabilità generale non sono ovviamente la stessa cosa. La verifica di stabilità generale riguarda la ricerca di possibili meccanismi di rottura che coinvolgono l'opera geotecnica ma che possono essere determinati da condizioni morfologiche e geotecniche che prescindono dall'opera; niente a che vedere con le verifiche della combinazione DA1-2, che invece indaga su possibili condizioni di stato limite ultimo conseguenti alla sua realizzazione. Inoltre, se uno Stato Limite Ultimo è la rappresentazione di uno scenario estremo, da non superare, è implicito che la capacità strutturale deve essere compatibile con la domanda di resistenza che risulta per ogni specifico scenario. Analizzando la questione in questi termini risulta addirittura agevole un capovolgimento di prospettiva: non solo nel DA1-2 è necessario verificare che la resistenza delle strutture sia adeguata, ma anche nelle verifiche di stabilità generale può essere necessario verificare la compatibilità delle sollecitazioni risultanti sulle strutture. Prendiamo in esame un caso in cui la presenza delle strutture modifica il cinematismo critico geotecnico di instabilità generale. Ad esempio, una paratia molto più lunga dello stretto necessario per l'equilibrio alla rotazione (situazione tipica di opere di contenimento dimensionate nei confronti di possibili fenomeni di filtrazione monte-valle). Può la stabilità generale essere valutata solo su cinematismi che coinvolgono l'intera paratia senza valutare l'instabilità che si potrebbe originare da un cinematismo meno profondo e che “attraversi” la paratia? Se l'esempio apparisse poco significativo in termini di conseguenze sul dimensionamento dell'opera, pensiamo allora a due opere di sostegno, apparentemente piuttosto diverse, ma che assolvono al medesimo compito, una paratia mono-ancorata ed una terra rinforzata. Nella visione delle NTC2008 la paratia mono-ancorata sembrerebbe poter essere dimensionata in termini di approfondimento con la combinazione DA1-2 e in termini di momento sollecitante con il solo DA1-1. Viceversa nel progetto della terra rinforzata non è così facile distinguere le verifiche strutturali da quelle geotecniche in quanto gli elementi strutturali sono collocati appositamente e dimensionati proprio per evitare lo sviluppo dei cinematismi geotecniche. L'analisi di tale opera, piuttosto chiara all'ingegnere libero professionista, ma non codificata né in sede di Eurocodice, né in sede di NTC2008, prevede l'esecuzione di verifiche di stabilità interna, stabilità esterna e resistenza degli elementi di ancoraggio. Come eseguirle? Appare naturale applicare l'Approccio 1. Si avrebbero infatti due scenari, rappresentati dalle combinazioni DA1-1 e DA1-2 ed in ambedue gli scenari devono essere soddisfatte le verifiche struttu-

rali (paramento, geo griglie) e geotecniche (verifiche interne - sfilamento geo griglie, verifiche esterne - scorrimento, carico limite).

Con queste semplici considerazioni si intende affermare che è possibile individuare diverse tipologie di opere di sostegno in cui diviene progressivamente più difficile distinguere azioni e resistenze, verifiche strutturali da verifiche geotecniche. Pensiamo al grado di interazione terreno-struttura crescente che

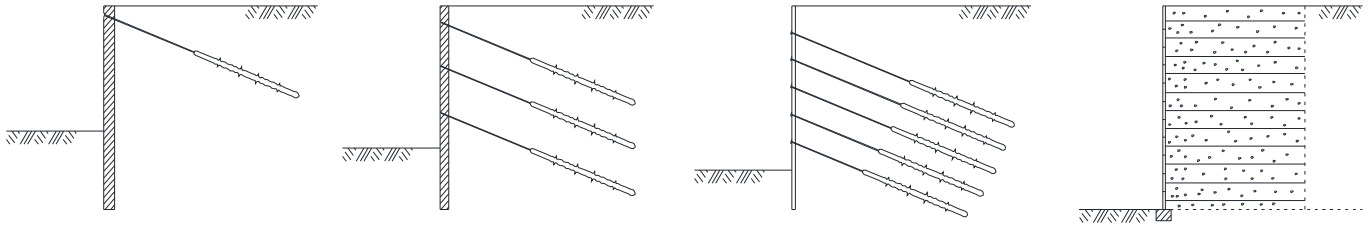


Figure 3. Earth Retaining systems with increasing soil-structure interaction /Opere di sostegno a livello crescente di interazione terreno-struttura

4 GALLERIE

Da ultimo si vuole trattare il caso delle gallerie, tipicamente un problema di interazione terreno-struttura, la cui progettazione non è considerata esplicitamente dagli Eurocodici e solo in parte sviluppata nelle NTC 2008. Nella prassi progettuale corrente il dimensionamento si svolge con l'uso di metodi empirici o con analisi bi-dimensionali distinguendo nettamente due problemi: la stabilità del fronte e la stabilità del cavo. La stabilità del fronte è un problema strettamente geotecnico, che può essere affrontato riferendosi al capitolo delle opere in materiali sciolti e fronti di scavo e pertanto analizzato in termini di stabilità generale, anche se qualche approfondimento meriterebbe la questione del dimensionamento dei consolidamenti del nucleo. In tal senso sono quindi applicabili i metodi all'equilibrio limite (vedi, tra gli altri, [Anagnostou e Kovari, 1996](#)) e/o i metodi agli elementi finiti.

Il progetto del rivestimento è sostanzialmente un problema di interazione terreno-struttura che viene trattato in analogia alle opere di sostegno flessibili pluritirate. Ciò significa che la resistenza e la rigidità sia del terreno che della struttura influenzano la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni e quindi la sicurezza della galleria. Di conseguenza, per eseguire in modo appropriato tali analisi, si ricorre a codici numerici di calcolo (modelli a molle equivalenti o modelli agli elementi finiti). L'utilizzo dei codici numerici di calcolo per le verifiche di sicurezza geotecnica e la modalità di implementazione degli approcci di verifica in tali situazioni è ancora oggetto di dibattito, specialmente per quanto riguarda le verifiche di sicurezza ([Walter, 2006](#); [Schweiger et al., 2010](#)). La questione riguarda principalmente il fatto che il terreno è causa delle azioni principali ma anche sede della resistenza. Inoltre la resistenza del terreno ha natura sostanzialmente attritiva ed il comportamento è fortemente non lineare.

si ha passando da una paratia mono-ancorata, ad una paratia pluriancorata, ad una berlinese fino ad una terra rinforzata. Come progettare tali opere? La risposta che ci appare naturale è di eseguire senza indugio le due combinazioni dell'Approccio 1 e dimensionare tutti gli elementi affinché i due scenari considerati siano compiutamente verificati sia sotto l'aspetto geotecnico che strutturale.

Per le gallerie sembrerebbe possibile quindi riferirsi appieno alla nota in calce al paragrafo 2.4.2 dell'Eurocodice 7 che permette di applicare un unico fattore parziale alla somma delle azioni o alla somma degli effetti delle azioni quando esistono azioni permanenti favorevoli e sfavorevoli provenienti da un'unica sorgente.

Tale questione rende di fatto impraticabile l'Approccio 2 ed ha favorito un orientamento dei progettisti verso l'Approccio 1

Nella revisione della norma nazionale, approvata nel Novembre 2014 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, si prevede l'utilizzo per la progettazione delle gallerie dell'Approccio 1. Tuttavia, considerato che al già richiamato paragrafo 6.2.4.1.3 si precisa che *“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”*, si ha che la progettazione del rivestimento della galleria risulta di fatto definita dalla sola combinazione DA1-1. La verifica della combinazione DA1-1 potrebbe essere sufficiente solo per situazioni lontane dal collasso geotecnico del cavo (ad esempio quando si sviluppa un efficace "effetto arco" nell'intorno dello scavo); quest'unica verifica potrebbe invece non risultare sufficiente nei casi in cui si possano verificare cinematismi di tipo geotecnico, come accade per esempio per le gallerie superficiali.

5 DISCUSSIONE

In Italia, dal quadro normativo attuale e dalla revisione in corso, appare emergere un generale rifiuto dei metodi MFD per il dimensionamento delle membrature strutturali. Tale osservazione, mai espressa chiaramente, può evincersi dall'associazione dei coefficienti parziali A1 alla sigla STR e dei coefficienti A2 alla sigla GEO, come

ad indicare che i primi siano idonei alle verifiche strutturali ed i secondi agli stati limite geotecnici. Tale distinzione, accentuata nella circolare applicativa, ha portato alla “specializzazione” delle due combinazioni dell’Approccio 1, cosicché nella pratica progettuale corrente le verifiche strutturali vengono spesso eseguite con le sole sollecitazioni provenienti da DA1-1; la combinazione DA1-2 viene utilizzata solo per le verifiche geotecniche, intendendo con ciò l’innescio di cinematiche nel terreno coinvolgenti l’intera opera. L’Eurocodice 7 richiede, invece, che tutte le parti del sistema siano verificate in tutti gli scenari considerati (STR e GEO). Le incertezze e le ambiguità presenti nelle NTC2008 sono note da tempo, tanto che il gruppo di lavoro creato dal Consiglio Nazionale degli Ingegneri, scriveva, nelle osservazioni del 6-10-2011: “Per l’Approccio 1 non è chiarito se le Combinazioni 1 e 2 vadano entrambe applicate a tutte le verifiche geotecniche e strutturali assumendo la più esigente in termini prestazionali. In particolare, mentre nelle NTC sembrerebbe così, la circolare sembra andare nell’altra direzione”.

Inoltre, con motivazione mai esplicitata, la norma nazionale prevede che nelle analisi “finalizzate al dimensionamento strutturale, il coefficiente γ_R non deve essere portato in conto”. Ciò significa che le sollecitazioni sulle strutture calcolate con l’Approccio 2 coincidano con quelle derivanti dalla combinazione DA1-1. Dal combinato delle varie disposizioni risulta quindi che il dimensionamento strutturale in Italia, a prescindere dall’approccio progettuale scelto, risulta sempre svolto con i coefficienti A1 sulle azioni, i parametri caratteristici del terreno (M1) e le resistenze geotecniche con coefficiente parziale unitario sulle resistenze. Una tale conclusione sembra più dettata da un desiderio di semplificazione (avere sempre un valore unico delle sollecitazioni di progetto sulle strutture) che non motivata razionalmente. E’ parere degli scriventi che considerare uno scenario “strutturale” che consideri una sfavorevole deviazione delle azioni dal loro valore caratteristico (DA1-1) insieme ad uno scenario “geotecnico” con una deviazione sfavorevole dal valore caratteristico delle proprietà di resistenza del terreno e le incertezze del modello di calcolo (DA1-2), porti ad accrescere la consapevolezza del progettista sulla sensibilità dell’opera alle variazioni di scenario, migliorando di fatto la qualità, l’affidabilità e la sicurezza della progettazione.

6 CONCLUSIONI

From the above considerations it is suggested that when soil-structure interaction governs design, the analysis of Limit States by using Design Approach 1 of Eurocode 7 is to be preferred to other more practical approaches. With Design Approach 1, safety and intelligibility of verifications are better reached

as it implies a careful identification of the critical aspects and more consciousness by the designer./Appare pertanto possibile concludere che la progettazione delle opere per le quali l’interazione terreno-struttura giochi un ruolo importante, in coerenza con il contesto normativo europeo, sia più efficacemente affrontabile con entrambe le combinazioni dell’Approccio 1 che non con gli altri approcci progettuali.

REFERENCES

- Anagnostou, G., Kovári, K. 1996. Face stability conditions with Earth Pressure Balanced shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11 (2), 165-173.
- Bond, A. J. and Harris, A. J. 2008 *Decoding Eurocode 7*, London: Taylor & Francis
- Bond, A. J., Schuppener, B., Scarpelli, G., Orr, T. L. L. 2013. *Eurocode 7: Geotechnical Design - Worked examples*, Editors: Silvia Dimova, Borislava Nikolova, Artur V. Pinto, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Broms B.B. (1964) Lateral resistance of piles in cohesionless soils. J.S.M.F. Div. Proc. ASCE, 90. SM3 pp. 123-156
- Calgaro, J. -A. 2011. Safety philosophy of Eurocodes. *Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical Safety and Risk*, Munich 2011, eds. N. Vogt, B. Schuppener, D. Straub and G. Brau, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Germany, pp. 29-36
- CEN (2002) EN 1990 *Eurocode basis of structural design*, CEN Comité Européen de Normalization, Brussels
- CEN (2004) EN 1997-1 *Geotechnical design: Part 1: General rules*, CEN Comité Européen de Normalization, Brussels
- DM 31/07/2012 2013 Approvazione delle Appendici nazionali recanti i parametri tecnici per l’applicazione degli Eurocodici. Supplemento Ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 73 del 27 marzo 2013 – Serie generale
- NTC (2008) Norme Tecniche per le Costruzioni. Decreto Ministeriale Infrastrutture 14 Gennaio 2008, pubblicato su S.O. n.30 alla G.U. 4 febbraio 2008, n.29
- Rowe, P. W. 1952. Anchored sheet-pile walls *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1(1), 27-70
- Schuppener, B., Bond, A. J., Day, P., Frank, R., Orr, T. L. L., Scarpelli, G., Simpson, B. 2009. Eurocode 7 for geotechnical design – a model code for non-EU countries? *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypte, 5-9 October: 1132-1135.
- Simpson, B. 2007. Approaches to ULS design – The merits of design approach 1 in Eurocode 7 ISGSR2007, *First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*, pp. 527-538, Shanghai, Tongji University, China.
- Schuppener, B., Heibaum, M. 2011. Reliability theory and safety in German geotechnical design. *Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical Safety and Risk*, Munich 2011, eds. N. Vogt, B. Schuppener, D. Straub and G. Brau, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Germany, pp. 527-536
- Schweiger, H. F., Marcher, T., Nasekhian, A. 2010. Nonlinear FE-analysis of tunnel excavation – comparison of EC7 design approaches. *Geomechanics and Tunneling*, 1(3) DOI: 10.1002/geot.201000005
- Walter, H. 2006 Eurocode-based ultimate limit state design of NATM tunnels using nonlinear constitutive models for sprayed concrete and soil. *Numerical Method in Geotechnical Engineering*, Ed. Schweiger Taylor & Francis Group, London