

PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

<p>IL PROGETTISTA</p>  <p>Ing. E.M. Veje Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p> 	<p>IL CONTRAENTE GENERALE</p> <p>Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA</p> <p>Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA</p> <p>Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
--	---	--	---

<p><i>Unità Funzionale</i></p> <p><i>Tipo di sistema</i></p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i></p> <p><i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i></p> <p><i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO</p> <p>SOTTOSTRUTTURE</p> <p>BLOCCHI D'ANCORAGGIO</p> <p>Generale</p> <p>Relazione tecnica specialistica di progetto</p>	<p>PF0063_F0</p>
---	--	------------------

CODICE	C	G	1	0	0	0	P	R	G	D	P	S	T	B	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	F0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	ABI	IJ/CSS	ABI

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

INDICE

INDICE	3
1 Introduzione	5
2 Descrizione tecnica	5
2.1 Blocco d'ancoraggio sul versante siciliano	6
2.2 Blocco d'ancoraggio sul versante calabrese	8
3 Condizioni del suolo e proprietà dei materiali	10
3.1 Condizioni del suolo	10
3.2 Materiali	10
3.2.1 Calcestruzzo	10
3.2.2 Armatura	11
3.2.3 Precompressione	11
3.2.4 Materiale da zavorra	12
4 Carichi e combinazione dei carichi	12
5 Metodologia di progettazione strutturale	13
5.1 Metodo di analisi sismica	13
5.2 Reazione del suolo per modellazione strutturale	15
5.3 Calcoli strutturali	17
5.3.1 Ancoraggio del cavo	19
5.3.1.1 Armatura generale / minima	19
5.3.2 Armatura aggiuntiva	21
5.3.3 Armatura superficiale	23
6 Progettazione Geotecnica	23
6.1 Prestazioni sismiche	23
6.1.1 Sicurezza allo scorrimento	23
6.1.1.1 Approccio pseudo statico	24
6.1.1.2 Approccio basato sullo spostamento	24
6.1.2 Capacità portante e sicurezza alla rotazione	25
6.2 Analisi FE 3D dei blocchi d'ancoraggio	25
6.2.1 Blocco d'ancoraggio sul versante siciliano	26
6.2.2 Blocco d'ancoraggio sul versante calabrese	27

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

1 Introduzione

Lo scopo del presente documento è di fornire un'introduzione ai principi di verifica della progettazione strutturale e geotecnica e risultati per i blocchi d'ancoraggio Siciliano e Calabrese del Ponte sullo Stretto di Messina.

La verifica strutturale è stata esposta nei seguenti rapporti di progettazione:

- Descrizione Modello FE Semilocale
- Spinte del terreno per il Modello strutturale
- Relazione di Calcolo Strutturale - Blocco d'ancoraggio della Sicilia
- Relazione di Calcolo Strutturale - Blocco d'ancoraggio della Calabria

La verifica geotecnica è stata esposta nei seguenti rapporti di progettazione:

- Blocco d'ancoraggio siciliano – Spostamenti indotti da terremoto e sicurezza rispetto a stati limite ultimi
- Blocco d'ancoraggio siciliano – Valutazione del comportamento del blocco mediante analisi 3D FE e della capacità portante.
- Blocco d'ancoraggio calabrese - Spostamenti indotti da terremoto e sicurezza rispetto a stati limite ultimi
- Blocco d'ancoraggio calabrese - Valutazione del comportamento del blocco mediante analisi 3D FE e della capacità portante.
- Analisi sismica dei sistemi terreno-fondazioni

2 Descrizione tecnica

Nel presente Progetto Definitivo sono state mantenute in generale le dimensioni totali dei blocchi d'ancoraggio del Progetto di Gara; tuttavia sono state introdotte le seguenti modifiche:

- Il Blocco d'ancoraggio siciliano è stato spostato di circa 10 m verso Est, per evitare interferenze fra i cavi principali e l'adiacente cimitero. Tale spostamento influenza anche la

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

posizione delle altre fondazioni del ponte, in quanto l'allineamento del ponte è stato fatto ruotare attorno al blocco d'ancoraggio calabrese.

- La forma dei blocchi d'ancoraggio è stata leggermente rettificata per facilitare il getto dei blocchi d'ancoraggio in sezioni di 3 m × 11 m × 26 m. La modifica riguarda la base dei blocchi d'ancoraggio e i comparti di riempimento.
- Le pareti del blocco d'ancoraggio siciliano sono livellate ai muri di diaframma usati per il pozzo di costruzione. Ciò significa che la trave esterna superiore "sospesa" è stata cancellata. Questo cambiamento ha anche una leggera influenza sulla larghezza totale del blocco d'ancoraggio.
- L'uso di barre di armatura accoppiate \varnothing 46 mm è stato sostituito da barre sovrapposte di diametro inferiore.
- L'ancoraggio delle funi PPWS (Preformed Parallel Wire Strands) al blocco d'ancoraggio è stato modificato da barre DYWIDAG a tiranti post-tesi a cappio.
- Il riempimento pesante del blocco d'ancoraggio calabrese è stato sostituito dal normale riempimento in sabbia.
- Il calcestruzzo per il calcestruzzo massivo è stato sostituito in calcestruzzo del tipo a lento indurimento, che genera meno calore durante la presa.

2.1 Blocco d'ancoraggio sul versante siciliano

Le dimensioni esterne del blocco d'ancoraggio sono indicate nel disegno definitivo (Disposizione Generale).

Le fondazioni del blocco d'ancoraggio siciliano si trovano sopra la falda freatica delle Ghiaie di Messina. Sono previste zone di terreno consolidato mediante jet grouting di fronte e sotto il blocco d'ancoraggio per aumentare (leggermente) la capacità di carico di scorrimento del blocco d'ancoraggio. Questo consolidamento a getto è stato progettato per Eurolink da RockSoil.

La parte principale del blocco d'ancoraggio sarà gettata in blocchi da 3 m × 11 m × 26 m. I blocchi saranno sfalsati per evitare giunti di colata passanti verticali. L'armatura di ogni blocco sarà costituita da gabbie prefabbricate da installare con una sola operazione.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

I cavi principali sono collegati al blocco d'ancoraggio tramite basi di ancoraggio metalliche che sono ancorate al calcestruzzo massivo con tiranti VSL 6-19 post-tesi a cappio.

La copertura della camera del pendolo sarà realizzata come una soletta di cemento armato da 300 mm gettata in sito, supportata da travi preinstallate di cemento prefabbricate precomprese.

All'estremità posteriore del blocco d'ancoraggio saranno installati elementi prefabbricati come supporto per i compartimenti di suolo terrazzati.

Per il blocco d'ancoraggio siciliano è stato previsto in generale un calcestruzzo con classe di resistenza C30/37. Tuttavia, nelle zone fortemente sollecitate sulla parte frontale del blocco d'ancoraggio e sotto le traverse di ancoraggio e vicino ai supporti a sella, è previsto un calcestruzzo di classe C35/45. Le pareti e il tetto delle camere del pendolo e gli elementi prefabbricati all'estremità posteriore del blocco d'ancoraggio sono previste in calcestruzzo di classe C45/55.

Il riempimento di paesaggio sarà posto sulla parte posteriore del blocco d'ancoraggio al fine di ripristinare l'originale livello del terreno nella zona del blocco d'ancoraggio. La progettazione paesaggistica deve essere effettuata da Eurolink.

Il layout del blocco d'ancoraggio siciliano è rappresentato nella Figura 2-1.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

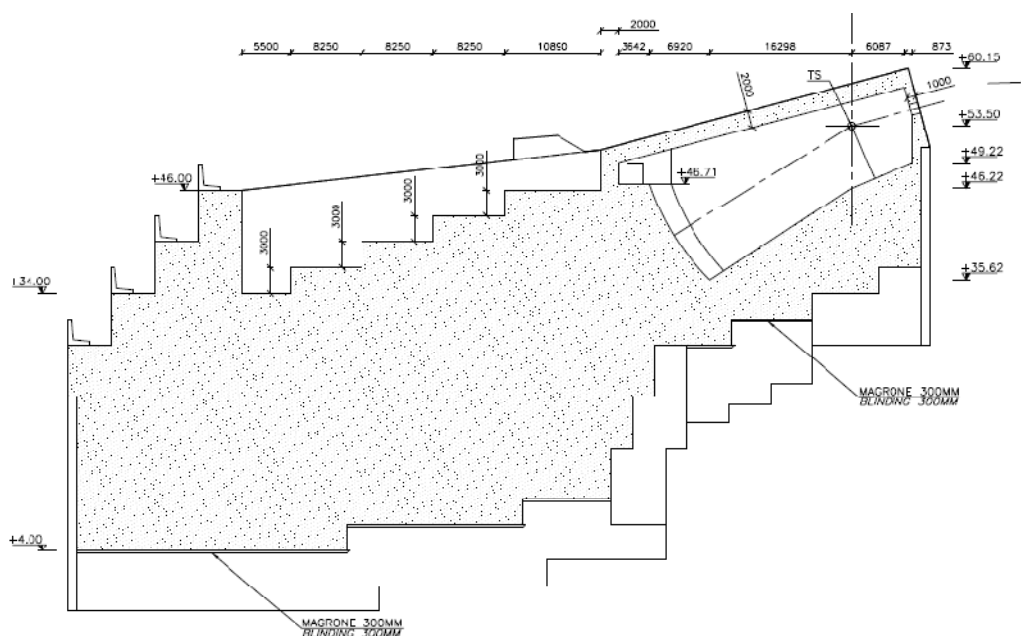


Figura 2-1 Layout del blocco d'ancoraggio Siciliano

2.2 Blocco d'ancoraggio sul versante calabrese

Le dimensioni esterne del blocco d'ancoraggio sono indicate nel disegno definitivo (Disposizione Generale).

Le fondazioni del blocco d'ancoraggio siciliano si trovano nel Conglomerato di Pezzo sotto la falda freatica.

La parte principale del blocco d'ancoraggio sarà gettata in blocchi da 3 m × 11 m × 26 m. I blocchi saranno sfalsati per evitare giunti passanti di colata verticali. L'armatura di ogni blocco sarà costituita da gabbie prefabbricate da installare con una sola operazione.

I cavi principali sono collegati al blocco d'ancoraggio tramite basi di ancoraggio metalliche che sono ancorate al calcestruzzo massivo con tiranti VSL 6-19 post-tesi a coppia.

La copertura della camera del pendolo sarà costruita come una soletta di cemento armato da 300 mm gettata in sito supportata da travi preinstallate di cemento precomprese prefabbricate.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Per il blocco d'ancoraggio calabrese è stato previsto in generale un calcestruzzo con classe di resistenza C30/37. Tuttavia, nelle zone fortemente sollecitate sulla parte frontale del blocco d'ancoraggio e sotto le traverse di ancoraggio e vicino ai supporti a sella, è previsto un calcestruzzo di classe C35/45. Le pareti e il tetto delle camera del pendolo sono previste in calcestruzzo di classe C45/55.

Il riempimento di paesaggio sarà posto sulla sommità della parte posteriore del blocco d'ancoraggio al fine di ridurre l'impatto visivo del blocco d'ancoraggio. La progettazione paesaggistica è effettuata da Eurolink.

Il layout del blocco d'ancoraggio calabrese è rappresentato nella Figura 2-2.

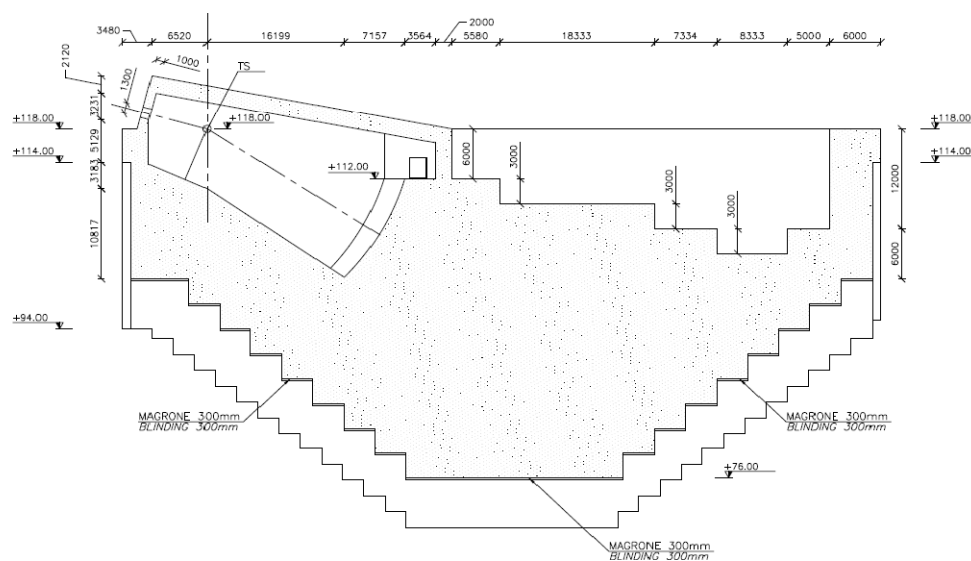


Figura 2-2 Layout del blocco d'ancoraggio calabrese

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

3 Condizioni del suolo e proprietà dei materiali

3.1 Condizioni del suolo

Le condizioni geologiche del sito e la stratigrafia sono descritte nel rapporto: "Aggiornamento delle caratteristiche geotecniche sulla base delle indagini sul sito e in laboratorio del 2010, Allegato" (CG1003-P-RG-D-P-SB-G3-00-00-00-00_01_A), preparato dal Professor S. Rampello e dal Prof. A. Flora in virtù di un accordo con Eurolink. Si osserva che le indagini sul sito sono ancora in corso. I risultati delle indagini e dei test di laboratorio non sono quindi ancora tutti disponibili.

Le proprietà del terreno e le stratificazioni risultanti da quanto sopra menzionato, sono state usate per la verifica geotecnica e strutturale per il Progetto Definitivo.

3.2 Materiali

3.2.1 Calcestruzzo

Le principali proprietà del calcestruzzo usato per i blocchi d'ancoraggio sono riassunte nella Tabella 3-2. La resistenza a compressione cilindrica caratteristica del calcestruzzo dovrebbe essere raggiunta dopo 60 giorni.

Tabella 3-2 Proprietà del calcestruzzo

Classe di resistenza	Caratteristica resistenza alla compressione su cilindri, f_{ck}	Resistenza alla compressione su cilindri di progettazione, $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$	Caratteristica resistenza alla trazione assiale, $f_{ctk,0.05}$	Resistenza alla trazione media, f_{ctm}	Modulo di elasticità, E_{cm}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[MN/mm ²]
C30/37	30	20	2.0	2.9	33
C35/45	35	23	2.2	3.2	34
C45/55	45	30	2.7	3.8	36

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Il coefficiente di sicurezza parziale del calcestruzzo per ULS è $\gamma_C = 1.5$; il coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine sulla sollecitazione di compressione e degli effetti sfavorevoli risultanti dal modo in cui è applicato il carico è $\alpha_{cc} = 0.85$.

Il comportamento del materiale di calcestruzzo è modellato o da un diagramma parabola-rettangolo con proprietà $\epsilon_{c2} = 0,2\%$, $\epsilon_{cu} = 0,35\%$, f_{cd} o da un diagramma bilineare con proprietà $\epsilon_{c3} = 0,175\%$, $\epsilon_{cu} = 0,35\%$, f_{cd} .

La resistenza alla trazione del calcestruzzo non è considerata per la verifica strutturale.

Le proprietà di viscosità e ritiro sono considerate nel modello FE semilocale (IBDAS).

3.2.2 Armatura

E' impiegata acciaio da armatura di classe B450 con proprietà principali riepilogate in Tabella 3-3.

Tabella 3-3 Proprietà dei materiali di armatura

Classe di resistenza	Tensione di snervamento caratteristica, f_{yk}	Tensione di rottura caratteristica, f_{tk}	Deformazione caratteristica alla forza massima, ϵ_{uk}	Densità, γ_c	Modulo di elasticità, E_s
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[T/m ³]	[MN/mm ²]
B450	450	450	5.0	7.85	200

Il coefficiente di sicurezza parziale dell'acciaio di armatura è $\gamma_C = 1.15$ per situazioni di progettazione persistenti e transitorie.

Il diagramma sforzo-deformazione a compressione è modellato come elastoplastico con le seguenti proprietà: $\epsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$, $\epsilon_{ud} = 3,5\%$, f_{yd} .

3.2.3 Precompressione

I tiranti di post-tensione VSL con le rispettive proprietà principali sintetizzate nella Tabella 3-4 sono usati per l'ancoraggio dei cavi principali nei blocchi d'ancoraggio. La precompressione è usata anche per le travi prefabbricate della copertura della camera di deviazione.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Tabella 3-4 Proprietà del materiale precompresso

Denominazione	Numero di funi	Classe di acciaio, $f_{p0,1k} / f_{pk}$	Area sezione trasversale, A_{pe}	Tensione di prova (tensione di prova allo 0,1%), $F_{p0,1k}$	Carico di rottura caratteristico, F_{pek}	Modulo di elasticità, E_p	Forza di sollecitazione e massima $P_{max,d}$
	[-]	[N/mm ²]	[mm ²]	[kN]	[kN]	[MN/mm ²]	[MN]
EN10138-3 Y1860S7-15.7	19	1,640/1,860	2,850	4,674	5,301	205	3.688

Il fattore di sicurezza parziale dell'acciaio di precompressione è $\gamma_s = 1.15$ per ULS.

La perdita per rilassamento è calcolata in accordo alla norma EN 1992-2:2005 Sezione 3.3.2. Le normali proprietà di rilassamento (rilassamento di Classe 1) sono assegnate al metallo di precompressione.

3.2.4 Materiale da zavorra

Sabbia con una densità di $\gamma_{Ba} = 17\text{kN/m}^3$ è usata come materiale da zavorra nei bacini dei blocchi d'ancoraggio.

4 Carichi e combinazione dei carichi

I calcoli sono basati sui fattori di carico e sulle combinazioni di carico specificate nel documento di gara GCG.F.04.01. I livelli specificati di accelerazione di picco del terreno a_p (PGA) in GCG.F.04.01 Tabella 18 sono presi come accelerazione a campo libero di picco del terreno alla base dei blocchi d'ancoraggio.

L'Approccio progettuale 1 sarà usato per la progettazione di fondazioni in accordo alla NTC 2008. Le combinazioni di carico associate e i fattori di carico e materiali sono definiti nel rapporto: Basi del progetto e livelli attesi per le prestazioni del ponte, Allegato, documento CG1000-P-RG-D-P-GE-00-00-00-00-02.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Le forze dei cavi principali utilizzate per i calcoli strutturali dei blocchi di ancoraggio, sono desunte dal modello globale IBDAS versione 3.3c. Le forze derivate dal modello globale IBDAS più recente, versione 3.3f, sono circa del 2% inferiori alle forze progettuali per i cavi della versione 3.3c, e comportano così una piccola sicurezza strutturale aggiuntiva.

Le forze dei cavi principali, utilizzate per i calcoli geotecnici dei blocchi di ancoraggio, sono derivate dal modello globale IBDAS del progetto di gara. Queste forze sono state confrontate con le forze dei cavi aggiornate ottenute dal modello globale IBDAS 3.3b e 3.3f in appendice alle relazioni geotecniche. Si osserva che le forze del cavo di stato limite ultimo adottate del progetto di gara, sono del 7% e dell'8% maggiori delle forze dei cavi del modello IBDAS versione 3.3f per il blocco di ancoraggio lato Sicilia e Calabria, rispettivamente, generando così una stima conservatrice del comportamento geotecnico dei blocchi di ancoraggio.

5 Metodologia di progettazione strutturale

I blocchi d'ancoraggio del Ponte sullo Stretto di Messina sono strutture massive molto grandi ed essenzialmente strutture rigide in cemento armato annegate nel terreno sul versante Siciliano e Calabrese. Le condizioni di carico dimensionanti per la progettazione dei blocchi d'ancoraggio includono le combinazioni di carico con azione sismica.

La risposta sismica delle strutture massive annegate nel terreno è soggetta agli effetti dell'interazione suolo-struttura (SSI). In contrasto a una ipotizzata fondazione rigida con base fissa soggetta a un movimento a campo libero, gli effetti primari SSI da considerare sono la flessibilità del terreno e l'effetto della grande massa e delle deformazioni del suolo che modificano i movimenti a campo libero del terreno. L'effetto associato alla rigidità della struttura è l'interazione cinematica. Questa, correlata alla massa della struttura, determina l'interazione inerziale, che definisce la razione del terreno da applicare al modello strutturale dei blocchi d'ancoraggio.

Le sezioni seguenti descrivono il metodo di esecuzione dell'analisi dei blocchi d'ancoraggio per la progettazione considerando la SSI.

5.1 Metodo di analisi sismica

Le analisi strutturali dei blocchi d'ancoraggio si basano su delle analisi pseudo statiche basate

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

sullo spettro di risposta dato in GCG.F.04.01.

Il processo di progettazione pseudo statica per il progetto strutturale dei blocchi d'ancoraggio è costituito dalle seguenti fasi:

- Le forze nei cavi principali sono calcolate nel modello globale IBIDAS per tutte le combinazioni di carico inclusi i carichi da terremoto.
- La struttura rigida nel suolo adotta un coefficiente sismico orizzontale efficace, k_x , che rappresenta la forza statica equivalente all'inerzia dall'accelerazione oscillatoria del terreno.
- Il coefficiente sismico orizzontale efficace è definito $k_h = 0.5 pga$, dove pga è l'accelerazione di picco del terreno, secondo Mononobe-Okabe, 1926 e 1929, vedi anche Eurocodice 8 - Parte 5.

Le seguenti combinazioni di coefficienti sismici elastici pseudo statici sono calcolate per ogni combinazione di carico pseudo statico:

- 100% orizzontale in combinazione con accelerazione verticale al 30% (caso 1)
- 30% orizzontale in combinazione con accelerazione verticale al 100% (caso 2).

L'approccio pseudo statico non include l'effetto benefico dovuto alle grandi dimensioni in pianta del blocco d'ancoraggio rigido. L'interazione cinematica dovuta a questo effetto (effetto tau) risulta in una media efficace dei movimenti traslatori liberi sulla grande dimensione, che causa un'inferiore eccitazione sismica della struttura. Per la dimensione della fondazione (~100m) e per il profilo del terreno dato agli ancoraggi della Sicilia o della Calabria, è ragionevole assumere un coefficiente di riduzione tau compreso fra 0,70 e 0,85.

I componenti potenzialmente flessibili delle strutture dei blocchi d'ancoraggio sono controllati per verificare la potenziale amplificazione dinamica sismo-indotta, es. travi della copertura dell'alloggiamento dell'ancoraggio. Se necessario, le forze inerziali sono corrette per amplificazione dinamica.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

5.2 Reazione del suolo per modellazione strutturale

I blocchi d'ancoraggio sono influenzati dalla forza del cavo principale, dal peso proprio e dalle forze di accelerazione derivanti dagli eventi sismici. Questi carichi sono bilanciati dalla reazione del terreno dal terreno che agisce sui blocchi d'ancoraggio.

La reazione del terreno su ciascun blocco d'ancoraggio è calcolata in un'analisi geotecnica con un modello ABAQUS. Tale reazione del terreno è poi applicata come carico esterno al modello strutturale FE semi-locale (IBDAS) dei blocchi d'ancoraggio.

Poiché i blocchi d'ancoraggio sono molto più rigidi del terreno circostante e saranno progettati per resistere alle forze indotte, essi sono modellati come parti rigide, vale a dire con rigidità infinita. Poiché i modelli FE sono a bidimensionali, è necessario un modello piano approssimato della deformazione.

E' stato fatto un taglio longitudinale al centro dei blocchi d'ancoraggio. Per il blocco d'ancoraggio calabrese, la profondità della deformazione è direttamente interpretata come la larghezza del blocco, 100 m. Per il blocco d'ancoraggio siciliano tuttavia, la larghezza varia da 90,0 m a 129,6 m. Conservativamente, è stata applicata una profondità di deformazione di 100 m anche per il blocco d'ancoraggio siciliano.

Le geometrie della deformazione piana modellata sono rappresentate in Figura 5-1.

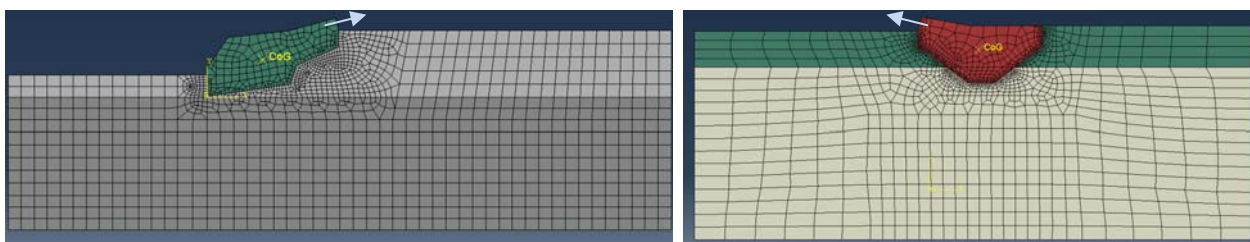


Figura 5-1 Geometria FEM. Il cambiamento di colore del suolo indica la posizione della falda freatica. Sinistra: Sicilia. Destra: Calabria. Le frecce blu indicano i cavi.

Le analisi bidimensionali producono solo sollecitazioni sulle superfici nel piano del blocco d'ancoraggio. Quindi, non è calcolata alcuna sollecitazione sui lati dei blocchi d'ancoraggio

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

parallelamente alla direzione longitudinale del ponte. Come approssimazione conservativa per la verifica del cemento armato, i lati sono considerati privi di sollecitazioni. Nel caso tridimensionale corretto, le pressioni del terreno saranno distribuite più uniformemente sui blocchi d'ancoraggio.

Il terreno consolidato con jet-grouting e i diaframmi non sono stati considerati nelle analisi.

Le spinte del terreno sismo-indotte per ogni condizione di carico sono derivate dall'approccio pseudo statico nelle analisi geotecniche ABAQAS.

Nella Figura 5-2 e nella Figura 5-3 sono rappresentati degli esempi di spinte del terreno calcolate che agiscono rispettivamente sui blocchi d'ancoraggio dei versanti siciliano e calabrese.

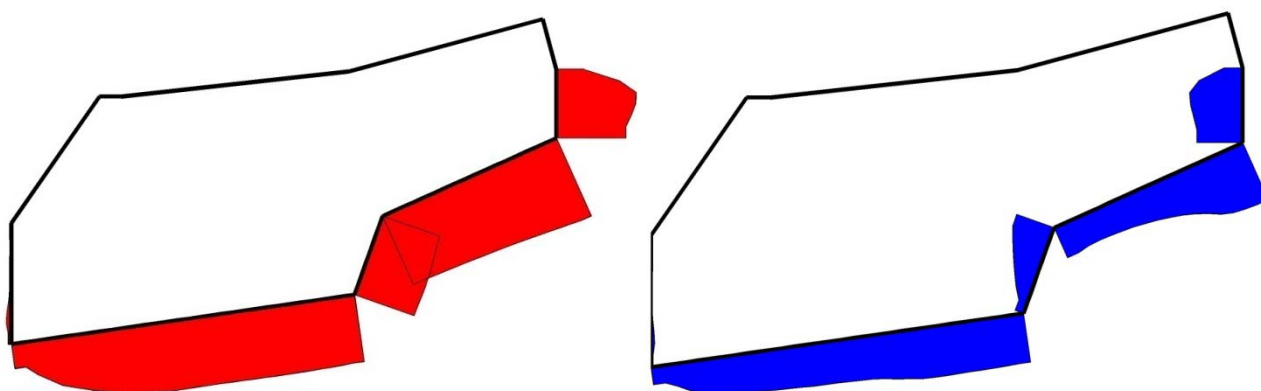


Figura 5-2 Esempio di spinte del terreno che agiscono sulla superficie del blocco d'ancoraggio siciliano per carico ULS con terremoto. Sinistra: Sollecitazione normale, con un massimo di $\sigma = 793 \text{ kPa}$. Destra: Sollecitazione di taglio con valore massimo assoluto di $\tau = 531 \text{ kPa}$.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

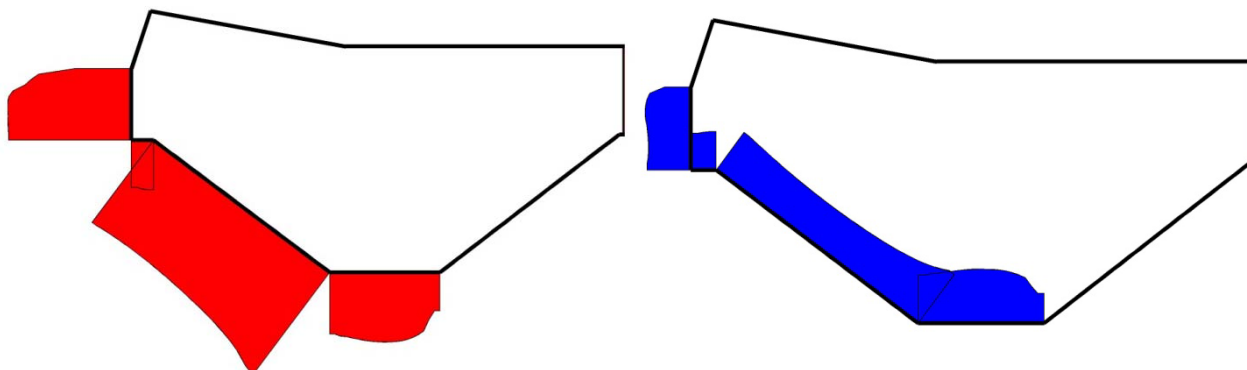


Figura 5-3 Esempio di spinte del terreno che agiscono sulla superficie del blocco d'ancoraggio calabrese per carico ULS con terremoto. Sinistra: Sollecitazione normale, con un massimo di $\sigma = 1202 \text{ kPa}$. Destra: Sollecitazione di taglio con valore massimo assoluto di $\tau = 522 \text{ kPa}$.

5.3 Calcoli strutturali

Sono stati preparati modelli locali IBDAS per il calcolo dell'armatura generale nei blocchi d'ancoraggio. Le forze dei cavi calcolate nel modello globale IBDAS e le reazioni del terreno calcolate nel modello locale ABAQUS sono state applicate ai blocchi d'ancoraggio come carichi esterni.

Per le analisi pseudo statiche le forze di inerzia sono applicate ai modelli ABAQUS così come ai modelli locali IBDAS.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

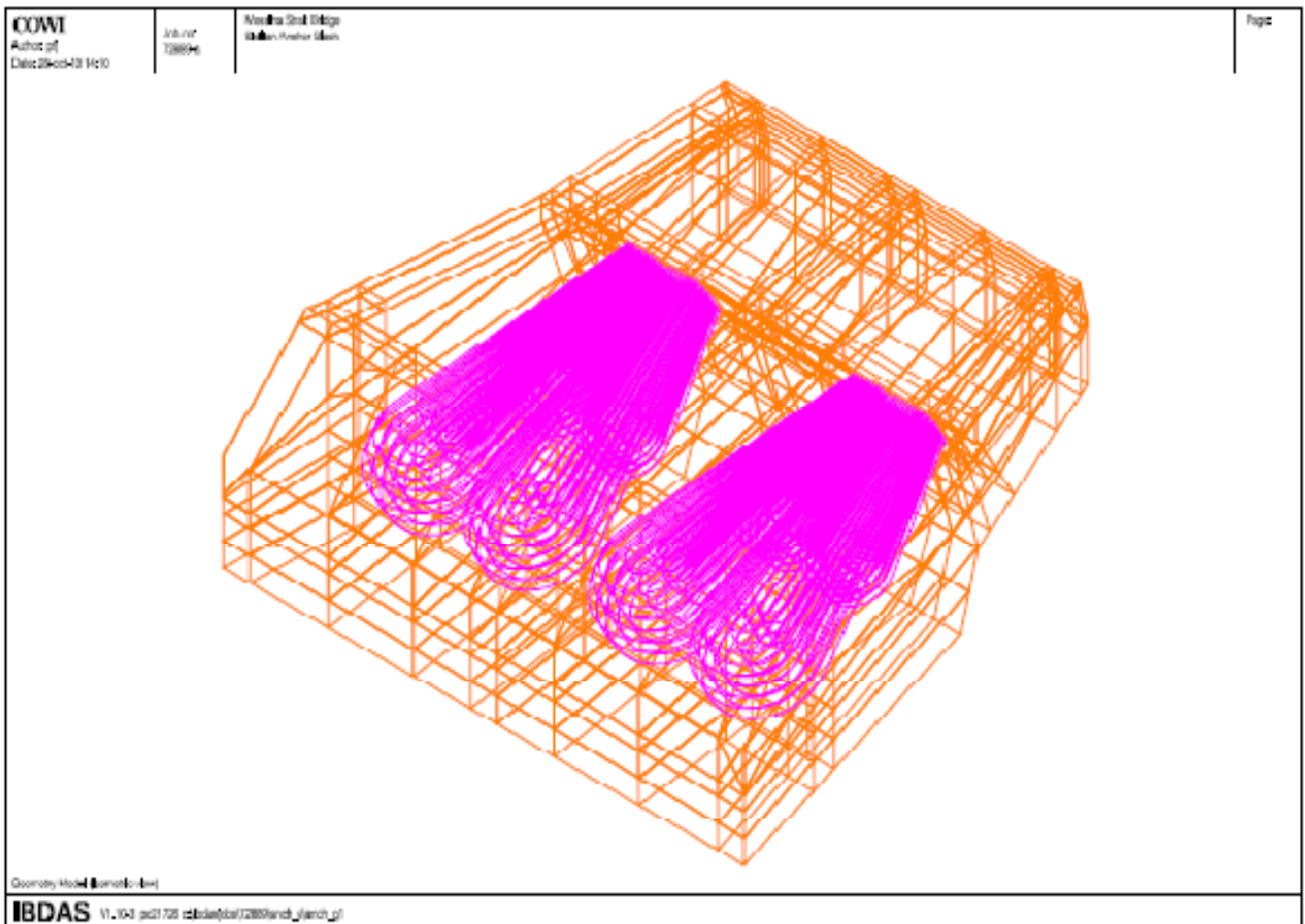


Figura 5-4 Modello IBDAS del blocco d'ancoraggio siciliano

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

5.3.1 Ancoraggio del cavo

5.3.1.1 Armatura generale / minima

La verifica dell'armatura è stata eseguita per passi. Inizialmente è stata prevista per l'intera struttura una rete di armatura generale corrispondente ai requisiti minimi di armatura in tutte e tre le direzioni e sono stati calcolati i rapporti di utilizzo (UR) delle barre in tutti i punti di sollecitazione.

L'armatura minima necessaria è stata calcolata in accordo alla norma EN 1992-2:2005 Sezione 7.3.2.

Si prevede che i blocchi d'ancoraggio siano gettati in blocchi di 3 m × 11 m × 26 m con armatura generale diretta in tutte le tre dimensioni, vale a dire, rispettivamente in direzione longitudinale (s), trasversale (y) e verticale (z).

La disposizione dell'armatura generale può essere osservata nella Figura 5-5. L'armatura generale è posta in gruppi di "pareti" di armatura (piani definiti in direzione verticale e longitudinale o trasversale). La distribuzione fra i gruppi di armatura delle "pareti" di armatura nei gruppi ha origine dalla richiesta che nessuna armatura verticale sia posta alla distanza di 1 m da ogni superficie del blocco.

La distanza orizzontale fra le barre è rispettivamente di 250 mm e 200 mm per i blocchi d'ancoraggio lato Calabria e Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

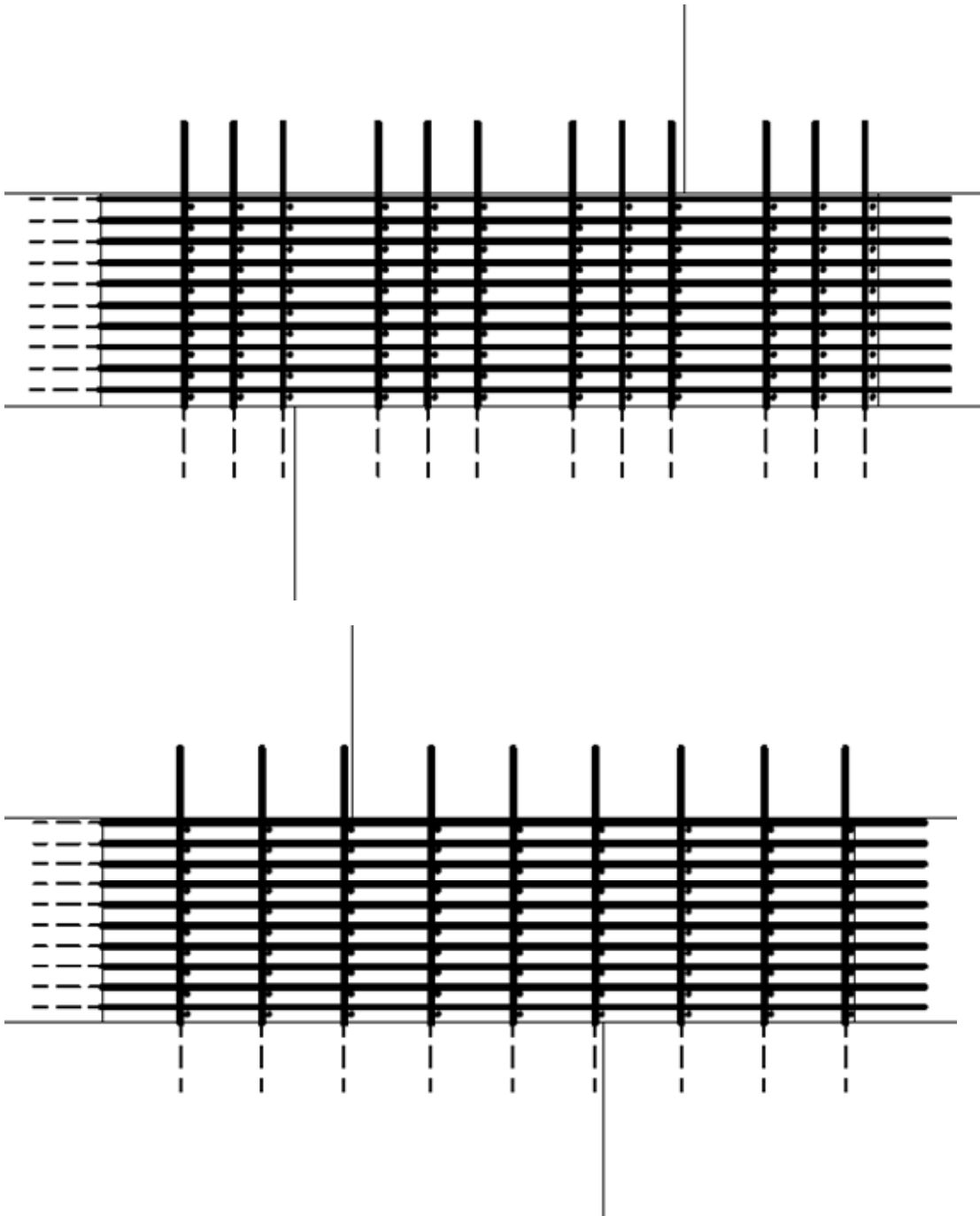



Figura 5-5 Disposizione delle “pareti” di armatura del blocco d’ancoraggio calabrese (sopra) e Siciliano (sotto).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

5.3.2 Armatura aggiuntiva

Nelle zone dove l'armatura risulta sovra-utilizzata (rapporto di utilizzo UR maggiore a 1.0) è stata prevista dell'armatura aggiuntiva e il modello di calcolo locale IBDAS è stato ri-eseguito per confermare che sia stata inserita un'armatura sufficiente a soddisfare i requisiti di resistenza. L'armatura aggiuntiva è stata prevista soprattutto nelle zone di ancoraggio e nella zona frontale dei blocchi di ancoraggio al di sotto del pendolo.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		Codice documento <i>PF0063_F0_ITA.docx</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

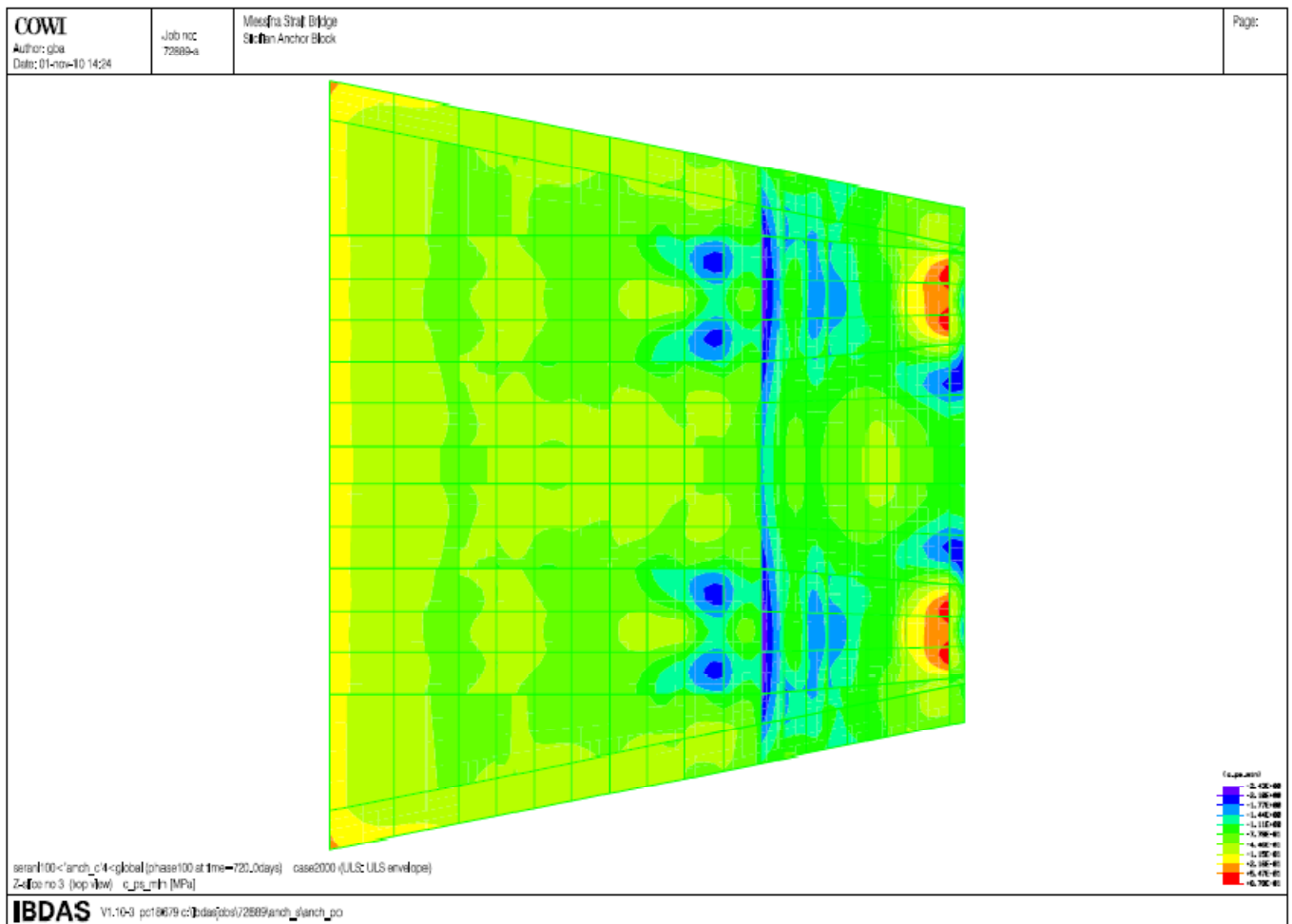


Figura 5-6 Sezione modello IBDAS del blocco d'ancoraggio siciliano, che mostra il rapporto di utilizzo dell'armatura metallica

L'armatura densa, minima e aggiuntiva basata su un diametro delle barre di 25 mm intersecherà i capi di precompressione. Nel caso in cui una barra di armatura generale o addizionale intersechi

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

un coppia di precompressione la barra di armatura verrà tagliata. Il salto nella barra di armatura sarà chiusa da una nuova barra di lunghezza sufficiente (inclusa la lunghezza della sezione tagliata e di sovrapposizione) posta nelle dirette vicinanze della barra di armatura tagliata.

5.3.3 Armatura superficiale

A tutte le superfici esterne dei blocchi d'ancoraggio è stata applicata un'armatura superficiale con diametro 25 mm per 250 mm × 250 mm che soddisfa i requisiti delle norme relativi all'armatura minima.

L'armatura superficiale dovrà impedire fessurazioni estese del calcestruzzo. Si ipotizza che tale condizione sia soddisfatta se le sollecitazioni nell'acciaio dell'armatura superficiale non eccedono 200N/mm² allo stato di servizio limite.

La resistenza dell'armatura prevista nei blocchi d'ancoraggio è generalmente inferiore alla resistenza alla trazione della sezione di calcestruzzo non fessurata.

6 Progettazione Geotecnica

6.1 Prestazioni sismiche

Le prestazioni sismiche dei blocchi d'ancoraggio sono state valutate usando due metodi: il metodo pseudo statico, in cui il blocco d'ancoraggio è assunto essere in uno stato di equilibrio limite sotto l'azione di forze inerziali e statiche, e l'approccio basato sullo spostamento, in cui gli spostamenti del blocco d'ancoraggio indotti dal terremoto sono valutati per un numero di spostamenti indotti dal sisma.

6.1.1 Sicurezza allo scorrimento

Per la valutazione della sicurezza allo scorrimento, sono state calcolate resistenze di progettazione considerando i contributi della resistenza allo scorrimento alla base e ai lati del blocco e quello della resistenza passiva sul fronte del blocco.

Nelle analisi sono stati assunti tre possibili meccanismi di scorrimento per ogni blocco

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto		<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

d'ancoraggio. L'analisi piana agli elementi finiti della deformazione dei blocchi d'ancoraggio ha permesso di valutare inclinazione prevalente dei vettori di spostamento in condizioni di carico ULS.

La sicurezza allo scorrimento in condizioni di carico statico non è valutata nel rapporto poiché le condizioni di carico pseudo statiche sono le più critiche.

6.1.1.1 Approccio pseudo statico

Nell'approccio pseudo statico, la sicurezza del blocco rispetto a eventuali meccanismi di collasso è assicurata comparando le azioni di progettazione con le resistenze di progettazione, le prime aumentare e le seconde ridotte da fattori di sicurezza parziali.

Per le condizioni pseudo statiche, sia le azioni di progetto sia le resistenze di progetto sono state calcolate usando i coefficienti sismici pseudo statici forniti dalla normativa italiana. I risultati ottenuti hanno indicato che la sicurezza allo scorrimento è adeguatamente rispettata per le forze dei cavi principali fornite dal modello globale IBDAS versione 3.3.

6.1.1.2 Approccio basato sullo spostamento

Nell'approccio basato sullo spostamento, l'accelerazione critica è determinata inizialmente con il metodo pseudo statico e lo spostamento cumulativo della potenziale massa di scorrimento è quindi valutato usando l'analisi di scorrimento del blocco, in cui l'equazione del moto relativo è integrata due volte con l'accelerazione critica usata come origine di riferimento.

Nell'approccio basato sullo spostamento è stato ipotizzato che la resistenza della terra ΔR mobilizzata di fronte al blocco aumenti progressivamente con l'aumentare del relativo spostamento u indotto dall'azione sismica. In queste condizioni, il suo contributo non è stato considerato nell'espressione del coefficiente sismico critico ed è stato incluso nell'equazione del moto relativo. La relazione fra ΔR e lo spostamento relativo è stata valutata effettuando il best fitting dei dati $u - \Delta R$ ottenuti dalle analisi FE 2D in cui spostamenti orizzontali uniformi sono applicati a una parete ideale liscia.

Al fine di ridurre la pressione dell'acqua dei pori agente sul blocco d'ancoraggio calabrese, nel progetto di gara era stata prevista la costruzione di un tunnel di drenaggio. Tale tunnel di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

drenaggio garantirebbe un livello di falda non superiore a +88 m LMM. Eurolink ha deciso di eliminare tale tunnel di drenaggio nel Progetto Definitivo. Tuttavia, un certo drenaggio potrebbe risultare dai futuri tunnel ferroviari adiacenti al blocco di ancoraggio. Le verifiche di sicurezza sono state quindi eseguite sia considerando che trascurando l'effetto del tunnel di drenaggio.

Gli spostamenti indotti dal terremoto sono stati calcolati usando 30 accelerogrammi di input. Il componente orizzontale delle time histories di accelerazione scelte è stato scalato di 0.58 g, mentre il componente verticale è stato scalato con lo stesso fattore usato per il corrispondente componente orizzontale o anch'esso di 0.58 g. Il calcolo è stato ripetuto assumendo entrambe le direzioni di applicazione degli accelerogrammi orizzontali.

I risultati mostrano che gli spostamenti indotti dal terremoto diminuiscono con il diminuire dell'inclinazione del meccanismo di scorrimento.

Per il blocco d'ancoraggio sul versante siciliano, lo spostamento massimo è 1 mm per il meccanismo 2 ($\alpha = 26^\circ$) e 33 mm per il meccanismo 3 ($\alpha = 8^\circ$).

Per il blocco d'ancoraggio calabrese, lo spostamento massimo è 14 mm per il meccanismo 2 ($\alpha = 23.5^\circ$) e 69 mm per il meccanismo 3 ($\alpha = 0^\circ$) se è considerato l'effetto del tunnel di drenaggio, mentre è di 21 mm per il meccanismo 2 e 72 mm per il meccanismo 3 se l'effetto del tunnel di scarico non è considerato.

6.1.2 Capacità portante e sicurezza alla rotazione

La capacità portante e la sicurezza anti rotazione sono state stimate seguendo le prescrizioni del D.M. 14.01.2008; i risultati mostrano che i requisiti sono soddisfatti per le condizioni di carico considerate.

6.2 Analisi FE 3D dei blocchi d'ancoraggio

Le analisi FE sono state eseguite principalmente per valutare il campo di spostamento e lo stato di sollecitazione indotto nel terreno di fondazioni dalle forze del cavo principale. A tale proposito, l'intera sequenza di costruzione è stata simulata nelle analisi che sono state effettuate in termini di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

tensioni efficaci, assumendo condizioni di suolo drenato. E' stata considerata la seguente sequenza: calcolo dello stato di sollecitazione iniziale; scavo preliminare dell'area di costruzione; attivazione di diaframmi e jet grouting; scavo progressivo per raggiungere la base del blocco d'ancoraggio con simultanea attivazione dei livelli dell'ancoraggio di contenimento; attivazione progressiva del blocco d'ancoraggio; riempimento dell'area precedentemente scavata e delle camere di zavorra con materiale granulare; applicazione dei carichi di progetto (condizioni di carico SLIS, SLS2 e SLU); analisi incrementale con forze esterne crescenti.

Il comportamento dei blocchi d'ancoraggio è stato studiato con analisi FE 3D usando il codice *Plaxis^{3D} Foundation*.

Nell'analisi FE, il comportamento meccanico del terreno è stato descritto usando il modello di indurimento del suolo, che è un modello elastoplastico indipendente dalla velocità di variazione con indurimento isotropico, in grado di riprodurre la non linearità del terreno dovuta al verificarsi di deformazioni plastiche dall'inizio del processo di carico; il calcestruzzo del blocco d'ancoraggio e il materiale di zavorra sono stati descritti come materiali elastico-lineari; i diaframmi sono stati modellati come elementi shell WALL, mentre gli ancoraggi di contenimento come elementi SPRING. Il terreno consolidato con jet-grouting è stato assimilato a un materiale elastoplastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

Nel modello, il comportamento elastico è definito da elasticità isotropica tramite un modulo di Young dipendente dalla sollecitazione, E . Per il carico plastico dagli stati di sollecitazione isotropici, il modello prevede una relazione tensione-deformazione non lineare con modulo tangente iniziale pari a E . I valori di E sono collegati al modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 ottenuto da prove cross-hole eseguite in sito. E' stato ipotizzato un profilo semplificato del terreno, caratterizzato da valori più bassi di rigidità di taglio.

6.2.1 Blocco d'ancoraggio sul versante siciliano

Le forze nei cavi principali del blocco d'ancoraggio siciliano sono state ottenute dal modello globale IBDAS, per tre diverse combinazioni di carico (SLIS, SLS2 e SLU). La direzione della forza è inclinata di 15 gradi rispetto all'orizzontale e diretta verso l'alto, verso la torre della Sicilia.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Partendo dagli spostamenti calcolati, sono stati ricostruiti due meccanismi cinematici per il blocco: uno è di pura traslazione e l'altro di roto-traslazione attorno al centro di gravità.

In condizioni di carico SLIS, SLS2 e SLU lo spostamento medio è rispettivamente di circa 27 mm, 28 mm e 35 mm; l'inclinazione media è di circa 14° rispetto all'orizzontale per tutte le suddette condizioni di carico (SLIS, SLS2 e SLU). Il comportamento del blocco d'ancoraggio all'applicazione di carichi esterni consiste soprattutto in un movimento traslatorio, diretto verso la torre, associato a un movimento rotatorio verso il basso.

Una valutazione del carico di rottura massimo del blocco d'ancoraggio, effettuata usando un best-fitting dei dati carico-deformazione iperbolico, fornisce un carico ultimo uguale a 15100 ÷ 16500 MN. Ciò risulta in un fattore di sicurezza rispetto alle forze esterne in aumento di 3,75 ÷ 4.15 per la condizione di carico ULS.

6.2.2 Blocco d'ancoraggio sul versante calabrese

Le forze nei cavi principali del blocco d'ancoraggio calabrese sono state fornite dalle analisi strutturali nel progetto di gara, per tre diverse combinazioni di carico (SLIS, SLS2 e SLU). La direzione della forza è inclinata di 15 gradi rispetto all'orizzontale e diretta verso l'alto, verso la torre della Calabria.

I risultati delle analisi ad elementi finiti sono esposti principalmente come curve carico-deformazione; a tale scopo sono stati selezionati dieci punti rappresentativi del blocco d'ancoraggio. Le fasi preliminari dell'analisi (cioè, lo scavo del pozzo supportato da pareti di contenimento e ancoraggi, costruzione del blocco, rimozione degli ancoraggi di tenuta provvisori, ripristino delle condizioni idrauliche iniziali) sono state simulate per riprodurre completamente lo stato di sollecitazione del suolo all'inizio del processo di carico. Gli spostamenti calcolati in queste fasi sono stati azzerati e le curve carico-deformazione si riferiscono soltanto all'applicazione dei carichi esterni.

I risultati ottenuti consentono le seguenti osservazioni:

1. Il comportamento del blocco d'ancoraggio all'applicazione dei carichi esterni consiste in un

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Relazione tecnica specialistica di progetto	<i>Codice documento</i> PF0063_F0_ITA.docx	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

movimento traslativo, diretto verso il mare (direzione z), associato a un movimento rotatorio verso il basso nel piano y-z.

2. Lo spostamento orizzontale globale del blocco, diretto verso il mare è inferiore a 10 mm, per ciascuna delle tre condizioni di carico. Lo spostamento verticale totale, diretto verso l'alto, è inferiore a 2 mm, mentre lo spostamento orizzontale in direzione x (ortogonale all'asse del ponte) è praticamente uguale a zero.
3. I valori di rotazione nel piano verticale y-z sono di alcuni millesimi di grado (diretti verso il mare), mentre sono praticamente uguali a zero nella direzione x-y. I valori di rotazione nel piano x-z sono bassi e mostrano una leggera influenza della stratigrafia del suolo inclinato sulla risposta del blocco.
4. Un'analisi comparativa, indica un'influenza relativamente piccola sulla parte più alta di 4 m di suolo alla risposta del blocco.
5. La direzione media del movimento del blocco, per ciascuna delle condizioni di carico, è diretta verso l'alto, con un'inclinazione rispetto all'orizzontale pari a circa 10 gradi.
6. Una valutazione del carico di rottura massimo del blocco d'ancoraggio, ricavata effettuando il best-fitting dei dati carico-deformazione iperbolico, fornisce un carico ultimo uguale a circa 11000 MN. Ciò risulta in un fattore di sicurezza rispetto alle forze esterne in aumento di circa 2,75 per carichi SLU e di circa 3,5 per carico SLIS.
7. Nell'analisi di riduzione $\phi' - c'$ le proprietà di resistenza dei terreni sono ridotte all'aumento del fattore M_{sf} , il cui significato fisico è comparabile ad un fattore di sicurezza. Un valore conservativo di M_{sf} , valido per ciascuna delle tre condizioni di carico, è uguale a 3 circa. L'analisi comparativa, con scavo profondo 4 m attorno al blocco, ha generato un valore conservativo di $M_{sf} = 2,5$, confermando l'importanza di reinterrare la zona attorno al blocco con terreno dopo la costruzione.