



# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO

### EUROLINK S.C.p.A.

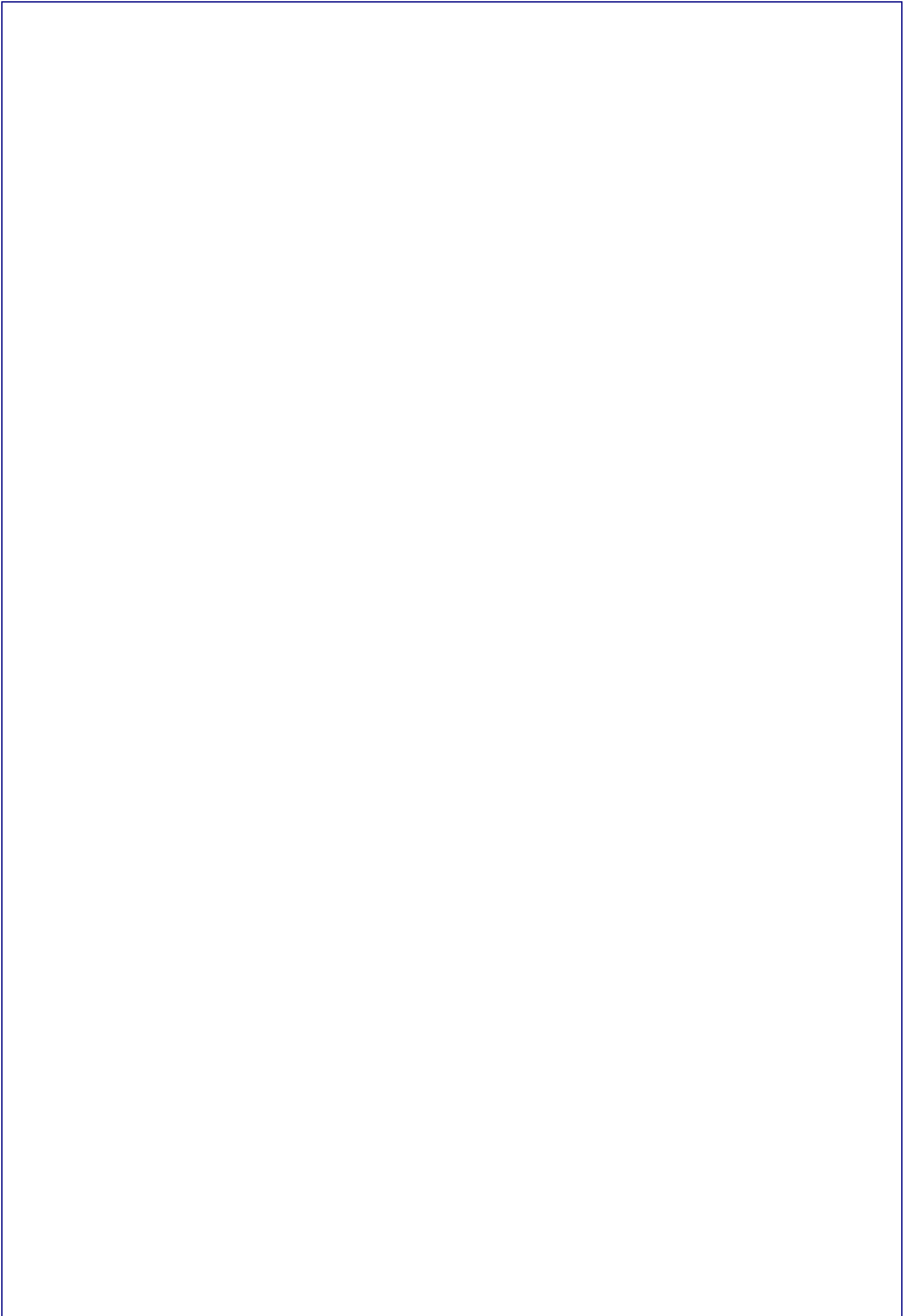
IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)  
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)  
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)  
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)  
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)  
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE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

<p><b>IL PROGETTISTA</b></p>  <p>S.p.A. CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA nel campo della GEOINGEGNERIA</p> <p>Dott. Ing. G. Cassani Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p> 	<p><b>IL CONTRAENTE GENERALE</b></p> <p>Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p><b>STRETTO DI MESSINA</b> Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p><b>STRETTO DI MESSINA</b> Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
---	---	--	--

<i>Unità Funzionale</i>	COLLEGAMENTI CALABRIA	CS0197_F0
<i>Tipo di sistema</i>	PARTE GENERALE STRADALE – OPERE CIVILI	
<i>Raggruppamento di opere/attività</i>	SEZIONI TIPO COSTRUTTIVE DELLE OPERE D'ARTE IN SOTTERRANEO	
<i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i>	GALLERIA NATURALE	
<i>Titolo del documento</i>	"RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO	

CODICE	C	G	0	8	0	0	P	C	L	D	C	G	S	T	7	G	N	0	0	0	0	0	0	6	F0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	M.FRANDINO	A.BELLOCCHIO	G.CASSANI



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## INDICE

INDICE.....	3
1 Premessa.....	5
1.1 Approccio progettuale ADECO-RS .....	5
1.2 Inquadramento generale e sintesi delle sezioni tipo applicate.....	6
2 Riferimenti normativi e documentazione di riferimento.....	9
2.1 Applicazione della Normativa.....	9
2.2 Elaborati di riferimento .....	12
3 Caratteristiche dei materiali .....	13
4 FASE CONOSCITIVA: Contesto geologico, idrogeologico e geotecnico .....	16
4.1 Inquadramento geologico.....	16
4.2 Inquadramento geomorfologico .....	16
4.3 Inquadramento stratigrafico lungo il tracciato .....	20
4.4 Sintesi lungo il tracciato .....	27
4.5 Inquadramento idrogeologico.....	27
4.5.1 Rampa B .....	29
4.5.2 Afflussi lungo le Rampe autostradali.....	29
4.5.3 Perturbazione della piezometria.....	30
4.6 Sintesi dei parametri geotecnici e individuazione dei parametri operativi di calcolo.....	31
5 FASE DI DIAGNOSI: Previsioni sul comportamento degli ammassi allo scavo.....	35
5.1 Individuazione delle sezioni di calcolo e analisi mediante linee caratteristiche .....	37
6 FASE DI TERAPIA .....	40
6.1.1 Verifica tensionale dei rivestimenti.....	45
6.1.1.1 Verifica dei rivestimenti di prima fase.....	45
6.1.1.2 Verifica dei rivestimenti definitivi .....	46
7 Analisi di stabilità del fronte .....	48
8 Analisi numeriche .....	50
8.1 Curve di "relax" nel modello di calcolo .....	52
8.2 Fasi di calcolo .....	53
8.3 Risultati delle analisi numeriche.....	53
8.3.1 Modalità di verifica.....	54
8.3.1.1 Rivestimento di prima fase .....	54

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>	<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

8.3.1.2	Rivestimento definitivo .....	55
8.3.2	Risultati deformativi .....	56
8.3.3	Risultati tensionali .....	56
8.3.3.1	Verifica dei rivestimento di prima fase S.L.U.....	56
8.3.3.2	Verifica dei rivestimenti definitivi S.L.U. ....	57
8.3.3.3	Verifica dei rivestimenti definitivi S.L.E.....	60
ALLEGATO – RIFERIMENTI TEORICI E DI CALCOLO .....		61
9	Metodo delle curve caratteristiche .....	62
9.1	Aspetti generali .....	62
9.2	Consolidamento del fronte di scavo .....	65
10	Analisi di stabilità del fronte.....	67
11	Software di calcolo .....	69
11.1	PLAXIS.....	69
ALLEGATO – LINEE CARATTERISTICHE .....		75
ALLEGATO – STABILITA' DEL FRONTE .....		76
ALLEGATO – ANALISI NUMERICHE .....		77

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 1 Premessa

Nella presente relazione si analizzano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione della galleria naturale *RAMO B*, nell'ambito dei lavori di costruzione dei collegamenti stradali tra il Ponte sullo Stretto e la città di Messina. Lo scavo in naturale è previsto a piena sezione.

La tipologia e l'intensità dei trattamenti da applicare al fronte di scavo sono calibrati sulla base dell'analisi tenso-deformativa del fronte stesso e l'individuazione della relativa classe di comportamento (A, B, C secondo la classificazione A.De.Co.RS).

### 1.1 Approccio progettuale ADECO-RS

Nei paragrafi che seguono, dopo aver richiamato il quadro geologico-geotecnico sino ad oggi noto (FASE CONOSCITIVA), sulla base dei dati e delle considerazioni riportate all'interno della relazione geologica e geotecnica, verrà individuato il più probabile comportamento che l'ammasso potrebbe manifestare a seguito del proseguimento degli scavi (FASE DI DIAGNOSI).

In base a quanto determinato in fase di diagnosi verranno quindi stabilite le principali tipologie di intervento che si ritengono necessarie a garantire la stabilità globale della cavità nel breve e nel lungo termine (FASE DI TERAPIA).

La sequenza delle varie fasi progettuali può essere di seguito riassunta nelle quattro seguenti tappe fondamentali:

**Fase conoscitiva** che consente, attraverso un'analisi dettagliata ed un esame critico dei dati disponibili, una preliminare caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso interessato dallo scavo;

**Fase di diagnosi** nella quale, utilizzando il metodo delle "linee caratteristiche", analizzando i differenti gruppi geomeccanici individuati nella fase conoscitiva ed in base ai differenti valori di copertura, si individuano delle classi di comportamento, considerando quale elemento centrale per l'analisi, la stabilità del fronte di scavo (approccio ADECO-RS):

caso "A", fronte stabile,

caso "B" fronte stabile a breve termine,

caso "C" fronte instabile;

**Fase di terapia** che consente, successivamente all'individuazione delle categorie di comportamento, la definizione degli interventi progettuali più idonei da mettere in atto per garantire la stabilità globale della cavità nel breve e nel lungo termine. In questa fase verranno svolte, per la verifica del comportamento del terreno allo scavo a seguito degli interventi di consolidamento e

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

supporto previsti e per la determinazione degli stati tenso-deformativi indotti nelle strutture, analisi sia mediante il metodo delle "linee caratteristiche" sia utilizzando modelli numerici agli elementi finiti per le sezioni di scavo ritenute maggiormente significative;

**Fase di controllo** ove sono forniti, per ciascuna sezione tipo, dei valori limite di deformazione e delle linee guida per l'applicazione delle stesse sezioni (per questa fase si rimanda alla "Relazione tecnica generale").

In fase di progettazione, lo studio e il dimensionamento degli interventi di preconsolidamento al fronte tiene conto dei seguenti aspetti:

- 1- Garantire la condizione di stabilità globale del fronte, verificate mediante metodi all'equilibrio limite (si veda capitolo 7). Tale aspetto risulta in genere dimensionante per le basse coperture, alle quali le analisi analitiche del comportamento deformativo del cavo e del fronte (Teoria delle Linee Caratteristiche) non sono applicabili, venendo meno le condizioni di stato tensionale isotropo in mezzo omogeneo;
- 2- Garantire il controllo deformativo del cavo e del fronte, legato a sua volta all'estensione del raggio plastico. Tale aspetto viene tenuto in debito conto nelle analisi analitiche sviluppate nella fase di terapia mediante il metodo delle Linee caratteristiche.
- 3- Verifiche locali di stabilità correlabili in prima approssimazione alla "densità di intervento", intesa come numero di consolidamenti rapportato alla superficie di scavo. I valori limite superiori ed inferiori di densità dipendono dalla tipologia di consolidamento, dalle caratteristiche dell'ammasso e da considerazioni legate all'esperienza in contesti similari.

## 1.2 Inquadramento generale e sintesi delle sezioni tipo applicate

Gli ambiti territoriali direttamente interessati dalle opere ricadono nei comuni di Villa San Giovanni e Campo Calabro in provincia di Reggio Calabria.

Il sistema urbano centrale è rappresentato da Reggio Calabria che costituisce uno dei due principali sistemi antropizzati della Calabria con una fascia costiera di circa 30 km che ospita l'80% della popolazione di tutto il complesso urbano.

L'intervento di progetto si integra completamente nel sistema autostradale nazionale esistente o in costruzione, costituendo con esso un complesso omogeneo e perfettamente fruibile dall'utente.

La rete stradale che attualmente insiste sulla fascia di territorio compresa fra la struttura terminale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>	<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

del Ponte, Villa San Giovanni, Cannitello e Scilla è costituita dalle infrastrutture di seguito elencate.

**A. Autostrada Salerno-Reggio Calabria (A3)**

**B. SS N°18 Tirrenica**

**C. Rete stradale locale**

La configurazione del sistema dei rami di accesso (direzione Messina) e di uscita (direzione nord e direzione Reggio Calabria) prevede i seguenti collegamenti viari:

1. *sistema principale di uscita*, costituito dal ramo A (dalla struttura terminale del Ponte all'autostrada A3 in direzione Nord) e dal ramo B (dalla struttura terminale del Ponte all'autostrada A3 in direzione Reggio Calabria);
2. *sistema principale di accesso*, costituito dal ramo C (dall'autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria in direzione Sud fino alla struttura terminale del Ponte) e dal ramo D (dall'autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria in direzione Nord fino alla connessione con il ramo C);
3. *sistema di collegamento al Centro Direzionale*, che permette il collegamento alle aree destinate ai servizi generali, alla gestione ed alla manutenzione del Ponte;
4. *sistema di servizio ed emergenza*, che permette il movimento dei veicoli addetti alla manutenzione ordinaria e straordinaria, e la gestione del traffico in condizione di emergenza (chiusura di una carreggiata del Ponte o di blocchi in altri punti della rete per una gestione complessiva della sicurezza e dell'emergenza).

Il collegamento funzionale tra il Ponte ed il sistema autostradale nazionale (A3) è garantito dai rami principali A e B, diretti rispettivamente verso nord (Salerno) e verso sud (Reggio Calabria).


**RAMO "B"**

Il "Ramo B" ha inizio con una uscita a destra dal ramo A, al km 0+375 circa di quest'ultima, e termina sulla "Carreggiata per la Sicilia" prevista nel progetto del Lotto 7° dell'adeguamento della A3, all'altezza del km 1+170 circa.

La galleria naturale ha origine a 600m circa dall'asse Torre e ha uno sviluppo di 480m circa.

Dopo il tratto in galleria, la rampa si inserisce sul vecchio tracciato della A3 in corrispondenza del viadotto "Campanella".

La sezione tipo presenta una corsia di larghezza pari a 3,75 m affiancata da corsia di emergenza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

di 3,00 m e da un franco laterale in sinistra di 2,25 m, e si mantiene tale anche in galleria.

La larghezza del franco potrà consentire in futuro, in osservanza a quanto previsto nel Progetto Preliminare, la trasformazione della carreggiata in una sezione a 2 corsie da 3,50 m oltre al franco laterale di 1.00 m sia in destra che in sinistra.

Il ramo B presenta un andamento planimetrico complesso, composto da un doppio flesso con raggi compresi tra 405 e 525 m; la presenza della banchina in sinistra da 2,25 m garantisce sempre la distanza di visuale libera anche nelle curve verso sinistra.

La livelletta non supera mai il 4% nei tratti in galleria in salita.

In caso di corsie di accelerazione e decelerazione sempre in destra alla singola carreggiata è prevista l'aggiunta di una o due corsie da 3.75 m con eliminazione della corsia di emergenza e realizzazione di una banchina pavimentata da 2.50.

In presenza di piazzola di sosta si prevede l'allargamento della piattaforma di ulteriori 3,50 m oltre la corsia di emergenza. Planimetricamente le piazzole sono previste con una distanza massima in galleria di 600 m per senso di marcia e presentano uno sviluppo complessivo pari a 45 m.

Di seguito si riporta, per facilità di consultazione della relazione, la sintesi delle sezioni tipo di avanzamento applicate lungo il tracciato della galleria in oggetto. Per i dettagli relativi alle scelte progettuali alla base della Tabella 1 e la definizione delle percentuali di applicazione delle sezioni tipo, si veda la relazione tecnica generale. Per la definizione dei gruppi geomeccanici si veda il paragrafo 4.6.

<b>C1L</b>	Applicata nelle zone di contatto lito-stratigrafico tra i depositi superficiali o le ghiaie di Messina e i conglomerati di pezzo.	STANDARD	VTR CEMENTATI	JET Dn600	TUBI IN ACCIAIO SU 120°	25cm	2IPN180/100
<b>B2V</b>	Applicata come sezione tipo prevalente nella formazione del "CONGLOMERATO DI PEZZO" gruppo geomeccanico 2 e nella formazione delle Plutoniti in zone tettonizzate e fratturate	STANDARD	VTR CEMENTATI	INIEZIONI	TUBI IN ACCIAIO SU 120°	25cm	2IPN180/100
<b>C1IN</b>	Applicata nella formazione delle "GHIAIE E SABBIE DI MESSINA Gruppo Geomeccanico 2" per coperture inferiori ai 25m circa.	STANDARD	MICROJET ARMATI CON VTR	JET Dn600	TUBI IN ACCIAIO SU 120°	25cm	2IPN180/100

**Tabella 1 Sintesi sezioni tipo applicate**



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 2 Riferimenti normativi e documentazione di riferimento

Le verifiche statiche degli interventi e la redazione della presente relazione di calcolo, compresi gli elaborati tecnici allegati, sono state effettuate nel rispetto della Normativa in vigore e delle Specifiche tecniche fornite.

La normativa di riferimento è il D.M. 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" (pubblicato sulla G.U. n.29 –Suppl. Ordinario n.30 – del 4 febbraio 2008). Si è inoltre fatto riferimento a quanto riportato all'interno della Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009: "Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008".

### 2.1 Applicazione della Normativa

Le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito, per brevità, NTC 2008) "definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni", nei riguardi delle prestazioni richieste in termini di resistenza, stabilità, robustezza e durabilità. Le prestazioni di un'opera sono definite con riferimento a stati limite che si possono raggiungere durante la vita dell'opera, e che corrispondono a condizioni oltre le quali l'opera non soddisfa più i requisiti di progetto.

Nelle NTC 2008 i coefficienti di sicurezza sono introdotti direttamente sulle diverse fonti di incertezza (azioni, materiali, resistenza):

- $\gamma_F$  =  $\gamma_E$  per le azioni o l'effetto delle azioni (differenziati in funzione del tipo di carico (permanente o variabile) e in funzione dell'effetto (favorevole o sfavorevole);
- $\gamma_M$  per i materiali (applicati ai parametri di resistenza del terreno)
- $\gamma_R$  per le resistenze (definiti in funzione della tipologia di opera)

Le NTC 2008 richiedono, in linea con l'approccio progettuale tradizionale, che siano eseguite le analisi relative a:

- stabilità globale della cavità, con particolare riguardo al fronte e alla zona retrostante il fronte,
- valutazione dei risentimenti attesi in superficie in condizioni di bassa copertura,
- interazione terreno-struttura nelle fasi costruttive,
- interazione terreno-struttura in esercizio.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Per le analisi progettuali le NTC 2008 impongono di fare ricorso a metodi analitici e/o metodi numerici, questi ultimi necessari per l'analisi dell'interazione terreno-struttura nelle fasi costruttive e in condizioni di esercizio. I metodi di calcolo utilizzati devono essere *"di comprovata validità, adeguati alla complessità del sistema opera-terreno e al livello di progettazione"*.

Nel seguito si illustra l'approccio progettuale utilizzato, inteso come modalità di verifica della sicurezza e delle prestazioni dell'opera coerente con indicazioni e prescrizioni della nuova normativa.

La verifica della sicurezza deve essere effettuata con riferimento a stati limite "ultimi" e di "esercizio". In linea del tutto generale e non esaustiva per le opere in sotterraneo possono individuarsi i seguenti stati limite:

1. stati limite ultimi per sviluppo di meccanismi di collasso determinati dal raggiungimento della resistenza del terreno/ammasso roccioso interessato dallo scavo (GEO);
2. stati limite ultimi relativi al raggiungimento delle resistenze degli elementi strutturali (STR);
3. stati limite ultimi di erosione e sifonamento del terreno dovuta a gradienti idraulici (HYD);
4. stati limite di esercizio (SLE) connessi alla realizzazione delle opere in sotterraneo relativamente al danno funzionale dei manufatti presenti in superficie (edifici) o in profondità (tubazioni, fondazioni profonde, gallerie esistenti) con cui l'opera in sotterraneo interagisce;
5. stati limite di esercizio (SLE) relativi allo stato tensionale dei rivestimenti durante le fasi di esercizio.

In analogia con quanto indicato per le opere geotecniche per le quali l'interazione terreno-struttura è significativa (es. opere di sostegno flessibili), per le verifiche si adotta l'**Approccio 1**.

In particolare:

A. le verifiche di stabilità del fronte verranno condotte in accordo con gli **stati limite ultimi GEO Combinazione 2 dell'Approccio 1 (A2+M2+R2)**, nella quale i parametri di resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti parziali del gruppo M2, i coefficienti sulla resistenza globale (R2) sono unitari e solo le azioni variabili sono amplificate con coefficienti maggiori di 1 del gruppo A2. La procedura di riduzione dei parametri di resistenza tramite coefficienti parziali per l'analisi di un meccanismo di rottura agisce sulla maggiore fonte di incertezza e fornisce, di fatto, una misura della distanza dalle condizioni di collasso.

B. Le verifiche di interazione terreno struttura della cavità e le verifiche strutturali verranno condotte in accordo con gli **stati limite ultimi STR Combinazione 1 dell'Approccio 1**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

**(A1+M1+R1)**, nella quale i coefficienti sui parametri di resistenza (M1) e sulla resistenza globale del sistema (R1) sono unitari, mentre le azioni permanenti e le azioni variabili sono amplificate mediante i coefficienti del gruppo A1. E' opportuno, in questo caso, applicare i coefficienti amplificativi delle azioni direttamente alle sollecitazioni. Nelle analisi di interazione ai fini della valutazione delle sollecitazioni delle strutture, dove il fattore dominante è rappresentato dalle rigidità e dai rapporti relativi delle rigidità di terreno e struttura, la modellazione eseguita con i valori caratteristici delle azioni e delle resistenze fornisce una descrizione realistica dello stato tensionale nel terreno e negli elementi strutturali. La procedura di riduzione dei parametri di resistenza del terreno è sconsigliabile perché introdurrebbe nel calcolo parametri tra loro non congruenti e quindi risultati non attendibili.

C. Nelle verifiche degli **stati limite di esercizio** i valori di progetto delle azioni, delle proprietà dei materiali e della resistenza globale sono assunti pari ai valori caratteristici. La verifica dello SLE si esegue calcolando il valore di progetto dell'effetto delle azioni (ad es. cedimenti differenziali, distorsioni) e confrontandolo con il valore limite prefissato, da specificare come requisito di progetto. In funzione della complessità del sistema e dello scopo delle analisi la previsione degli spostamenti al contorno della galleria può essere effettuato, come è prassi, con metodi semi-empirici o metodi numerici.

Adottando tale approccio, di fatto, si conserva la distinzione tipica dell'analisi geotecnica tradizionale, in cui si affrontano separatamente, e spesso con metodi e modelli differenti, i due aspetti del dimensionamento di un'opera geotecnica: la sicurezza rispetto ad un cinematiso di collasso e l'interazione terreno-struttura dalla quale è possibile derivare il campo degli spostamenti e le condizioni di sollecitazione negli elementi strutturali. Tale modo di procedere è in conformità a quanto indicato nelle *"Recommandations de l'AFTES-Compatibilité des recommandations AFTES relatives aux revêtements des tunnels en béton avec le Eurocodes"* (2007).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<b>Codice documento</b> CS0197_F0.doc	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20/06/2011

### 3 Caratteristiche dei materiali

#### RIVESTIMENTI DEFINITIVI

##### CALCESTRUZZO PER RIV. DEFINITIVO

classe di resistenza min. (UNI EN 206)	C25/30 tipo II -
tipo di cemento	42,5 o 42,5R -
dosaggio minimo di cemento	320 kg/m <sup>3</sup>
classe di esposizione	XC2

##### PREDALLE PER CASSEFORME BY-PASS

SCASSERO: classe di resistenza min.	C15/20 -
TRASPORTO: classe di resistenza min.	C15/20 -
GETTO RIVESTIMENTO: classe di resistenza min.	C25/30 -
BARRE: tipo di acciaio	B450C -

##### MAGRONE DI PULIZIA

classe di resistenza min. (UNI EN 206)	C12/15 -
classe di esposizione	XC2

##### ACCIAIO PER C.A

tipo di acciaio	B450C -
copriferro minimo	c > 5 cm

#### PRERIVESTIMENTI

##### SPRITZBETON E SPRITZBETON FIBRORINFORZATO (con silicati)

resistenza media su carote a 28gg	$f_{cm}$	25 MPa
resistenza media su carote a 24h	$f_{cm-24}$	10.00 MPa
resistenza media su carote a 48h	$f_{cm-48}$	15.00 MPa
rapporto a/c in peso max.		0.5 -

##### FIBRE IN ACCIAIO (CON ESTREMITA' SAGOMATA AD UNCINO)

dosaggio in fibre		= 30 kg/m <sup>3</sup>
energia assorbita		500 J
resistenza minima a trazione	$R_{ak}$	700 MPa
lunghezza	L	30 mm
diametro	D	0.5 mm
rapporto di aspetto	L/D	60 -

##### ACCIAIO

PROFILATI E PIASTRE: tipo di acciaio	S275 -
CATENE: tipo di acciaio	B450C -
RETE ELETTRICALDATA: tipo di acciaio	B450C -

##### BULLONI AD ALTA RESISTENZA

viti: classe di resistenza	8.8 -
dadi: classe di resistenza	8 -
rosette: acciaio temperato e rinvenuto HRC32÷40	C50 -

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<b>Codice documento</b> CS0197_F0.doc	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20/06/2011

## CONSOLIDAMENTI AL FRONTE

### TUBI IN VTR (Caratteristiche del composito)

diametro esterno ad aderenza migliorata	60 mm
spessore medio	10.00 mm
resistenza a trazione (UNI EN 61)	= 600 MPa
resistenza a taglio (ASTM D 732 85)	= 100 MPa
resistenza a flessione (UNI EN 63)	= 600 MPa
resistenza allo scoppio (solo per tubi valvolati)	= 8 MPa
allungamento a rottura	2 %
modulo elastico (UNI EN 61)	= 30000 MPa
contenuto in vetro	55 %
densità (UNI 7092/72)	1.8 t/mc
diametro di perforazione	100÷120 mm

### MISCELA CEMENTIZIA A RITIRO CONTROLLATO

resistenza a compressione monoassiale a 48h	>3 MPa
---	--------

### MICROJET ARMATO CON TUBI IN VTR

diametro teorico colonna	Dn	300 mm
modalità di iniezione		Monofluido -
res. media a compressione del terreno trattato a 48h		>2 MPa
res. media a compressione del terreno trattato a 28gg		>5 MPa
RQD del terreno trattato		>70 %
Tubo in VTR	Diam	60/40 mm
resistenza a trazione (UNI EN 61)		= 600 MPa

#### NOTE

I parametri operativi di intervento saranno definiti con specifico campo prova.

## CONSOLIDAMENTI AL CONTORNO

### INFILAGGI METALLICI

TUBI IN ACCIAIO: tipo di acciaio	S355 -
copriferro minimo per la perforazione	>15 mm

### MISCELE PER INIEZIONI AL CONTORNO

#### MISCELA DI GUAINA

resistenza a compressione della miscela a 28 gg	1 MPa
---	-------

#### CARATTERISTICHE MINIME DEL TERRENO CONSOLIDATO


resistenza a compressione semplice a 48 h	1 MPa
resistenza a compressione semplice a 7 giorni	1.5 MPa
R.D.Q. a 48 h	50 %
R.D.Q. a 7 giorni	70 %

### JET-GROUTING

diametro teorico colonna	Dn	600 mm
modalità di iniezione		Monofluido -
res. media a compressione del terreno trattato a 48h		>2 MPa
res. media a compressione del terreno trattato a 28gg		>5 MPa
RQD del terreno trattato		>70 %
TUBI IN ACCIAIO: tipo di acciaio		S355 -
TUBI IN ACCIAIO (ARMATURA STANDARD):	diam	114,3mm sp.10 mm
TUBI IN ACCIAIO (JET IN AVANZAMENTO):	diam	168,3mm sp. 8mm

#### NOTE

I parametri operativi di intervento saranno definiti con specifico campo prova.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>	<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

### SISTEMI DI DRENAGGIO

#### DRENAGGI IN AVANZAMENTO EVENTUALI

tubo microfessurato in PVC ad alta resistenza rivestiti in TNT

diametro esterno

60 mm

spessore

5 mm

diametro perforazione

100 mm

resistenza a trazione

4.5 MPa

#### TUBI DI RACCOLTA ACQUA SOTTO PIATTAFORMA IN CLS

diametro

30-50 cm

sella di appoggio

C20/25 tipo III

tubo in cls

C25/30 tipo II

cls di protezione 15cm

C20/25 tipo III

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## **4 FASE CONOSCITIVA: Contesto geologico, idrogeologico e geotecnico**

Di seguito si riporta un sintetico inquadramento geologico, geomorfologico, idrogeologico e geotecnico dell'area interessata dallo scavo della Galleria naturale Ramo A relativa al tracciato stradale Calabria. Per il dettaglio di tali caratteristiche si rimanda ai singoli elaborati: Relazione geologica generale, Relazione geomorfologica generale, Relazione idrogeologica generale e Relazione geotecnica generale.

### **4.1 Inquadramento geologico**

L'evoluzione geologica del territorio comprendente le due aree sulle sponde dello Stretto è riconducibile alla complessa storia deformativa della Sicilia nord-orientale e della Calabria, il cui assetto strutturale è stato da tempo oggetto di analisi e di diversa interpretazione da parte di vari Autori, in un contesto più ampio che comprende l'intero Arco Calabro-Peloritano.

Nel territorio considerato restano compresi termini della Catena Kabilo-Calabride, costituita da unità di basamento ercinico con resti delle originarie coperture sedimentarie meso-cenozoiche. Al tetto di tali unità si hanno successioni terrigene sin - e tardorogeniche a carattere fliscioide di età supraeocenica e oligo-miocenica. Seguono depositi sia terrigeni che evaporitici di età compresa tra il Serravalliano ed il Pleistocene, appartenenti a cicli sedimentari sovrapposti, riscontrabili principalmente lungo le fasce costiere.

I terreni più antichi affioranti nelle aree oggetto di studio appartengono alla terminazione meridionale dell'Arco Calabro-peloritano, che costituisce un segmento dell'orogene appenninico-maghrebide, esteso dall'Appennino meridionale alla Sicilia. Detti terreni, appartenenti all'unità tettonica dell'Aspromonte, costituiscono il basamento dei sedimenti miocenici e plio-pleistocenici, più estesamente affioranti nelle aree in esame.

### **4.2 Inquadramento geomorfologico**

Il rilevamento condotto nell'area ha consentito di ricostruire il quadro geomorfologico generale che nei suoi punti salienti può essere così sintetizzato:

- 1) Il motivo geomorfologico di fondo e caratteristico dell'area è legato alla presenza, fino alle quote massime della zona rilevata, dell'alternanza di superfici terrazzate di origine marina e delle



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

scarpate che le delimitano e, quindi, dall'alternanza tra superfici blandamente inclinate e versanti più o meno elevati ed acclivi.



2) Sempre in relazione alle recenti variazioni eustatiche e, quindi, dei livelli di base rispetto alla circolazione idrica continentale, le forme primarie terrazzate sono state incise ad opera delle acque incanalate che si sono organizzate in reticoli di estensione limitata e a basso grado di gerarchizzazione, quindi di formazione recente. I rapidi abbassamenti relativi del livello del mare hanno prodotto forti fasi di incisione, con la formazione delle valli tipiche della zona, cioè strette e profonde e delimitate da versanti ad elevata inclinazione. Ovviamente, in funzione della tipologia del substrato entro cui agiscono le acque incanalate, la morfologia appena descritta può essere più o meno accentuata: morfologie più accentuate sono riscontrabili nei settori di attraversamento di litologie quali il basamento cristallino ed il Conglomerato di Pezzo, mentre forme relativamente più dolci sono tipiche delle zone di attraversamento delle Sabbie e Ghiaie di Messina, più erodibili e soggette a fenomeni di degradazione. Nell'ambito della morfologia fluviale rimane inoltre traccia anche delle fasi di stazionamento del livello del mare, che hanno condotto alla formazione di terrazzi fluviali di cui si riscontrano sporadici lembi residui su più livelli. L'evidenza raccolta in alcuni luoghi di alvei che incidono le alluvioni recenti, testimoniano di una dinamica fluviale in cui ancora si registrano fasi erosive in alternanza alle fasi deposizionali.

3) Ulteriore fattore morfogenetico che segue e, in parte, si sovrappone all'azione fluviale è rappresentato dai fenomeni di degradazione e di frana che si impostano principalmente sui versanti formati per azione fluviale e/o marina, determinandone il rimodellamento. La presenza di numerosi forme e depositi attivi o al più quiescenti di origine gravitativa e, più in generale, dovuti a processi di denudazione/degradazione, mette in risalto un quadro di instabilità generalizzata dell'area, in risposta al sollevamento rapido e di grande entità che ha interessato l'area nel Quaternario.

I principali fattori di dissesto nell'area possono essere sintetizzati come segue:

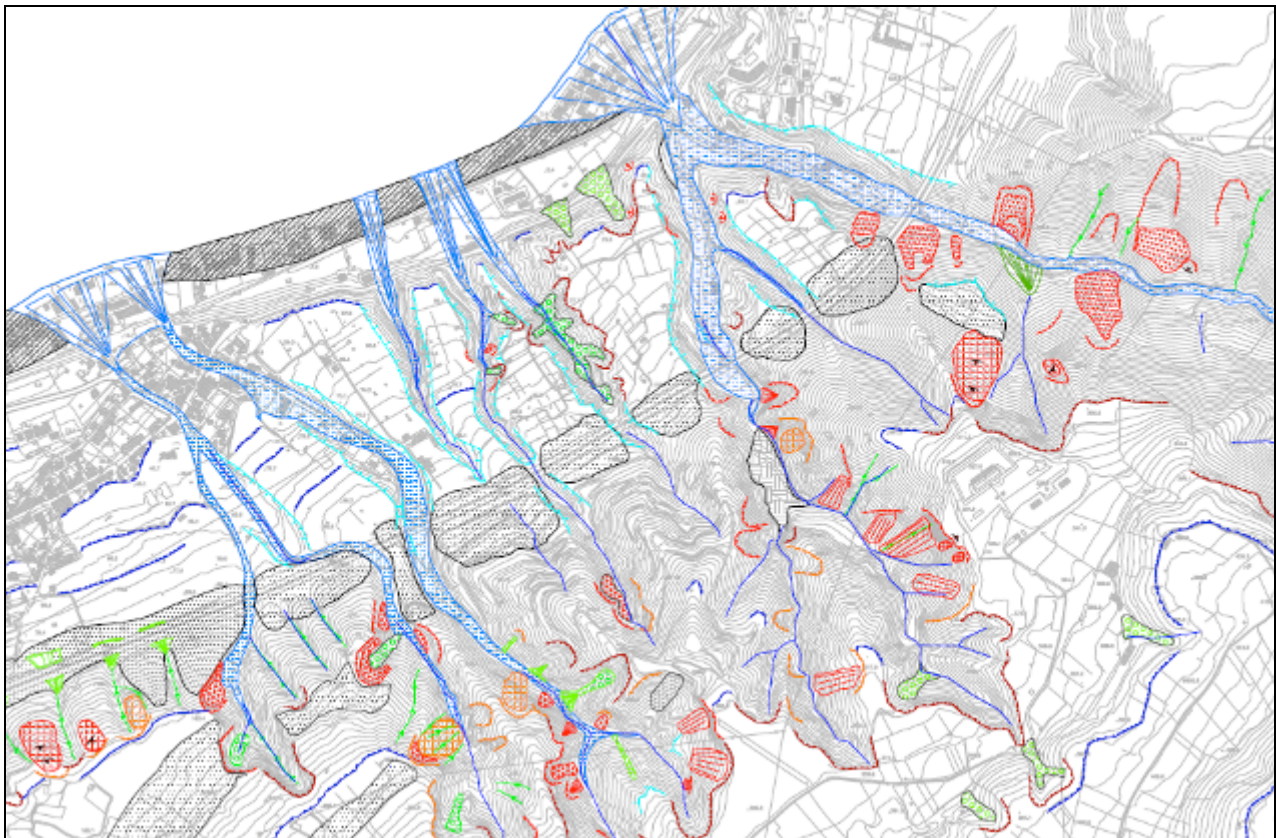
1) Possibile occorrenza di fenomeni alluvionali, con coinvolgimento dei tratti terminali dei principali torrenti, ove si possono avere esondazioni e/o la deiezione dell'elevato trasporto solido, di cui i con alluvionali rappresentano la testimonianza.

2) Processi di instabilità diffusi sui versanti locali e che si esplicano sia tramite processi erosivi lato sensu (degradazione) sia tramite fenomeni franosi che abbracciano un'ampia tipologia di cinematismi. Tra questi meritano menzione, per dimensione e stato di attività, le frane traslative e rototraslative del settore nord; in particolare, le frane con componente traslativa prevalente e di crollo/ribaltamento sono concentrate sia in destra che in sinistra idrografica dei valloni compresi tra

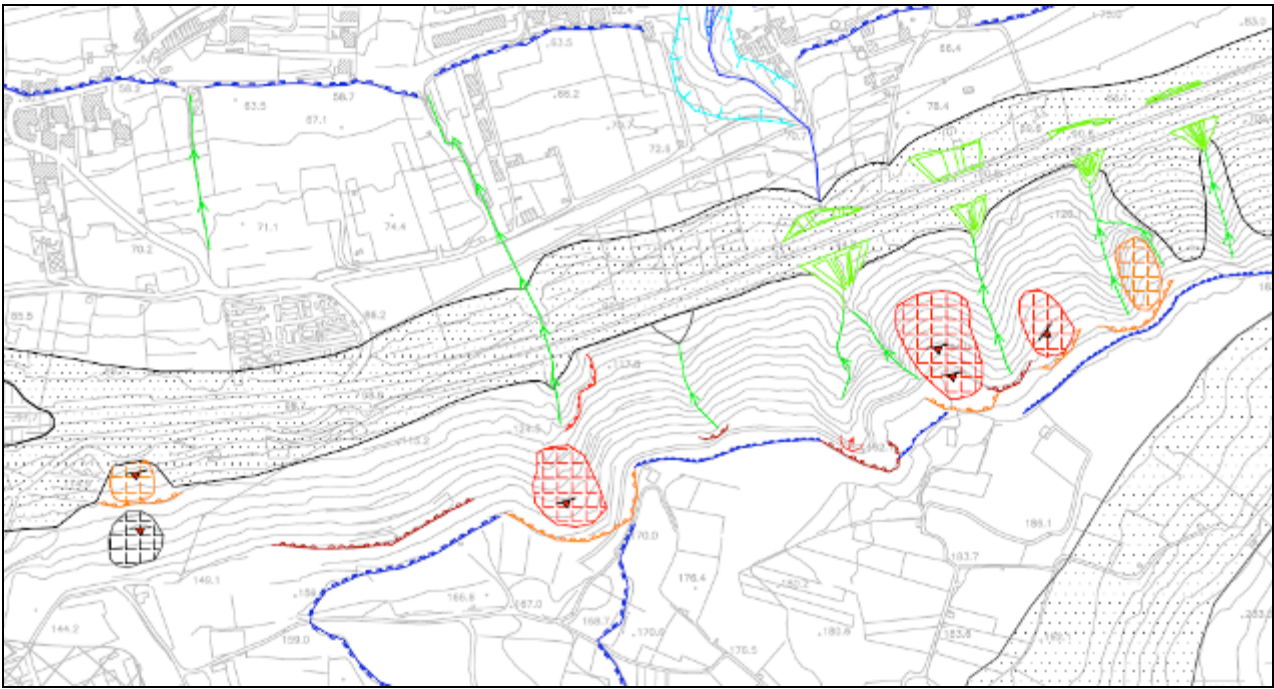
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

i torrenti S. Trada e Zagarella (Figura 1), mentre le frane con componente rotazionale più apprezzabile sono per lo più concentrate sul versante che borda a sud il tracciato della A3 tra lo svincolo di S. Trada e l'area di servizio "Villa San Giovanni" (Figura 2). In quest'ultimo settore sono inoltre diffuse alla base del versante anche accumuli tipo coni di origine mista, a testimoniare la possibile attivazione di fenomeni di erosione, trasporto e deposizione delle coltri detritiche prodotte dalla sommità e lungo il versante stesso, secondo meccanismi di flusso detritico incanalato lungo i solchi di erosione concentrata.

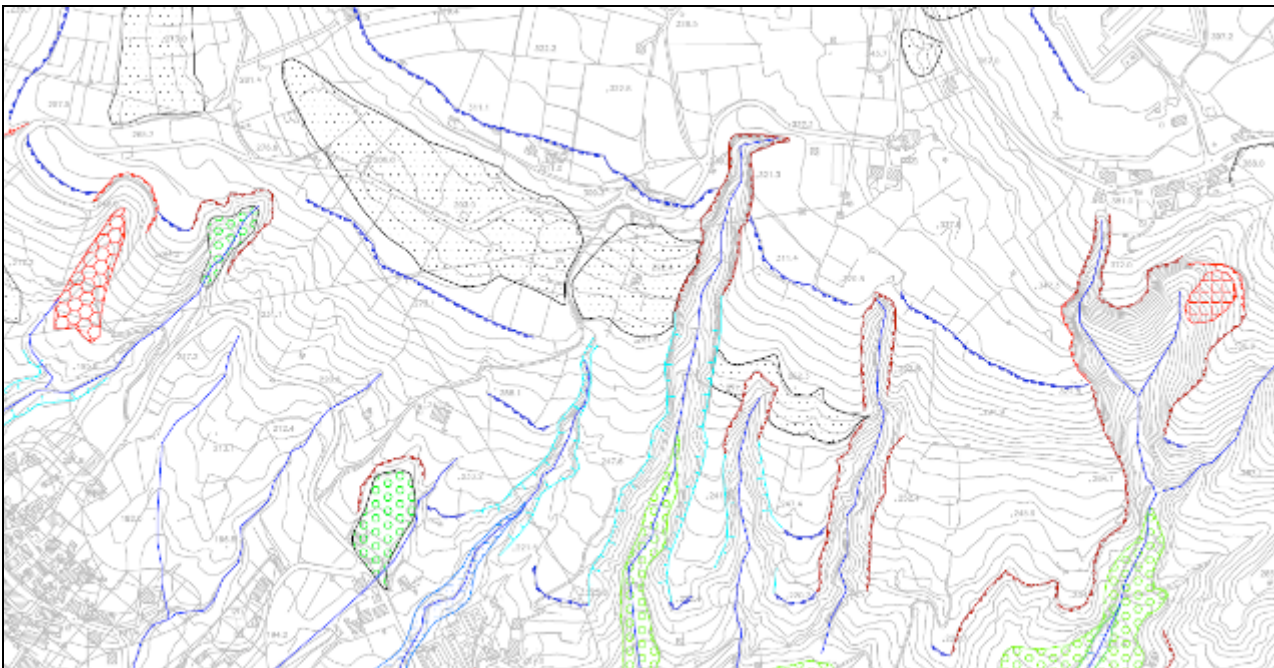
Fenomeni di dissesto legati sia a frane (seppure mediamente di dimensioni minori) che a processi di degradazione sono presenti anche nei settori meridionale ed occidentale dell'area, dove si osservano in particolare diffusi fenomeni franosi alla tesata e lungo i fianchi delle valli più incise e ampie coltri colluviali che registrano gli intensi processi erosivo-deposizionali che coinvolgono soprattutto le Sabbie e Ghiaie di Messina (Figura 3 e Figura 4).



**Figura 1 - Inquadramento geomorfologico; valloni compresi tra i torrenti S. Trada e Zagarella**

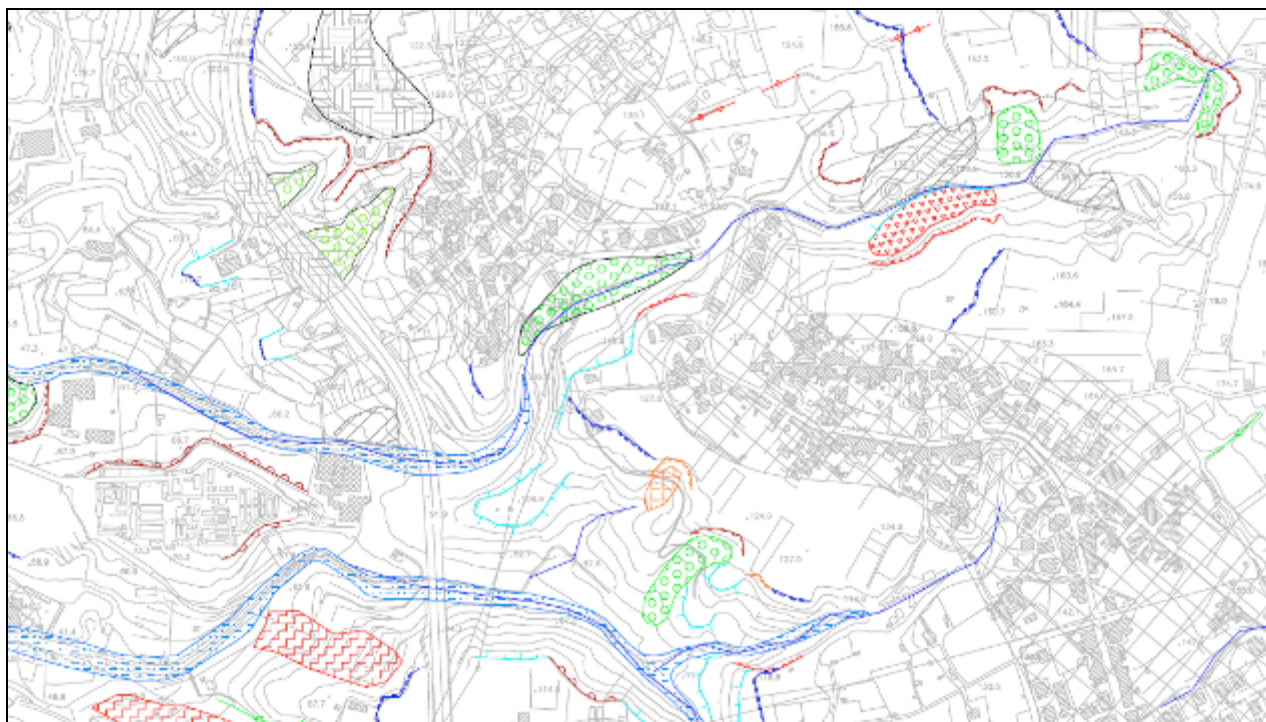


**Figura 2 - Inquadramento geomorfologico; versante tra lo svincolo del tracciato della A3 di S. Trada e l'area di servizio "Villa San Giovanni"**



**Figura 3 - Inquadramento geomorfologico; settori meridionale ed occidentale dell'area**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**Figura 4 - Inquadramento geomorfologico; settori meridionale ed occidentale dell'area**

### **4.3 Inquadramento stratigrafico lungo il tracciato**

Di seguito si descrivono in sintesi le litologie presenti lungo il tracciato autostradale a partire dalla più antica alla più recente.

#### **CONGLOMERATO DI PEZZO**

E' costituito da un conglomerato poligenico ed eterometrico, a matrice arenacea, da poco a mediamente fino a ben cementato, a stratificazione poco distinta a volte completamente assente. I clasti sono costituiti quasi esclusivamente da rocce del substrato cristallino-metamorfico. I singoli clasti si presentano da sub a scarsamente arrotondati, hanno dimensione variabile, anche superiore al metro ed il deposito si presenta non classato (Figura 5, Figura 6 e Figura 7). Raramente è stata rinvenuta nella matrice tra i clasti la presenza di frammenti lignei carboniosi. Localmente, inoltre, nella parte alta, al di sotto del contatto trasgressivo con i soprastanti depositi ascritti ai Trubi, si rinviene in affioramento ed in sondaggio la presenza di un livello di spessore metrico costituito da sabbie grigie monogranulari a laminazione piano-parallela che a luoghi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

passano a sabbie gialle ascrivibili ai depositi trasgressivi dei Trubi (Figura 8).

Queste evidenze portano ad ipotizzare un ambiente di sedimentazione condizionato dalla vicinanza di rilievi cristallini, caratterizzati da una forte energia del rilievo, soggetti ad intensa erosione. Il materiale smantellato si sarebbe depositato al piede dei rilievi, al margine di una piana costiera o in un ambiente marino litorale, dove subiva una scarsa evoluzione da parte del moto ondoso. Il materiale si sarebbe accumulato prevalentemente allo sbocco delle aree di impluvio con flussi ad alta efficienza, presumibilmente con meccanismi di trasporto in massa gravitativi (debris flow).



**Figura 5 - Affioramenti del Conglomerato di Pezzo nei pressi di Campo Piale.**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**Figura 6 – Affioramento del Conglomerato di Pezzo nei pressi di Campo Piale (Hotel Panorama).**

I depositi del Conglomerato di Pezzo affiorano estesamente nel settore più occidentale dell'area (località Pezzo e Cannitello, versante a monte dell'autostrada SA-RC).

Data la limitata estensione degli affioramenti di Conglomerato di Pezzo la sua caratterizzazione litologica è stata significativamente coadiuvata dall'analisi macroscopica delle carote di sondaggio.



**Figura 7 – Affioramento del Conglomerato di Pezzo nei pressi della località Mortille.**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011


Ciononostante, permane in alcuni siti (cfr Opera Terminale) l'oggettiva difficoltà a distinguere inequivocabilmente il Conglomerato di Pezzo dal sottostante substrato cristallino, a causa della mancanza in carota di sondaggio di evidenza di clasti natura metamorfici, all'elevato grado di cementazione che tende ad obliterare l'eventuale natura clastica del deposito ed al ridotto stato di fratturazione osservabile sulle carota.

In base all'insieme dei dati stratigrafici disponibili non è possibile stimare direttamente la potenza massima dell'Unità; tuttavia, le indagini geognostiche hanno reso possibile attribuire al Conglomerato di Pezzo spessori variabili da un minimo di qualche metro ad un massimo di diverse decine di metri (Figura 6 e Figura 7). L'aumento di spessore si osserva da est verso ovest ed è presumibilmente connesso a geometrie deposizionali del corpo detritico, a loro volta connesse all'evoluzione tettonica sin-sedimentaria.



**Figura 8 - Affioramento di sabbie gialle alla base dei Trubi, soprastanti le sabbie grigie a laminazione piano-parallela (affioranti limitatamente alla porzione in basso a destra della foto) al tetto del Conglomerato di Pezzo. È ben visibile il passaggio verso l'alto dalla facies marnoso-limosa a quella calcarenitica dei Trubi. Affioramento ubicato qualche centinaio di metri a nord della stazione di servizio autostradale.**

In corrispondenza degli affioramenti disponibili nell'area non è mai stato osservato uno stato di fratturazione pervasiva caratterizzata da giunti persistenti (extraclastici) nell'ammasso roccioso,

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

evidenza che rende più approssimativa rispetto al substrato la definizione di ampiezza delle fasce cataclastiche in corrispondenza degli elementi tettonici principali (Figura 7).

Per quanto attiene invece al grado di cementazione, l'insieme delle evidenze di affioramento e, soprattutto, di sondaggio induce a tenere conto di una ampia variabilità di questa caratteristica relativamente alla quale, tuttavia, non è stato possibile restituire una affidabile zonazione alla scala di lavoro.

E' da rilevare che, ad oggi, né in sondaggio né in affioramento è stato osservato il contatto disconforme tra il Conglomerato di Pezzo ed il substrato paleozoico.

Il contenuto fossilifero dell'Unità è pressoché assente (Atzori & Vezzani, 1974). Pertanto l'età di tali depositi (ovvero Tortoniano sup.) è desunta in via indiretta, dalla loro posizione stratigrafica.

### **SABBIE E GHIAIE DI MESSINA**

Sono costituiti da ghiaie da medie a grossolane in matrice sabbiosa. Si presentano generalmente ben stratificate anche se, più raramente, agli strati si intercalano livelli lenticolari conglomeratici o sabbiosi. I clasti, da sub-arrotondati ad appiattiti, sono di natura poligenica e risultano prevalentemente costituiti da termini cristallino-metamorfici (Figura 9, Figura 10, Figura 11). La giacitura presenta tipicamente una inclinazione di 25°-30° verso l'asse dello Stretto di Messina ed è spesso ben evidente una stratificazione incrociata con embricatura dei clasti (Figura 9). L'insieme delle caratteristiche sedimentologiche ed i rapporti con gli altri depositi affioranti, indicano per tali depositi un ambiente deposizionale riferibile ad un sistema deltizio fortemente alimentato dalle fiumare.

Le Ghiaie e Sabbie di Messina affiorano estesamente nell'intero settore occidentale e sud-occidentale dell'area di intervento, gli spessori deducibili da affioramento e sondaggio aumentano spostandosi verso ovest, e variano da pochi metri, in prossimità dei punti in cui si osservano a diretto contatto con il substrato cristallino-metamorfico (località Campo Piale), fino a 100m tra gli abitati di Cannitello e Villa S.Giovanni. Nell'area di intervento, le Sabbie e Ghiaie di Messina si osservano in discordanza su tutti i termini litologici presneti nell'aerea di studio e di età precedente, ovvero dal substrato cristallino alla Formazione di S. Corrado. Nell'intera area di intervento le Sabbie e Ghiaie di Messina non si presentano interessate da elementi tettonici anche se, sul lato siciliano, diversi Autori (Carbone et alii, 2008) rilevano la presenza di fagliazione al loro interno (Figura 9).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**Figura 9 - Affioramento di Sabbie e Ghiaie di Messina in cui è ben visibile la pendenza a basso angolo degli strati verso l'asse dello Stretto di Messina.**

Il sistema deltizio delle ghiaie di Messina, legato alla sua progradazione verso l'asse dello Stretto di Messina, è deducibile a più grande scala considerando l'estensione e la disposizione areale dell'intero corpo deposizionale stratificato. Relativamente all'area di Villa S.Giovanni-Cannitello, i depositi affioranti possono essere attribuiti alle facies clinostatificate del foreset (ovvero della porzione più esterna del corpo deltizio). Le Ghiaie e Sabbie di Messina vengono attribuite da diversi Autori (in particolare Barrier et alii, 1987) al Pleistocene medio, esse non presentano faune significative, ma sono trasgressive al disopra della Formazione di Le Masse e ricoperte a loro volta da depositi dei terrazzi marini olocenici.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**Figura 10 - Dettaglio di un livello ghiaioso intercalato con sabbie nelle Sabbie e Ghiaie di Messina.**



**Figura 11 - Affioramento in parete sub-verticale delle Sabbie e Ghiaie di Messina. Nella foto a sinistra è osservabile la stratificazione incrociata.**

Dal punto di vista litotecnico, i depositi delle Ghiaie e Sabbie di Messina sono da considerarsi terre da moderatamente a fortemente addensate, con cementazione da scarsa ad assente. All'accentuata eterometria dei clasti ed alla stratificazione del deposito si deve la capacità di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

sostenere pareti sub-verticali fino a 10-20 m di altezza (Figura 11).

#### 4.4 Sintesi lungo il tracciato

Di seguito si riporta una sintesi delle litologie incontrate lungo il tracciato della galleria naturale RAMO B.

A partire dall'imbocco lato Messina fino all'incirca alla progressiva 0+350 circa, lo scavo si troverà in condizioni di fronte misto, ovvero con la presenza della formazione delle ghiaie e sabbie di Messina, quindi si svilupperà all'interno del conglomerato di Pezzo, fino alla progressiva 0+650 circa. A partire dalla progressiva 0+650 circa fino all'imbocco lato Reggio, lo scavo si svilupperà completamente all'interno della formazione delle Ghiaie e sabbie di Messina.

Dal punto di vista idrogeologico i terreni affioranti nel settore in esame presentano sostanziali differenze di comportamento nei confronti dell'infiltrazione delle acque meteoriche e della circolazione idrica al loro interno.

Nelle zone a più alta quota, dove affiorano in prevalenza le metamorfiti, la permeabilità è bassa, dipendendo principalmente dallo stato di fessurazione dell'ammasso roccioso e quindi dalla frequenza, distribuzione e tipologia delle discontinuità di origine tettonica. Lungo le fasce collinari, caratterizzate da notevole eterogeneità litologica, le condizioni risultano molto variabili da luogo a luogo per la presenza di termini a permeabilità differente per tipo e grado. Nelle piane costiere e lungo i fondovalle, dove più estesi e consistenti sono i depositi alluvionali, si riscontrano condizioni di permeabilità per porosità da alta a media, che favoriscono l'esistenza di corpi idrici relativamente estesi e localmente di apprezzabile produttività.

#### 4.5 Inquadramento idrogeologico

In questo paragrafo si indicheranno i principali aspetti idrogeologici della zona interessata: per maggiori dettagli fare riferimento alla Relazione Idrogeologica Descrittiva relativa ai collegamenti Lato Calabria.

Come introduzione di carattere generale va rilevato che le numerose rampe costituiscono un complesso nodo infrastrutturale che interessa una porzione piuttosto limitata di un unico sistema acquifero. Tale sistema acquifero verrà pertanto drenato in più punti dalle varie gallerie stradali, cui si devono aggiungere le gallerie ferroviarie, che peraltro si trovano ad una quota inferiore e che pertanto saranno in realtà gli elementi di principale rilevanza per le interazioni con la falda.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Il nodo di gallerie si inserisce in un contesto idrogeologico generale piuttosto complesso, ove si può individuare la presenza di un sistema acquifero costituito perlopiù dal conglomerato di Pezzo, cui si aggiungono verso l'alto le ghiaie e sabbie di Messina, i depositi alluvionali attuali e recenti e i depositi recenti dei terrazzi marini. Alla base il sistema acquifero è delimitato dal basamento cristallino pre-mesozoico che presenta generalmente un grado di permeabilità molto basso. Quantitativamente il conglomerato di Pezzo è l'unità idrostratigrafica volumetricamente più importante, ma con minor grado di permeabilità che costituisce l'acquifero, mentre gli altri termini citati sono volumetricamente meno importanti e anche discontinui, ma sono quelli in cui avviene la maggior parte del flusso, a causa della elevata permeabilità.

Il contesto generale è quindi quello di un sistema di flusso con falda a superficie libera, dalle caratteristiche di trasmissività estremamente variabili da punto a punto e in cui il movimento delle acque sotterranee avviene in maniera piuttosto disomogenea. Peraltro a rendere più complesso il contesto idrogeologico interviene anche la presenza locale dei Trubi, che sono un orizzonte impermeabile interposto tra il conglomerato di Pezzo e le unità idrostratigrafiche superiori, e di numerose faglie con orientazione prevalente ENE-WSW e NW-SE. I Trubi sono presenti soltanto nel settore est del nodo di gallerie, mentre nel settore ovest essi sono stati erosi. Pertanto nel settore est sarà possibile anche la presenza di un doppio sistema di flusso, con una falda sospesa al di sopra dei Trubi nelle ghiaie e sabbie di Messina e nei depositi recenti e una falda sottostante all'interno del conglomerato di Pezzo.

La presenza delle faglie invece può condizionare soprattutto l'idrodinamica all'interno del conglomerato di Pezzo, meno gli altri termini acquiferi. Infatti, il conglomerato, che è interessato da diffusi ma discontinui fenomeni di cementazione, presenta probabilmente degli incrementi di permeabilità per fratturazione e frammentazione lungo le zone di faglia, mentre gli altri termini (ghiaie e sabbie di Messina e depositi recenti), non cementati, o comunque meno cementati, risentono meno della presenza dei disturbi tettonici, che anzi potrebbero localmente agire da elementi di compartimentazione, sebbene questo ruolo non emerga con chiarezza dai dati disponibili. Dalle ricostruzioni piezometriche effettuate in ogni caso il ruolo idrogeologico delle faglie non emerge in maniera evidente. E' tuttavia probabile che il ruolo delle faglie vari da zona a zona.

Nel settore orientale dell'area di studio, dove le ricostruzioni piezometriche indicano un flusso a prevalente direzione sud-nord, le faglie a direzione ENE-WSW non hanno verosimilmente un ruolo idrogeologico importante, poiché costituiscono dei volumi a permeabilità maggiore imballati all'interno di un acquifero a permeabilità minore. Tali corpi a permeabilità maggiore presentano

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

però uno sviluppo trasversale rispetto alle linee di flusso, il cui effetto di incremento di permeabilità viene pertanto smorzato dalla presenza di materiale meno permeabile a monte e a valle. Diverso è il ruolo di questi sistemi nel settore ovest, dove il flusso avviene principalmente in direzione est-ovest, circa parallelamente allo sviluppo delle discontinuità; in questo caso esse possono costituire degli assi di drenaggio preferenziali dell'acquifero alla scala locale.

Per le faglie a direzione NW-SE vale un discorso inverso, poiché esse hanno una direzione obliqua rispetto al flusso nel settore ovest, mentre risultano circa parallele alle direzioni di flusso nel settore est.

Va detto tuttavia che la ricostruzione piezometrica disponibile non sembra indicare una grossa influenza delle faglie sul deflusso sotterraneo generale. E' comunque possibile che ciò sia dovuto al fatto che questa ricostruzione fotografa bene il flusso nelle porzioni più alte dell'acquifero, quelle più permeabili e poco disturbate dalla presenza di faglie, mentre nelle porzioni più basse, seppur in continuità con quelle superiori, il flusso, meno attivo, può presentare anche direttrici preferenziali leggermente diverse da quelle superficiali.

#### **4.5.1 Rampa B**



La tratta in galleria della Rampa B si sviluppa per gran parte all'interno del conglomerato di Pezzo e solo per un breve tratto all'interno delle ghiaie e sabbie di Messina. Il tracciato rimane tuttavia quasi sempre ben al di sopra della superficie piezometrica calcolata ricostruita negli studi idrogeologici generali. Con questo assetto geometrico non si prevedono pertanto afflussi significativi.

L'unico settore in cui potranno verificarsi venute di consistente una qualche rilevanza è quello posto in corrispondenza della faglia che interseca il tracciato in prossimità del km 0+400. Anche in questo caso tuttavia gli afflussi non potranno essere particolarmente elevati proprio a causa del ridotto battente idraulico.

#### **4.5.2 Afflussi lungo le Rampe autostradali**

Le problematiche di afflussi in galleria per le rampe autostradali sono principalmente legati ad intersezioni con zone di faglia nel conglomerato di Pezzo. Per fornire valutazioni sull'entità degli afflussi transitori in galleria al momento dell'ingresso degli scavi in zona di faglia è possibile utilizzare la soluzione analitica proposta da Goodman et al. (1965).

Poiché tale problematica è ricorrente lungo i tracciati, e si incontra peraltro per battenti idraulici

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

differenti, si sono svolte alcune stime in contesti di carico e conducibilità variabili, che coprono tutto l'intervallo di condizioni che si presume possano verificarsi.

Le portate drenate sono generalmente dell'ordine dei 2-3 l/s per quasi tutte le condizioni di battente idraulico possibili e soltanto con le ipotesi di conducibilità idraulica maggiore ( $5 \times 10^{-5}$  m/s) si possono ipotizzare portate maggiori e dell'ordine dei 10-20 l/s\*5m. Queste conducibilità più elevate non sono da escludere, sebbene si ritenga più frequente incontrare le condizioni di conducibilità più basse.

In conclusione per le zone di faglia all'interno del conglomerato di Pezzo sono perlopiù da attendersi portate massime transitorie che saranno inferiori ai 10 l/s\*5m. Solo occasionalmente potranno verificarsi portate massime transitorie superiori e comprese tra i 10 e 20 l/s\*5m.

Le portate in regime stabilizzato possono essere stimate sulla base delle modellizzazioni numeriche eseguite, che tuttavia suggeriscono che le portate saranno nulle o di entità irrisoria a causa della presenza delle adiacenti gallerie ferroviarie e del richiamo dei flussi sotterranei da esse esercitato.

#### **4.5.3 Perturbazione della piezometria**

Essendo prevista per le gallerie una condizione di drenaggio in regime permanente, tali interventi avranno un'influenza sulla piezometria più marcata nel loro intorno, mentre verso mare le variazioni saranno di minor entità o pressoché nulli.

Sulla base dei modelli numerici è stato previsto che la superficie di falda in corrispondenza delle gallerie in regime perturbato si manterrà praticamente alla quota delle opere. Già circa 250-300m a valle delle opere sia sul versante verso Villa San Giovanni che su quello verso Cannitello la falda tenderà invece a stabilizzarsi su livelli non molto dissimili da quello originario, mentre su una fascia di 200-250m a partire dalla costa non si avvertiranno abbassamenti significativi.

Per una miglior definizione delle alterazioni del deflusso in falda è stato inoltre stimato che in prossimità delle zone di recapito a mare del sistema di flusso, nella fascia di 200-250m ove non si verificheranno significativi abbassamenti del livello di falda, a causa della diminuzione comunque presente dell'abbassamento di gradiente a monte si potranno verificare riduzioni del deflusso in falda dell'ordine del 30-40% rispetto al deflusso originario.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 4.6 Sintesi dei parametri geotecnici e individuazione dei parametri operativi di calcolo

Per i diversi litotipi rinvenuti lungo il tracciato stradale in corrispondenza dell'opera, sono riportati in sintesi i parametri geotecnici di interesse ai fini progettuali utilizzati per la verifica delle sezioni di scavo e dei rivestimenti definitivi. Laddove non vi sono determinazioni dirette per le profondità di interesse, alle quali si colloca l'asse della galleria, i dati di progetto sono estrapolati tenendo conto della variabilità dei parametri stessi con la profondità dal piano campagna in base anche all'esperienza maturata in analoghi contesti. E' esclusa da tale trattazione la parametrizzazione geotecnica puntuale delle opere d'imbocco; per maggiori indicazioni si faccia riferimento alle relazioni specifiche dei singoli imbocchi.


Per maggiori dettagli sulla caratterizzazione geotecnica degli ammassi si rimanda alla relazione Geotecnica Generale

##### **Sabbie e Ghiaie di Messina**

La caratterizzazione geotecnica della formazione delle Sabbie e Ghiaie di Messina si è basata prevalentemente sui risultati di prove SPT eseguite a profondità relativamente ridotte in relazione all'opera in oggetto. Ai fini del calcolo e della verifica delle opere in sotterraneo, basandosi anche sull'esperienza maturata in contesti similari e sulle evidenze dei rilievi geostrutturali, sono stati individuati due gruppi geomeccanici, differenziati sulla base del probabile grado di cementazione dell'ammasso in relazione alle coperture. In particolare si ritiene che ad elevate coperture la stima dei parametri di resistenza al taglio, con particolare riferimento al "range" di variabilità della coesione di picco, possa essere eccessivamente cautelativa.

In Tabella 2 sono riportati i parametri utilizzati per le verifiche svolte nei successivi Capitoli. La suddivisione in gruppo geomeccanici è da intendersi finalizzata ai fini operativi e di calcolo. Non si esclude, tuttavia, che anche ad elevate coperture si possano incontrare orizzonti poco cementati e caratterizzati da parametri appartenenti al gruppo geomeccanico 2, e viceversa.

GRUPPI GEOMECCANICI – FORMAZIONE DELLE SABBIE E GHIAIE DI MESSINA			
DATO	CARAT. GEOT. GENERALE	GRUPPO 1 (z>120m)	GRUPPO 2 (z<120m)
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18÷20	18÷20	18÷20
$c^{\text{picco}}$ (kPa)	0÷10	20÷60	0÷10
$\varphi^{\text{picco}}$ (°)	38÷40 (p'ff=0-272KPa) 35÷38 (p'ff=272-350KPa)	35÷38 (p'ff=272-350KPa)	38÷40 (p'ff=0-272KPa)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

<b>C<sub>r</sub>' (kPa)</b>	0	10÷50	0
<b>φ<sub>r</sub>' (°)</b>	33÷35	30÷35	33÷35
<b>E' * (Mpa)</b>	$E = (17 \div 35) \cdot (z)^{0.65}$	650-850	100-450
<b>v' (-)</b>	0.2	0.2	0.2
<b>K(m/s)</b>	$10^{-4} \div 10^{-5}$	$10^{-4} \div 10^{-5}$	$10^{-4} \div 10^{-5}$

**Tabella 2 - Parametri di calcolo**

*Simbologia:*

$\gamma_t$  = peso di volume naturale;

$\varphi'$  = angolo di attrito operativo;

$c'$  = intercetta di coesione operativa;

$\varphi_r'$  = angolo di attrito residuo;

$c_r'$  = intercetta di coesione residua;

$E'$  = modulo di Young "operativo"; \* = si considerano valori nel range per gallerie, fronti di scavo sostenuti con opere di sostegno tipo paratie tirantate e non; valori al minimo del range per fondazioni dirette, fondazioni su pali e rilevati.

$\nu'$  = rapporto di Poisson.

### **Conglomerati di Pezzo**

L'opera attraversa la parte relativamente più superficiale del Conglomerato di Pezzo al di sotto delle gallerie Piale, attualmente in fase di scavo. Il conglomerato è composto prevalentemente da clasti di graniti e gneiss cementati in matrice prevalentemente composta da frazioni arenacee fini e limose.

La valutazione delle caratteristiche geotecniche del Conglomerato di Pezzo si è resa problematica, a causa della elevata eterogeneità connessa con la presenza di un elevato contenuto di materiali fini e molto grossolani (anche metrici) nonché di estesi fenomeni di cementazione.

Le prove sismiche in foro effettuate mostrano una elevata dispersione dei valori; dall'analisi di tutti i valori di  $V_s$  (media mobile con la profondità) si evidenzia un andamento medio in cui è riconoscibile un primo sismostrato di più scadenti caratteristiche elastiche anche se mediamente crescenti fino a circa 25m. Dalle prove effettuate è dunque risultato evidente come il Conglomerato possa essere suddiviso in due sottogruppi ben distinti: una prima fascia, fortemente alterata, e una zona sottostante a comportamento litoide. Data l'estrema variabilità del litotipo e l'eterogeneità



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

intrinseca del materiale, non si esclude tuttavia la presenza ancorché discontinua della fascia alterata anche a maggiori profondità e indipendentemente dalla copertura.

Lo strato superficiale, fortemente alterati, e gli strati tettonizzati sono stati associati al gruppo geomeccanico 3, come evidenziato in Tabella 3. In questo ambito, presumibilmente caratterizzato da una più scarsa cementazione e da maggiore alterazione, sono disponibili:

- prove di carico su piastra di grande diametro
- prove SPT
- prove pressiometriche

Le prove pressiometriche e le prove SPT sono prove "puntuali", non in grado di rappresentare il comportamento globale di un ammasso conglomeratico molto eterogeneo; inoltre, soprattutto per quanto riguarda le prove SPT, si riferiscono ad un materiale disturbato dall'esecuzione del foro e quindi a maggior ragione non rappresentativo della frazione medio fine cementata ma eventualmente solo della matrice non cementata.

L'ammasso in profondità, in relazione al valore di GSI valutato e a quanto riscontrato durante gli scavi della galleria Piaie, è stato associato al gruppo geomeccanico 1, come evidenziato in Tabella 3.

Allo scopo di definire il comportamento di una zona intermedia tra le due appena definite, è stato individuato il gruppo geomeccanico 2.

GRUPPI GEOMECCANICI – FORMAZIONE DEI CONGLOMERATI DI PEZZO				
DATO	CARAT. GEOT. GENERALE	GRUPPO 1 (z>60m circa e/o zone scarsamente fratturate)	GRUPPO 2 (30m<z<60m circa e/o zone mediamente fratturate)	GRUPPO 3 (z<30m) e/o zone tettonizzate
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20÷22	20÷22	20÷22	20÷22
$c'_{\text{picco}}$ (kPa)	0÷100 z (0-25m) Per profondità maggiori v. Tabella 4	320-410	60-320	0-60
$\varphi'_{\text{picco}}$ (°)	38-42 z (0-25m) Per profondità maggiori v. Tabella 4	29-32	32-41	38-42
$C_r'$ (kPa)	v. Tabella 4	200-260	50-250	0-40
$\varphi_r'$ (°)	v. Tabella 4	15-17	30	30-34

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

<b>E' * (Mpa)</b>	E'=150-300 (z 0 -20m) E'=300-500 (20 - 35m) E'=500-900 (35 - 65m) E'=900 -1500* (>65m)	500-1500	300-500	150-300
<b>v' (-)</b>	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3
<b>K(m/s)</b>	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$

**Tabella 3**

<b><math>\sigma_n</math>(Mpa)</b>	Picco		Residuo	
	<b>c' (MPa)</b>	<b><math>\Phi'</math> (°)</b>	<b>c' (MPa)</b>	<b><math>\Phi'</math> (°)</b>
0,42	0,16	41	0,10	24
0,63	0,22	37	0,14	21
0,84	0,27	34	0,17	19
1,05	0,32	32	0,20	17
1,26	0,37	30	0,23	16
1,47	0,41	29	0,26	15

**Tabella 4**

*Simbologia:*

$\gamma_t$  = peso di volume naturale;

$\varphi'$  = angolo di attrito operativo;

$c'$  = intercetta di coesione operativa;

$\varphi_r$  = angolo di attrito residuo;

$c_r$  = intercetta di coesione residua;

$E'$  = modulo di Young "operativo"; \* = si considerano valori nel range per gallerie, fronti di scavo sostenuti con opere di sostegno tipo paratie tirantate e non; valori al minimo del range per fondazioni dirette, fondazioni su pali e rilevati.

$\nu'$  = rapporto di Poisson.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 5 FASE DI DIAGNOSI: Previsioni sul comportamento degli ammassi allo scavo

L'apertura di una cavità in un materiale caratterizzato da un campo di tensioni naturali preesistente indisturbato, dovuto essenzialmente a carichi litostatici e a sforzi tettonici, porta ad una generale ridistribuzione degli sforzi, sia in direzione trasversale che longitudinale, con conseguente incremento delle tensioni al contorno della galleria e già oltre il fronte di scavo.

Si genera così un nuovo campo tensionale che tende a far evolvere l'ammasso intorno al cavo verso una nuova situazione di equilibrio diversa da quella naturale, dando luogo a fenomeni deformativi.

Sulla base delle conoscenze dei terreni interessati dalle gallerie, è possibile, elaborando anche le esperienze maturate in lavori analoghi, svolgere delle previsioni sul comportamento dei terreni allo scavo, necessarie alla definizione degli interventi di stabilizzazione e degli schemi di avanzamento. Queste previsioni sono strettamente connesse con lo studio dello stato tenso-deformativo instauratosi nell'ammasso al contorno della galleria e indotto dalle operazioni di scavo.

La previsione delle modalità di avanzamento in sotterraneo è stata condotta secondo l'approccio del "Metodo per l'Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS)". Sulla base dei dati raccolti in fase di studio geologico e di caratterizzazione geomeccanica degli ammassi da attraversare, sono state effettuate le previsioni di comportamento tenso-deformativo della galleria in assenza di interventi, ed in particolare modo la previsione sul "comportamento deformativo del fronte di scavo", il quale riveste notevole importanza nella definizione delle condizioni di stabilità, a breve e lungo termine, e degli interventi più idonei per garantirle. Il comportamento del fronte è principalmente condizionato da:

- le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso connesse con le varie strutture geologiche che interessano le gallerie;
- il comportamento del materiale nel breve e lungo termine: rigonfiamento, squeezing, fluage e rilasci tensionali;
- i carichi litostatici corrispondenti alle coperture in gioco;
- la forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- lo schema di avanzamento e la tipologia dello scavo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente di tre tipi: "stabile", "stabile a breve termine" e "instabile", come di seguito brevemente illustrato.

#### **Gallerie a fronte stabile (CASO A)**

Se il fronte di scavo è stabile, ciò significa che lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico e i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente. In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile (rimanendo prevalentemente in campo elastico) e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento. Saranno sufficienti, nel breve termine, interventi di confinamento delle pareti di scavo, e nel lungo termine, la realizzazione del rivestimento definitivo.

#### **Gallerie a fronte stabile a breve termine (CASO B)**

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera le caratteristiche di resistenza meccanica del materiale al fronte, che assume un comportamento di tipo elasto-plastico. I fenomeni deformativi connessi con tale redistribuzione delle tensioni sono più accentuati che nel caso precedente e producono nell'ammasso roccioso al fronte una decompressione che porta ad una riduzione della resistenza interna. Questa decompressione deve essere opportunamente regimata, nel breve termine, mediante adeguati interventi di preconsolidamento al fronte (e talora al contorno del cavo), in grado di contenere l'ammasso e condurlo verso condizioni di stabilità; diversamente lo stato tenso-deformativo può evolvere verso condizioni di instabilità del cavo. Il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza a lungo termine.

#### **Gallerie a fronte instabile (CASO C)**

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad una accentuazione dei fenomeni deformativi nel campo plastico, che risultano immediati, più rilevanti e si manifestano prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Di conseguenza tali deformazioni producono una decompressione più spinta nell'ammasso roccioso al fronte e portano ad un decadimento rapido e progressivo delle caratteristiche meccaniche d'ammasso. Questo tipo di decompressione più accentuata deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento che consentiranno di creare artificialmente quell'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile nel breve termine e, con l'aggiunta del rivestimento definitivo, anche nel lungo termine.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Si vuole ora determinare il comportamento dell'ammasso allo scavo in funzione delle caratteristiche geotecniche del terreno attraversato, della sezione di scavo e dei carichi litostatici dovuti alle differenti coperture riscontrate lungo il tracciato della galleria in oggetto.

Per ogni singolo gruppo sarà possibile ottenere diverse classi di comportamento allo scavo in funzione delle diverse coperture in esame. Nella successiva fase di terapia, in cui si definiranno gli interventi necessari per l'avanzamento nelle diverse classi di comportamento, ad una stessa classe di comportamento potranno corrispondere diverse sezioni tipo, adeguate alle caratteristiche geologiche e fisiche di ogni formazione.

## **5.1 Individuazione delle sezioni di calcolo e analisi mediante linee caratteristiche**

Per la determinazione del comportamento dell'ammasso allo scavo è stata utilizzata la teoria delle linee caratteristiche applicata con coperture minime pari a circa 3 diametri; per maggiori chiarimenti su tale metodologia di calcolo si rimanda alla teoria riportata in "Allegato – Riferimenti teorici e di calcolo".

La galleria "Ramo B" attraversa nel suo sviluppo le formazioni dei Conglomerati di Pezzo e delle Ghiaie di Messina, ed è interessata da coperture massime, misurate dal piano dei centri, pari a circa 45m.

Per le verifiche con il metodo delle curve caratteristiche è stata adottata la soluzione fornita da Lombardi (1974) che permette di determinare la curva caratteristica in condizioni piane, e quelle in prossimità del fronte tenendo conto di uno stato di tensione tridimensionale dovuto alla deviazione delle linee di forza delle tensioni longitudinali. Il materiale viene considerato elasto-plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

I dati di input delle analisi sono assunti in accordo con la Combinazione 1 dell'Approccio 1 (A1-M1-R1), come specificato nel Paragrafo 2.1. I parametri geotecnici utilizzati rappresentano parametri di calcolo operativi assunti all'interno del "range" di variabilità descritto nel paragrafo di caratterizzazione geotecnica. La scelta operativa all'interno del "range" è legata sia alla tipologia di analisi, sia alle incertezze e al "peso" del parametro nella tipologia di analisi stessa.

Il diametro equivalente inserito nelle analisi è stato calcolato dall'area di scavo di progetto comprensiva dell'arco rovescio, con approssimazione pari a 50cm. Nel caso di sezioni a geometria variabile si è considerata, a favore di sicurezza, l'area di scavo massima. I valori di copertura utilizzati sono da intendersi misurati dal piano dei centri.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Le linee caratteristiche sono riportate in "Allegato – Linee caratteristiche"; di seguito si propone una tabella riepilogativa delle analisi effettuate.

GALLERIA RAMO B - SINTESI LC\_DIAGNOSI - CONGLOMERATI DI PEZZO

			AN1	AN2	AN3
			GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3
			sezione standard	sezione standard	sezione standard
<b>Geometrical Data</b>					
Equivalent Tunnel Radius	ri	[m]	7	7	7
Overburden	H	[m]	40	40	30
Unit weight of the rock mass	g	[kN/m <sup>3</sup> ]	21	21	21
<b>Resistance Parameters</b>					
Cohesion in the elastic zone	Cel	[kPa]	370	200	30
Cohesion in the plastic zone	Cpl	[kPa]	230	160	20
Friction angle in the elastic zone	Φel				
<b>Elastic parameters</b>					
Deformation moduls in elastic zone	Eel	[MPa]	1200	300	150
Deformation moduls in plastic zone	Epl	[MPa]	1200	300	150
Poisson's ratio	v				
<b>DEFORMATION RESULTS</b>					
Critical pressure	Pcr	[MPa]	0.10	0.17	0.22
Max cavity def. (2D)	u2d8	[cm]	0.8	0.8	24.0
Rpl (2D)/Ro	Rpmax/r0	[-]	1.2	1.3	2.7
Cavity def. at the face	uf	[cm]	0.3	1.6	6.8
Rpl (Face)/Ro	Rpface/r0	[-]	0.8	0.9	1.5

INST = Deformazione maggiore di 80cm

Visti i risultati delle analisi svolte in assenza di interventi di sostegno, risulta evidente, nel caso del gruppo geomeccanico 3, lo sviluppo di fenomeni deformativi di tipo elasto-plastico, riguardanti sia il fronte dello scavo che la cavità. Al contorno del cavo, le sollecitazioni indotte dalle operazioni di avanzamento superano i valori di resistenza d'ammasso al contorno della cavità. Il comportamento del fronte di scavo, a cui è legato quello della cavità, può essere classificato di tipo B, ovvero "stabile a breve termine". Nel caso dei gruppi geomeccanici 1 e 2 l'entità delle deformazioni decresce in modo significativo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

GALLERIA RAMO B - SINTESI LC\_DIAGNOSI - SABBIE E GHIAIE DI MESSINA

<b>Geometrical Data</b>			<b>SEZ. standard</b>
Equivalent Tunnel Radius	ri	[m]	7
Overburden	H	[m]	30
Unit weight of the rock mass	g	[kN/m <sup>3</sup> ]	19

<b>Resistance Parameters</b>			
Cohesion in the elastic zone	Cel	[kPa]	5
Cohesion in the plastic zone	Cpl	[kPa]	0.4
Friction angle in the elastic zone	Φel	[°]	..
.....	.....	.....	.....

<b>Elastic parameters</b>			
Deformation moduls in elastic zone	Eel	[MPa]	275
Deformation moduls in plastic zone	Epl	[MPa]	275
Poisson's ratio	ν	[...]	.....
.....	.....	.....	.....

<b>DEFORMATION RESULTS</b>			
Critical pressure	Pcr	[MPa]	0.21
Max cavity def. (2D)	u2d8	[cm]	INST
Rpl (2D)/Ro	Rpmax/r0	[-]	10.1
Cavity def. at the face	uf	[cm]	25.7
Rpl (Face)/Ro	Rpface/r0	[-]	3.8

INST = Deformazione maggiore di 80cm

Visti i risultati delle analisi svolte in assenza di interventi di sostegno, risulta evidente lo sviluppo di fenomeni deformativi plastici di entità rilevante che riguardano sia il fronte dello scavo che la cavità. Il comportamento del fronte di scavo, a cui è legato quello della cavità, può essere classificato di tipo C, ovvero "instabile".

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 6 FASE DI TERAPIA

Per lo scavo della galleria in oggetto si prevede l'applicazione prevalente della Sezione Tipo B2V per quanto riguarda la parte scavata all'interno dei Conglomerati di Pezzo, e C1 per le zone interessate dalle Ghiaie di Messina. Per quanto concerne la variabilità della sezione tipo, i criteri applicativi, i dettagli sugli interventi, e per tutto quanto non esplicitamente riportato si rimanda alla Relazione Tecnica Generale, parte integrante del Progetto.

Nella tabella seguente si riporta una sintesi delle caratteristiche principali delle sezioni tipo applicate per lo scavo della galleria in oggetto; si ricorda che quanto indicato in tabella rappresenta la sezione media di intervento.

<b>C1L</b>	Applicata nelle zone di contatto lito-stratigrafico tra i depositi superficiali o le ghiaie di Messina e i conglomerati di pezzo.	STANDARD	VTR CEMENTATI	JET Dn600	TUBI IN ACCIAIO SU 120°	25cm	2IPN180/100
<b>B2V</b>	Applicata come sezione tipo prevalente nella formazione del "CONGLOMERATO DI PEZZO" gruppo geomeccanico 2 e nella formazione delle Plutoniti in zone tettonizzate e fratturate	STANDARD	VTR CEMENTATI	INIEZIONI	TUBI IN ACCIAIO SU 120°	25cm	2IPN180/100
<b>C1IN</b>	Applicata nella formazione delle "GHIAIE E SABBIE DI MESSINA Gruppo Geomeccanico 2" per coperture inferiori ai 25m circa.	STANDARD	MICROJET ARMATI CON VTR	JET Dn600	TUBI IN ACCIAIO SU 120°	25cm	2IPN180/100

Per le analisi sono stati utilizzati i coefficienti di sicurezza relativi alla Combinazione 1 dell'Approccio 1 (A1-M1-R1), come specificato nel Paragrafo 2.1.

L'effetto stabilizzante dovuto alla presenza di trattamenti di rinforzo del fronte (VTR, Jet-grouting, micro-jet armati con tubi in VTR, ecc.) posti in opera in avanzamento è stato tenuto in conto incrementando la coesione del nucleo di scavo. Tale contributo è stato valutato come il minimo tra la resistenza allo sfilamento della fondazione e la resistenza a rottura del tubo. Inoltre è stato assunto che la tensione tangenziale lungo la superficie di contatto tra la fondazione ed il terreno circostante sia distribuita uniformemente e solo sulla lunghezza di sovrapposizione.

Per mancanza di prove dirette a sfilamento, nella formazione dei Conglomerati di Pezzo, gruppo geomeccanico GR.3, è stato assunto un valore cautelativo della tensione tangenziale del terreno compreso tra 150kPa e 250kPa. I valori sono ipotizzati tenendo conto anche dei grafici riportati in letteratura (Bustamante – Doix), che mettono in relazione la tensione laterale di aderenza con il grado di addensamento del terreno, legato alle prove SPT.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

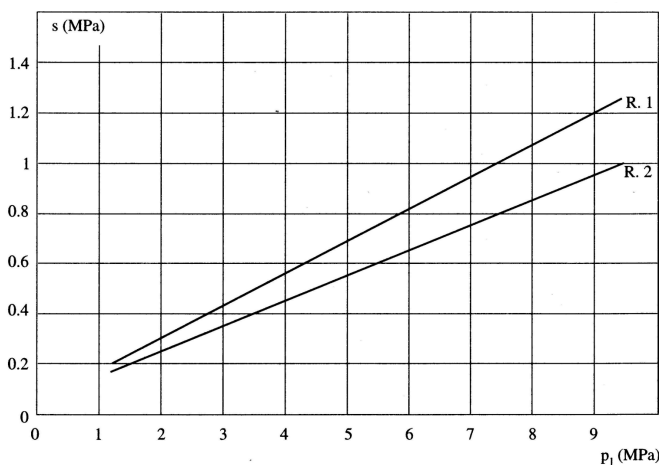


Fig. 13.19. Abaco per il calcolo di s per rocce alterate e fratturate

Il valore caratteristico della resistenza allo sfilamento è stato valutato applicando dei coefficienti correttivi ai valori medi della resistenza del terreno. Cautelativamente tale valore riduttivo è stato posto pari ad 1.8, pertanto si ha che:

$$\tau_{lim,Rd} = \frac{\tau_{lim}}{\xi_{a3}} = 200/1.8 = 110kPa$$

Per quanto riguarda la formazione delle Sabbie e Ghiaie di Messina, è stato assunto un valore cautelativo della tensione tangenziale del terreno, per profondità fino a 60m, compreso tra 150kPa e 200kPa e tra 250kPa e 450kPa per profondità maggiori. I valori sono ipotizzati tenendo conto anche dei grafici riportati in letteratura (Bustamante – Doix), che mettono in relazione la tensione laterale di aderenza con il grado di addensamento del terreno, legato alle prove SPT.

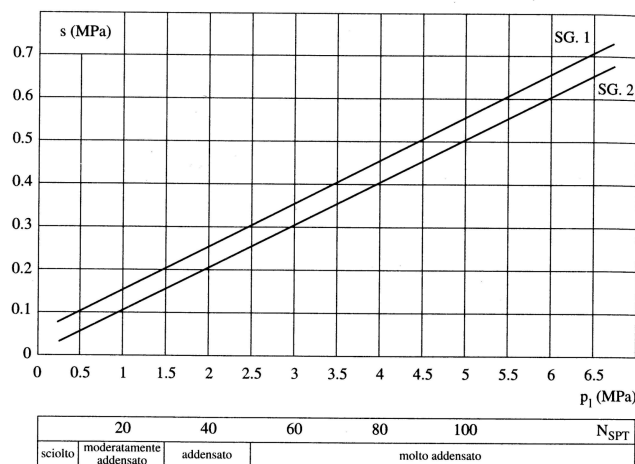


Fig. 13.16. Abaco per il calcolo di s per sabbie e ghiaie

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Il valore caratteristico della resistenza allo sfilamento è stato valutato applicando dei coefficienti correttivi ai valori medi della resistenza del terreno. Cautelativamente tale valore riduttivo è stato posto pari ad 1.8, pertanto si ha che:

$$\tau_{lim,Rd} = \frac{\tau_{lim}}{\xi_{a3}} = \begin{cases} 180 / 1.8 = 100kPa & \text{per } D \leq 60m \\ 360 / 1.8 = 200kPa & \text{per } D > 60m \end{cases}$$

Con :

$$\xi_{a3} = 1.8$$

Per maggiori dettagli sulla valutazione del contributo dei consolidamenti all'incremento di coesione si faccia riferimento alla teoria riportata in "Allegato – Riferimenti teorici e di calcolo".

Il calcolo delle tensioni agenti sul rivestimento definitivo fa riferimento allo spessore medio della calotta.

Alla base della teoria delle linee caratteristiche vi è l'ipotesi di scavo circolare in mezzo omogeneo, isotropo e in condizioni di spinta assialsimmetriche; questo comporta che la sezione risulti, per definizione, interamente compressa. In questa fase di analisi non si è pertanto tenuto conto dell'eventuale presenza di armatura all'interno del rivestimento definitivo. Nelle sezioni singolari, alle basse coperture ed in tutti i casi in cui verranno condotte delle analisi numeriche di approfondimento, eventuali armature necessarie verranno dimensionate caso per caso.

Le analisi complete svolte mediante le linee caratteristiche sono riportate in "Allegato – Linee caratteristiche"; di seguito si propone una tabella riepilogativa delle analisi effettuate.

GALLERIA RAMO B - SINTESI LC\_TERAPIA - CONGLOMERATI DI PEZZO

			GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3
<b>Geometrical Data</b>			SEZ. TIPO B0	SEZ. TIPO B0	SEZ. TIPO B2V
Equivalent Tunnel Radius	ri	[m]	7	7	7
Overburden	H	[m]	40	40	30
Unit weight of the rock mass	γ	[kN/m3]	21	21	21
<b>Resistance Parameters</b>					
Cohesion in the elastic zone	Cel	[kPa]	370	200	30
Cohesion in the plastic zone	Cpl	[kPa]	230	160	20
Friction angle in the elastic zone	Φel				
<b>Elastic parameters</b>					
Deformation moduls in elastic zone	Eel	[MPa]	1200	300	150
Deformation moduls in plastic zone	Epl	[MPa]	1200	300	150
Poisson's ratio	ν				
<b>PRECONFINEMENT (Therapy Phase)</b>					
Number of reinforcements	n°	[-]	0	0	44
Design Length	L	[m]	0	0	9
Cohesion improvement	Δc	[kPa]	0	0	109
<b>SUPPORT DATA (Therapy Phase)</b>					
Shotcrete Thickness	t	[cm]	25	25	25
Compression strenght (medium)	fcm	[MPa]	25	25	25
Steel ribs profile	-	-	IPN180	IPN180	IPN180
Number of profiles	n	-	2.00	2.00	2.00
Steel ribs spacing	s	[m]	1.20	1.20	1.00
<b>DEFORMATION RESULTS</b>					
Critical pressure	Pcr	[MPa]	0.10	0.17	0.22
Cavity def. at the face	uf	[cm]	0.3	1.6	2.4
Rpl (Face)/Ro	Rpface/r0	[-]	1.0	1.0	1.0
Deformation at (x) m	u(x)	[cm]	0.4	2.1	4.8
Def.at (x)m regarding gap	u'(x)	[cm]	0.4	2.1	4.8
Def.at equilibrium point	ueq	[cm]	0.7	2.7	5.6
Conv.at equilibrium point	Ceq	[cm]	0.9	2.3	6.4
Rpl (eq)/Ro	Rpeq/r0	[-]	1.1	1.1	1.3
Equilibrium pressure	C1	[MPa]	0.0	0.1	0.1
<b>TEMPORARY LINING RESULTS</b>					
Steel ribs stress	σ <sub>st</sub>	[MPa]	10.2	21.6	25.8
Shotcrete stress	σ <sub>sc</sub>	[MPa]	1.0	2.2	2.6
<b>SUPPORT RESULTS</b>					
Concrete stress	σ <sub>b</sub>	[MPa]	0.5	0.8	1.0
Reinforcement stress	σ <sub>s</sub>	[MPa]	-	-	-

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<b>Codice documento</b> CS0197_F0.doc	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20/06/2011

GALLERIA RAMO B - SINTESI LC\_TERAPIA - GHIAIE DI MESSINA

<b>Geometrical Data</b>			SEZ. B2V	SEZ. C1
Equivalent Tunnel Radius	ri	[m]	7	7
Overburden	H	[m]	30	30
Unit weight of the rock mass	γ	[kN/m <sup>3</sup> ]	19	19

<b>Resistance Parameters</b>				
Cohesion in the elastic zone	Cel	[kPa]	5	5
Cohesion in the plastic zone	Cpl	[kPa]	0	0
Friction angle in the elastic zone	Φel	[°]	...	...

<b>Elastic parameters</b>				
Deformation moduls in elastic zone	Eel	[MPa]	275	275
Deformation moduls in plastic zone	Epl	[MPa]	275	275
Poisson's ratio	ν	[...]	...	...

<b>PRECONFINEMENT (Therapy Phase)</b>				
Number of reinforcements	n°	[-]	52	42
Design Length	L	[m]	9	9
Cohesion improvement	Δc	[kPa]	120	243

<b>SUPPORT DATA (Therapy Phase)</b>				
Shotcrete Thickness	t	[cm]	25	25
Compression strenght (medium)	fcm	[MPa]	25	25
Steel ribs profile	-	-	IPN180	IPN180
Number of profiles	n	-	2.00	2.00
Steel ribs spacing	s	[m]	1.00	1.00

<b>DEFORMATION RESULTS</b>				
Critical pressure	Pcr	[MPa]	0.21	0.21
Cavity def. at the face	uf	[cm]	1.2	0.7
Rpl (Face)/Ro	Rpface/r0	[-]	1.0	1.0
Deformation at (x) m	u(x)	[cm]	6.7	0.7
Def.at (x)m regarding gap	u'(x)	[cm]	6.7	0.7
Def.at equilibrium point	ueq	[cm]	7.0	1.5
Conv.at equilibrium point	Ceq	[cm]	11.5	1.5
Rpl (eq)/Ro	Rpeq/r0	[-]	2.1	1.3
Equilibrium pressure	C1	[MPa]	0.0	0.1

<b>TEMPORARY LINING RESULTS</b>				
Steel ribs stress	σ <sub>st</sub>	[MPa]	7.1	26.5
Shotcrete stress	σ <sub>sc</sub>	[MPa]	0.7	2.7

<b>SUPPORT RESULTS</b>				
Concrete stress	σ <sub>b</sub>	[MPa]	0.3	0.9
Reinforcement stress	σ <sub>s</sub>	[MPa]	-	-

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Gli interventi di consolidamento inseriti nelle verifiche tengono conto della variabilità della sezione (Minima – Media – Massima). L'intensità di tali interventi è studiata in accordo con le linee guida presentate nel Paragrafo 1.1. Per gli interventi medi applicati per ciascuna tipologia di sezione si vedano gli elaborati grafici di riferimento.

Nelle tratte interessate dalla zona di contatto tra lo strato superficiale delle Ghiaie di Messina e il sottostante strato di Conglomerati di Pezzo, è stata prevista una sezione tipo denominata C1L. Tale sezione prevede consolidamento fronte mediante tubi in VTR (tipo B2V) un consolidamento al contorno mediante jet-grouting armate con tubi in acciaio.

### 6.1.1 Verifica tensionale dei rivestimenti

Le verifiche agli stati limite sono state condotte confrontando le tensioni di calcolo, opportunamente amplificate secondo i coefficienti previsti da normativa ( $\gamma_{G1} = 1.3$  - vedi tabella di seguito), con le resistenze di progetto.

Si riporta la Tabella 2.6.1 delle Norme tecniche delle costruzioni. In essa sono contenuti i Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU.

		Coefficiente $\gamma_F$	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli sfavorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9 1,1	1,0 1,3	1,0 1,0
Carichi permanenti non strutturali(1)	favorevoli sfavorevoli	$\gamma_{G2}$	0,0 1,5	0,0 1,5	0,0 1,3
Carichi variabili	favorevoli sfavorevoli	$\gamma_{Qi}$	0,0 1,5	0,0 1,5	0,0 1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

#### 6.1.1.1 Verifica dei rivestimenti di prima fase

Di seguito si riportano i valori delle sollecitazioni agenti sul rivestimento di prima fase ottenuti dalle analisi delle linee caratteristiche, amplificate per il coefficiente moltiplicativo previsto da normativa.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

RAMO B - SINTESI LC\_TERAPIA - CONGLOMERATI DI PEZZO

			GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3
			SEZ. TIPO B0	SEZ. TIPO B0	SEZ. TIPO B2V
<b>TEMPORARY LINING RESULTS</b>					
Steel ribs stress	$\sigma_{st}$	[MPa]	25.1	28.1	29.2
Shotcrete stress	$\sigma_{sc}$	[MPa]	2.5	2.8	2.9

GALLERIA RAMO B - SINTESI LC\_TERAPIA - GHIAIE DI MESSINA

**VERIFICHE DEI RIVESTIMENTI DI PRIMA FASE**

			SEZ. B2V	SEZ. C1
Overburden	H	[m]	30	30
Steel ribs stress	$\sigma_{st} \cdot \gamma_{G1}$	[MPa]	9.3	34.5
Shotcrete stress	$\sigma_{sc} \cdot \gamma_{G1}$	[MPa]	0.9	3.4

$\gamma_{G1}$  1.3

Le sollecitazioni di progetto risultano compatibili con le resistenze dei materiali utilizzati:

- Acciaio:  $f_{yd} = f_{yk} / 1.05 = 275 / 1.05 = 262 \text{ MPa}$
- Spritzbeton:  $f_{Sb,d} = f_{ck} / 1.0 = 25 / 1.0 = 25 \text{ MPa}$

**6.1.1.2 Verifica dei rivestimenti definitivi**

Di seguito si riportano i valori delle sollecitazioni agenti sul rivestimento definitivo ottenuti dalle analisi delle linee caratteristiche.

Per le verifiche di resistenza delle sezioni non armate, si è fatto riferimento a quanto riportato nel paragrafo 4.1.11 delle NTC2008. Per effetto delle azioni di calcolo sotto la combinazione rara, le tensioni che insorgono nel calcestruzzo devono risultare inferiori a:



$$\sigma_{c,lim} = 0.25 \cdot f_{ck} = 0.25 \cdot 25 = 6.25 \text{ MPa}$$

GALLERIA RAMO B- SINTESI LC\_TERAPIA - CONGLOMERATI DI PEZZO

**VERIFICHE DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI**

			GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3
			SEZ. TIPO B0	SEZ. TIPO B0	SEZ. TIPO B2V
Deformation moduls in elastic zone	H	[m]	40	40	30
Concrete stress	$\sigma_b \cdot \gamma_{G1}$	[MPa]	0.7	1.1	1.3
Reinforcement stress	$\sigma_s \cdot \gamma_{G1}$	[MPa]	-	-	-

$\gamma_{G1}$  1.3

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

GALLERIA RAMO B - SINTESI LC\_TERAPIA - GHIAIE DI MESSINA

**VERIFICHE DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI**

			SEZ. B2V	SEZ. C1
Deformation moduls in elastic zone	H	[m]	30	30
Concrete stress	$\sigma_b \cdot \gamma_{G1}$	[MPa]	0.4	1.2
Reinforcement stress	$\sigma_s \cdot \gamma_{G1}$	[MPa]	-	-

$\gamma_{G1}$  1.3

Le sollecitazioni di progetto risultano inferiori a quanto prescritto dalla normativa vigente.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 7 Analisi di stabilità del fronte

Una valutazione della stabilità del fronte di scavo può essere condotta mediante l'impiego di metodi analitici semplificati all'equilibrio limite secondo la teoria Tamez e Cornejo. Per maggiori dettagli sui metodi di calcolo utilizzati si rimanda a quanto riportato all'interno del "Allegato – Riferimenti teorici e di calcolo".

Le analisi di stabilità del fronte sono state svolte solo alle basse coperture, in quanto per coperture superiori a tre diametri il numero di consolidamenti non viene determinato ai fini della stabilità globale, ma dipende dalla necessità di operare il controllo deformativo del fronte e del contorno.

Per quanto riguarda i valori di tensione tangenziali del terreno utilizzati, si faccia riferimento a quanto già riportato all'interno del capitolo 6.

Come indicato al paragrafo 6.6.2 delle NTC2008, nella valutazione analitica della resistenza allo sfilamento non si applicano coefficienti parziali di sicurezza sui valori caratteristici della resistenza del terreno, facendo quindi riferimento a coefficienti parziali di sicurezza M1.

Le analisi sono svolte in accordo alla combinazione GEO dell'approccio 1, utilizzando i coefficienti parziali (A2 – M2 – R2), come specificato nel paragrafo 2.1.

Di seguito si riporta una sintesi dei risultati delle analisi di stabilità del fronte di scavo al variare delle coperture.

SINTESI VERIFICHE DI STABILITA' DEL FRONTE GALLERIA "RAMO B" - CONGLOMERATI DI PEZZO

SEZ.	PARAMETRI GEOMETRICI				PARAMETRI GEOTECNICI			DIAGNOSI			TERAPIA			
	B	D	C	Deq	$\gamma$	c	$\Phi$				$\Delta c$		FSF	
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[-]			[kPa]	[kPa]	[-]	
B0	13	11.9	33.5	13	21	216	32	4.45	-	-	-	-	-	-
B0	13	11.9	23.5	13	21	216	32	4.45	-	-	-	-	-	-
B0	13	11.9	33.5	13	21	160	32	3.27	-	-	-	-	-	-
B0	13	11.9	23.5	13	21	160	32	3.27	-	-	-	-	-	-
B2V	13.2	12.1	23	13.6	21	24	32	0.41	FRONTE INSTABILE	44	102	126	1.38	FRONTE STABILE
B2V	13.2	12.1	13	13.6	21	24	32	0.42	FRONTE INSTABILE	44	102	126	1.57	FRONTE STABILE

Le analisi evidenziano un fattore di sicurezza variabile compreso tra 3.27 e 4.45 per quanto riguarda le sezioni non consolidate, scavate nella porzione litoide dei Conglomerati di Pezzo. Per quanto riguarda le analisi svolte nella porzione alterata di tale formazione, si evidenzia la necessità di utilizzare consolidamenti al fronte, il che comporta un fattore di sicurezza variabile tra 1.38 e 1.57 avendo considerato la sezione tipo massima di progetto.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

SINTESI VERIFICHE DI STABILITA' DEL FRONTE GALLERIA "RAMO B" - GHIAIE DI MESSINA

SEZ.	PARAMETRI GEOMETRICI				PARAMETRI GEOTECNICI			DIAGNOSI			TERAPIA			
	B	D	C	Deq	$\gamma$	c	$\Phi$				$\Delta c$		FSF	
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[°]	[-]		[-]	[kPa]	[kPa]	[-]	
B2V	13.2	12.1	23	13.5	19	4	33	0.04	FRONTE INSTABILE	52	120	124	1.28	FRONTE STABILE
B2V	13.2	12.1	13	13.5	19	4	33	0.05	FRONTE INSTABILE	52	120	124	1.52	FRONTE STABILE
C1	14.4	12.6	22.5	14	19	4	33	0.04	FRONTE INSTABILE	42	243	247	2.45	FRONTE STABILE
C1	14.4	12.6	12.5	14	19	4	33	0.05	FRONTE INSTABILE	42	243	247	2.95	FRONTE STABILE

Per quanto riguarda le analisi svolte nelle Ghiaie di Messina, si evidenzia la necessità di utilizzare consolidamenti al fronte, il che comporta un fattore di sicurezza variabile tra 1.28 e 2.95 avendo considerato la sezione tipo media di progetto.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 8 Analisi numeriche

Le analisi sono svolte mediante la realizzazione di un modello bidimensionale agli elementi finiti, implementato con il codice di calcolo **PLAXIS2D** versione 9.00, sviluppato dall'Università di DELFT, che ha consentito di simulare lo stato di sforzo e di deformazione generato all'interno della struttura dalle sollecitazioni dovute sia alla propria massa, sia a quanto trasmesso dal terreno circostante.

Nell'analisi condotta, quale modello costitutivo del terreno è stato assunto un modello di comportamento elasto-plastico incrudente di tipo "*Hardening Soil*", che riproduce in condizioni di primo carico triassiale, un legame tensione-deformazione di tipo iperbolico. L'incrudimento è funzione sia delle deformazioni distorsionali plastiche sia delle deformazioni volumetriche plastiche. Per maggiori dettagli a riguardo si rimanda a quanto riportato all'interno del documento "Allegato – Riferimenti teorici e di calcolo".

Per i parametri geomeccanici di calcolo utilizzati nelle analisi si rimanda a quanto riportato nel paragrafo 4.6. I valori operativi di calcolo sono assunti in accordo con i "range" di variabilità dichiarati in detto paragrafo, e tengono conto delle finalità del tipo di analisi svolta.

PARAMETRI	CONGLOMERATI DI PEZZO			GHIAIE DI ME
	GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3	
Modello terreno	HS	HS	HS	HS
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21	21	21	19
$c_{ref}$ [kPa]	400	200	30	10
$\phi$ [°]	38	38	38	38
$E_{50, ref}$ [MPa]	500	300	150	100
$E_{edom, ref}$ [MPa]	500	300	150	100
$E_{ur, ref}$ [MPa]	1500	900	450	300
$m$ [-]	0	0	0	0
$p_{ref}$ [kPa]	100	100	100	100
$\nu_{ur}$ [-]	0,2	0,2	0,2	0,2

Per il consolidamento in jet-grouting utilizzato nella sezione C1 sono stati considerati i seguenti parametri:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

PARAMETRI		JET-GROUTING
Modello		MC
$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20
$C_{ref}$	[kPa]	1000
$\phi$	[°]	5
$E_{ref}$	[MPa]	600
$\nu$	[-]	0.2

I modelli sviluppati tengono conto delle differenti tipologie di interventi di consolidamento al contorno previsti per la sezione di scavo in esame. I modelli sviluppati tengono conto delle differenti tipologie di interventi di consolidamento al contorno previsti per la sezione di scavo in esame. In modo particolare nel caso di sezioni tipo B, tali interventi rientrano nel calcolo delle curve di "relax" per la modellazione numerica bi-dimensionale, mentre nelle sezioni tipo C, ove presenti, il consolidamento al contorno è modellato direttamente nel calcolo plaxis.

Le gallerie naturali in oggetto interferiscono con la falda statica per gran parte del loro sviluppo. Durante lo scavo dell'opera la falda risulterà sempre al di sotto del piano dell'opera a causa dell'effetto drenante della galleria stessa, come ampiamente dettagliato nelle relative relazione idrogeologiche. Nel lungo termine, a titolo cautelativo, si è ipotizzata la risalita della falda sino a circa 9m al di sopra della calotta, considerata incrementando la sollecitazione assiale in fase di verifica del rivestimento definitivo. Tale ipotesi, sicuramente semplificativa, permette una rapida presa in carico di tali effetti di lungo termine senza la modifica dei modelli di calcolo e mantenendo comunque validi i risultati delle analisi, essendo, nei casi in esame, trascurabili gli effetti di tale ipotesi. Le principali ipotesi semplificative di tale assunzione sono:

- Lo stato tensionale efficace iniziale non è coerentemente riprodotto;
- Gli effetti della presenza della falda assunti come sforzo normale trascurano gli effetti flessionali che si possono generare nel rivestimento definitivo essendo la forma della galleria non circolare.

Al fine di validare le assunzioni fatte è stato comunque riportato un calcolo tipologico mediante un modello agli elementi finiti in cui sono state eliminate tale ipotesi semplificative (Vedi l'elaborato "Ramo D- Relazione di Calcolo").

Il rivestimento di prima fase è stato schematizzato con elementi *PLATE*, mentre il rivestimento definitivo è stato simulato con elementi di mesh a cui vengono attribuite le proprietà del calcestruzzo. Per entrambi i rivestimenti è stato adottato un modello costitutivo elastico-lineare ed isotropo.

Gli elementi rappresentativi dei rivestimenti sono attivati "*free stress*" (senza sforzi iniziali) e sono

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

soggetti al peso proprio ed agli spostamenti indotti dalle variazioni di rigidità e di sollecitazione che intervengono nello stesso step di calcolo e nei successivi.

Le analisi sono state condotte in condizioni di deformazione piane (*PLANE STRAIN*), ma con accorgimenti tali da rappresentare il progressivo passaggio dal problema tridimensionale, vicino al fronte, a quello piano, lontano dal fronte. L'effetto del fronte di scavo è stato considerato nel calcolo con una progressiva riduzione delle "forze di scavo", ottenuta modificando il coefficiente  $\Sigma M_{stage}$  progressivamente da 0 ad 1. Per ulteriori dettagli sull'utilizzo di tale coefficiente si faccia riferimento al manuale tecnico del programma di calcolo.

Le analisi condotte con modelli numerici sono state sviluppate allo scopo di dimensionare le tipologie di sezione previste per lo scavo della galleria. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle analisi effettuate.



GALLERIA	COPERTURA [m]	LITOTIPO PREVALENTE	SEZIONE TIPO	CONDIZIONE DI CARICO
RAMO B	30	GHIAIE E CONGLOMERATI	C1	SIMMETRICO
	30	CONGLOMERATI DI PEZZO G3	B2V	SIMMETRICO

**Tabella 5 - Analisi di calcolo effettuate**

## 8.1 Curve di "relax" nel modello di calcolo

Per simulare il progressivo allontanamento del fronte di scavo dalla sezione di verifica e la contemporanea posa in opera dei sostegni con un'analisi bidimensionale, è necessario introdurre numericamente l'"effetto fronte", rilassando progressivamente le forze di scavo.

L'introduzione del concetto di "effetto fronte" nel calcolo richiede la definizione di una legge di rilassamento del nucleo in grado di simulare il progressivo incremento della deformazione della cavità, con conseguente diminuzione della pressione esercitata sui rivestimenti. Tale concetto risulta adeguatamente espresso in termini analitici dalla curva  $1-\lambda = \sigma_r/\sigma_0$  di Panet, che rappresenta in termini di sforzi radiali il passaggio dal comportamento tridimensionale a quello piano. L'adozione della sola curva  $\lambda$ , così come comunemente espressa quale criterio di riduzione delle caratteristiche elastiche e di resistenza del nucleo nel corso dell'analisi, non produce tuttavia i dovuti risultati tenso-deformativi, né per confronto con quanto ottenuto in base alla teoria delle Curve Caratteristiche o a simulazioni con modelli assialsimmetrici, né per confronto con quanto effettivamente rilevato in corso d'opera. Tale curva deve essere tarata in funzione delle caratteristiche geomeccaniche del materiale, dello stato tensionale in sito e del criterio di rottura

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

del materiale.

Per tale motivo si è stabilito di tarare la riduzione delle forze di scavo facendo in modo di ottenere un valore di convergenza al fronte prossimo a quello determinato mediante il calcolo delle Curve Caratteristiche.

La riduzione così ottenuta va applicata al termine della time geostatica. Si ha pertanto:

$$R_{\text{forze, fronte}} = R_{\text{PANET, fronte}} \cdot \alpha$$

con  $\alpha = (\text{Rid.}\%) / R_{\text{PANET, fronte}}\%$ .

Una volta determinata la riduzione iniziale, le riduzioni alle Time successive verranno determinate proporzionalmente all'andamento della curva  $1-\lambda$  di Panet in funzione della distanza dal fronte.

Si ha pertanto:

$$R_{\text{forze}} = R_{\text{forze, fronte}} + \beta \cdot (R_{\text{PANET}} - R_{\text{PANET, fronte}})$$

in cui il termine  $\beta = (100\% - \text{Rid.}\%) / (100\% - R_{\text{PANET, fronte}}\%)$  tiene conto delle percentuali di riduzione residue, dopo il rilassamento del fronte.

I valori adottati nelle varie time per ogni sezione tipo sono riportati negli allegati di calcolo PLAXIS a cui si rimanda.

## 8.2 Fasi di calcolo

Le time di calcolo considerate per tutte le analisi prevedono il completamento dello scavo della prima canna ed il passaggio della canna adiacente successivamente al getto del rivestimento definito della prima. In particolare le fasistiche sono le seguenti:

TIME	DESCRIZIONE
Time 0	Geostatico
Time 1	Fronte di scavo
Time 2	Avanzamento primo sfondo
Time 3	Installazione priverivestimento e avanzamento
Time 4	Maturazione priverivestimento e avanzamento
Time 5	Getto arco rovescio e murette e avanzamento
Time 6	Getto calotte
Time 7	Analisi di lungo termine

## 8.3 Risultati delle analisi numeriche

In questo paragrafo si illustrano gli esiti delle analisi numeriche condotte con il metodo degli elementi finiti, impiegando il codice di calcolo PLAXIS 2D, e le conseguenti verifiche statiche volte

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

a dimostrare l'adeguatezza della soluzione progettuale indicata.

In allegato alla presente relazione si riportano i dati di input / output delle analisi numeriche svolte. Le verifiche del rivestimento definitivo e del rivestimento di prima fase sono state condotte secondo i metodi imposti dalla normativa vigente (NTC 2008): per quanto riguarda le verifiche delle sezioni in c.a., si è fatto riferimento al metodo degli stati limite, mentre per le sezioni in calcestruzzo non armato, si è fatto riferimento a quanto riportato nel paragrafo 4.1.11 della normativa. Come già illustrato nel Paragrafo 2.1, le analisi sono svolte con riferimento alla Combinazione 1 dell'Approccio1.

I coefficienti amplificativi dei carichi utilizzati fanno riferimento alla tabella di seguito (combinazione A1).

		Coefficiente $\gamma_F$	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli sfavorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9 1,1	1,0 1,3	1,0 1,0
Carichi permanenti non strutturali(1)	favorevoli sfavorevoli	$\gamma_{G2}$	0,0 1,5	0,0 1,5	0,0 1,3
Carichi variabili	favorevoli sfavorevoli	$\gamma_{Qi}$	0,0 1,5	0,0 1,5	0,0 1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.



### 8.3.1 Modalità di verifica

Si è proceduto all'individuazione delle situazioni ritenute più critiche e comunque rappresentative della tratta in esame.

#### 8.3.1.1 Rivestimento di prima fase

Al fine di dimensionare le strutture in esame, ottenuto dal calcolo numerico lo stato di sollecitazione nel sostegno equivalente ( $N_{tot}$ ,  $T_{tot}$  e  $M_{tot}$ ), si ipotizza che i momenti flettenti ed il taglio siano assorbiti interamente dalle centine metalliche, mentre la forza normale  $N$ , viene ripartita sulla base delle rigidezze normali secondo le formule riportate di seguito:

$$N_{cen} = \frac{E_{acc} \cdot A_{cen} / d}{\bar{E} \cdot \bar{s}} \cdot N_{tot} = \frac{E_{acc}}{\bar{E}} \cdot \frac{A_{cen}}{\bar{s}} \cdot N_{tot} \quad N_{cls} = N_{tot} - \frac{N_{cen}}{d}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<b>Codice documento</b> CS0197_F0.doc	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20/06/2011

$$M_{cen} = M_{tot} \cdot d$$

$$T_{cen} = T_{tot} \cdot d$$

Il modulo elastico e lo spessore omogeneizzato utilizzati nel modello derivano dall'uguaglianza delle rigidità normali e flessionali del sistema reale e di quello equivalente e, quindi, dalla soluzione del conseguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} E \cdot s = E_{cls} \cdot s + \left( \frac{E_{acc}}{E_{cls}} - 1 \right) \cdot E_{cls} \cdot \frac{A_{cen}}{d} \\ \left( E \cdot \frac{s^3}{12} \right) = E_{cls} \cdot \frac{s^3}{12} + \left( \frac{E_{acc}}{E_{cls}} - 1 \right) \cdot E_{cls} \cdot \frac{I_{cen}}{d} \end{cases}$$

da cui:

$$E = \frac{\left[ E_{cls} \cdot s + \left( \frac{E_{acc}}{E_{cls}} - 1 \right) \cdot E_{cls} \cdot \frac{A_{cen}}{d} \right]^{3/2}}{\sqrt{E_{cls} \cdot s^3 + 12 \cdot \left( \frac{E_{acc}}{E_{cls}} - 1 \right) \cdot E_{cls} \cdot \frac{I_{cen}}{d}}} \quad s = \sqrt{\frac{E_{cls} \cdot s^3 + 12 \cdot \left( \frac{E_{acc}}{E_{cls}} - 1 \right) \cdot E_{cls} \cdot \frac{I_{cen}}{d}}{E_{cls} \cdot s + \left( \frac{E_{acc}}{E_{cls}} - 1 \right) \cdot E_{cls} \cdot \frac{A_{cen}}{d}}}$$

### 8.3.1.2 Rivestimento definitivo

Il dimensionamento e le verifiche del rivestimento definitivo sono state condotte considerando le combinazioni di azioni interne più sfavorevoli, facendo riferimento allo spessore medio dello stesso.

Nel caso di sezioni non armate si fa riferimento al seguente dominio di rottura, in cui i coefficienti moltiplicativi delle azioni ( $\gamma_{g1}$ ) sono assunti unitari, come indicato nel paragrafo 4.1.11 delle NTC2008.

$$M_d(N_d) = N_d \cdot \left( \frac{H}{2} - \frac{N_d}{2 \cdot 0.8 \cdot f_{cd} \cdot B} \right)$$

dove H e B sono rispettivamente l'altezza e la base della sezione.

Nel caso di sezioni armate sono state analizzate, per ogni coppia di azioni interne, due combinazioni:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
		COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO	Codice documento CS0197_F0.doc	Rev F0

- N-M<sub>d</sub>: Sforzo normale moltiplicato per  $\gamma_{g1} = 1$  e momento moltiplicato per  $\gamma_{g1} = 1.3$ ;
- N<sub>d</sub>-M<sub>d</sub>: Sforzo normale e momento moltiplicati per  $\gamma_{g1} = 1.3$

### 8.3.2 Risultati deformativi

Si riporta di seguito una sintesi delle deformazioni massime ottenute dai modelli numerici.

In particolare si riportano i valori degli spostamenti verticali e delle convergenze del cavo e del rivestimento di prima fase.

GALLERIA	SEZIONE TIPO	COPERTURA [m]	LITOTIPO PREVALENTE	CONDIZIONE DI CARICO	CEDIMENTO VERT. [cm]	PRECONV. ORIZ. [cm]	CED. PRERIV. VERT. [cm]	CONV. PRERIV. ORIZ. [cm]
RAMO B	C1	30m	GHIAIE E CONGLOMERATO G3	SIMMETRICA	1.05	0.20	3.89	0.32
	B2V	30m	CONGLOMERATO G3-G2	SIMMETRICA	0.96	0.25	2.09	0.58

### 8.3.3 Risultati tensionali

Nei paragrafi successivi sono presentate le verifiche tensionali dei rivestimenti di prima fase e definitivi.

#### 8.3.3.1 Verifica dei rivestimento di prima fase S.L.U.

Per il dimensionamento delle centine, le tensioni sono state analizzate verificando gli stati pluriassiali (combinazione di flessione, taglio e forza assiale). Nella Tabella 6 si riportano le azioni più sfavorevoli agenti per ogni analisi (moltiplicate per i coefficienti previsti da normativa), i valori resistenti ed il fattore per le verifiche agli stati pluriassiali.

VERIFICA S.L.U						CENTINE							SPRITZ-BETON	
GALLERIA	CALCOLO	SEZIONE TIPO	COPERTURA [m]	LITOTIPO PREVALENTE	CONDIZIONE DI CARICO	M [kNm]	N [kN]	T [kN]	M <sub>r</sub> [kNm]	N <sub>r</sub> [kN]	T <sub>r</sub> [kN]	PL [-]	N [kN]	f <sub>t</sub> [MPa]
RAMO B		C1	30m	GHIAIE E CONGLOMERATO G3	SIMMETRICA	25.18	147.10	55.35	46.80	697.50	187.60	0.75	1251.15	5.00
		B2V	30m	CONGLOMERATO G3-G2	SIMMETRICA	13.31	189.81	23.92	46.80	697.50	187.60	0.56	1614.30	6.46

**Tabella 6 - Verifiche tensionali S.L.U. rivestimento di prima fase**

Le sollecitazioni di progetto risultano compatibili con le resistenze dei materiali utilizzati:

- Acciaio:  $f_{yd} = f_{yk} / 1.05 = 275 / 1.05 = 262 \text{ MPa}$
- Spritzbeton:  $f_{sb,d} = f_{ck} / 1.0 = 25 / 1.0 = 25 \text{ MPa}$



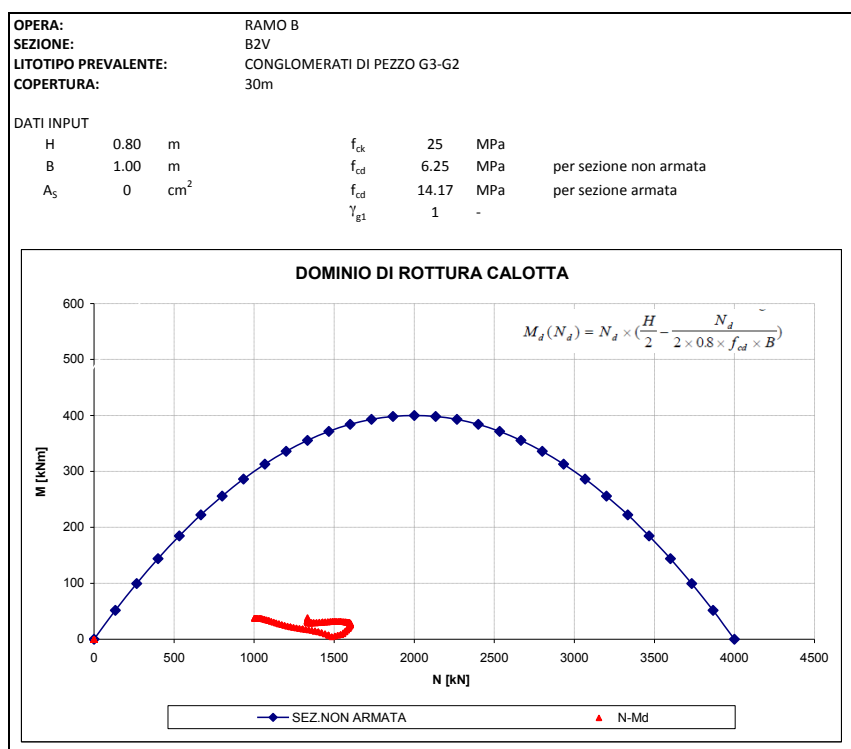
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<b>Codice documento</b> CS0197_F0.doc	<table border="1"> <tr> <td><b>Rev</b></td> <td><b>Data</b></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<b>Rev</b>	<b>Data</b>	F0	20/06/2011
<b>Rev</b>	<b>Data</b>						
F0	20/06/2011						

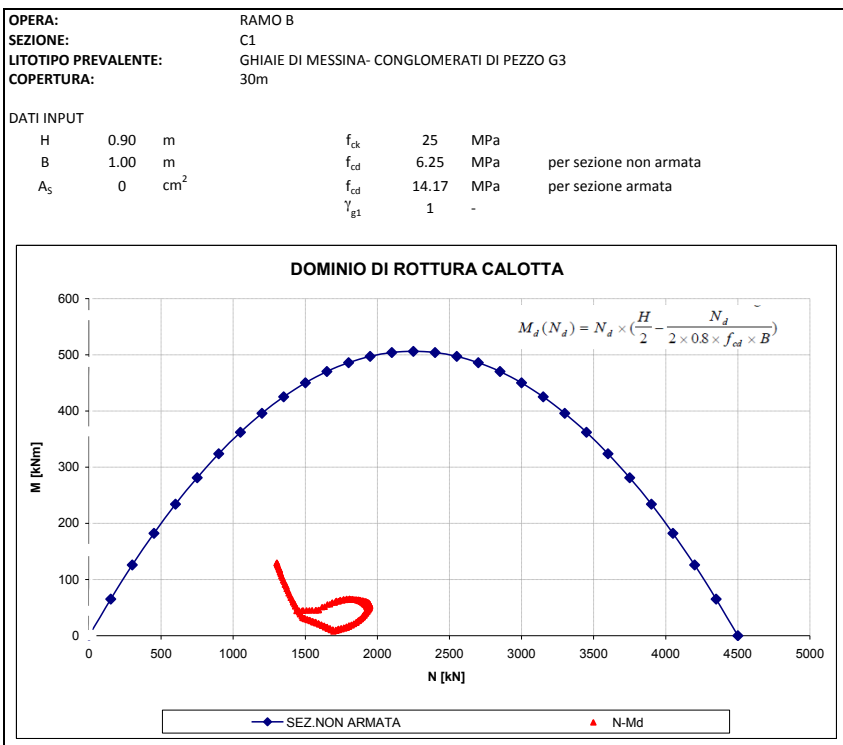
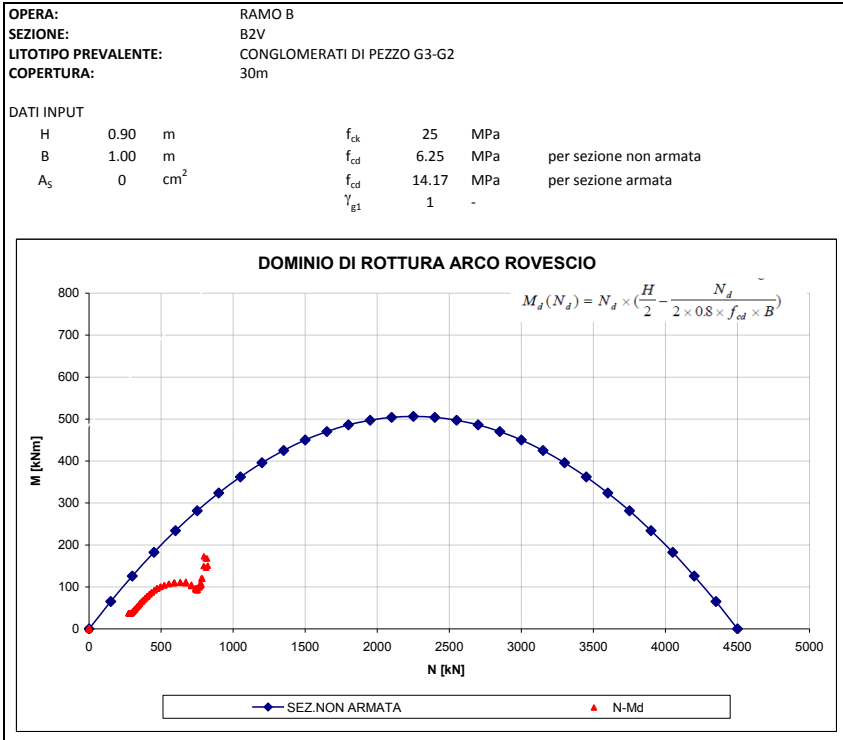
### 8.3.3.2 Verifica dei rivestimenti definitivi S.L.U.

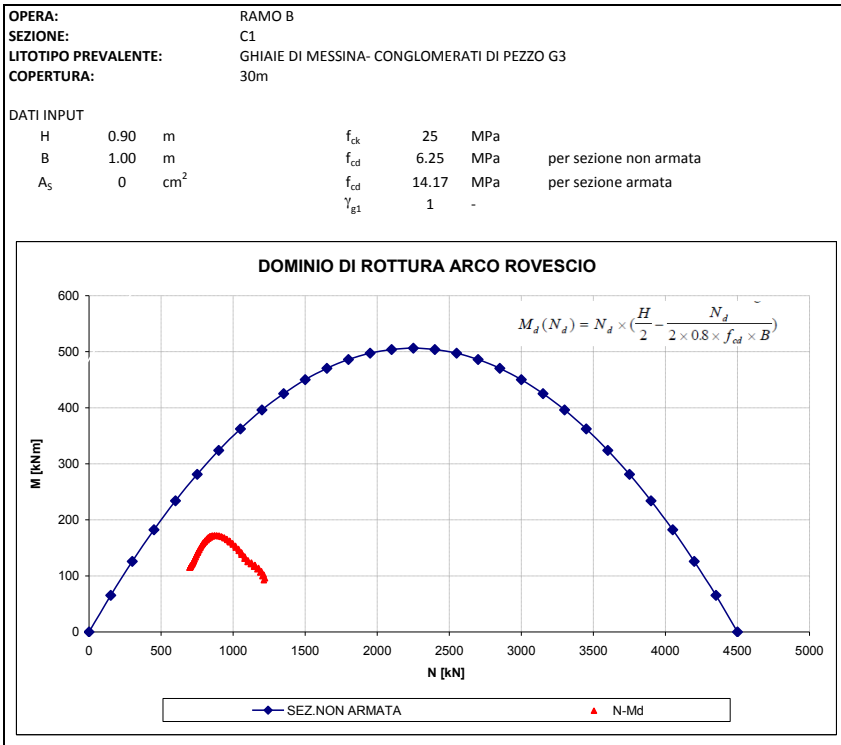
Come già detto nei capitoli precedenti, sono state previste diverse sezioni tipo di avanzamento lungo il tracciato dell'opera in esame. Sono state svolte analisi numeriche, allo scopo di poter verificare le condizioni di lavoro della struttura a diverse profondità. Le verifiche agli stati limite svolte a partire dai risultati delle analisi numeriche mostrano che, per le zone non soggette a rischio sismico o che non presentano particolarità geometriche, la galleria naturale Ramo B può essere realizzata non armata.

Per le tratte di scavo armate, non incluse nelle analisi, si rimanda a quanto riportato nei Profili Geomeccanici e nella tabella riassuntiva dell'applicazione delle sezioni tipo (Tabella 1 Sintesi sezioni tipo applicate). L'incidenza riportata nei profili è da considerarsi media.

Si riportano di seguito i domini di rottura con la verifica dei valori tensionali per i rivestimenti definitivi di calotta ed arco rovescio.







In Tabella 7 ed in Tabella 8 sono riportate le verifiche a taglio. Il contributo dello sforzo assiale e dell'azione tagliante sono amplificati secondo i coefficienti previsti da normativa ( $\gamma_{g1} = 1.3$ ). I valori del taglio corrispondono alle sollecitazioni massime agenti per ogni analisi.

VERIFICA S.L.U.					CALOTTA					
GALLERIA	SEZIONE TIPO	COPERTURA [m]	LITOTIPO PREVALENTE	CONDIZIONE DI CARICO	N [kN]	T [kN]	$A_s$ [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	V <sub>Rd</sub> [kN]	V <sub>Rsd</sub> [kN]	V <sub>Rcd</sub> [kN]
RAMO B	C1	30m	GHIAIE E CONGLOMERATO G3	SIMMETRICA	2434.5	132.0	-	268.5	-	-
	B2V	30m	CONGLOMERATO G3-G2	SIMMETRICA	1734.08	58.85	-	268.5	-	-

**Tabella 7 - Verifica taglio S.L.U. calotta**



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

VERIFICA S.L.U.					ARCO ROVESCIO					
GALLERIA	SEZIONE TIPO	COPERTURA [m]	LITOTIPO PREVALENTE	CONDIZIONE DI CARICO	N [kN]	T [kN]	A <sub>s</sub> [cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	V <sub>Rd</sub> [kN]	V <sub>Rsd</sub> [kN]	V <sub>Rcd</sub> [kN]
RAMO B	C1	30m	GHIAIE E CONGLOMERATO G3	SIMMETRICA	1587.2	142.1	-	294.9	-	-
	B2V	30m	CONGLOMERATO G3- G2	SIMMETRICA	1125.0	134.03	-	294.9	-	-

**Tabella 8 - Verifica S.L.U. taglio arco rovescio**

### 8.3.3.3 Verifica dei rivestimenti definitivi S.L.E.

Per il rivestimento definitivo della galleria naturale "Ramo B" non è stata prevista armatura. Le verifiche agli stati limite di esercizio relative al rivestimento definitivo nella combinazione più sfavorevole risultano pertanto automaticamente soddisfatte dalle verifiche riportate nel capitolo relativo agli SLU.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO	<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

## ALLEGATO – RIFERIMENTI TEORICI E DI CALCOLO

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 9 Metodo delle curve caratteristiche

### 9.1 Aspetti generali

Le curve caratteristiche consistono nel simulare lo scavo di una galleria nell'ipotesi di simmetria assiale e di stato di deformazione piana.

Per curve caratteristiche di una cavità si intendono delle curve che legano le pressioni di contenimento, esercitate in senso radiale sul bordo della galleria dalle opere di stabilizzazione e di rivestimento, agli spostamenti radiali al suo contorno (convergenze).



Lo scavo è rappresentato come una graduale riduzione di una pressione fittizia " $p$ " applicata alle pareti della galleria, tramite cui si simula il progressivo deconfinamento dell'ammasso prodotto dall'avvicinarsi del fronte di scavo alla sezione di calcolo ed al successivo avanzamento del fronte stesso, cui corrisponde una convergenza radiale " $u$ " crescente in funzione delle caratteristiche dell'ammasso. Questo fenomeno può essere descritto in un piano  $p-u$  e la linea che ne risulta prende il nome di *curva caratteristica della cavità*.

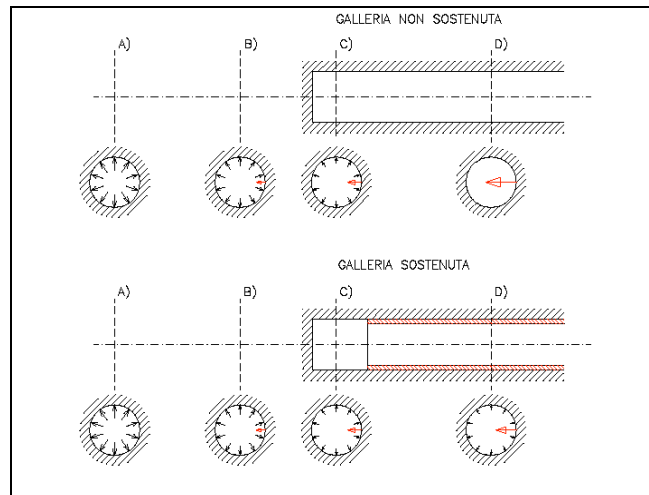
Tali curve possono quindi essere utilizzate, oltre che per valutare il comportamento dell'ammasso allo scavo, anche per determinare lo stato di sollecitazione sui diversi interventi costituenti la galleria, mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve caratteristiche della cavità e dei singoli interventi che la costituiscono.

Per ogni galleria è possibile costruire due curve caratteristiche principali:

- quella valida presso il fronte di scavo, detta curva caratteristica del fronte, che tiene conto dell'effetto tridimensionale delle tensioni vicino ad esso e che permette di risalire, mediante considerazioni sulla resistenza del nucleo, all'entità della convergenza già subita dalla galleria nella sezione in corrispondenza al fronte di scavo;
- quella valida per qualsiasi sezione sufficientemente lontana dal fronte, detta curva caratteristica della cavità, per la quale lo stato di tensione può considerarsi piano.

In generale, ove la curva caratteristica non intersechi in un valore finito l'asse delle deformazioni radiali, la galleria risulta instabile senza adeguati interventi di stabilizzazione.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -</b> <b>RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

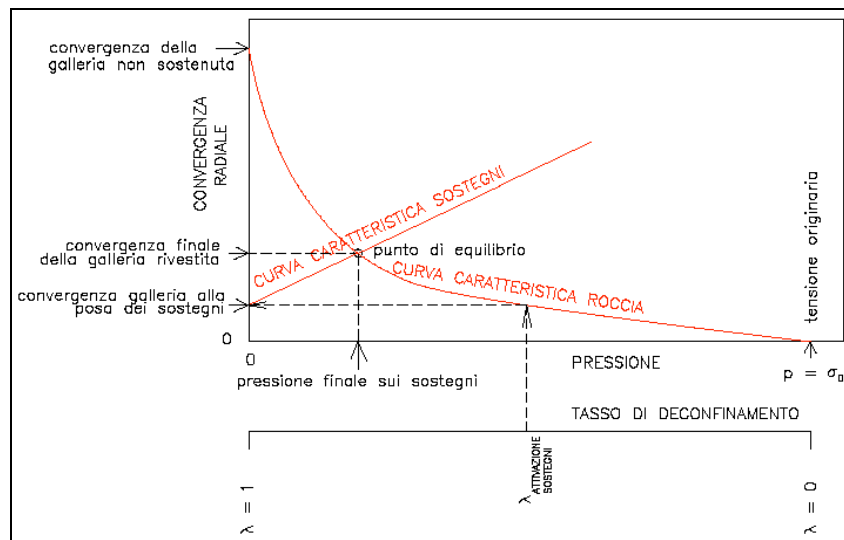


**Figura 12 - Progressivo deconfinamento del bordo di scavo per simulare l'avanzamento della galleria**

Se la galleria è scavata in assenza di sostegni, il valore finale della pressione di confinamento è pari a zero; in caso contrario allo stato finale è presente una pressione di confinamento maggiore di zero che rappresenta la pressione di equilibrio del cavo ottenuta dall'intersezione della curva caratteristica della cavità e dei rivestimenti impiegati. Quest'ultima curva, a sua volta, dipende dalle proprietà dei materiali impiegati e dalle deformazioni subite dall'ammasso prima della posa in opera dei sostegni provvisori e quindi, in ultima analisi, è legata al comportamento del fronte di scavo e al tipo di interventi previsti in avanzamento.

Mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve "caratteristiche" della galleria, dei sostegni provvisori e definitivi e del fronte è possibile ridurre il problema tridimensionale in prossimità del fronte di scavo ad un problema bidimensionale; l'intersezione delle varie curve permette di determinare graficamente il comportamento della galleria allo scavo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<b>Codice documento</b> CS0197_F0.doc	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20/06/2011



**Figura 13 Curve caratteristiche**

La curva caratteristica del rivestimento, o curva di confinamento, è individuata dalla rigidità della struttura  $K_{st}$  e dallo spostamento radiale  $U_{d0}$  che si è già generato nell'intorno del cavo prima dell'installazione del supporto, messo in opera a distanza  $d_0$  dal fronte di avanzamento della galleria.

$$u_r = u_{d0} + R \frac{p}{K_{st}}$$

Il valore della convergenza alla distanza di posa in opera del rivestimento,  $u_{d0}$ , viene determinato simulando l'effetto di deconfinamento dovuto allo scavo e all'allontanamento del fronte per mezzo di una pressione fittizia applicata alla parete della galleria. Tale pressione, inizialmente pari allo stato di sforzo originario, viene ridotta fino ad un valore  $P^*$  definito da un tasso di rilascio  $\lambda$ :

$$P^* = (1 - \lambda) \cdot \sigma_0$$

In tutti i casi è necessario valutare lo spostamento al fronte  $u_f$  per risalire allo spostamento radiale alla distanza  $d_0$ .

Tracciando la curva caratteristica del fronte, non solo si ricava il valore  $u_f$  (ovvero l'intersezione della curva del fronte con quella del nucleo), tenendo conto del tipo di preconsolidamento eventualmente effettuato in avanzamento dal fronte stesso, ma è anche possibile individuare a priori il comportamento della galleria, distinguendo tra fronte stabile (A), stabile a breve termine (B) ed instabile (C), secondo l'approccio A.De.Co.Rs.

Noto lo spostamento al fronte e determinato l'andamento della curva di convergenza longitudinale della galleria tramite la funzione che fornisce il tasso di deconfinamento  $\lambda$ , si calcola il valore della



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

convergenza radiale già subita dal cavo, prima della posa in opera del rivestimento; la curva di confinamento risulta a questo punto completamente definita.

La condizione di equilibrio, individuata dallo spostamento radiale  $u_{re}$  o dalla pressione radiale  $P=P_e$ , è determinata dall'intersezione della curva caratteristica del terreno e di quella del rivestimento. Tale condizione risulta verificata se la pressione di equilibrio è inferiore alla resistenza massima propria del rivestimento.

In virtù dei sistemi di avanzamento proposti, volti a conservare le caratteristiche meccaniche del terreno indisturbato, limitando al minimo il rimaneggiamento e l'alterazione dello stesso conseguente alle operazioni di scavo, diviene estremamente importante sapere quanto il terreno è effettivamente in grado di incassare nelle sue condizioni naturali e indisturbate, prima di giungere alla rottura. La conoscenza delle caratteristiche di resistenza al taglio del terreno nelle sue condizioni naturali è indispensabile per determinare con discreta accuratezza il contributo al contenimento del cavo che i vari interventi adottati saranno in grado di fornire.



Il discorso così impostato sulla sensibilità del terreno dovrà essere poi allargato per mettere in conto anche l'eterogeneità strutturale dell'ammasso, che in rapporto alle coperture in gioco, è determinante nella parametrizzazione geotecnica. Non essendo realmente praticabile l'ipotesi di una perfetta conoscenza delle condizioni del terreno ad ogni avanzamento sarà necessario individuare, anche facendo ipotesi di lavoro sulla base di esperienze maturate in casi analoghi, condizioni geotecniche standard in base alle quali svolgere i calcoli.

Si precisa inoltre che i calcoli svolti fanno riferimento a condizioni puramente statiche, considerando il consolidamento del fronte come un irrigidimento del nucleo e non come uno strumento di stabilizzazione del paramento, che pertanto rimane pur sempre una fonte di pericolo da tenere costantemente sotto controllo, evitando che le maestranze permangano entro il suo raggio di azione in particolare durante le operazioni di scavo.

La formulazione delle curve caratteristiche è stata desunta dall'articolo di G. Lombardi e A. Amberg: *"Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine"*, mentre per il calcolo della convergenza a distanza  $x$  dal fronte  $C(x)$ , si è fatto riferimento a quanto descritto dall'articolo: Panet M., Guenot A.: *"Analysis of convergence behind the face of a tunnel"*.

## 9.2 Consolidamento del fronte di scavo

Nel caso di presenza di trattamenti di rinforzo del fronte (VTR, Jet-grouting ecc.) posti in opera in avanzamento, il loro effetto stabilizzante può utilmente essere tenuto in conto incrementando la

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

resistenza coesiva dell'ammasso.

Infatti la chiodatura esercita un'azione di contenimento passivo del fronte, rappresentabile, nel caso di impiego di elementi strutturali in VTR, da una tensione di confinamento  $\sigma_3^{VTR}$  fittizia, funzione dei parametri tecnici del trattamento secondo le equazioni:

$$\sigma_3^{VTR_A} = \frac{\tau_A \cdot L_A \cdot 2p_A}{A_i}$$

$$\sigma_3^{VTR_B} = \frac{\sigma_T \cdot A_T}{A_i}$$

$$\sigma_3^{VTR} = \text{minimo} (\sigma_3^{VTR_A}, \sigma_3^{VTR_B})$$

dove:

- $\tau_a$  = tensione di aderenza ammasso-fondazione
- $L_A$  = semi-lunghezza dell'elemento di rinforzo (si assume che mezzo elemento costituisca la fondazione)
- $2p_A$  = perimetro della sezione reagente a sfilamento
- $\sigma_t$  = resistenza a trazione dell'elemento di rinforzo
- $A_i$  = area di influenza di un elemento strutturale
- $A_t$  = sezione dell'elemento resistente a trazione
- L'effetto di  $\sigma_3^{VTR}$  può essere considerato come incremento di coesione dell'ammasso:
- $\Delta\sigma_C^{\text{Fronte}} = \frac{\sigma_3^{VTR}}{2} * \sqrt{K_p}$

Se il fronte di scavo è rinforzato con trattamenti colonnari in jet-grouting, allora i parametri di coesione sono migliorati specificando un incremento della coesione di picco pari alla differenza tra la coesione dell'ammasso non trattato e quella dell'ammasso trattato; quest'ultima è valutata come media pesata della coesione originaria del terreno e di quella del trattamento:

$$\Delta C = C_{\text{ammasso trattato}} - C_{\text{ammasso}} = \frac{c_{\text{jet}} \cdot A_{\text{jet}} + c_{\text{ammasso}} \cdot A_{\text{ammasso}}}{A_{\text{tot}}} - C_{\text{ammasso}}$$

dove:

- $c_{\text{jet}}$  = coesione dei trattamenti colonnari in jet grouting
- $c_{\text{ammasso}}$  = coesione dell'ammasso senza trattamenti
- $A_{\text{jet}}, A_{\text{ammasso}}, A_{\text{tot}}$  = sono le aree, rispettivamente, dei trattamenti colonnari, della sezione di scavo al netto dei trattamenti e della sezione di scavo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 10 Analisi di stabilità del fronte

A partire dai parametri geotecnici e geomeccanici di caratterizzazione dei materiali interessati dallo scavo delle gallerie è doveroso effettuare analisi della risposta dell'ammasso roccioso allo scavo. Tali analisi di stabilità del fronte di scavo sono eseguibili mediante l'applicazione di criteri semiempirici e delle linee caratteristiche.

Si intende per instabilità del fronte la possibilità di collasso del nucleo. Lo scavo di una galleria comporta la modifica dello stato tensionale naturale. Al fronte l'ammasso subisce una forte decompressione verso la galleria con conseguente estrusione del materiale che costituisce il nucleo. Fintanto che si ammetta la presenza di un sufficiente sostegno radiale immediatamente a tergo del fronte, l'estrusione del nucleo costituisce l'unico elemento critico nel sistema. La deviazione verso l'esterno delle tensioni longitudinali lungo l'asse della galleria, dalla situazione naturale (non scavata) alla situazione equilibrata dello scavo sostenuto, provoca un particolare stato tensionale del nucleo. Esso subisce, infatti, una compressione radiale che, sommandosi all'assenza di un sufficiente contenimento verso lo scavo, ne può provocare il collasso similmente alla rottura di tipo passivo che si verifica in una cella triassiale con la diminuzione della tensione assiale lasciando invariata la compressione radiale.

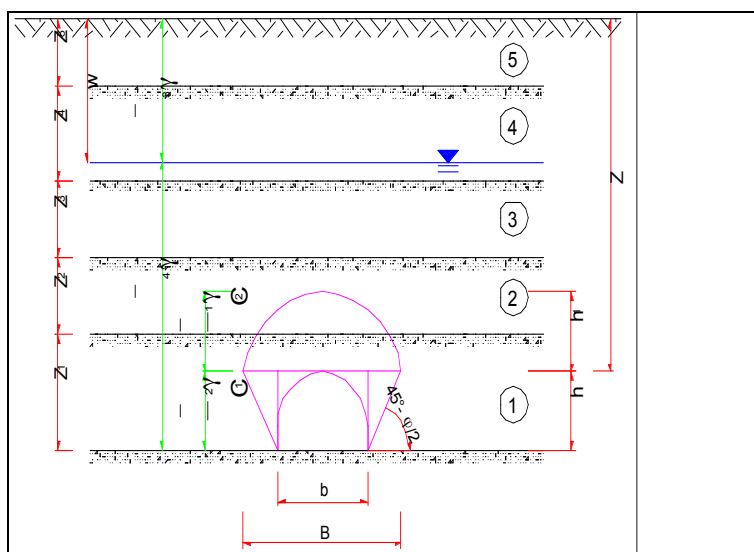
La valutazione della stabilità del fronte di scavo può essere condotta mediante l'impiego di metodi analitici semplificati all'equilibrio limite.

Per casi di basse coperture (inferiori ai  $3\phi$ ) si fa riferimento alle teorie di Tamez e Cornejo che ipotizzano che esistano dei prismi di terreno in distacco secondo sezioni longitudinali, giungendo a definire un coefficiente di sicurezza FSF nei confronti della stabilità del fronte di scavo. Tali metodi consentono inoltre di tenere in conto degli interventi di preconsolidamento assumendo per il terreno trattato caratteristiche meccaniche incrementate rispetto a quelle del terreno naturale.

Si riporta nel seguito una breve sintesi di riepilogo del metodo adottato.

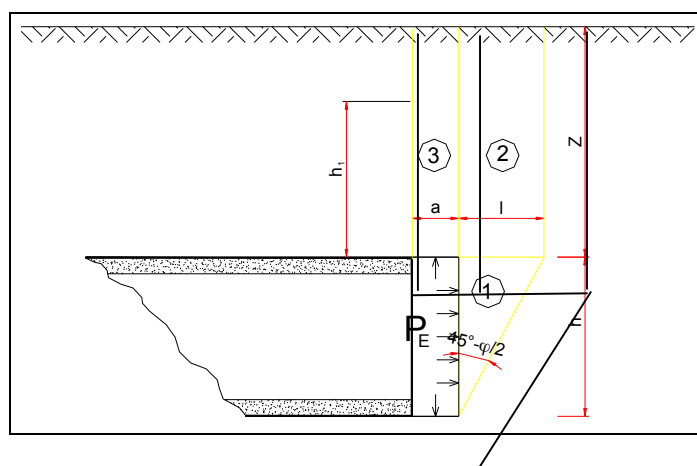
Il metodo dell'equilibrio limite proposto da Tamez tiene conto della riduzione dello stato di confinamento triassiale del nucleo di terreno oltre il fronte per mezzo di un meccanismo di rottura del tipo effetto volta, con il quale il volume di terreno gravante sulla corona della galleria è definito da un paraboloide, approssimato mediante tre solidi prismatici, come illustrato nelle figure seguenti.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -</b> <b>RELAZIONE DI CALCOLO</b>		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**Figura 14 – Schema proposto da Tamez.**

In questo modo si determinano le massime tensioni tangenziali che si possono sviluppare sulle facce di ogni prisma senza che avvengano scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti). Il rapporto tra i momenti delle forze resistenti e delle forze agenti fornisce un coefficiente di sicurezza, denominato FSF (face security factor).



**Figura 15 – Schema proposto da Tamez.**

Anche per le analisi con il metodo dell'equilibrio limite è possibile tener conto di eventuali interventi di preconsolidamento del fronte mediante un approccio del tutto analogo a quanto illustrato per le linee caratteristiche.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 11 Software di calcolo

### 11.1 PLAXIS

Le analisi tensio-deformative riportate di seguito sono state condotte per mezzo del codice di calcolo *PLAXIS2D* versione 9, sviluppato dalla *Delft University of Technology & Plaxis bv*, Olanda, il quale consente di eseguire analisi di stabilità e di deformazione per applicazioni geotecniche in condizioni di deformazioni piane e condizioni assialsimmetriche.

Il problema in stato di deformazione piana viene studiato costruendo un modello agli elementi finiti, specificando le proprietà dei materiali e le condizioni al contorno.

Il modello in stato piano può essere adoperato nel caso in cui la geometria sia riconducibile ad una sezione trasversale (nel piano x,y) che si ripete in modo più o meno uniforme nella direzione ad essa normale. (direzione z) per una lunghezza significativa. In tal senso lo scavo della galleria viene simulato la definizione di una legge di rilassamento del nucleo in grado di simulare il progressivo incremento della deformazione della cavità, con conseguente diminuzione della pressione esercitata sui rivestimenti, attraverso un coefficiente  $\Sigma Mstage$  che viene progressivamente incrementato da 0 ad 1.

Il rivestimento di prima fase è stato schematizzato con elementi BEAM, mentre il rivestimento definitivo è simulato con elementi di mesh a cui vengono attribuite le proprietà del calcestruzzo. Per entrambi i rivestimenti si è adottato un modello costitutivo elastico-lineare ed isotropo.

L'interazione tra terreno e struttura può essere simulata per mezzo di elementi interfaccia che consentono di modellare un comportamento intermedio tra un contatto perfettamente liscio ed un contatto perfettamente scabro. La scabrezza dell'interazione è modellata mediante un opportuno valore del fattore di riduzione della resistenza all'interfaccia ( $R_{inter}$ ). Questo fattore mette in relazione la resistenza all'interfaccia (attrito ed adesione con il muro) con quella del terreno (angolo di resistenza a taglio e coesione).

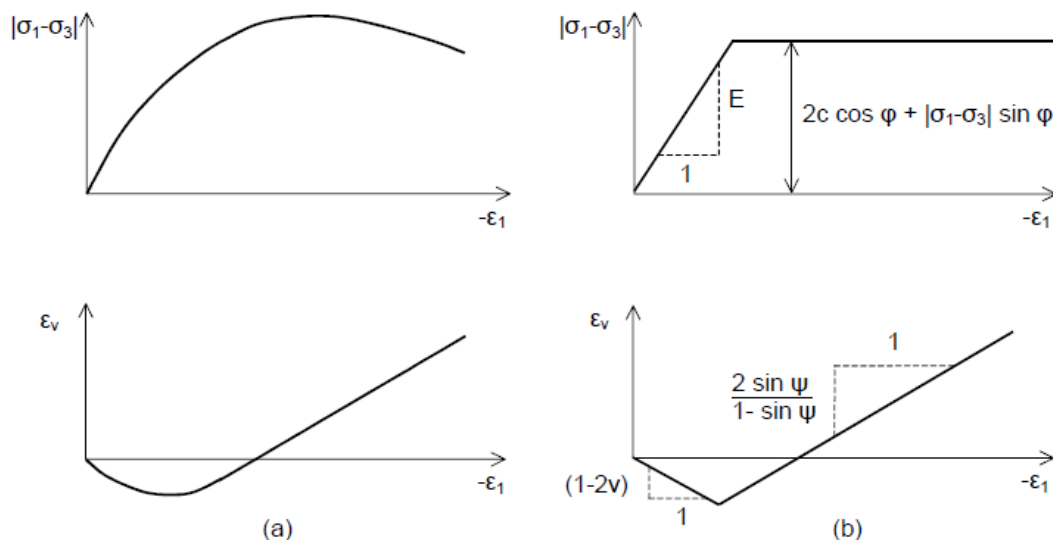
Il comportamento tensio-deformativo dei terreni può essere modellato per mezzo di vari legami costitutivi:

- **Modello Linear elastic (Elastico lineare)**: Questo modello rappresenta la legge di Hooke dell'elasticità isotropa lineare. Il modello richiede due parametri di rigidezza elastici, che sono il modulo di Young  $E$ , ed il coefficiente di Poisson  $\nu$ . Il modello elastico lineare è molto

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

limitato nei riguardi della simulazione del comportamento del terreno; è utilizzato principalmente per simulare strutture rigide nel terreno.

- **Modello Mohr-Coulomb:** Questo modello viene utilizzato come una prima approssimazione del comportamento del terreno in generale. Il modello richiede cinque parametri, che sono il modulo di Young  $E$ , il coefficiente di Poisson  $\nu$ , la coesione  $c$ , l'angolo di attrito  $\varphi$ , e l'angolo di dilatanza  $\psi$ .
- **Modello Jointed Rock model (Roccia fratturata):** E' un modello elasto-plastico anisotropo in cui può manifestarsi soltanto plasticizzazione per taglio lungo un limitato numero di direzioni (piani). Questo modello può essere adottato per simulare il comportamento di rocce stratificate o fratturate.



- **Modello Hardening Soil (Terreno incrudente):** E' un modello elastoplastico incrudente che riproduce in condizioni di primo carico triassiale un legame tensioni deformazioni di tipo iperbolico. L'incrudimento è funzione sia delle deformazioni distorsionali plastiche sia delle deformazioni volumetriche plastiche. Il modello è quindi in grado di simulare, tra l'altro, la riduzione irreversibile di volume di un terreno sottoposto a compressione lungo percorsi di carico proporzionali (e.g. carico isotropo, edometrico) a partire da una condizione di normal-consolidazione. Questo modello di 'secondo livello' può essere utilizzato per simulare il comportamento sia di sabbie e di ghiaie sia di terreni più compressibili come argille e limi.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- **Modello Soft Soil (Terreno compressibile):** E' un modello tipo Cam-clay che può essere utilizzato per simulare il comportamento di terreni compressibili quali argille normalmente consolidate e torba. Il modello è particolarmente adatto ad analizzare situazioni nelle quali il terreno è sollecitato lungo percorsi tensionali che lo mantengono in condizioni di normal-consolidazione.
- **Modello Soft Soil Creep (Creep per terreno compressibile):** E' un modello di 'secondo livello' formulato nell'ambito della viscoplasticità. Il modello può essere utilizzato per simulare il comportamento nel tempo di terreni molto compressibili come argille normalconsolidate e torba. Il modello riproduce in condizioni di primo carico edometrico il legame lineare tra deformazioni volumetriche e logaritmo della tensione principale massima.

I parametri del modello in PLAXIS sono intesi a rappresentare la risposta del terreno in termini di tensioni efficaci, e cioè la relazione tra le tensioni e le deformazioni associate allo scheletro solido del terreno. Per consentire di tenere conto, nella risposta del terreno, dell'interazione acqua-scheletro solido, è possibile scegliere tra tre tipi di comportamento:

- **Drained behaviour (Comportamento drenato):** non vengono generate sovrappressioni neutre. Questo è il caso di terreni asciutti ed anche il caso in cui sia possibile un rapido drenaggio per l'elevata permeabilità dei terreni (sabbie) e/o per la bassa velocità di applicazione dei carichi. Questa scelta può anche essere utilizzata per simulare il comportamento del terreno a lungo termine senza la necessità di modellare l'esatta storia delle sollecitazioni in condizioni non drenate e della consolidazione.


- **Undrained behaviour (Comportamento non drenato):** viene utilizzato per simulare la generazione di sovrappressioni neutre in condizioni di flusso idraulico impedito. Tali condizioni possono verificarsi per la bassa permeabilità dei terreni (argille) e/o per l'elevata velocità di applicazione dei carichi. Oltre alla rigidità ed alla resistenza dello scheletro solido del terreno, PLAXIS aggiunge un modulo di compressibilità volumetrica per l'acqua e distingue tra tensioni totali, tensioni efficaci e sovrappressioni neutre:

$$\text{Tensioni totali: } \Delta p = K_u \Delta \epsilon_v$$

$$\text{Tensioni efficaci: } \Delta p' = (1 - B) \Delta p = K' \Delta \epsilon_v$$

$$\text{Sovrappressioni neutre: } \Delta p_w = B \Delta p = K_w / n \Delta \epsilon_v$$

dove  $\Delta p$  è un incremento della tensione totale media,  $\Delta p'$  è un incremento della tensione efficace

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

media e  $\Delta p_w$  è un incremento della sovrappressione neutra. B è il parametro di Skempton, che mette in relazione l'incremento della tensione totale media con l'incremento delle sovrappressioni neutre.  $K_u$  è il modulo di rigidezza volumetrica non drenato,  $K'$  è il modulo di rigidezza volumetrica dello scheletro solido del terreno,  $K_w$  è il modulo di rigidezza volumetrica del fluido interstiziale,  $n$  è la porosità del terreno e  $\Delta \varepsilon_v$  è l'incremento della deformazione volumetrica.

Per simulare il comportamento non drenato PLAXIS non usa un valore realistico per il modulo di rigidezza volumetrica dell'acqua, in quanto questo potrebbe condurre al cattivo condizionamento della matrice delle rigidezze ed a problemi numerici. Infatti, in caso di compressione isotropa, la rigidezza del mezzo monofase equivalente è, per default, assunta pari ad un modulo di rigidezza volumetrica non drenato:

$$K_u = \frac{2G(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)} \quad \text{dove} \quad G = \frac{E'}{2(1+\nu')} \quad \text{e} \quad \nu_u = 0.495$$

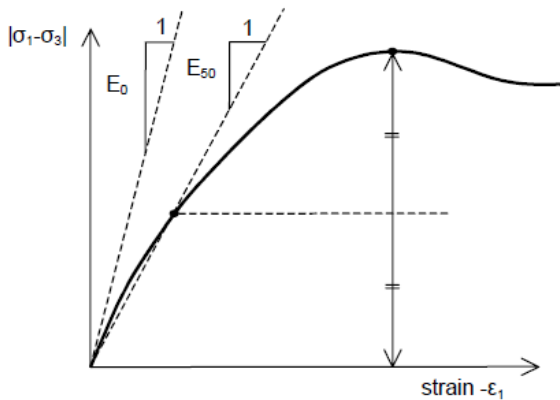
L'acqua interstiziale è quindi considerata leggermente compressibile ed il coefficiente B appena inferiore a 1,0. Quindi, in condizioni di carico isotrope, una piccola percentuale del carico sarà trasferito alle tensioni efficaci, almeno nel caso di piccoli valori del coefficiente di Poisson efficace.

- **Non-porous behaviour (Comportamento non poroso)**: non sono considerate né pressioni neutre iniziali né sovrappressioni neutre. Applicazioni possibili di questo caso sono la modellazione del comportamento del calcestruzzo o di elementi strutturali in genere. Il comportamento non poroso viene spesso utilizzato in combinazione con il modello Linear elastic (Elastico-lineare). L'introduzione di un peso dell'unità di volume saturo e della permeabilità non è rilevante per materiali non porosi. Il tipo di materiale non poroso può essere applicato anche alle interfacce.

Il modulo di Young è utilizzato come modulo di rigidezza fondamentale dei modelli Elastic e Mohr-Coulomb, ma è possibile anche adottare alcuni moduli di rigidezza alternativi. Nella meccanica dei terreni, la pendenza iniziale della curva tensione-deformazione è indicata con  $E_0$  (modulo tangente iniziale) ed il modulo secante al 50% della resistenza è denotato con  $E_{50}$ . Per argille fortemente sovraconsolidate e per alcune rocce con un ampio intervallo di carico elastico-lineare, è realistico utilizzare  $E_0$ , invece per sabbie ed argille pressocché normalconsolidate, soggette a carico, è più appropriato utilizzare  $E_{50}$ .



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<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: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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 i terreni, sia il modulo tangente iniziale che il modulo secante tendono ad aumentare con la tensione media efficace. Quindi, gli strati profondi di terreno tendono ad avere una rigidezza maggiore degli strati superficiali. Inoltre, la rigidezza osservata dipende dal percorso di sollecitazione seguito. La rigidezza è molto più alta per la fase di scarico e di ricarica piuttosto che per la fase di primo carico. Inoltre la rigidezza del terreno osservata in termini di modulo di Young è generalmente più bassa per compressione in condizioni drenate piuttosto che per taglio. Quindi, se si utilizza un modulo di rigidezza costante per rappresentare il comportamento del terreno sarebbe opportuno scegliere un valore che sia coerente con il livello tensionale e con il percorso di sollecitazione atteso. La dipendenza del comportamento dei terreni dal livello tensionale è portata in conto dal software. Per il modello Mohr-Coulomb, è possibile prevedere una rigidezza che aumenta con la profondità.

Le tensioni iniziali in un ammasso di terreno sono determinate dal peso del materiale e dalla storia della sua formazione. Questo stato tensionale è di solito caratterizzato da una tensione verticale efficace iniziale  $\sigma'_{v,0}$ . La tensione efficace orizzontale iniziale  $\sigma'_{h,0}$  è legata alla tensione efficace verticale iniziale attraverso il coefficiente di spinta a riposo,  $K_0$  ( $\sigma'_{h,0} = K_0 \sigma'_{v,0}$ ). In PLAXIS le tensioni iniziali possono essere generate specificando  $K_0$  oppure utilizzando la procedura Gravity loading (Generazione delle tensioni iniziali per incremento della gravità).

Per il tipo di calcolo da adottare in una fase viene fatta una distinzione fra tre tipi fondamentali:



- **Plastic calculation (Calcolo plastico)**: utilizzato per eseguire un'analisi di deformazione elasto-plastica in cui non sia necessario prendere in considerazione la dissipazione delle sovrappressioni neutre nel tempo. La matrice di rigidezza in un calcolo plastico normale è riferita alla geometria

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" - RELAZIONE DI CALCOLO		<i>Codice documento</i> CS0197_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



indeformata originaria. Questo tipo di calcolo è appropriato nella maggior parte delle applicazioni pratiche di tipo geotecnico.

- **Consolidation analysis (Analisi di consolidazione)**: Quando è necessario analizzare l'evoluzione o la dissipazione delle sovrappressioni neutre nel tempo in terreni saturi di tipo argilloso, si deve effettuare un'analisi di consolidazione. PLAXIS consente di effettuare analisi di consolidazione elasto-plastiche. In generale, un'analisi di consolidazione senza ulteriori sollecitazioni viene eseguita dopo un calcolo plastico non drenato.



- **Phi-c reduction (Analisi di stabilità per riduzione dei parametri di resistenza)**: Un'analisi di stabilità in PLAXIS può essere eseguita riducendo i parametri di resistenza del terreno; tale processo è denominato Phi-c reduction.

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
<p>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</p>	<p><i>Codice documento</i>          CS0197_F0.doc</p>		<p><i>Rev</i>          F0</p>	<p><i>Data</i>          20/06/2011</p>

## ALLEGATO – LINEE CARATTERISTICHE

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
<p>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</p>	<p><i>Codice documento</i>          CS0197_F0.doc</p>		<p><i>Rev</i>          F0</p>	<p><i>Data</i>          20/06/2011</p>

## ALLEGATO – STABILITA' DEL FRONTE

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
<p>COLLEGAMENTI STRADALI CALABRIA - "RAMO B" -          RELAZIONE DI CALCOLO</p>	<p><i>Codice documento</i>          CS0197_F0.doc</p>		<p><i>Rev</i>          F0</p>	<p><i>Data</i>          20/06/2011</p>

## ALLEGATO – ANALISI NUMERICHE