



PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

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

 <p>IL PROGETTISTA Dott. Ing. F. Colla Ordine Ingegneri Milano n°20355 Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n°15408</p> 	<p>IL CONTRAENTE GENERALE</p> <p>Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
---	---	--	---

<p><i>Unità Funzionale</i> COLLEGAMENTI CALABRIA</p> <p><i>Tipo di sistema</i> INFRASTRUTTURE STRADALI OPERE CIVILI</p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i> ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE</p> <p><i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i> GENERALE</p> <p><i>Titolo del documento</i> NOTA TECNICA VIADOTTI</p>	<p style="text-align: right;">CS0288_F0</p>
--	--

CODICE	C G 0 7 0 0 P R X D C S C 0 0 G 0 0 0 0 0 0 0 1 F0
--------	--

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	R.CAFFARENA	G.SCIUTO	F.COLLA

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

INDICE

INDICE	3
PREMESSA.....	4
1 INTERPRETAZIONE DELLA NORMATIVA D.M.2008.....	5
2 MODELLO AGLI EF – ANALISI STATICA LINEARE	7
3 ANALISI DINAMICHE SPALLA VIADOTTO PANTANO.....	10
3.1 Confronto tra analisi dinamica non lineare e analisi statica lineare	11
4 ANALISI DINAMICA SU 2 STRUTTURE LATO CALABRIA.....	12
4.1 Brevi cenni sul funzionamento del programma di calcolo impiegato (Plaxis).....	12
4.2 Parametri/condizioni aggiuntive per l'esecuzione di analisi dinamiche.....	14
4.3 Estensione del modello in direzione orizzontale e contorni viscosi lungo i bordi verticali	15
4.4 Carichi e spostamenti variabili nel tempo.....	16
4.5 Discretizzazione del modello in strati orizzontali	17
4.6 Definizione delle proprietà dei materiali	19
4.7 Modello di calcolo e parametri adottati.....	21
4.8 Accelerogrammi.....	23
4.9 Sintesi dei risultati SPALLA ALTA – VIADOTTO DI ACCESSO.....	25
4.10 Sintesi dei risultati SPALLA BASSA – VIADOTTO ZAGARELLA 1	25

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

PREMESSA

La presente nota tecnica si riferisce ai viadotti lato Calabria aventi fondazione diretta e comportamento deformabile.

In particolare il presente documento, argomenta la scelta di applicare la riduzione dell'azione sismica (come da paragrafo 7.11.6.2.1 del DM 14-01-2008) mediante l'applicazione di $\beta_m=0,35$ per i seguenti viadotti:

- ZAGARELLA 1
- POLISTENA
- VIADOTTO ACCESSO RAMO AB
- VIADOTTO ACCESSO RAMO CD
- VIADOTTO ACCESSO FS
- CAMPANELLA
- IMMACOLATA

Per ZAGARELLA 2, SOLARO e SAN GIOVANNI ROSSO, si è applicato invece il valore di $\beta_m=1,00$ (non si è ridotta l'azione sismica) in quanto:

- ZAGARELLA 2 = opera su pali, a causa della presenza di lenti coesive rilevate dai sondaggi in zona
- SOLARO = opera su pali, a causa delle ridotte dimensioni dei plinti di fondazione in relazione alle interferenze coi manufatti esistenti presenti in zona; in particolare si sono rilevate:
 - interferenza con la vasca di raccolta acque dell'A3 esistente di dimensioni circa 30x7 mq in pianta
 - presenza dei plinti dei viadotti esistenti dell'A3 a una distanza di circa 11 m da asse impalcato di progetto
- SAN GIOVANNI ROSSO = opera su fondazione diretta, ma con spalla bassa a comportamento poco deformabile

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

1 INTERPRETAZIONE DELLA NORMATIVA D.M.2008

La normativa tecnica DM2008, affronta lo studio delle Spalle da ponte soggette ad azione sismica nel capitolo 7.9.5.6.

All'interno del capitolo vengono distinti i due comportamenti, in funzione che il collegamento con l'impalcato sia di tipo fisso o di tipo mobile.

Con particolare riferimento al capitolo 7.9.5.6.2 (spalle da ponte con appoggio fisso), viene dichiarato che *“nel senso longitudinale il modello deve comprendere la deformabilità del terreno retrostante e quella delle fondazione. L'analisi deve essere condotta adottando un fattore di struttura pari a $q=1,5$. Nel caso in cui la spalla sostenga un terreno rigido naturale per più dell'80% dell'altezza, si può considerare che si muova col suolo. In questo caso si deve considerare $q=1$ e le forze d'inerzia possono essere determinate considerando ag_S .”*

Si rileva immediatamente una non chiarezza normativa, in quanto non viene dichiarato il riferimento per le analisi geotecniche, nè il modello da adottare (se considerare o meno il terreno inglobato a tergo, o che percentuale si mobilità).

La frase inserita *“nel senso longitudinale il modello deve comprendere la deformabilità del terreno retrostante e quella delle fondazione”* implica quindi uno studio di interazione terreno-struttura, modellando l'effettiva deformabilità del terreno (capacità dissipativa intrinseca) durante l'azione sismica.

Per colmare tale carenza normativa, si è studiato il comportamento statico della spalla da ponte su fondazione diretta. Il comportamento è assimilabile (da un punto di vista geotecnico) a un muro di sostegno, in quanto può subire spostamenti roto-traslazioni e quindi innescare la capacità “dissipativa” propria del terreno sostenuto.

Facendo riferimento al capitolo 7.11.6 del DM2008, la tipologia di comportamento da indagare è conforme a quanto indicato al capitolo 7.9.5.6.2, ma più dettagliata e più argomentata. Di fatti si indica che *“è necessario portare in conto i seguenti aspetti:*

- *effetti inerziali nel terreno, nelle strutture di sostegno e negli eventuali carichi aggiunti presenti*
- *comportamento anelastico e non lineare del terreno*
- *effetto delle pressioni interstiziali, se presenti*
- *condizioni di drenaggio*
- *influenza degli spostamenti dell'opera sulla mobilitazione delle condizioni di equilibrio*

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

limite"

Nello stesso capitolo è poi consentito l'utilizzo di metodi pseudo-statici, facendo ricorso in via semplificata a metodi dell'equilibrio limite.

La formulazione da utilizzare è la nota espressione per cui:

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{\max}}{g} \qquad k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

dove

a_{\max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità;

β = parametro riduttivo dell'azione sismica in accordo con il §7.11.6.2.1

Il comportamento fondamentale da indagare per stabilire se è possibile adottare una riduzione dell'azione sismica è quindi la deformabilità della struttura, la quale permette l'attivarsi della mobilitazione delle condizioni di equilibrio limite.

Lo studio del comportamento deformativo della spalla è stato quindi condotto mediante un modello spaziale agli EF in cui sono state modellate le parti strutturali con elementi a lastra, l'interazione col terreno di fondazione con elementi "molla" e le azioni derivanti dal terreno a tergo e dall'impalcato applicate staticamente.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

2 MODELLO AGLI EF – ANALISI STATICA LINEARE

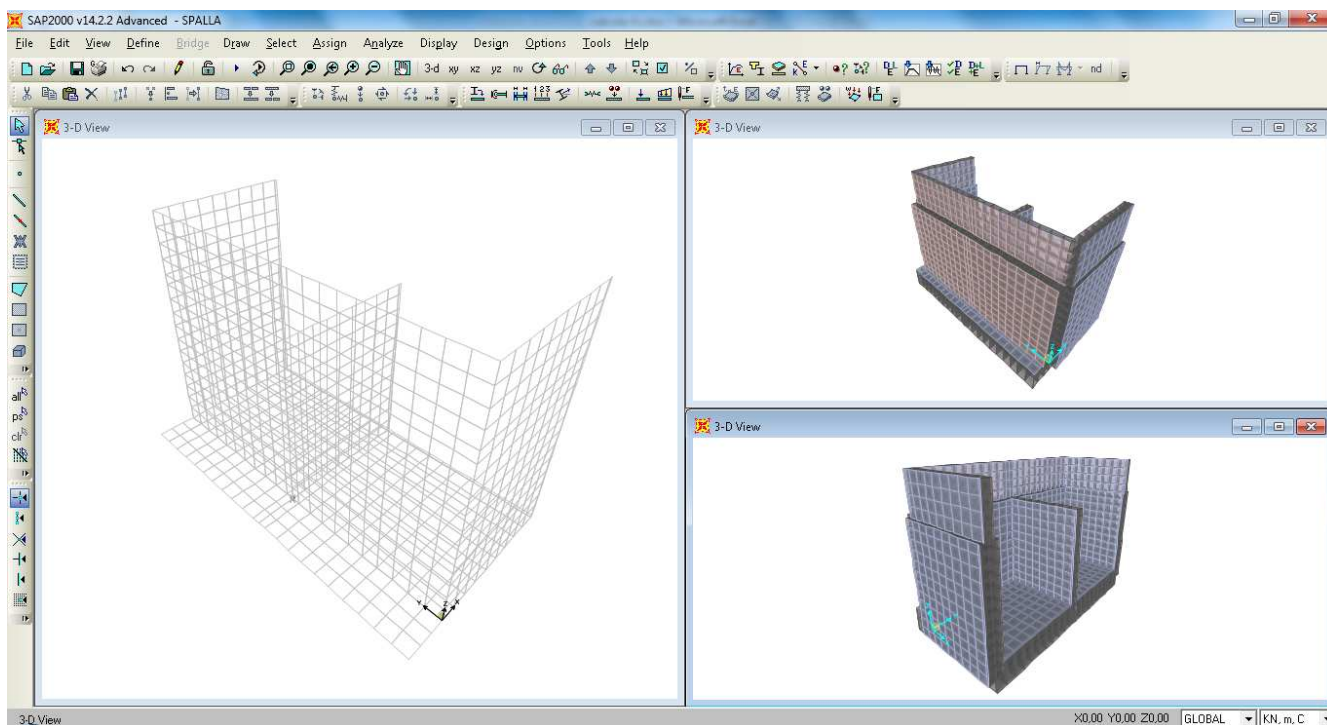
E' un modello agli elementi finiti (EF) dove le singole componenti strutturali sono state modellate mediante elementi di tipo "Area" (shell tick element) con modellazione del comportamento bidimensionale alla Mindlin, includendo quindi anche le deformazioni taglianti degli elementi.

Di seguito si riportano le caratteristiche dei materiali e delle sezioni implementati nel modello.

TABLE: Material Properties 02 - Basic Mechanical Properties						
Material	UnitWeight	UnitMass	E1	G12	U12	A1
Text	KN/m3	KN-s2/m4	KN/m2	KN/m2	Unitless	1/C
C28/35	25	2,5	33923000	14134583,33	0,2	0,0000099
C32/40	25	2,5	35013000	14588750	0,2	0,0000099

TABLE: Area Section Properties							
Section	Material	MatAngle	AreaType	Type	DrillDOF	Thickness	BendThick
Text	Text	Degrees	Text	Text	Yes/No	m	m
sp100	C32/40	0	Shell	Shell-Thick	Yes	1	1
sp150	C32/40	0	Shell	Shell-Thick	Yes	1,5	1,5
sp230	C32/40	0	Shell	Shell-Thick	Yes	2,3	2,3
sp250	C28/35	0	Shell	Shell-Thick	Yes	2,5	2,5
sp50	C32/40	0	Shell	Shell-Thick	Yes	0,5	0,5
sp80	C32/40	0	Shell	Shell-Thick	Yes	0,8	0,8

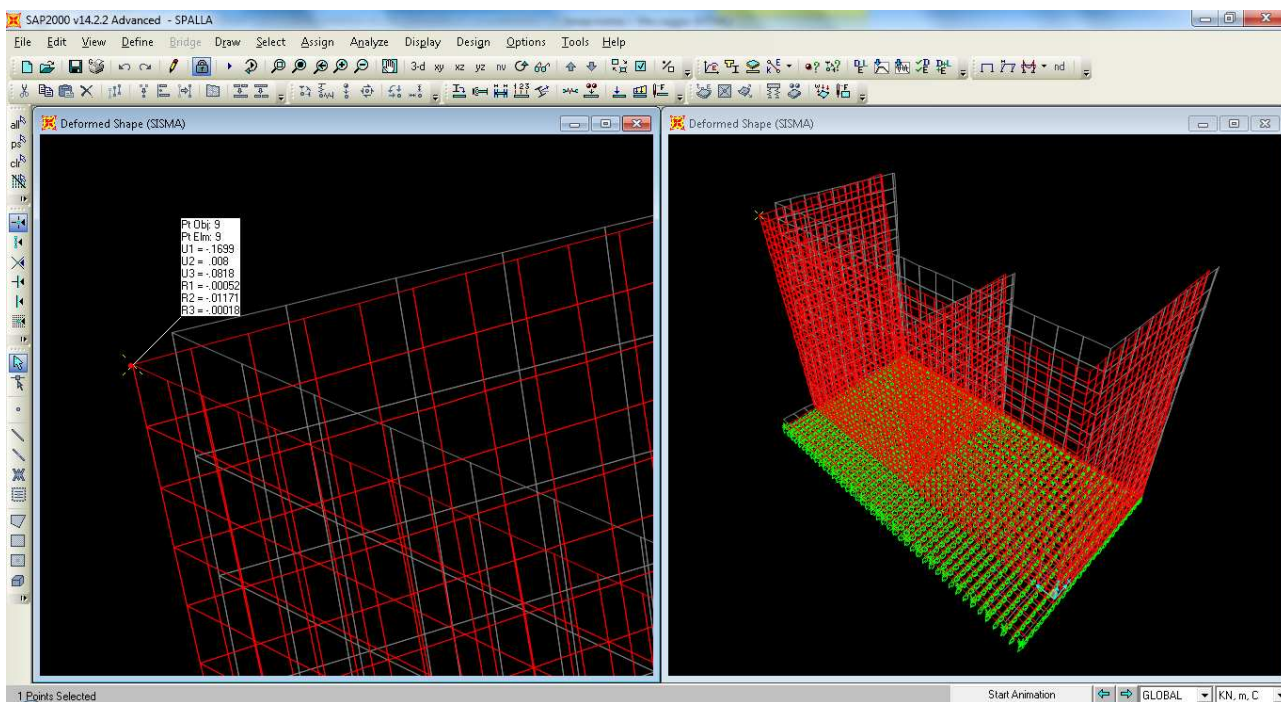
		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



L'interazione col terreno al di sotto della platea di fondazione è stata modellata mediante elementi di connessione (link element) con comportamento elastico non lineare (dove la non linearità è dettata dal fatto che l'elemento link reagisce solo a compressione).

Applicando le azioni agenti sulla spalla (peso proprio, permanenti portati, spinte, ...) si sono quindi valutate le massime deformazioni in testa. A favore di sicurezza di è modellato il terreno antistante la fondazione come rigido e pertanto l'unica deformazione possibile del complesso terreno-struttura è quello rotazionale.

Come illustrato nella figura sottostante i massimi spostamenti registrati sono di circa 17 cm.



Il valore ottenuto dimostra quindi che la struttura rientra fra le tipologie “deformabili” e che pertanto ammettono una riduzione dell’azione sismica.

Facendo riferimento a UNI EN 1998-5:2005, al paragrafo 7.3.2, vengono indicate le strutture deformabili come quelle che possono subire uno spostamento superiore a $300 \cdot a_g \cdot S$, dove per la zona sismica in esame ($a_g=0,44g$) equivale a 135 mm.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

3 ANALISI DINAMICHE SPALLA VIADOTTO PANTANO

Parallelamente alle calcolazioni effettuate lato Calabria, è stata condotta indipendentemente l'analisi dinamica della spalla del viadotto Pantano (essendo un'opera di maggior importanza).

Le risultanze ottenute hanno confermato quanto precedentemente descritto.

Riporto nel seguito un breve estratto delle analisi svolte.

Il calcolo è stato condotto con il programma PLAXIS; è un codice di calcolo agli elementi finiti utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche. Il programma permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (*plane strain*) o a condizioni assialsimmetriche (*axisymmetric*). Per le potenzialità e le caratteristiche del programma si rimanda al "*Plaxis Reference Manual v.9 (2008)*". Nelle analisi eseguite per step di accuratezza crescente il terreno è stato assimilato dapprima ad un mezzo lineare elastico e poi ad un mezzo elasto-plastico con incrudimento isotropo regolato dalle deformazioni volumetriche e deviatoriche plastiche (modello "*Hardening Soil HS*").

Il comportamento meccanico del terreno può essere modellato con diversi gradi di accuratezza. La legge di Hooke per il modello elastico isotropo lineare, per esempio, può essere pensato come la più semplice relazione sforzi-deformazioni possibile. Essa tiene conto di solo due parametri, il modulo di Young (E) ed il coefficiente di Poisson (ν) e dunque può risultare poco efficace a catturare le caratteristiche essenziali del comportamento meccanico del terreno.

Le principali caratteristiche del modello costitutivo Hardening Soil sono le seguenti:

- una differente rigidità per percorsi tensionali di primo carico e di scarico-ricarico;
- sviluppo di deformazioni plastiche per stati tensionali deviatorici (con legge di flusso non associata) e sferici (con legge di flusso associata);
- criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb;
- il modulo di rigidità secante E_{50} per percorsi tensionali di primo carico è funzione della tensione di confinamento applicata:

$$E_{50} = E_{50ref} \left[\frac{(c' \cdot \cos \varphi' - \sigma'_{min} \cdot \sin \varphi')}{(c' \cdot \cos \varphi' - p_{ref} \cdot \sin \varphi')} \right]^m$$

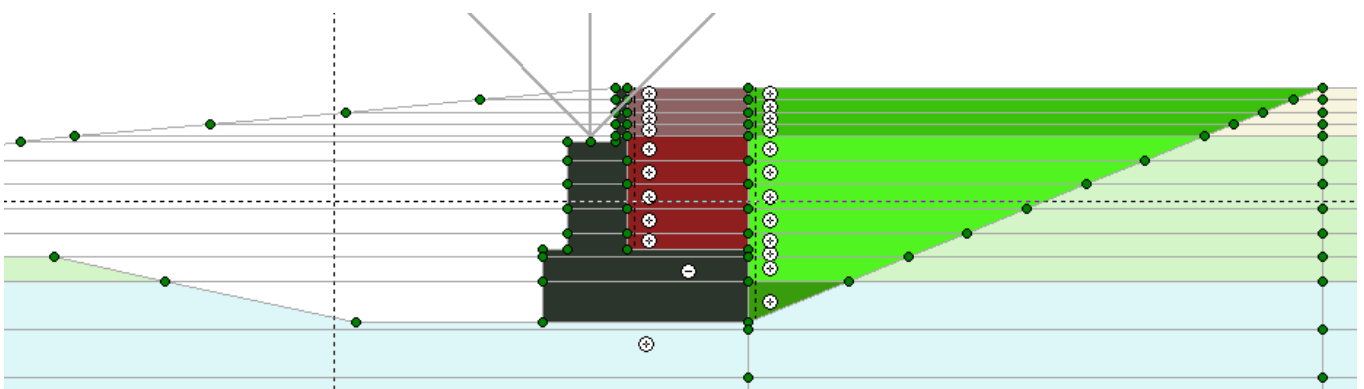
dove $p_{ref} = 100$ kPa è la pressione di riferimento, σ'_{min} è la tensione efficace principale minore, E_{50ref} è il modulo di rigidità secante alla pressione di riferimento ($\sigma'_{min} = p_{ref}$), m è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidità dallo stato tensionale e E_{50} è il modulo di rigidità secante (al 50% della rottura) riferito alla tensione σ'_{min} .

- il modulo di rigidità E_{ur} per percorsi tensionali di scarico-ricarico funzione della tensione di confinamento applicata:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$$E_{ur} = E_{urref} \left[\frac{(c' \cdot \cos \varphi' - \sigma'_{\min} \cdot \sin \varphi')}{(c' \cdot \cos \varphi' - p_{ref} \cdot \sin \varphi')} \right]^m ; E_{ur} = E_{urref} \cdot k_{-1}$$

dove $p_{ref} = 100$ kPa è la pressione di riferimento, σ'_{\min} è la tensione efficace principale minore, E_{urref} è il modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento ($\sigma'_{\min} = p_{ref}$), m è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidezza dallo stato tensionale e E_{ur} è il modulo di rigidezza secante alla tensione σ'_{\min} ;



Le analisi agli elementi finiti eseguite con Plaxis hanno fornito le seguenti spinte orizzontali:

$S_{sup\ ideale} = 1622.00$ kN/m (spinta sismica complessiva)

3.1 Confronto tra analisi dinamica non lineare e analisi statica lineare

Si è operato poi un confronto tra l'analisi statica e l'analisi dinamica per valutare effettivamente quanto potesse contribuire la deformabilità della struttura.

Analizzando la stessa struttura oggetto dell'analisi dinamica, con un'analisi di tipo statica lineare (considerando l'incremento di azione sismica secondo Mononobe\Okabe) e considerando nulla la riduzione delle azioni sismiche ($\beta=1.00$) si sono ottenute le seguenti azioni:

- $S_{sup\ ideale} = 2367.00$ kN/m (spinta sismica del terreno a tergo della superficie ideale)
- $S_{inerzia\ riempimento} = 956.00$ kN/m;
- $S_{inerzia\ muro} = 1509.00$ kN/m;
- $S_{tot} = 4832.00$ kN/m.

E' immediato verificare che il coefficiente di riduzione dell'azione sismica vale $1622.00/4832.00 = 0.336$.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4 ANALISI DINAMICA SU 2 STRUTTURE LATO CALABRIA

A valle delle analisi svolte, si è operata un'analisi dinamica non lineare (simile a quanto fatto per il viadotto Pantano) sulla spalla più alta (viadotto di accesso altezza circa 15 m) e sulla spalla più bassa (viadotto zagarella 1 altezza circa 10 m) delle opere lato Calabria.

4.1 Brevi cenni sul funzionamento del programma di calcolo impiegato (Plaxis)

PLAXIS è un codice di calcolo agli elementi finiti utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche. Il programma permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (**plane strain**) o a condizioni assialsimmetriche (**axisymmetric**).

Questo codice di calcolo e i modelli in esso utilizzati, sono stati sviluppati con estrema cura. Tuttavia l'accuratezza ottenuta è correlata all'esperienza dell'utente riguardo, la modellazione del problema, la conoscenza dei modelli del terreno e dei loro limiti, la selezione dei parametri del modello e l'abilità nel giudicare la attendibilità dei risultati del calcolo. Per effettuare un'analisi agli elementi finiti attraverso PLAXIS, l'utente deve creare un modello agli elementi finiti, specificare le proprietà dei materiali ed imporre le condizioni al contorno.

Ciò viene fatto nel programma **Input** il quale contiene tutti gli strumenti per creare e modificare un modello geometrico, per generare la corrispondente mesh agli elementi finiti e per generare le condizioni iniziali. Inizialmente è necessario inserire il nome e la descrizione del progetto, il tipo di modello e il numero di elementi finiti, i dati sull'accelerazione, le unità fondamentali di lunghezza, forza e tempo ed impostare le dimensioni dell'area di disegno. La generazione di un modello agli elementi finiti comincia con la creazione di un modello geometrico che è la rappresentazione del problema da studiare.

Un modello geometrico si compone di punti, linee e clusters. Oltre a questi componenti di base si possono assegnare al modello geometrico oggetti strutturali o condizioni speciali in modo da simulare rivestimenti di galleria, setti, piastre, interazioni terreno-struttura o sollecitazioni. Dopo aver creato i componenti geometrici del modello l'utente può introdurre carichi distribuiti, carichi lineari o carichi concentrati e spostamenti imposti applicati ai contorni del modello così come al suo interno. L'utente poi è chiamato a definire le caratteristiche dei materiali ed assegnare i set di parametri alle corrispondenti componenti geometriche. In particolare occorre definire il modello

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

costitutivo del terreno, il tipo di comportamento del terreno (drenato o non drenato), le proprietà generali del terreno come il peso dell'unità di volume e la permeabilità, i parametri di rigidità e resistenza del modello di terreno selezionato e quelli che mettono in relazione le proprietà dell'interfaccia con quelle del terreno.

Tutti i dati relativi ai materiali sono immagazzinati in un archivio dei materiali dal quale i materiali possono essere assegnati ai clusters di terreno o ai corrispondenti oggetti strutturali del modello geometrico. Quando il modello geometrico è completamente definito e le proprietà dei materiali sono state assegnate a tutti i clusters ed agli oggetti strutturali, la geometria deve essere divisa in elementi finiti (discretizzazione) prima di poter eseguire il calcolo. Un insieme di elementi finiti viene chiamato mesh. PLAXIS consente una generazione completamente automatica di mesh agli elementi finiti, basata su una robusta procedura di triangolazione, che da luogo a mesh "non strutturate" la cui prestazione numerica è di solito migliore rispetto alle mesh regolari ("strutturate"). L'utente può inoltre infittire globalmente o localmente la mesh in modo da ottimizzarne le prestazioni.

La parte finale della procedura di input comporta la definizione delle condizioni iniziali attraverso la generazione delle pressioni neutre e delle tensioni efficaci iniziali.

Le pressioni neutre e le pressioni idrauliche al contorno possono essere generate con riferimento ai livelli di falda o in base all'analisi del moto di filtrazione. Condizioni al contorno aggiuntive per le sovrappressioni neutre sono richieste per le analisi di consolidazione. Infatti per default, tutti i contorni della geometria sono "aperti", il che implica che l'acqua possa fluire attraverso i contorni ovvero sovrappressioni neutre nulle sul contorno. Su alcuni contorni questa condizione può non essere corretta come per esempio sui contorni verticali che rappresentano un asse di simmetria o se la base del modello geometrico è posizionata su uno strato impermeabile. In questi casi non vi è alcun flusso attraverso questi contorni.

In questi casi è possibile utilizzare lo strumento Closed consolidation boundary (contorno di consolidazione chiuso) per "chiudere" i contorni. Le tensioni iniziali possono essere generate utilizzando la procedura K0 (**K0 - procedure**) oppure utilizzando la procedura di generazione delle tensioni iniziali per incremento della gravità (**gravity loading**), disattivando rilevati o strutture, ed oggetti inizialmente non attivi (come carichi, piastre, geotessili, ancoraggi, interfacce o cluster di terreno al di sopra del piano di campagna iniziale). Dopo la generazione del modello agli elementi finiti, può essere eseguito l'effettivo calcolo agli elementi finiti ed è pertanto necessario definire quale tipo di calcolo debba essere effettuato e quali tipi di sollecitazioni o fasi di costruzione debbano essere attivati durante i calcoli; ciò viene fatto nel programma **Calculations**.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

PLAXIS consente di svolgere diversi tipi di calcolo agli elementi finiti distinguendo tra calcoli di tipo Plastico (**plastic**), Analisi di consolidazione (**consolidation**), Analisi di stabilità con il metodo della riduzione dei parametri di resistenza (**phi-c reduction**) e Analisi dinamiche (**dynamic**). Un calcolo di tipo plastico dovrà essere selezionato per eseguire un'analisi di deformazione elasto-plastica in cui non sia necessario prendere in considerazione la dissipazione delle sovrappressioni neutre nel tempo. Diversamente si dovrà selezionare un'analisi di consolidazione. Un'analisi di stabilità con il metodo della riduzione dei parametri di resistenza dovrà essere selezionata quando si desidera calcolare un fattore di sicurezza globale per il problema in studio.

Nella pratica ingegneristica, un progetto è suddiviso in fasi esecutive; analogamente, un processo di calcolo in PLAXIS è anch'esso suddiviso in fasi di calcolo. Esempi di fasi di calcolo sono l'attivazione di un particolare carico, la simulazione di uno stadio della costruzione, l'introduzione di un periodo di consolidazione, il calcolo del fattore di sicurezza, ecc..

Ogni fase di calcolo è suddivisa in un numero di step (passi) di calcolo; ciò è necessario in quanto il comportamento non lineare del terreno richiede che le sollecitazioni vengano applicate per incrementi successivi (chiamati step di carico). In PLAXIS, procedure robuste ed automatiche sono dedicate alla suddivisione in adeguati step di carico.

Ogni fase di calcolo dovrà essere definita indicando il tipo di calcolo e la fase di partenza, il numero di step di calcolo, i parametri di controllo delle procedure iterative, la modalità di carico. A questo punto può essere avviato il processo di calcolo e tutte le fasi definite saranno eseguite in successione purché non si verifichi la rottura del terreno. Durante un'analisi di deformazione, le informazioni sul processo d'iterazione vengono mostrate in una finestra separata. Esse comprendono i valori correnti dei moltiplicatori di carico totali e tutta una serie di parametri caratteristici del processo iterativo che consentono un rapido controllo sull'evoluzione della procedura di calcolo.

4.2 Parametri/condizioni aggiuntive per l'esecuzione di analisi dinamiche

L'utilizzo del codice per l'esecuzione di analisi dinamiche richiede che vengano definiti una serie di parametri/condizioni aggiuntive rispetto a quelle necessarie per le analisi statiche. In particolare in fase di definizione del modello agli elementi finiti con il sottoprogramma Input, occorre prestare particolare attenzione a:

1. estensione del modello in direzione orizzontale e contorni viscosi lungo i bordi verticali;
2. carichi e spostamenti variabili nel tempo;
3. suddivisione del modello in strati orizzontali;

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4. definizione delle proprietà dei materiali con particolare attenzione ai parametri che controllano lo smorzamento viscoso alla Rayleigh ed alla rigidità a taglio del materiale;

5. definizione del reticolo di elementi finiti;

In fase di calcolo con il sottoprogramma **Calculation** occorre prestare particolare attenzione a:

6. valori da attribuire al numero di additional steps e dynamic substeps;

7. definizione ed attivazione del carico dinamico;

4.3 Estensione del modello in direzione orizzontale e contorni viscosi lungo i bordi verticali

I contorni verticali del modello devono essere posizionati sufficientemente lontani dalla regione di interesse, al fine di evitare il disturbo dovuto alla riflessione delle onde incidenti. Infatti l'analisi di risposta sismica locale di un deposito di terreno è in genere eseguita considerando il deposito orizzontale ed uniforme, infinitamente esteso in direzione orizzontale, poggiante su un basamento roccioso orizzontale (bedrock) e investito da onde sismiche che si propagano verticalmente (condizioni monodimensionali). La condizione di estensione infinita, equivale ad assumere che le onde che si propagano dal bedrock verso la superficie, non subiscano alcuna riflessione ai bordi.

La condizione di allontanamento dei bordi verticali dalla regione di interesse in PLAXIS, non è però da sola sufficiente a garantire l'assenza di perturbazioni della soluzione numerica ottenuta.

Occorre applicare ai bordi del modello dei contorni viscosi (**absorbent boundaries**) alla **Lysmer e Kuhlmeyer (1969)** la cui funzione è quella di assorbire parte dell'energia posseduta dalle onde incidenti.

Le componenti normali e di taglio assorbite mediante smorzatori in direzione orizzontale sono pari a:

$$\sigma_n = -C_1 \cdot \rho \cdot V_P \cdot \dot{u}_x \qquad \tau = -C_2 \cdot \rho \cdot V_S \cdot \dot{u}_y$$

ove ρ è la densità del materiale, V_P e V_S rispettivamente velocità delle onde di pressione e di taglio, C_1 e C_2 coefficienti che controllano l'effetto dei contorni assorbenti, u_x e u_y componente orizzontale e verticale della velocità nel generico nodo appartenente al contorno assorbente. I valori da attribuire a C_1 e C_2 sono quelli Standard ossia $C_1=1$ e $C_2=0.25$.

Per quanto riguarda l'estensione del modello in direzione orizzontale, le analisi parametriche svolte con diverse larghezze del modello e con smorzatori viscosi (valori di C_1 e C_2 standard), rivelano che la soluzione ottenuta nel dominio di interesse non risente della riflessione delle onde ai bordi,

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

assumendo una larghezza L del modello pari ad otto volte l'altezza H.

Per quanto concerne gli smorzatori viscosi in PLAXIS sono disponibili due opzioni:

- **Standard Absorbent Boundaries** per vibrazioni prodotte da una singola sorgente (ad esempio la battitura di un palo). Questa opzione genera contorni assorbenti sul bordo verticale sinistro e su quello destro ed in corrispondenza della base per condizioni di deformazione piana (plane strain), mentre per modelli assialsimmetrici i contorni assorbenti sono posizionati sul bordo destro e in corrispondenza della base del modello;
- **Standard Earthquake Boundaries** nel caso di un terremoto. Questa opzione genera contorni assorbenti sul bordo verticale sinistro e su quello destro del modello e impone uno spostamento alla base del modello con $u_x = 0.01$ m e $u_y = 0.01$ m.

Occorre far notare che oltre alle prescritte condizioni al contorno per l'analisi dinamica occorre definire anche le condizioni di vincolo ai bordi. Selezionando **Standard fixities** dal sottomenu Loads si impongono al modello un insieme di condizioni al contorno generali; in particolare, i bordi verticali ricevono il vincolo alla traslazione orizzontale ($u_x = 0$) mentre la base del modello riceve un vincolo totale ($u_x = 0$; $u_y = 0$).

4.4 Carichi e spostamenti variabili nel tempo

In PLAXIS un carico o spostamento dinamico è inserito nel modello come per il caso statico, cioè utilizzando carichi concentrati o distribuiti e/o spostamenti imposti. Questi carichi possono successivamente essere trasformati in dinamici, cioè in carichi e/o spostamenti variabili nel tempo, utilizzando l'opzione **Set dynamic load system** nel menù Load.

Occorre prestare molta attenzione al valore di input del carico e/o dello spostamento imposto: infatti in PLAXIS il carico/spostamento effettivamente applicato è dato dal prodotto del valore di input del carico/spostamento per il moltiplicatore del carico dinamico, Dynamic Load Multiplier, che è attivato in fase di calcolo e che definisce la variazione del corrispondente carico/spostamento con il tempo.

Carico/Spostamento applicato(t) = Valore di input x Moltiplicatore dinamico(t)

In pratica il valore di input funge da fattore di scala.

In PLAXIS il terremoto (**Earthquake**) è simulato attraverso uno spostamento imposto alla base del modello. Tale spostamento viene automaticamente generato dal programma, nel momento in cui si seleziona il comando **Standard Earthquake Boundaries**.

Occorre però prestare particolare attenzione perché il valore di input dello spostamento generato

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

in tal modo è pari a 0.01 m.

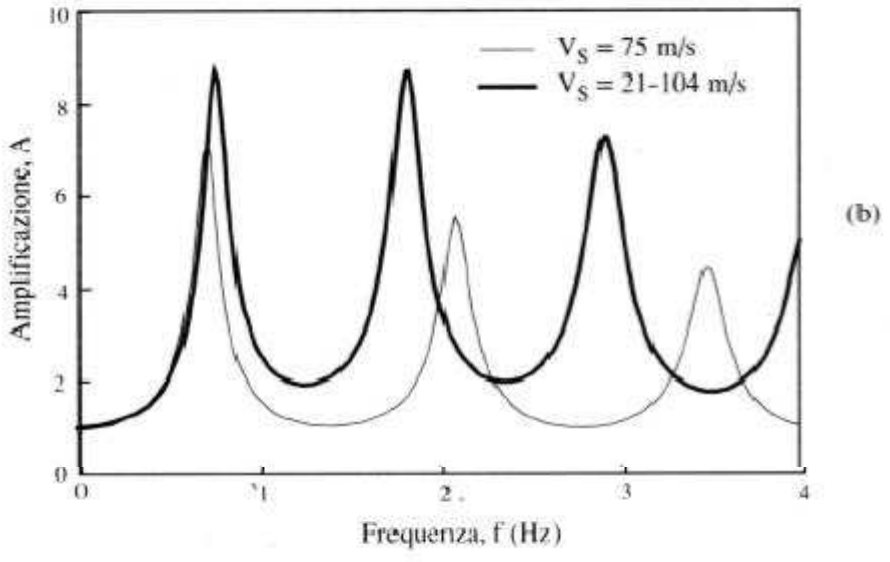
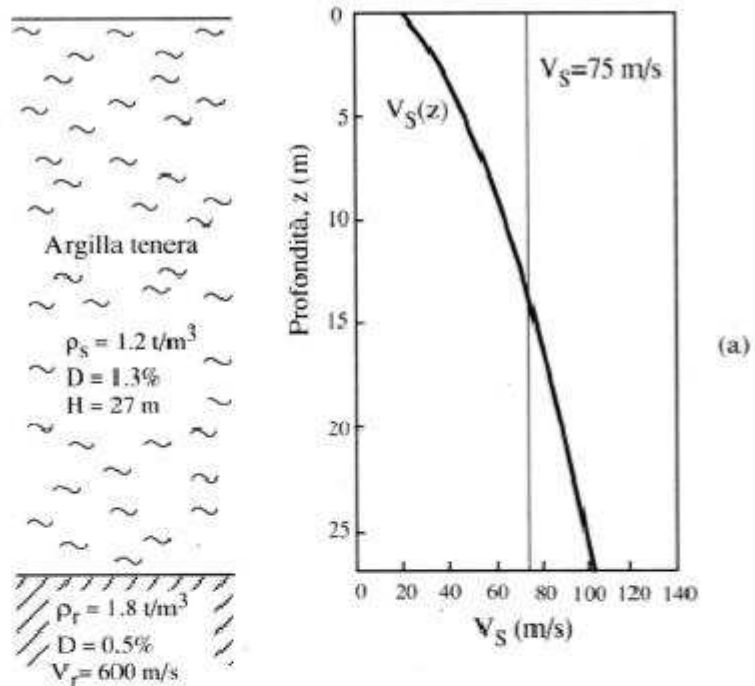
Pertanto se l'accelerogramma è definito in m/s^2 , è di fondamentale priorità, appena lo spostamento applicato è stato generato, scalare il valore di input da 0.01 m a 1 m. Se l'accelerogramma è definito in g è consigliabile trasformare le accelerazioni in m/s^2 , moltiplicando i valori dell'accelerazione per 9.81 m/s^2 per mezzo di foglio di calcolo elettronico, applicando poi tale storia di carico variabile nel tempo come moltiplicatore dello spostamento di input che dovrà essere pari a 1 m.

4.5 Discretizzazione del modello in strati orizzontali

Per garantire la massima affidabilità di un'analisi di risposta sismica locale è necessario tener conto delle inevitabili disomogeneità del terreno e quindi della variazione tra strato e strato dei parametri di rigidezza e smorzamento. Occorre osservare che, anche nell'ambito di un banco litologicamente omogeneo le caratteristiche di rigidezza e smorzamento sono variabili con la profondità poiché dipendono dallo stato tensionale alla generica profondità.

Nella figura seguente sono poste a confronto la funzione di amplificazione relativa al modello di terreno eterogeneo con quella relativa al modello di terreno omogeneo, con velocità delle onde di taglio costante in tutto lo strato e pari al valore medio. Il confronto mostra che l'effetto dell'eterogeneità sulla funzione di amplificazione si traduce in un avvicinamento delle frequenze fondamentali del deposito ed in un aumento dei picchi di amplificazione, rispetto al caso di sottosuolo omogeneo (Lanzo e Silvestri, 1999). Pertanto ridurre un sottosuolo ad uno strato di elevata potenza con proprietà di rigidezza variabili con la profondità, ad un banco omogeneo equivalente può significare sottostimare anche notevolmente i potenziali effetti di amplificazione del moto sismico (Lanzo e Silvestri, 1999).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
NOTA TECNICA VIADOTTI		Codice documento CS0288_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; text-align: center;">Rev</td> <td style="text-align: center;">Data</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	Rev	Data	F0	20/06/2011
Rev	Data						
F0	20/06/2011						



Caso di città del Messico: profili di velocità (a) e confronto tra funzioni di amplificazione (b) relative alle ipotesi di sottosuolo omogeneo ed eterogeneo. (Lanzo e Silvestri, 1999)

Per tener conto in PLAXIS della variazione della rigidezza e dello smorzamento con la profondità, occorre:

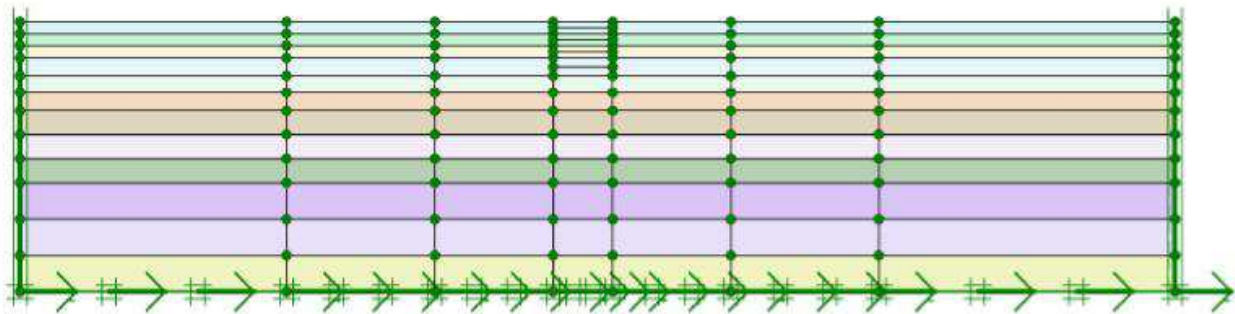
1. suddividere il modello in strati orizzontali di spessore in genere crescente dalla testa alla base

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

del modello;

2. attribuire ad ogni strato un valore costante della rigidità e dello smorzamento pari al valore medio che compete a quello strato;

Nella figura seguente è riportato un esempio di suddivisione del modello in strati orizzontali.



4.6 Definizione delle proprietà dei materiali

Particolare attenzione deve essere posta ai parametri che controllano lo smorzamento viscoso alla rayleigh ed alla rigidità a taglio del materiale

Le analisi dinamiche con il codice di calcolo PLAXIS richiedono parametri aggiuntivi rispetto alle analisi statiche in particolare quali dati di input occorre definire:

1. la velocità delle onde di compressione **VP** e di taglio **VS** o alternativamente il modulo di Young **E'** e il coefficiente di Poisson ν' o la rigidità a taglio **G** e il coefficiente di Poisson ν' .
2. lo smorzamento viscoso del materiale;

In PLAXIS lo smorzamento è assunto proporzionale alla massa ed alla rigidità del sistema attraverso la relazione:

$$[C] = \alpha_R[M] + \beta_R[K]$$

ove α_R e β_R sono i **coefficienti di Rayleigh** che controllano lo smorzamento viscoso. Essi possono essere determinati attraverso la seguente relazione:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_R \\ \beta_R \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_n + \omega_m} \begin{Bmatrix} \omega_n \omega_m \\ 1 \end{Bmatrix}$$

ove ξ (o alternativamente D) rappresenta il coefficiente di smorzamento, $\omega_n = 2\pi f_n$ (rad/s) e $2\omega_m = 2\pi f_m$ (rad/s) pulsazioni relative alle due frequenze di soglia f_n e f_m del campo di frequenze

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

prevalenti. Quest'ultimo è quel campo di frequenze per il quale si ha il più alto contenuto energetico.

In PLAXIS i valori della rigidezza e dello smorzamento vengono introdotti in Material data sets. Occorre prestare particolare attenzione ai valori da attribuire alla rigidezza ed allo smorzamento poiché essi devono essere appropriati al livello deformazione mobilitato in ogni substrato durante il sisma. I profili di rigidezza e smorzamento cui si fa riferimento dipendono dalla rigidezza e dallo smorzamento iniziale, dalla legge adottata per descriverne la variazione con il livello deformativo, dalla geometria del problema e, in modo non trascurabile, dalle caratteristiche dell'evento sismico (accelerazione di picco, contenuto in frequenza,...).

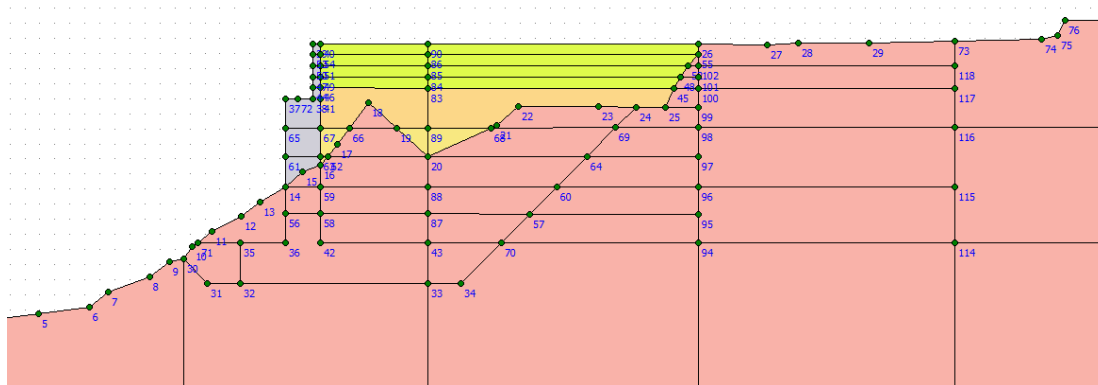
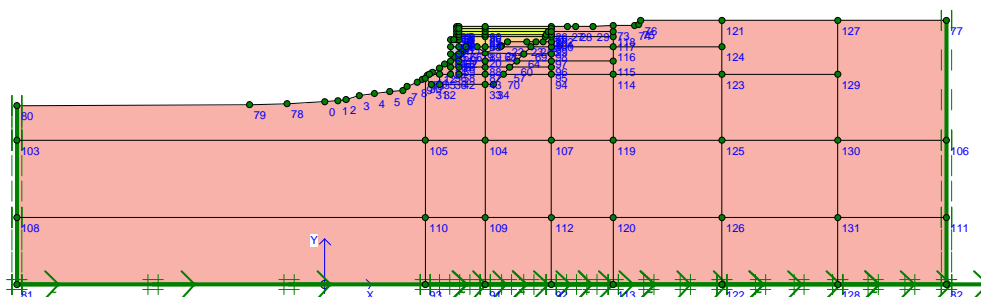
Allo scopo di selezionare adeguatamente il profilo di rigidezza e smorzamento da adottare nelle analisi visco-elastiche lineari o visco-elasto-plastiche agli elementi finiti, si propone di adottare la seguente strategia di calibrazione dei parametri dinamici:

- a) definire i profili di rigidezza e smorzamento iniziale, le curve di decadimento della rigidezza e dello smorzamento con la deformazione di taglio e l'accelerogramma di input ;
- b) eseguire una analisi di propagazione monodimensionale in condizioni di **free-field** con il codice di calcolo **EERA** nell'ipotesi di comportamento visco-elastico lineare equivalente;
- c) selezionare per ogni materiale ed , in particolare, per ogni substrato, un valore medio della rigidezza e dello smorzamento da utilizzare per le analisi dinamiche agli elementi finiti, a partire dai profili di rigidezza a taglio e di smorzamento con la profondità ricavati dall'analisi **EERA**;
- d) valutare il campo di frequenze prevalenti per il quale si ha il più alto contenuto energetico;
- e) valutare per ogni substrato i coefficienti α_r e β_r dello smorzamento viscoso alla Rayleigh utilizzando la relazione precedente.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> <i>Data</i> F0 20/06/2011

4.7 Modello di calcolo e parametri adottati

Nella figure che seguono si riporta il modello di calcolo adottato (per il caso di spalla alta).



Di seguito si riportano i parametri dei terreni adottati nel calcolo:

Linear Elastic		3
Type		Spalla
γ_{unsat}	[kN/m ³]	Drained
γ_{sat}	[kN/m ³]	25,00
k_x	[m/day]	25,00
k_y	[m/day]	1,000
e_{init}	[-]	1,000
C_k	[-]	0,500
		1E15

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		Codice documento CS0288_F0	Rev F0	Data 20/06/2011

Linear Elastic		3
		Spalla
E_{ref}	[kN/m ²]	32000000,00
ν	[-]	0,200
G_{ref}	[kN/m ²]	13333333,333
E_{oed}	[kN/m ²]	35555555,556
E_{incr}	[kN/m ² /m]	0,00
y_{ref}	[m]	0,000
R_{inter}	[-]	1,000
Interface		Neutral
permeability		

Hardening Soil		1	2	4	5
		Plutoniti	Rilevato3	Rilevato2	Rilevato1
Type		Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	[kN/m ³]	21,00	19,00	19,00	19,00
γ_{sat}	[kN/m ³]	23,00	19,00	19,00	19,00
k_x	[m/day]	1,000	1,000	1,000	1,000
k_y	[m/day]	1,000	1,000	1,000	1,000
e_{init}	[-]	0,50	0,50	0,50	0,50
e_{min}	[-]	0,00	0,00	0,00	0,00
e_{max}	[-]	999,00	999,00	999,00	999,00
C_k	[-]	1E15	1E15	1E15	1E15
E_{50}^{ref}	[kN/m ²]	150000,00	6340,00	5280,00	4530,00
E_{oed}^{ref}	[kN/m ²]	150000,00	6340,00	5280,00	4530,00
power (m)	[-]	0,20	0,20	0,20	0,20
C_{ref}	[kN/m ²]	1,00	1,00	1,00	1,00
ϕ	[°]	32,00	32,00	32,00	32,00
ψ	[°]	1,00	1,00	1,00	1,00
E_{ur}^{ref}	[kN/m ²]	300000,00	126000,00	105600,00	90600,00
$\nu_{ur}^{(nu)}$	[-]	0,200	0,200	0,200	0,200
p^{ref}	[kN/m ²]	100,00	100,00	100,00	100,00
$C_{increment}$	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00

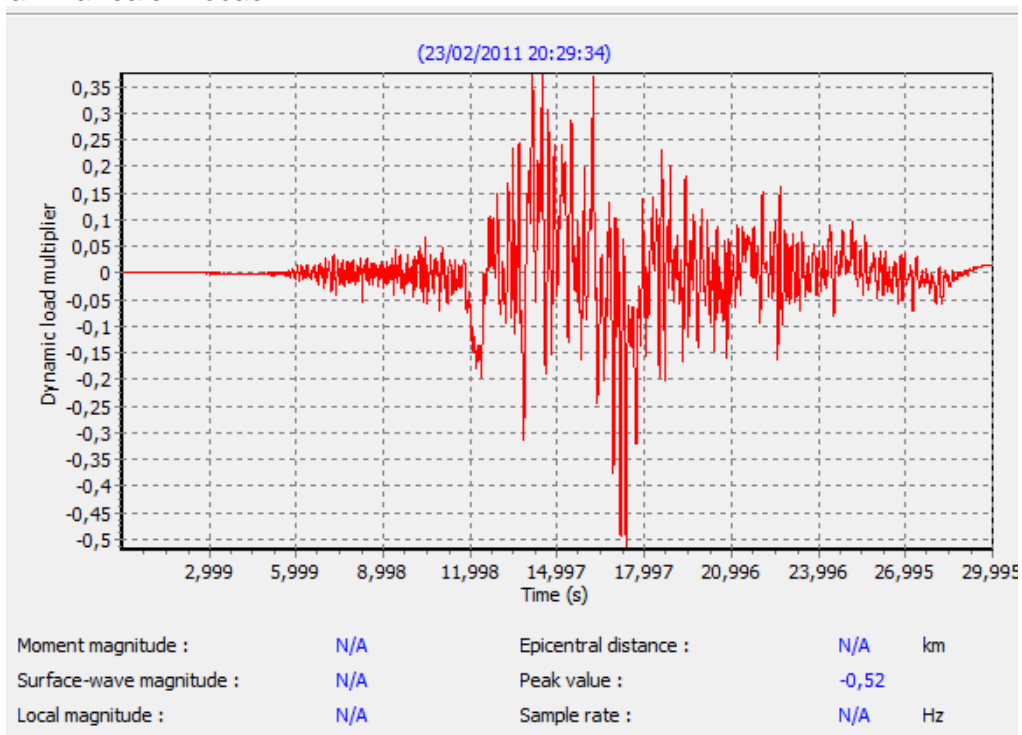
		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
		NOTA TECNICA VIADOTTI	<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0

Hardening Soil		1	2	4	5
		Plutoniti	Rilevato3	Rilevato2	Rilevato1
y_{ref}	[m]	0,00	0,00	0,00	0,00
R_f	[-]	0,90	0,90	0,90	0,90
$T_{str.}$	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00
R_{inter}	[-]	1,00	1,00	1,00	1,00
δ_{inter}	[m]	0,00	0,00	0,00	0,00
Interface permeability		Neutral	Neutral	Neutral	Neutral

4.8 Accelerogrammi

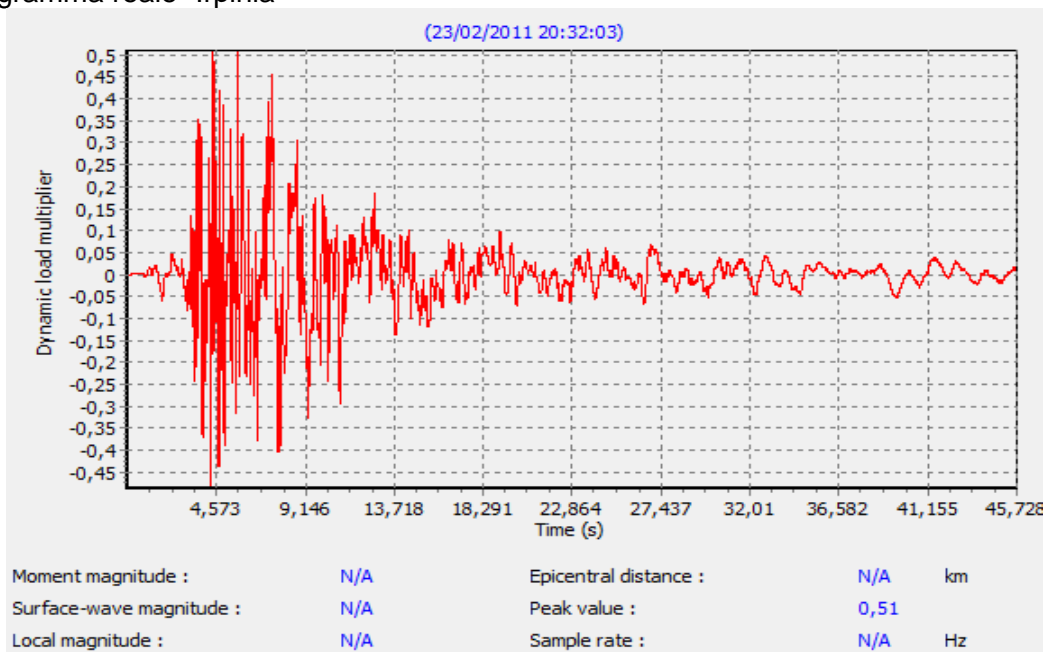
Il calcolo è stato condotto con riferimento a 3 accelerogrammi reali, ovvero:

Accelerogramma reale "Kocaeli"

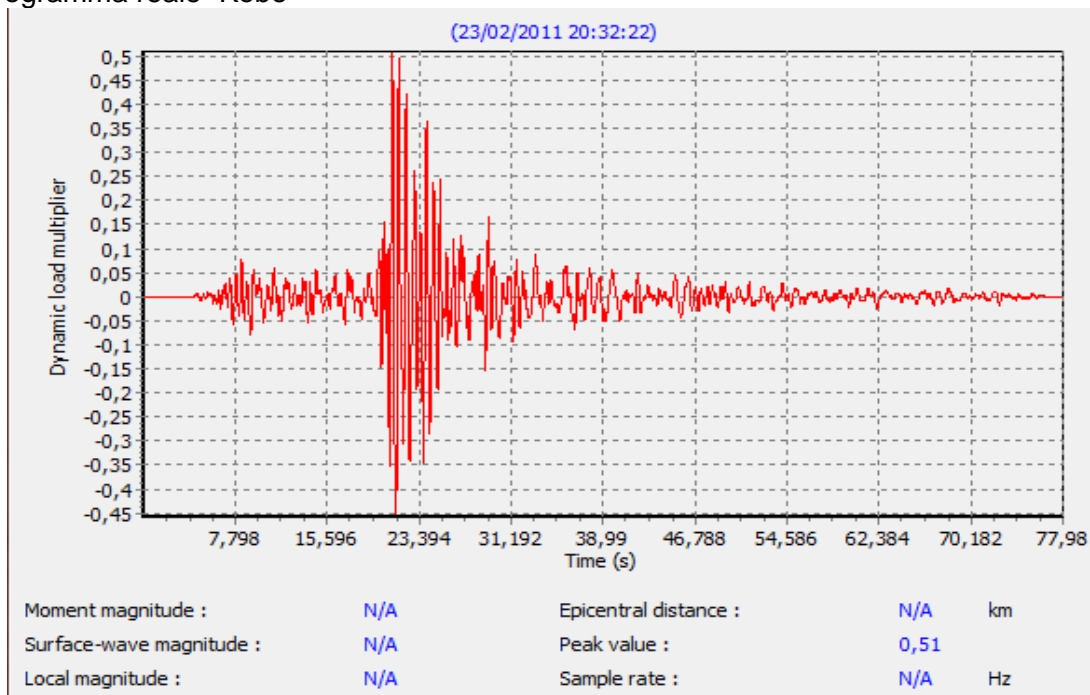


		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Accelerogramma reale "Irpinia"



Accelerogramma reale "Kobe"



Gli step di calcolo dinamico sono stati definiti con intervalli di 5 secondi.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
NOTA TECNICA VIADOTTI		<i>Codice documento</i> CS0288_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4.9 Sintesi dei risultati SPALLA ALTA – VIADOTTO DI ACCESSO

Si riporta di seguito la sintesi dei risultati ottenuti con l'accelerogramma "Kocaeli", in termini di spinta a tergo dell'opera e di spostamenti testa muro:

Kocaeli T=25sec

24559,3 kN Risultante alla base

5,75E-02 m Spostamento orizzontale testa muro

A tali valori deve essere aggiunto il carico sismico derivante dalla massa d'impalcato pari a 5822 kN. Si ottiene quindi un taglio massimo alla base di circa 30300 kN.

Facendo riferimento all'analisi statica equivalente condotta in relazione CG0700PCLDCSC00VIA1000001C-01 con un b pari a 0.35, il taglio massimo alla base in direzione longitudinale è pari a 42784 kN.

Come ci si aspettava, le analisi dinamiche riportano valori più bassi rispetto quanto condotto con le analisi statiche. In particolare l'analisi dinamica presenta un coefficiente equivalente beta pari a 0,25.

4.10 Sintesi dei risultati SPALLA BASSA – VIADOTTO ZAGARELLA 1

Si riporta di seguito la sintesi dei risultati ottenuti con l'accelerogramma "Kocaeli", in termini di spinta a tergo dell'opera e di spostamenti testa muro:

Kocaeli T=20sec

10073,49 kN Risultante alla base

8,0E-04 m Spostamento orizzontale testa muro

A tali valori deve essere aggiunto il carico sismico derivante dalla massa d'impalcato pari a 4568 kN. Si ottiene quindi un taglio massimo alla base di circa 14642 kN.

Facendo riferimento all'analisi statica equivalente condotta in relazione CG0700PCLDCSC00VIC3000001C-01 con un b pari a 0.35, il taglio massimo alla base in direzione longitudinale è pari a 17325 kN.

Come ci si aspettava, le analisi dinamiche riportano valori più bassi rispetto quanto condotto con le analisi statiche. In particolare l'analisi dinamica presenta un coefficiente equivalente beta pari a 0,30.