

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

Nuova linea Ferrandina - Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale

MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA

Relazione di calcolo

Vulnerabilità VI14-VI15

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

I A 6 F 0 3 D 0 9 C L V I 1 4 0 0 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	I. Lardani	Luglio 2019	S.Di Spigno 	Luglio 2019	F.Gernone 	Luglio 2019	A. Vittozzi

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
N° A20783

File: IA6F03D09CLV11400001A_Vulnerabilità_VI_14-15.docx

n. Elab.:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

INDICE

1.	INTRODUZIONE	4
2.	RIFERIMENTI NORMATIVI	6
3.	MATERIALI	7
4.	DESCRIZIONE DELL'OPERA	8
4.1	Descrizione delle carpenterie e delle armature	10
5.	AZIONE SISMICA	11
5.1	Terreno C	13
5.2	Terreno E	17
6.	ANALISI DEI CARICHI	21
6.1	Carichi trasmessi dall'impalcato	21
6.2	Spinta del terreno	21
6.2.1	<i>Spinta statica del terreno</i>	21
6.2.2	<i>Spinta dovuta al sovraccarico accidentale e permanenti portati</i>	22
6.2.3	<i>Spinta sismica del terreno</i>	23
6.3	Forze inerziali dovute al sisma	25
6.4	Combinazione dei carichi	25
7.	RISULTATI DELLE ANALISI – VI 14	26
7.1	Sollecitazioni alla base del muro frontale	26
7.2	Sollecitazioni a quota intradosso fondazioni	29
8.	RISULTATI DELLE ANALISI – VI 15	30
8.1	Sollecitazioni alla base del muro frontale	30
8.2	Sollecitazioni a quota intradosso fondazioni	33
9.	VERIFICHE DI SICUREZZA – VI 14	34
9.1	Appoggi	34
9.1.1	<i>Verifica di resistenza degli appoggi</i>	34
9.1.2	<i>Perdita dell'appoggio</i>	35
9.2	Spalle – verifica strutture in elevazione	38
9.2.1	<i>Verifica dei meccanismi duttili</i>	38
9.2.2	<i>Verifica dei meccanismi fragili</i>	40
9.2.3	<i>Indice di rischio delle spalle</i>	41
10.	VERIFICHE DI SICUREZZA – VI 15	42

<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A	FOGLIO 3 di 50
-----------------------------	------------------	--------------	------------------	------------------------	-----------	-------------------

10.1	Appoggi.....	42
10.1.1	Verifica di resistenza degli appoggi	42
10.1.2	Perdita dell'appoggio.....	43
10.2	Spalle – verifica strutture in elevazione	46
10.2.1	Verifica dei meccanismi duttili.....	46
10.2.2	Verifica dei meccanismi fragili	48
10.2.3	Indice di rischio delle spalle.....	49
11.	CONCLUSIONI	50

Relazione di calcolo	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A	FOGLIO 4 di 50
----------------------	------------------	--------------	------------------	------------------------	-----------	-------------------

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è la definizione della vulnerabilità sismica dei viadotti VI14 al km 11+109 (ex10+947) e VI15 al km 14+237 (ex14+057), della linea Ferrandina Matera.

Le due opere si compongono di 1 singola campata da 17.9m con un impalcato di larghezza 7.4m e schema statico di travi poggiate.



Figura 1 – Vista dell'opera VI 14



Figura 2 – Vista dell'opera VI 15



Figura 3 – prospetto VI 14

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A



Figura 4 – prospetto VI 15

La risposta sismica dell'opera determina delle soggezioni alla sicurezza della linea ferroviaria. Pertanto il presente studio è volto a valutare l'entità di tali soggezioni.

Gli elementi/meccanismi presi a riferimento nello studio sono i seguenti:

- Collasso dei muri frontali delle spalle;
- Collasso degli apparecchi d'appoggio;
- Perdita d'appoggio delle travi.

Per ciascuno dei meccanismi indicati è stato valutato l'indice di rischio sismico nei vari stati limite di riferimento, espresso attraverso il rapporto tra l'accelerazione sismica al suolo di capacità (PGA_c) e quella di domanda (PGA_d):

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d}$$

In generale il valore minimo ottenuto tra tutti i meccanismi indagati è rappresentativo del grado di sicurezza sismica dell'opera.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

2. RIFERIMENTI NORMATIVI

- [1] D.M. 17 gennaio 2018 (G.U. 20 febbraio 2018 n. 42) - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».
- [2] RFI DTC SI PS MA IFS 001 C - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II – Sezione 2 – Ponti e Strutture
- [3] Circolare 21 Gennaio 2019 n. 7 C.S.LL.PP. (G.U. n. 35 del 11 febbraio 2019) - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- [4] Progetto DOC-Reluis 2005-2008 – linea 3: Valutazione e riduzione del rischio sismico di ponti esistenti – “linee guida e manuale applicativo per la valutazione della sicurezza sismica e il consolidamento dei ponti esistenti in c.a.” marzo 2009
- [5] EUROCODE 1998-1 Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
- [6] EUROCODE 1998-2 Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 2: Ponti

3. ELABORATI DI RIFERIMENTO

TITOLO ELABORATO	CODIFICA ELABORATO
relazione appoggi VI 15	19
relazioni di calcolo impalcati – I parte	R.T.2.1
relazioni di calcolo impalcati – II parte	R.T.2.2

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

4. MATERIALI

Non essendo disponibili prove specifiche sui materiali del viadotto in esame, ma essendo state fatte ampie campagne di indagini su altri viadotti della medesima linea, i cui esiti hanno confermato le proprietà dei materiali da costruzioni indicati negli elaborati di progetto, si è deciso nelle analisi di verifica sismica di impiegare i valori di resistenza indicati nei disegni e relazioni originali di progetto ridotti applicando il fattore di confidenza $FC=1.2$ (livello di conoscenza LC2).

Di seguito si riportano le caratteristiche dei materiali risultanti dal progetto ed i rispettivi valori delle resistenze impiegati nelle verifiche strutturali.

Pile/Spalle

- Materiali di progetto

Calcestruzzo

R_c

ρ_k 250 Kg/cm²

Acciaio

armature

Fe

B38k

- Resistenze di calcolo

Pile/Spalle	Meccanismi duttili	Meccanismi fragili
resistenza a compressione cls f_c (Mpa)	17.29	11.53
resistenza a trazione armatura f_y (Mpa)	312.5	271.7

5. DESCRIZIONE DELL'OPERA

Le due opere oggetto delle analisi sono viadotti ferroviari della linea ferroviaria Ferrandina-Matera, a binario singolo.

Entrambi i viadotti sono costituiti da una sola campata in c.a.p. in semplice appoggio, con le seguenti caratteristiche geometriche:

	VI 14	VI15	
obliquità	55	60	°
num travi	8	8	-
h travi	1.2	1.2	m
interasse travi	0.87	0.87	m
spessore soletta	0.25	0.25	m

luce netta	15.0	15.0	m
lunghezza travi	17.2	17.2	m
luce calcolo	16.0	16.0	m
L impalcato	17.9	17.9	m
B impalcato	7.4	7.4	m

Le spalle sono costituite da strutture scatolari in c.a., con fondazioni profonde su pali (9D1200).

<u>dimensioni spalle</u>	VI 14	VI15	
h spalle	8	7.5	m
sp muro frontale	1.7	1.7	m
sp muri andatori	1.0	1.0	m

L long fondazione	15.44	15.31	m
L trasv fondazione	7.9	8.25	m
sp plinto fondazione	2	2	m

Le travi d'impalcato poggiano su dispositivi in acciaio di tipo fisso su un allineamento e di tipo unidirezionale longitudinalmente sull'altro allineamento.

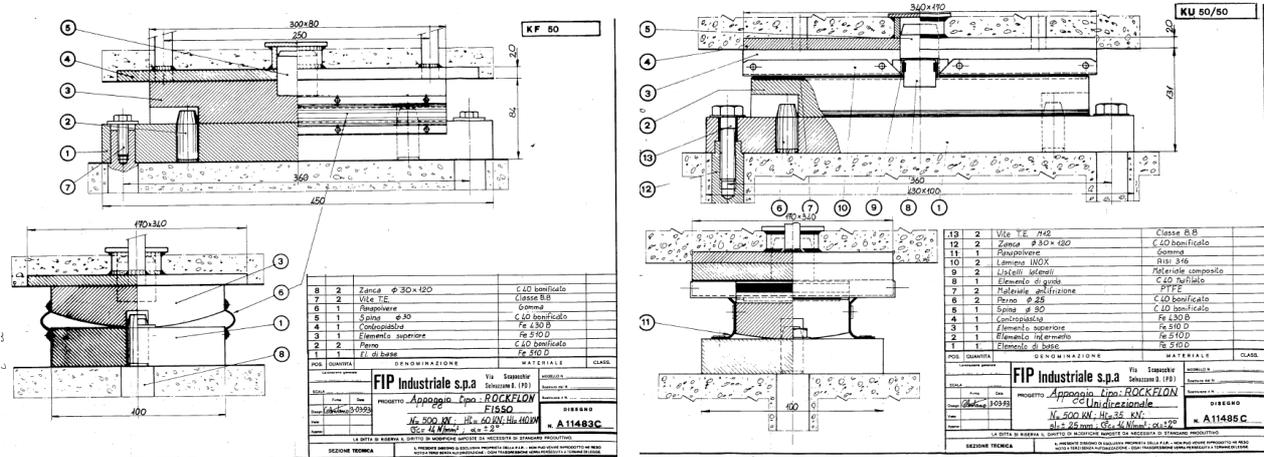


Figura 5 – Dispositivi di appoggio

Le figure seguenti rappresentano alcuni estratti significativi degli elaborati di progetto originali:

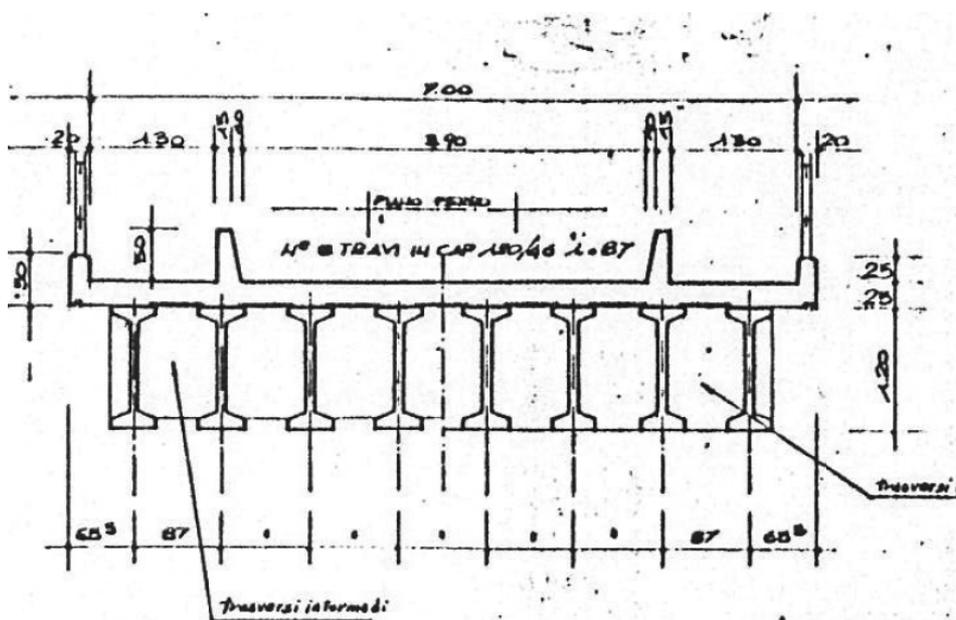


Figura 6 - Sezione trasversale impalcato

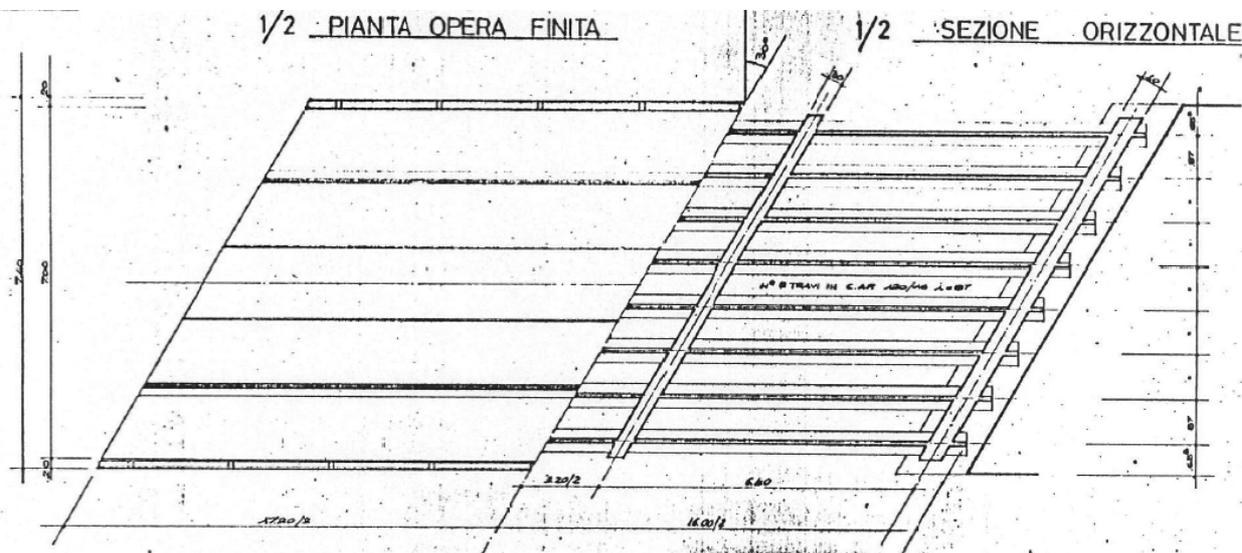


Figura 7 – Pianta

5.1 Descrizione delle carpenterie e delle armature

Dagli elaborati del progetto originale si evince la configurazione delle carpenterie e delle armature relative ai vari elementi strutturali. In particolare, per le analisi di interesse della presente relazione, si riporta il quantitativo di armatura delle spalle:

Muro frontale	VI 14	VI 15
	cm ²	cm ²
As, flessione	26.5	26.5

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

6. AZIONE SISMICA

Lo spettro di progetto è stato identificato nel rispetto del §2.4 e del §3.2 delle norme NTC2018. Si definiscono quindi i parametri per individuare lo spettro da utilizzare nelle analisi:

V_N	=	50 [anni]
Classe d'uso		II
C_u	=	1
V_R	=	$50 \times 1 = 50$ [anni]
Categoria di sottosuolo – VI14	=	C
Categoria di sottosuolo – VI15	=	E

L'azione sismica viene determinata a partire dalla definizione della pericolosità sismica di base del sito in cui ricade l'opera, definita mediante spettro di risposta elastico in accelerazione in accordo a quanto prescritto al § 3.2 NTC2018, espresso da uno spettro normalizzato riferito ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicato per il valore dell'accelerazione orizzontale massima a_g su sito di riferimento rigido orizzontale. Per la sua determinazione si è fatto uso del software free *SPETTRI-NTC ver. 1.0.3* fornito dal MIT, del quale si riportano i passaggi essenziali, con simboli come dal punto citato delle NTC 2018 e riferimento al sito in cui è ubicata l'opera.

Si riportano nelle figure che seguono la determinazione dello spettro elastico per il caso del cavalcavia in esame.

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE: LATITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE: PROVINCIA: COMUNE:

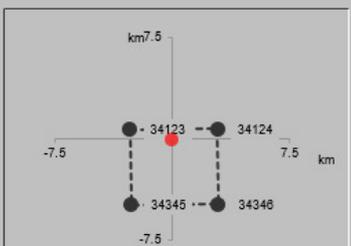
Elaborazioni grafiche

- Grafici spettri di risposta
- Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

- Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione:

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO **FASE 1** FASE 2 FASE 3

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_N info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_U info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_R info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_R info

Stati limite di esercizio - SLE

- SLO - $P_{VR} = 81\%$
- SLD - $P_{VR} = 63\%$

Stati limite ultimi - SLU

- SLV - $P_{VR} = 10\%$
- SLC - $P_{VR} = 5\%$

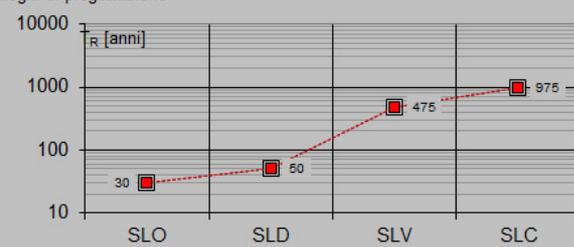
Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

LEGENDA GRAFICO

- Strategia per costruzioni ordinarie
- Strategia scelta

Strategia di progettazione



SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_C^* [s]
SLO	30	0.040	2.458	0.289
SLD	50	0.055	2.496	0.303
SLV	475	0.159	2.477	0.331
SLC	975	0.205	2.497	0.334

6.1 Terreno C

Stato limite di salvaguardia della vita – SLV

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite
Stato Limite considerato SLV info

Risposta sismica
 Categoria di sottosuolo C info $S_S =$ 1.464 $C_C =$ 1.513 info
 Categoria topografica T1 info $h/H =$ 0.000 $S_T =$ 1.000 info
(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale
 Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento ξ (%) 5 $\eta =$ 1.000 info
 Spettro di progetto inelastico (SLU) Fattore q_0 3 Regol. in altezza sì info

Compon. verticale
 Spettro di progetto Fattore q 1 $\eta =$ 1.000 info

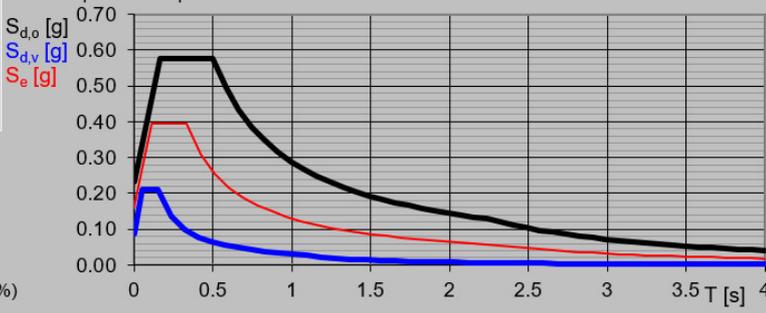
Elaborazioni
 Grafici spettri di risposta ➔
 Parametri e punti spettri di risposta ➔

— Spettro di progetto - componente orizzontale

— Spettro di progetto - componente verticale

— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

Spettri di risposta



INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV

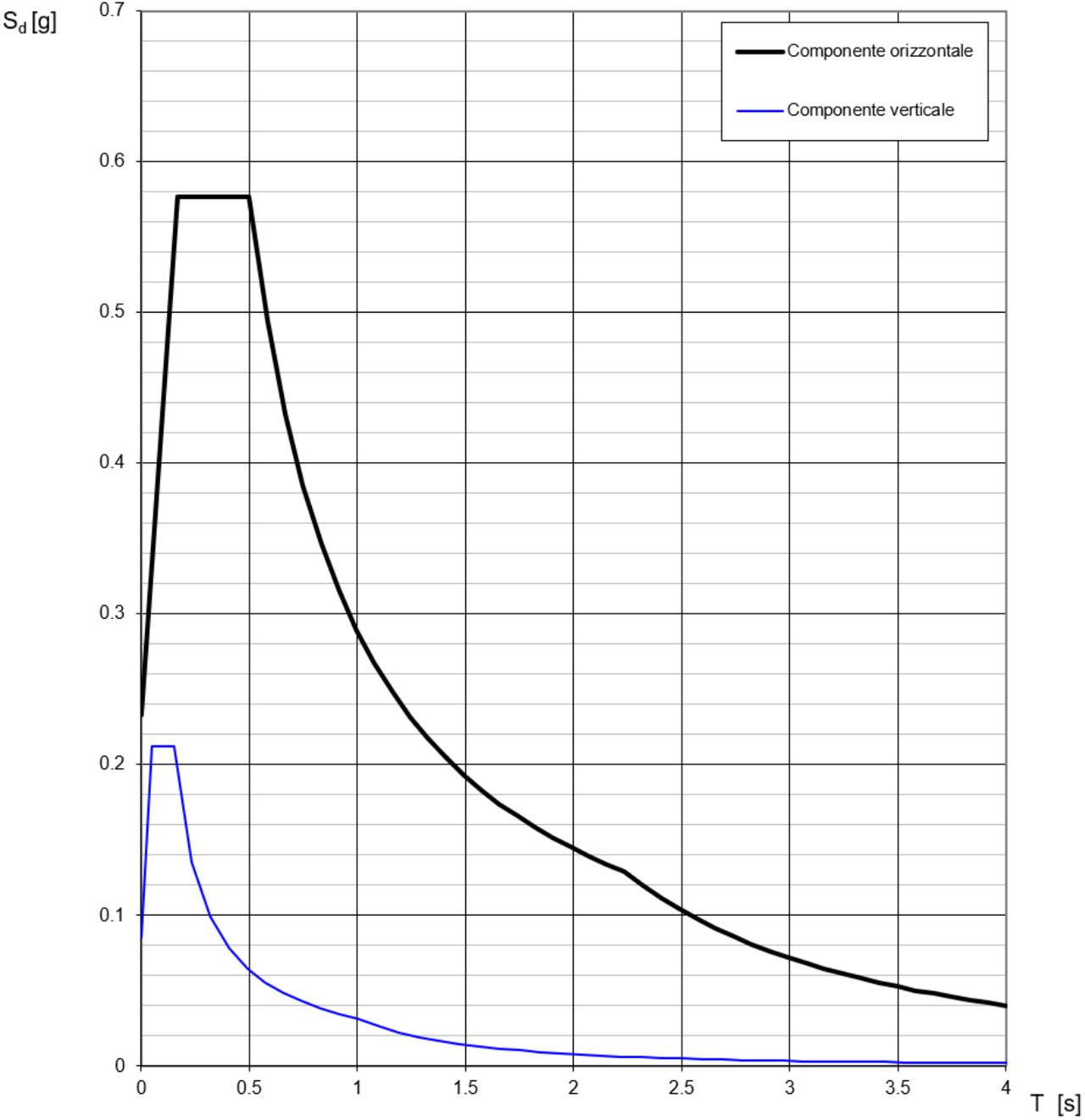


Figura 8- Spettro elastico SLV – terreno C

Stato limite di collasso – SLC

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato **SLC** info

Risposta sismica

Categoria di sottosuolo **C** info

$S_S =$ **1.393**

$C_C =$ **1.508** info

Categoria topografica **T1** info

$h/H =$ **0.000**

$S_T =$ **1.000** info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE)

Smorzamento ξ (%) **5**

$\eta =$ **1.000** info

Spettro di progetto inelastico (SLU)

Fattore q_0 **3**

Regol. in altezza **si** info

Compon. verticale

Spettro di progetto

Fattore q **1**

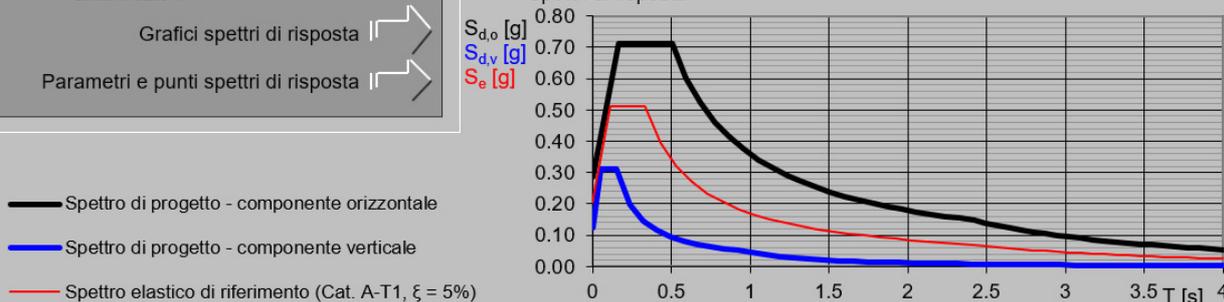
$\eta =$ **1.000** info

Elaborazioni

Grafici spettri di risposta

Parametri e punti spettri di risposta

Spettri di risposta



INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLC

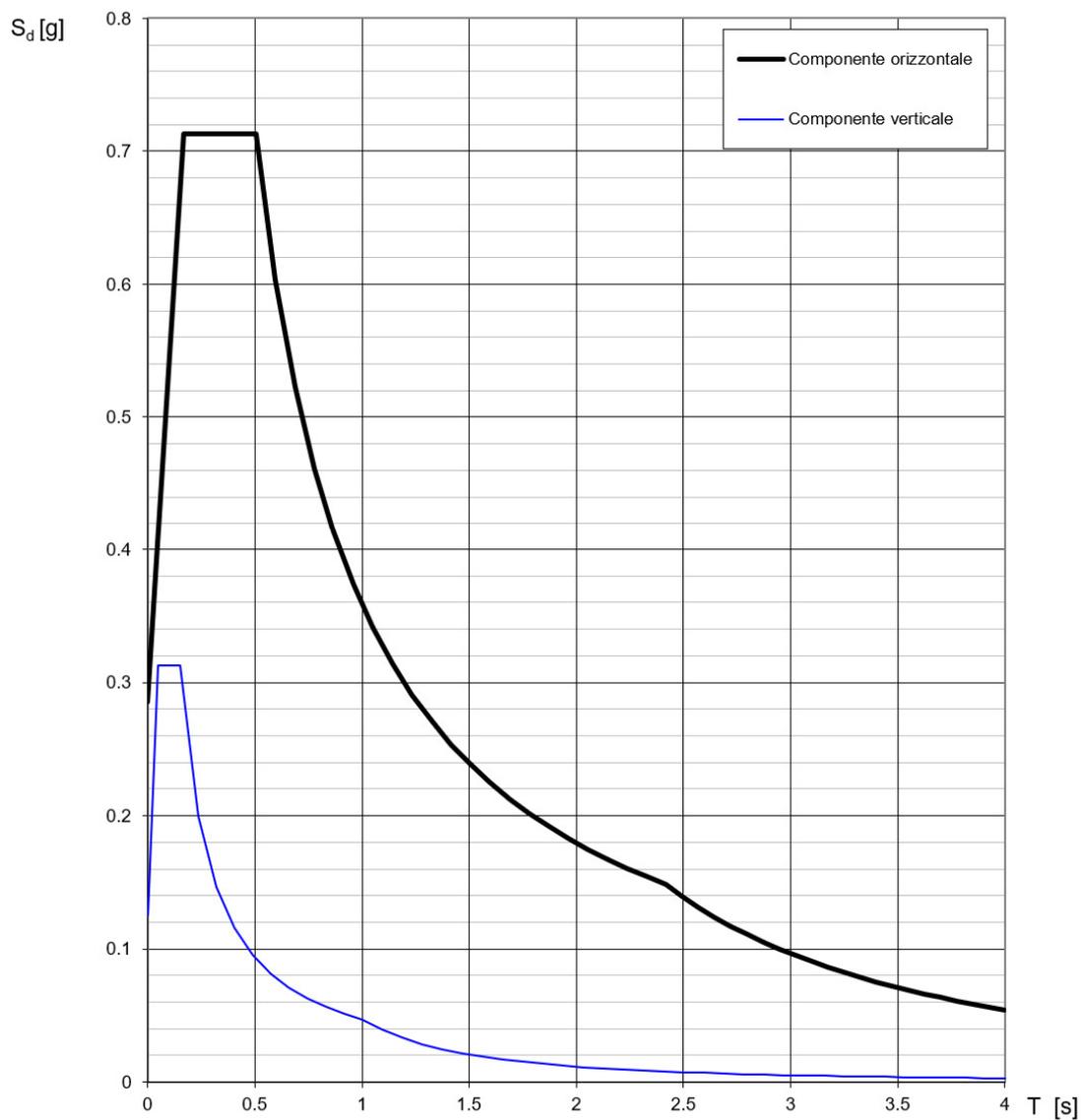


Figura 9- Spettro elastico SLC – terreno C

6.2 Terreno E

Stato limite di salvaguardia della vita – SLV

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite
Stato Limite considerato SLV ▼ info

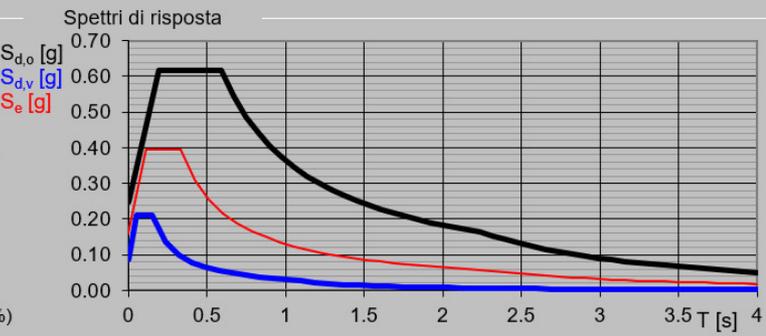
Risposta sismica
 Categoria di sottosuolo E ▼ info $S_S =$ 1.567 $C_C =$ 1.790 ▼ info
 Categoria topografica T1 ▼ info $h/H =$ 0.000 $S_T =$ 1.000 ▼ info
(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale
 Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento ξ (%) 5 $\eta =$ 1.000 ▼ info
 Spettro di progetto inelastico (SLU) Fattore q_0 3 Regol. in altezza si ▼ info

Compon. verticale
 Spettro di progetto Fattore q 1 $\eta =$ 1.000 ▼ info

Elaborazioni
▶▶▶ Grafici spettri di risposta
▶▶▶ Parametri e punti spettri di risposta

Spettri di risposta



— Spettro di progetto - componente orizzontale
— Spettro di progetto - componente verticale
— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV

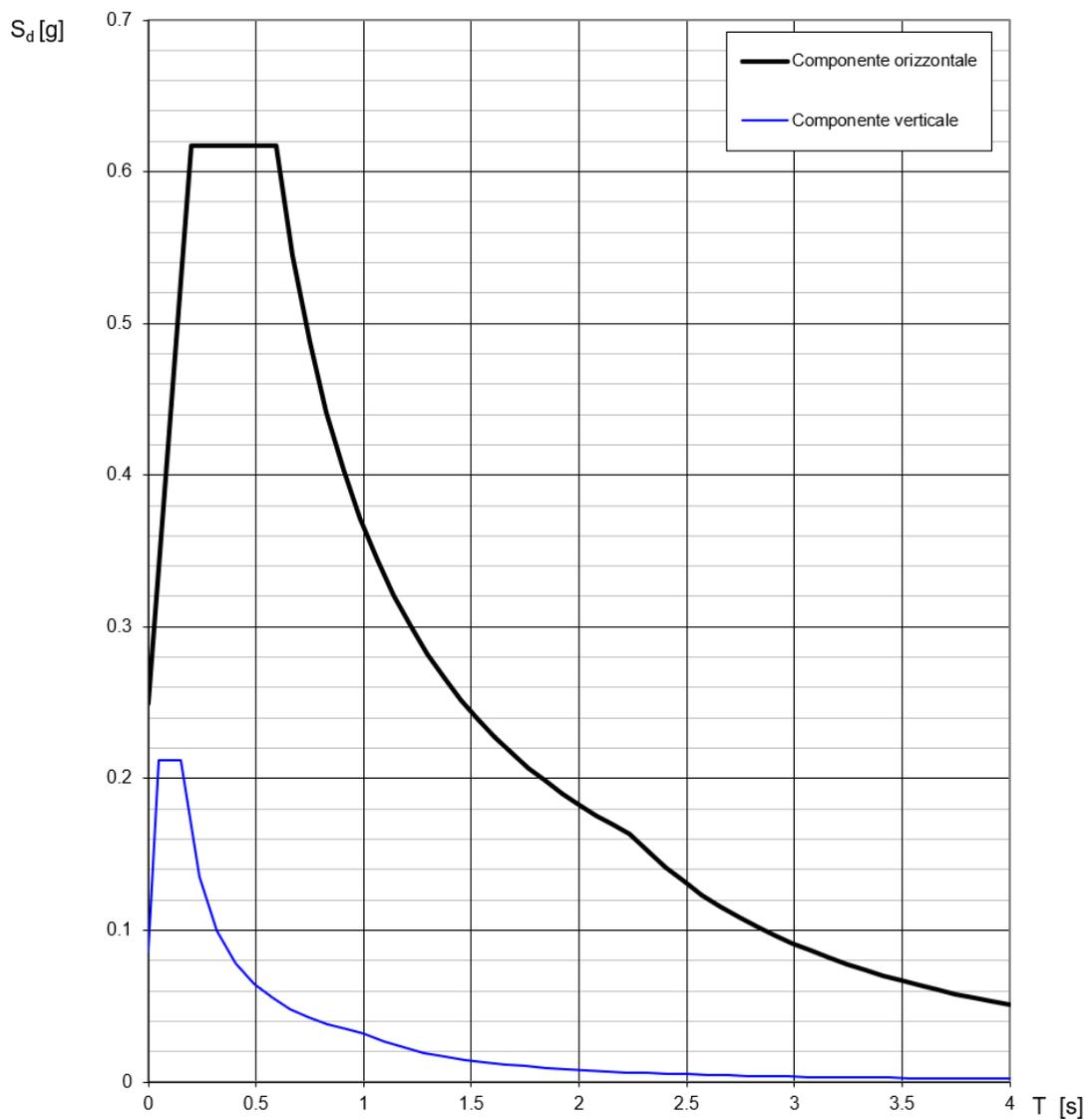


Figura 9- Spettro elastico SLV – terreno E

Stato limite di collasso – SLC

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato SLC ▼ info

Risposta sismica

Categoria di sottosuolo E ▼ info $S_S =$ 1.437 $C_C =$ 1.784 info

Categoria topografica T1 ▼ info $h/H =$ 0.000 $S_T =$ 1.000 info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento ξ (%) 5 $\eta =$ 1.000 info

Spettro di progetto inelastico (SLU) Fattore q_0 3 Regol. in altezza sì ▼ info

Compon. verticale

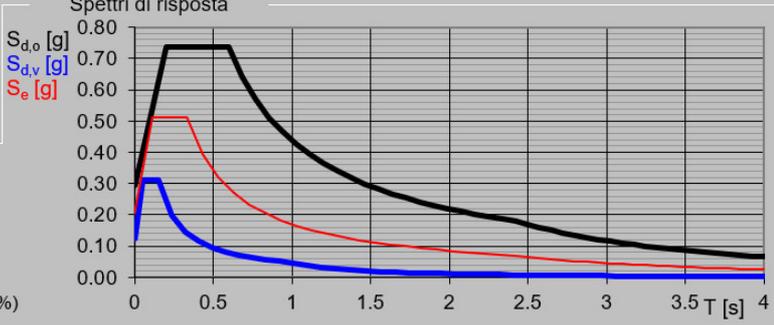
Spettro di progetto Fattore q 1 $\eta =$ 1.000 info

Elaborazioni

Grafici spettri di risposta ▶▶▶

Parametri e punti spettri di risposta ▶▶▶

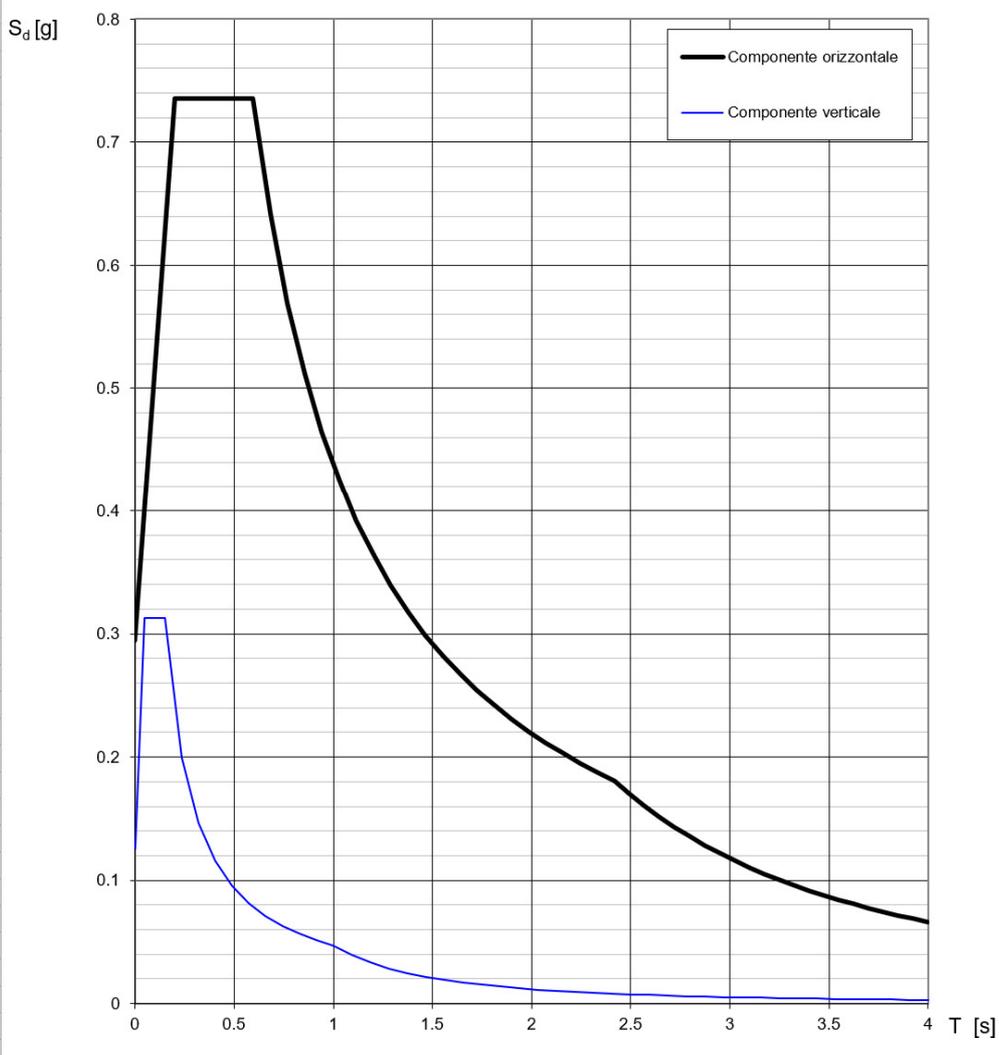
Spettri di risposta



— Spettro di progetto - componente orizzontale
— Spettro di progetto - componente verticale
— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLC



 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

7. ANALISI DEI CARICHI

Il peso proprio strutturale delle opere è valutato sulla base dei pesi per unità di volume dei diversi materiali da costruzione.

Cemento armato:

$$\gamma_c = 25.00 \text{ KN/m}^3$$

7.1 Carichi trasmessi dall'impalcato

I seguenti carichi sono stati estrapolati dalla relazione di calcolo del progetto originale, il relativo elaborato di riferimento è stato riportato nell'apposito paragrafo.

Pesi permanenti strutturali e non strutturali dell'impalcato: **G = 2770 kN**

Sovraccarico variabile (treno): **Q = 3530 kN/m**

7.2 Spinta del terreno

La seguente tabella riporta i parametri geotecnici caratterizzanti il terreno a tergo della spalla.

Parametri meccanici del terreno di rinterro					
γ_{terr} [KN/m ³]	c (MPa)	ϕ (°)	ψ (°)	δ (°)	ε (°)
19.0	0.00	38.00	90.00	25.33	0.00

7.2.1 Spinta statica del terreno

Le spinte del terreno a monte degli elementi verticali della spalla sono calcolate con la teoria di Muller-Breslau, con distribuzione triangolare delle tensioni e conseguente risultante della spinta al metro pari a $S=1/2 \cdot k_a \cdot \gamma \cdot H^2$, applicata ad 1/3 dal basso.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione di calcolo	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

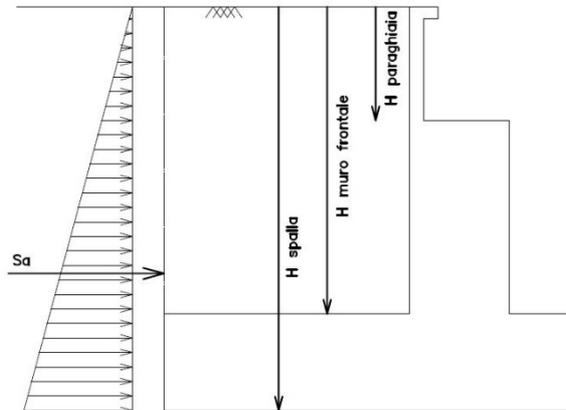


Figura 10 - Schema per il calcolo degli effetti della spinta statica del terreno

La spinta sia in condizioni di esercizio che in condizioni sismiche viene calcolata con il coefficiente di spinta attiva k_a .

La spinta statica del terreno è determinata secondo la teoria di Coulomb. In particolare, il coefficiente di spinta attiva è stato definito attraverso la seguente espressione:

$$k_a = \frac{\text{sen}^2(\psi + \varphi')}{\text{sen}^2\psi \cdot \text{sen}(\psi - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi' + \delta) \cdot \text{sen}(\varphi' - \varepsilon)}{\text{sen}(\psi - \delta) \cdot \text{sen}(\psi + \varepsilon)}} \right]^2}$$

dove:

ψ inclinazione paramento interno della spalla;

φ' angolo d'attrito efficace del terreno di riempimento a tergo della spalla;

δ angolo d'attrito terra-paramento (in prima approssimazione pari a 2/3 di φ');

ε inclinazione del terreno a tergo della spalla.

7.2.2 Spinta dovuta al sovraccarico accidentale e permanenti portati

Per considerare la presenza di un sovraccarico da traffico gravante sulla spalla e a tergo di essa, si considera un carico uniformemente distribuito di lunghezza indefinita con valore pari a $q = q_{\text{accidentali}} + q_{\text{permanenti portati}}$.

Il valore della spinta risultante al metro è dunque pari a $S = k_a \cdot q \cdot H$, con punto di applicazione posizionato a metà dell'altezza dell'elemento su cui insiste. Tale forza si considera agente in senso longitudinale su tutta la larghezza della spalla.

Relazione di calcolo	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A	FOGLIO 23 di 50
----------------------	------------------	--------------	------------------	------------------------	-----------	--------------------

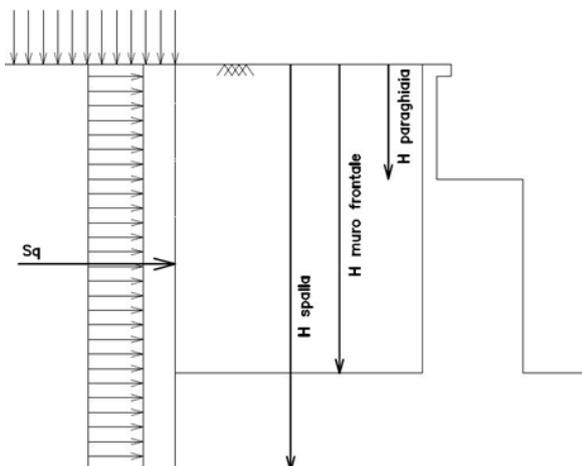


Figura 11 - Schema per il calcolo degli effetti della spinta dovuta al sovraccarico accidentale

7.2.3 Spinta sismica del terreno

La spinta complessiva del terreno sull'opera in condizione sismica è valutata sulla base della teoria di Mononobe-Okabe:

$$k_a = \frac{\sin^2(\psi + \varphi' - \vartheta)}{\cos \vartheta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \vartheta - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi' + \delta) \cdot \sin(\varphi' - \varepsilon - \vartheta)}{\sin(\psi - \vartheta - \delta) \cdot \sin(\psi + \varepsilon)}} \right]^2}$$

Dove:

ψ inclinazione paramento interno della spalla;

φ' angolo d'attrito efficace del terreno di riempimento a tergo della spalla;

δ angolo d'attrito terra-paramento (in prima approssimazione pari a 2/3 di φ');

ε inclinazione del terreno a tergo della spalla.

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{k_h}{1 \pm k_v}\right)$$

$$k_h = \frac{\beta_m \cdot a_{\max}}{g}$$

$$k_v = 0.5 \cdot k_h$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

è un coefficiente definito pari a 0.38 nelle verifiche allo stato limite ultimo (SLV) e pari a 0.47 nelle verifiche allo stato limite di esercizio (SLD) (rif. §7.11.6.2.1. del DM 17.01.2018).

L'incremento dovuto all'azione sismica agente sulla spalla (ΔS_{sism}), calcolato come differenza fra la spinta complessiva sismica e quella statica (S_{stat}), viene applicato come illustrato di seguito:

$$S_{stat} = k_a \cdot \left(\frac{\gamma_t h_s^2}{2} + \gamma_t h_r h_s + q h_s \right) \quad \text{è la spinta litostatica;}$$

$$S_{sism} = k_{as} \cdot \left((1 + k_v) \cdot \frac{\gamma_t h_s^2}{2} + \gamma_t h_r h_s + q h_s \right) \quad \text{è la spinta sismica;}$$

$$\Delta S_{sism} = S_{sism} - S_{stat} \quad \text{è l'incremento di spinta sismico;}$$

$$\gamma_t \quad \text{è il peso per unità di volume del terreno a tergo della spalla;}$$

$$q \quad \text{è il sovraccarico agente superiormente (ulteriori strati di terreno, armamento e carico da treno).}$$

- Alle azioni sopra indicate si aggiungono le azioni inerziali correlate alle masse strutturali dell'opera (muro e ciabatta di fondazione) e del terreno imbarcato; queste ultime pari ad $a_{max} \cdot W_i$, essendo a_{max} l'accelerazione di aggancio dello spettro per la categoria di suolo in oggetto e w_i il peso strutturale dell'opera o il peso del terreno imbarcato.
- Infine, ai carichi sopra indicati si aggiungeranno le azioni trasmesse dall'impalcato alla sommità dell'opera.
- Alle azioni descritte sono aggiunte quelle concernenti il carico da traffico in funzione del corrispondente coefficiente di combinazione $\psi_2=0.2$.

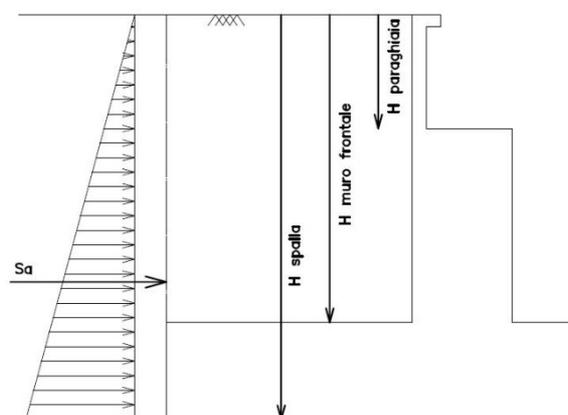


Figura 12 - Schema per il calcolo degli effetti della sovraspinta sismica

Relazione di calcolo	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A	FOGLIO 25 di 50
----------------------	------------------	--------------	------------------	------------------------	-----------	--------------------

7.3 Forze inerziali dovute al sisma

In fase sismica si devono considerare le azioni orizzontali e verticali agenti sulla spalla dovute all'inerzia delle parti in calcestruzzo e del rinterro compreso tra i muri andatori. Le risultanti orizzontali e verticali sono rispettivamente pari a $F_h = k_h \cdot W$ e $F_v = k_v \cdot W$, dove i coefficienti k_h e k_v sono calcolati come esposto al paragrafo 7.11.3.5.2 delle NTC18 risultando pari a $k_h = \beta_m \cdot a_{max} / g$, $k_v = \pm 0.5 k_h$ con $a_{max} = S_s \cdot S_t \cdot a_g$. Il coefficiente β_m , come mostrato nella tabella riportata al paragrafo precedente, viene assunto pari a 0.38 per le verifiche SLV e 0.47 per le verifiche SLD.

7.4 Combinazione dei carichi

Le verifiche di sicurezza strutturali e geotecniche sono state condotte utilizzando le combinazioni di carico definite in ottemperanza al Ref. 1 e Ref. 4.

Le verifiche di sicurezza strutturali e geotecniche dei pali sono state condotte utilizzando la combinazione A1+M1+R3, in ottemperanza alle NTC18.

Nelle tabelle seguenti, si riportano i dati relativamente alle sole combinazioni sismiche.

	SLV1	SLV2	SLV3	SLV4
Peso proprio	1.00	1.00	1.00	1.00
Peso rinterro	1.00	1.00	1.00	1.00
sovrastuttura ferroviaria	1.00	1.00	1.00	1.00
peso accidentali traffico	0.20	0.20	0.20	0.20
Spinta terreno (K0)	1.00	1.00	1.00	1.00
Spinta sovraccarico sovrastuttura (K0)	1.00	1.00	1.00	1.00
Spinta acc. Traffico (K0)	0.20	0.20	0.20	0.20
Incremento spinta sismica terreno	1.00	1.00	1.00	1.00
Effetti inerziali struttura long.	1.00	1.00	0.30	0.30
Effetti inerziali struttura trasv.	0.30	0.30	1.00	1.00
Effetti inerziali verticali (+)	0.30	-0.30	0.30	-0.30
Permanenti da impalcato	1.00	1.00	1.00	1.00
traffico da impalcato	0.00	0.00	0.20	0.20
Resistenza parassita vincoli	1.00	1.00	1.00	1.00
Sisma long	1.00	1.00	0.30	0.30
Sisma trasv	0.30	0.30	1.00	1.00
Sisma vert	0.30	-0.30	0.30	-0.30

8. RISULTATI DELLE ANALISI – VI 14

8.1 Sollecitazioni alla base del muro frontale

Di seguito si riportano per esteso i calcoli delle varie azioni che gravano sul muro frontale della spalla.

PESO PROPRIO SPALLA										
ELEMENTI	b_l [m]	b_t [m]	H [m]	V [m ³]	P [kN]	e_l [m]	e_t [m]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]
Muro Paraghiaia	0.50	8.54	1.50	6.4	160	-1.70	0.00	7.25	-272	0
Muro frontale	1.70	8.54	6.50	94.4	2359	0.00	0.00	3.25	0	0
Azione totale in fondazione				101	2519				-272	0

Peso dei sovraccarichi permanenti (g2)										
ELEMENTI	b_l [m]	b_t [m]	h [m]	q_p [kN/m ²]	P [kN]	e_l [m]	e_t [m]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]
Pavimentazione	0.50	-	-	50.00	25	-6.70	0.00	8.00	-168	0
			0		25				-168	0

Peso dei sovraccarichi accidentali (q1)										
ELEMENTI	b_l [m]	b_t [m]	h [m]	q_v [kN/m ²]	P [kN]	e_l [m]	e_t [m]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]
Accidentali	0.50	-	-	80.00	40	-6.70	0.00	8.00	-268	0
				80.00	40				-268	0

SPINTA STATICA										
Coeff. di spinta attiva	K_a	0.217								
	γ [kN/m ³]	φ' [°]	K_a	H [m]	b [m]	S_i [kN]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]	
Spinta del terreno	19.0	38.00	0.217	8.00	6.54	862	2.67	2299	0	
	q [kN/mq]	K_a	H [m]	b [m]	S_0 [kN]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]		
Incremento spinta per sovraccarico sovrastruttura	50.00	0.217	8.00	6.54	567	4.00	2268	0		
Incremento spinta per carichi accidentali	80.00	0.217	8.00	6.54	907	4.00	3630	0		

SPINTA SISMICA (teoria di Mononobe-Okabe)

S_s	1.46	k_{as+}	0.249
S_r	1.00	k_h	0.060
a_g/g	0.159	k_v	0.030
β_m	0.38		
γ_t [kN/m ³]	19.0		
h_s [m]	8.00		
$\gamma_r * h_r$ [kN/m ²]	50.00		
q [kN/m ²]	80.00		
b [m]	6.54		

spinta litostatica	357.3	kN/m
spinta sismica	415.3	kN/m
incremento spinta sismico	58.0	kN/m
ΔE_d [kN]	380	kN
e_v [m]	4	
m_i [kN m]	1518	

FORZE SISMICHE INERZIALI

	Direzione orizzontale				Direzione verticale		
	P [kN]	E.I. [kN]	e_v [m]	m_i [kN m]	E.I. [kN]	e_i [m]	m_i [kN m]
Muro Paraghiaia	160	10	7.25	70	5	-1.70	-8
Muro frontale	2359	143	3.25	463	71	0.00	0
Muro andatore SX sup	216	13	7.25	95	7	-6.70	-44
Muro andatore DX sup	216	13	7.25	95	7	-6.70	-44
Muro andatore SX inf	1730	104	3.25	340	52	-6.70	-350
Muro andatore DX inf	1730	104	3.25	340	52	-6.70	-350
Terreno di rinterro	11462	692	8.00	5539	346	-6.70	-2319
Tot.		1080		6940	540		-3115

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

Riepilogando tutte le azioni elementari alla base del muro frontale della spalla (lato appoggio fisso), si ottiene la seguente tabella:

Intradosso muro frontale						
	N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]	
Peso proprio	2519	-272	0	0	0	STATICA
sovrastuttura stradale	25	-168	0	0	0	
peso accidentali traffico	40	-268	0	0	0	
Spinta terreno (Ka)	0	2299	0	862	0	
Spinta sovraccarico sovrastuttura (Ka)	0	2268	0	567	0	
Spinta acc. Traffico (Ka)	0	3630	0	907	0	
Incremento spinta sismica terreno	0	1518	0	380	0	SISMICA
Effetti inerziali struttura long.	0	6940	0	1080	0	
Effetti inerziali struttura trasv.	0	0	6940	0	1080	
Effetti inerziali verticali (+)	540	-3115	0	0	0	AZIONI DA IMPALCATO
permanenti	1408	366	0	0	0	
traffico	1520	395	0	0	0	
Resistenza parassita vincoli	0	411	0	103	0	
Sisma long	0	3187	0	797	0	
Sisma trasv	0	0	1593	0	398	
Sisma vert	199	52	0	0	0	

Combinando le sollecitazioni sopra elencate, secondo i coefficienti riportati ai precedenti paragrafi, si ottengono i seguenti valori di sollecitazione:

		N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]
SLV	SLV1	4182	16303	2560	3969	443
	SLV2	3739	18141	2560	3969	443
	SLV3	4486	9293	8534	2656	1478
	SLV4	4043	11131	8534	2656	1478

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

8.2 Sollecitazioni a quota intradosso fondazioni

Nelle seguenti tabelle sono riportate le azioni elementari in direzione orizzontale e verticale agenti all'intradosso fondazione della spalla (lato appoggio fisso)

Intradosso fondazione						
	N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]	
Peso proprio	12509	1420	0	0	0	STATICA
Peso rinterro	11462	-25216	0	0	0	
sovrastuttura stradale	577	-1268	0	0	0	
peso accidentali traffico	922	-2029	0	0	0	
Spinta terreno (Ka)	0	4490	0	1347	0	
Spinta sovraccarico sovrastuttura (Ka)	0	3545	0	709	0	
Spinta acc. Traffico (Ka)	0	5671	0	1134	0	
Incremento spinta sismica terreno	0	2620	0	524	0	SISMICA
Effetti inerziali struttura long.	0	6699	0	1448	0	
Effetti inerziali struttura trasv.	0	0	6699	0	1448	
Effetti inerziali verticali (+)	724	-719	0	0	0	
permanenti	1408	6054	0	0	0	AZIONI DA IMPALCATO
traffico	1520	6536	0	0	0	
Resistenza parassita vincoli	0	873	0	103	0	
Sisma long	0	6772	0	797	0	
Sisma trasv	0	0	3386	0	398	
Sisma vert	199	856	0	0	0	

Tali azioni combinate con i coefficienti riportati in precedenza determinano le sollecitazioni di progetto nel baricentro del plinto, alla quota intradosso, esposte nelle tabelle seguenti.

		N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]
SLV	SLV1	26417	6758	3025	5154	554
	SLV2	25863	6675	3025	5154	554
	SLV3	26721	-1364	10084	3583	1846
	SLV4	26167	-1447	10084	3583	1846

9. RISULTATI DELLE ANALISI – VI 15

9.1 Sollecitazioni alla base del muro frontale

Di seguito si riportano per esteso i calcoli delle varie azioni che gravano sul muro frontale della spalla.

PESO PROPRIO SPALLA										
ELEMENTI	b_l [m]	b_t [m]	H [m]	V [m ³]	P [kN]	e_l [m]	e_t [m]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]
Muro Paraghiaia	0.50	8.08	1.50	6.1	152	-0.60	0.00	6.75	-91	0
Muro frontale	1.70	8.08	6.00	82.4	2060	0.00	0.00	3.00	0	0
Azione totale in fondazione				88	2212				-91	0

Peso dei sovraccarichi permanenti (g2)										
ELEMENTI	b_l [m]	b_t [m]	h [m]	q_p [kN/m ²]	P [kN]	e_l [m]	e_t [m]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]
Pavimentazione	0.50	-	-	50.00	25	-6.65	0.00	7.50	-166	0
			0		25				-166	0

Peso dei sovraccarichi accidentali (q1)										
ELEMENTI	b_l [m]	b_t [m]	h [m]	q_v [kN/m ²]	P [kN]	e_l [m]	e_t [m]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]
Accidentali	0.50	-	-	80.00	40	-6.65	0.00	7.50	-266	0
				80.00	40				-266	0

SPINTA STATICA										
Coeff. di spinta attiva	K_a	0.217								
	γ [kN/m ³]	φ' [°]	K_a	H [m]	b [m]	S_i [kN]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]	
Spinta del terreno	19.0	38.00	0.217	7.50	6.08	704	2.50	1761	0	
	q [kN/mq]	K_a	H [m]	b [m]	S_o [kN]	e_v [m]	m_l [kN m]	m_t [kN m]		
Incremento spinta per sovraccarico sovrastruttura	50.00	0.217	7.50	6.08	494	3.75	1854	0		
Incremento spinta per carichi accidentali	80.00	0.217	7.50	6.08	791	3.75	2966	0		

SPINTA SISMICA (teoria di Mononobe-Okabe)

S_s	1.57		kas +	0.249
S_r	1.00		k_h	0.060
a_g/g	0.159		k_v	0.030
β_m	0.38			
γ_t [kN/m ³]	19.0			
hs [m]	7.50			
$\gamma_r * hr$ [kN/m ²]	50.00			
q [kN/m ²]	80.00			
b [m]	6.08			

spinta litostatica	327.2	kN/m
spinta sismica	380.2	kN/m
incremento spinta sismico	53.0	kN/m
ΔE_d [kN]	322	kN
ev [m]	3.75	
m_i [kN m]	1208	

FORZE SISMICHE INERZIALI

	Direzione orizzontale				Direzione verticale		
	P [kN]	E.I. [kN]	e_v [m]	m_i [kN m]	E.I. [kN]	e_i [m]	m_i [kN m]
Muro Paraghiaia	152	9	6.75	62	5	-0.60	-3
Muro frontale	2060	124	3.00	373	62	0.00	0
Muro andatore SX sup	218	13	6.75	89	7	-6.65	-44
Muro andatore DX sup	218	13	6.75	89	7	-6.65	-44
Muro andatore SX inf	1742	105	3.00	316	53	-6.65	-350
Muro andatore DX inf	1742	105	3.00	316	53	-6.65	-350
Terreno di rinterro	152	9	6.75	62	5	-0.60	-3
Tot.		978		5801	489		-2810

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

Riepilogando tutte le azioni elementari alla base del muro frontale della spalla (lato appoggi fissi), si ottiene la seguente tabella:

Intradosso muro frontale						
	N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]	
Peso proprio	2212	-91	0	0	0	STATICA
sovrastuttura stradale	25	-166	0	0	0	
peso accidentali traffico	40	-266	0	0	0	
Spinta terreno (Ka)	0	1761	0	704	0	
Spinta sovraccarico sovrastuttura (Ka)	0	1854	0	494	0	
Spinta acc. Traffico (Ka)	0	2966	0	791	0	
Incremento spinta sismica terreno	0	1208	0	322	0	SISMICA
Effetti inerziali struttura long.	0	5801	0	978	0	
Effetti inerziali struttura trasv.	0	0	5801	0	978	
Effetti inerziali verticali (+)	489	-2810	0	0	0	AZIONI DA IMPALCATO
permanenti	1408	366	0	0	0	
traffico	1520	395	0	0	0	
Resistenza parassita vincoli	0	411	0	103	0	
Sisma long	0	3411	0	853	0	
Sisma trasv	0	0	1706	0	426	
Sisma vert	213	55	0	0	0	

Combinando le sollecitazioni sopra elencate, secondo i coefficienti riportati ai precedenti paragrafi, si ottengono i seguenti valori di sollecitazione:

		N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]
SLV	SLV1	3864	14268	2252	3612	421
	SLV2	3442	15921	2252	3612	421
	SLV3	4168	7898	7506	2331	1404
	SLV4	3746	9551	7506	2331	1404

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

9.2 Sollecitazioni a quota intradosso fondazioni

Nelle seguenti tabelle sono riportate le azioni elementari in direzione orizzontale e verticale agenti all'intradosso delle fondazioni della spalla (lato appoggi fissi).

Intradosso fondazione						
	N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]	
Peso proprio	13403	-903	0	0	0	STATICA
Peso rinterro	10059	-25650	0	0	0	
sovrastuttura stradale	581	-1480	0	0	0	
peso accidentali traffico	929	-2368	0	0	0	
Spinta terreno (Ka)	0	3579	0	1130	0	
Spinta sovraccarico sovrastuttura (Ka)	0	2974	0	626	0	
Spinta acc. Traffico (Ka)	0	4758	0	1002	0	
Incremento spinta sismica terreno	0	2146	0	452	0	SISMICA
Effetti inerziali struttura long.	0	4702	0	1417	0	
Effetti inerziali struttura trasv.	0	0	4702	0	1417	
Effetti inerziali verticali (+)	709	-802	0	0	0	AZIONI DA
permanenti	1408	6054	0	0	0	
traffico	1520	6536	0	0	0	
Resistenza parassita vincoli	0	822	0	103	0	
Sisma long	0	6822	0	853	0	
Sisma trasv	0	0	3411	0	426	
Sisma vert	213	917	0	0	0	

Tali azioni combinate con i coefficienti riportati in precedenza determinano le sollecitazioni di progetto nel baricentro del plinto, alla quota intradosso, esposte nelle tabelle seguenti.

		N [kN]	MI [kNm]	Mt [kNm]	FI [kN]	Ft [kN]
SLV	SLV1	25912	-422	2434	4781	553
	SLV2	25359	-491	2434	4781	553
	SLV3	26216	-7182	8113	3192	1844
	SLV4	25663	-7251	8113	3192	1844

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

10. VERIFICHE DI SICUREZZA – VI 14

10.1 Appoggi

10.1.1 Verifica di resistenza degli appoggi

Lo schema di appoggi previsto per il viadotto è il seguente:

SCHEMA DI VINCOLO

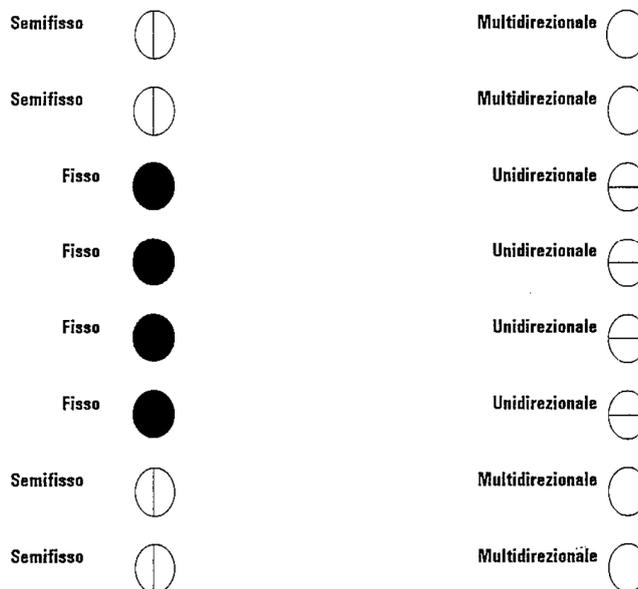


Figura 13 – schema appoggi

Si riportano le reazioni massime per il singolo dispositivo di appoggio della campata, per il sisma SLV, con il fattore $q=1$:

	N [kN]	FI [kN]	Ft [kN]
fisso	210	100	100
unidirezionale	210	0	100

In cui:

Ft = taglio in direzione trasversale

FI = taglio in direzione longitudinale

N = azione verticale

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

La resistenza di progetto degli appoggi risulta:

	N [kN]	FI [kN]	Ft [kN]
valori di resistenza appoggio fisso	500	110	60
valori di resistenza appoggio unidir.	500	0	75

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R relativamente alla rottura degli appoggi, ottenuto confrontando l'accelerazione di picco al suolo che porta alla rottura l'apparecchio d'appoggio (PGA di capacità), con l'accelerazione di picco al suolo attesa nel sito (PGA di domanda):

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d}$$

	carico vert.	carico long.	carico trasv.	Min
I_{r_SLV}	2.38	1.10	0.60	0.600
PGA_min (g)	0.554	0.256	0.140	0.140
TR (anni)	> 475	> 475	121	121

10.1.2 Perdita dell'appoggio

Per non avere la caduta dell'impalcato dalla sottostruttura per l'azione sismica allo SLC, si deve verificare che la lunghezza di sovrapposizione della trave sul pulvino sia superiore a:

$$d_{tot} = l_0 + d_{eg} + d_{es} + 0.5d_{\Delta t}$$

dove

l_0 è un valore di sicurezza posto pari a 400mm;

d_{eg} è lo spostamento sismico SLC relativo del terreno tra le due sottostrutture che sostengono il medesimo impalcato calcolato conformemente al pt. 3.2.4.2 delle NTC18;

d_{es} è lo spostamento sismico SLC relativo tra le due sottostrutture che sostengono il medesimo impalcato derivante dall'analisi, assunto pari alla radice quadrata della somma dei quadrati dei singoli spostamenti delle sottostrutture adiacenti;

$d_{\Delta t}$ è lo spostamento dell'impalcato dovuto all'azione termica uniforme (assunta pari a 30°C).

Si procede al calcolo dei singoli contributi:

- Spostamento relativo del terreno (d_{eg}):

$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_c \cdot T_D$$

$$d_{ij\max} = 1,25 \sqrt{d_{gi}^2 + d_{gj}^2}$$

$$d_{ij}(x) = \frac{d_{ij\max}}{v_s} \cdot 3,0x \text{ per sottosuolo di tipo diverso da D.}$$

ag	0.205	g
S	1.393	-
Tc	0.503	s
TD	2.420	s
vs	270	m/s
x	16.00	m
dgi=dgj	0.0853	m
d ij max	0.151	m
d ij(x) = deg	0.0268	m

- Spostamento relativo delle sottostrutture adiacenti (d_{es})

Si assume una deformabilità delle spalle nulla, ossia che le spalle si muovano rigidamente col terreno in fase sismica.

$$d_{es} = \sqrt{d_{spalla\ 1}^2 + d_{spalla\ 2}^2}$$

d spalla 1	0.0	m
d spalla 2	0.0	m
d_{es}	0.0	m

- Spostamento per deformazione termica dell'impalcato (d_{Dt})

L	17.2	m
α	1.00E-05	1/°C
Δt	30	°C
d_{Dt}	0.005	m

Si ottiene:

Domanda:

$$d_{tot} = 0.429 \text{ m}$$

Capacità:

$$L_{\text{disponibile appoggio}} = 1.10 \text{ m}$$

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

La lunghezza di sovrapposizione disponibile per l'appoggio delle travi è maggiore dello spostamento massimo che si può verificare allo stato limite di collasso, per cui la verifica risulta soddisfatta.

Dalla verifica condotta l'indice di rischio per perdita d'appoggio delle travi risulta maggiore di 1.

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d} > 1$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

10.2 Spalle – verifica strutture in elevazione

10.2.1 Verifica dei meccanismi duttili

Le sollecitazioni massime agenti alla base del muro frontale della spalla sono:

VI max	3969	kN
N min	3739	kN
MI max	14993	kNm

Si calcola il momento resistente corrispondente al relativo valore di sforzo normale (Nmin), calcolati riferendosi ad una sezione resistente comprensiva di muro frontale e muri andatori.

Le armature dei vari elementi componenti la spalla sono:

Muro frontale

armatura interna (tesa) = 26.5 cmq/ml

Muro andatore

armatura verticale = 36.0 cmq/ml

Si ottiene il seguente momento resistente:

Verifica C.A. S.L.U. - File: spalla VI14

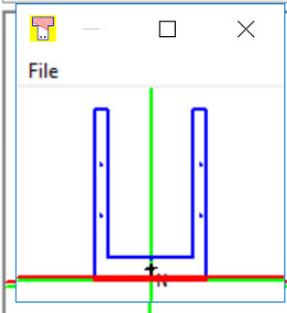
File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° Vertici Zoom N° barre Zoom

N°	x [cm]	y [cm]	N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	427	0	1	226.3	0	5
2	427	1323	2	226.3	0	165
3	327	1323	3	154	377	500
4	327	170	4	154	-377	900
5	-327	170	5	154	377	900
6	-327	1323	6	154	-377	500

Tipologia Sezione:
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

File 

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N_{Ed} kN
 M_{xEd} kNm
 M_{yEd} kNm

P.to applicazione N:
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN yN

Tipologia rottura: Lato acciaio - Acciaio snervato

Materiali: FeB38k C20/25

ε_{su} ‰ ε_{c2} ‰
 f_{yd} N/mm² ε_{cu} ‰
 E_s N/mm² f_{cd} ‰
 E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
 ε_{syd} ‰ σ_{c,adm} ‰
 σ_{s,adm} N/mm² τ_{co} τ_{c1}

M_{xRd} kNm
 σ_c N/mm²
 σ_s N/mm²
 ε_c ‰
 ε_s ‰
 d cm
 x x/d δ

Metodo di calcolo:
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipologia flessione:
 Retta Deviata

N° rett.
 Calcola MRd Dominio M-N
 L₀ cm Col. modello
 Precompresso

Mrd (Ned) = 146895 kNm

Si ottiene di conseguenza il seguente valore del coefficiente di sicurezza:

$$\rho = \text{domanda} / \text{capacità} = \text{Med}/\text{Mrd} = 0.123$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

10.2.2 Verifica dei meccanismi fragili

La sollecitazione massima di taglio è pari a $V_{Ed} = 3969$ kN.

Si valuta la resistenza a taglio del solo muro frontale in assenza di armatura specifica (assunzione a favore di sicurezza)

Classe cls	f_{cm}	20.0	N/mm ²
resistenza di calcolo	f_{cd}	11.1	N/mm ²
larghezza membratura resistente	b_w	8540	mm
altezza membratura resistente	H	1700	mm
altezza utile	d	1640	mm
area della sezione	A_{TOT}	1.40E+07	mm ²
area armatura tesa	A	22631.0	mm ²
area armatura totale	A_l	22631	mm ²
percentuale di armatura	rl	0.162%	
sforzo assiale dovuto ai carichi o precompressione	N	3.74E+06	N
	s_{cp}	0.26	N/mm ²
	k	1.35	
	v_{min}	0.25	
	V_{Rd1}	5570	kN
	V_{Rd2}	3977	kN
taglio resistente	V_{Rd}	5570	kN

Si ottiene di conseguenza il seguente valore del coefficiente di sicurezza:

$$\rho = \text{domanda} / \text{capacità} = V_{Ed}/V_{Rd} = 0.713$$

10.2.3 *Indice di rischio delle spalle*

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R delle spalle, ottenuto confrontando l'accelerazione di picco al suolo che porta alla rottura dell'elemento (PGA di capacità), con l'accelerazione di picco al suolo attesa nel sito (PGA di domanda). Nel caso in esame considerato l'esito delle verifiche si può indicare:

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d}$$

meccanismo duttile

	capacità	domanda
PGA [g]	> 0.233	0.233
TR [anni]	> 475	475
IR	>> 1	

meccanismo fragile

	capacità	domanda
PGA [g]	> 0.233	0.233
TR [anni]	475	475
IR	> 1.00	

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

11. VERIFICHE DI SICUREZZA – VI 15

11.1 Appoggi

11.1.1 Verifica di resistenza degli appoggi

Lo schema di appoggi previsto per il viadotto è il seguente:

SCHEMA DI VINCOLO

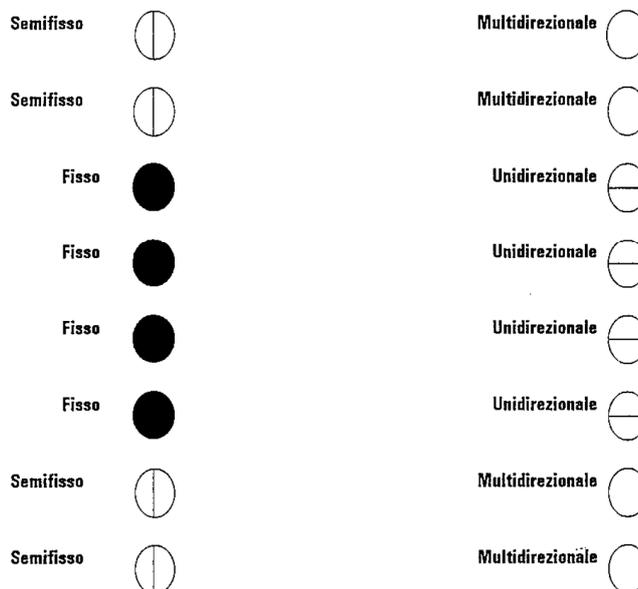


Figura 14 – schema appoggi

Si riportano le reazioni massime per il singolo dispositivo di appoggio della campata, per il sisma SLV di sito, con il fattore $q=1$:

	N [kN]	FI [kN]	Ft [kN]
fisso	210	110	110
unidirezionale	210	0	110

In cui:

Ft = taglio in direzione trasversale

FI = taglio in direzione longitudinale

N = azione verticale

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

La resistenza di progetto degli appoggi risulta:

	N [kN]	FI [kN]	Ft [kN]
valori di resistenza appoggio fisso	500	110	60
valori di resistenza appoggio unidir.	500	0	75

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R relativamente alla rottura degli appoggi, ottenuto confrontando l'accelerazione di picco al suolo che porta alla rottura l'apparecchio d'appoggio (PGA di capacità), con l'accelerazione di picco al suolo attesa nel sito (PGA di domanda):

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d}$$

	carico vert.	carico long.	carico trasv.	Min
I_{R_SLV}	2.38	1.00	0.55	0.55
PGA_min (g)	0.593	0.249	0.136	0.136
TR (anni)	> 475	475	114	114

11.1.2 Perdita dell'appoggio

Per non avere la caduta dell'impalcato dalla sottostruttura per l'azione sismica allo SLC, si deve verificare la lunghezza di sovrapposizione della trave sul pulvino sia superiore a:

$$d_{tot} = l_0 + d_{eg} + d_{es} + 0.5d_{\Delta t}$$

dove

l_0 è un valore di sicurezza posto pari a 400mm;

d_{eg} è lo spostamento sismico relativo del terreno tra le due sottostrutture che sostengono il medesimo impalcato calcolato conformemente al pt. 3.2.4.2 delle NTC18;

d_{es} è lo spostamento sismico relativo tra le due sottostrutture che sostengono il medesimo impalcato derivante dall'analisi, assunto pari alla radice quadrata della somma dei quadrati dei singoli spostamenti delle pile adiacenti;

$d_{\Delta t}$ è lo spostamento dell'impalcato dovuto all'azione termica uniforme (assunta pari a 30°C).

Si procede al calcolo dei singoli contributi:

- Spostamento relativo del terreno (d_{eg})

$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_c \cdot T_D$$

$$d_{ij\max} = 1,25 \sqrt{d_{gi}^2 + d_{gj}^2}$$

$$d_{ij}(x) = \frac{d_{ij\max}}{v_i} \cdot 3,0x \text{ per sottosuolo di tipo diverso da D.}$$

ag	0.205 g
S	1.437 -
Tc	0.595 s
TD	2.420 s
vs	180 m/s
x	16.00 m
dgi=dgj	0.1040 m
d ij max	0.184 m
d ij (x) = deg	0.0490 m

- Spostamento relativo delle sottostrutture adiacenti (d_{es})

$$d_{es} = \sqrt{d_{spalla\ 1}^2 + d_{spalla\ 2}^2}$$

d spalla 1	0.0 m
d spalla 2	0.0 m
d_{es}	0.0 m

- Spostamento per deformazione termica dell'impalcato (d_{Dt})

L	17.2 m
α	1.00E-05 1/°C
Δt	30 °C
d_{Dt}	0.005 m

Si ottiene:

Domanda:

$$d_{tot} = 0.452 \text{ m}$$

Capacità:

$$L_{\text{disponibile appoggio}} = 1.10 \text{ m}$$

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

La lunghezza di sovrapposizione disponibile per l'appoggio delle travi è maggiore dello spostamento massimo che si può verificare allo stato limite di collasso, per cui la verifica risulta soddisfatta.

Dalla verifica condotta l'indice di rischio per perdita d'appoggio delle travi risulta maggiore di 1.

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d} > 1$$

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

11.2 Spalle – verifica strutture in elevazione

11.2.1 Verifica dei meccanismi duttili

Le sollecitazioni massime agenti alla base del muro frontale della spalla sono:

VI max	3612	kN
N min	3442	kN
MI max	15921	kNm

Si calcola il momento resistente corrispondente al relativo valore di sforzo normale (Nmin), calcolati riferendosi ad una sezione resistente comprensiva di muro frontale e muri andatori.

Le armature dei vari elementi componenti la spalla sono:

Muro frontale

armatura interna (tesa) = 26.5 cmq/ml

Muro andatore

armatura verticale = 36.0 cmq/ml

Si ottiene il seguente momento resistente:

Verifica C.A. S.L.U. - File: spalla V115

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

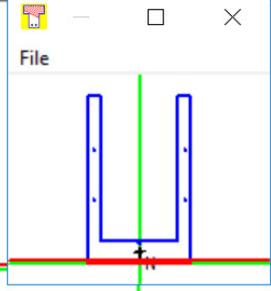
N° Vertici Zoom N° barre Zoom

N°	x [cm]	y [cm]	N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	404	0	1	214.2	0	5
2	404	1331	2	214.2	0	165
3	304	1331	3	145	354	500
4	304	170	4	145	-354	900
5	-304	170	5	145	354	900
6	-304	1331	6	145	-354	500

Tipologia Sezione

Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

File



Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N_{Ed} kN
M_{xEd} kNm
M_{yEd} kNm

P.to applicazione N

Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN
yN

Tipologia rottura

Lato acciaio - Acciaio snervato

Materiali

FeB38k C20/25

ε_{su} ‰ ε_{c2} ‰
f_{yd} N/mm² ε_{cu} ‰
E_s N/mm² f_{cd} ‰
E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
ε_{syd} ‰ σ_{c,adm} ‰
σ_{s,adm} N/mm² τ_{co} ‰
τ_{c1} ‰

M_{xRd} kNm

σ_c N/mm²
σ_s N/mm²
ε_c ‰
ε_s ‰
d cm
x x/d
δ

Metodo di calcolo

S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipologia flessione

Retta Deviate

N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N

L_o cm Col. modello

Precompresso

Mrd (Ned) = 138309 kNm

Si ottiene di conseguenza il seguente valore del coefficiente di sicurezza:

$$\rho = \text{domanda} / \text{capacità} = \text{Med}/\text{Mrd} = 0.115$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01D	CODIFICA 09CL	DOCUMENTO VI1400001	REV. A

11.2.2 Verifica dei meccanismi fragili

La sollecitazione massima di taglio è pari a $V_{Ed} = 3612$ kN

Si valuta la resistenza a taglio del solo muro frontale in assenza di armatura specifica (assunzione a favore di sicurezza)

Classe cls	f_{cm}	20.0	N/mm ²
resistenza di calcolo	f_{cd}	11.1	N/mm ²
larghezza membratura resistente	b_w	8080	mm
altezza membratura resistente	H	1700	mm
altezza utile	d	1640	mm
area della sezione	A_{TOT}	1.33E+07	mm ²
area armatura tesa	A	21412.0	mm ²
area armatura totale	Al	21412	mm ²
percentuale di armatura	rl	0.162%	
sforzo assiale dovuto ai carichi o precompressione	N	3.44E+06	N
	s_{cp}	0.25	N/mm ²
	k	1.35	
	v_{min}	0.25	
	V_{Rd1}	5256	kN
	V_{Rd2}	3749	kN
taglio resistente	V_{Rd}	5256	kN

Si ottiene di conseguenza il seguente valore del coefficiente di sicurezza:

$$\rho = \text{domanda} / \text{capacità} = V_{Ed}/V_{Rd} = 0.687$$

11.2.3 *Indice di rischio delle spalle*

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R delle spalle, ottenuto confrontando l'accelerazione di picco al suolo che porta alla rottura dell'elemento (PGA di capacità), con l'accelerazione di picco al suolo attesa nel sito (PGA di domanda). Nel caso in esame considerato l'esito delle verifiche si può indicare:

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d}$$

meccanismo duttile

	capacità	domanda
PGA [g]	> 0.249	0.249
TR [anni]	> 475	475
IR	> 1	

meccanismo fragile

	capacità	domanda
PGA [g]	> 0.249	0.249
TR [anni]	> 475	475
IR	> 1	

12. CONCLUSIONI

Come risultato dell'analisi di vulnerabilità del cavalcavia in oggetto, si riportano gli indici di rischio I_R per i meccanismi indagati, quindi l'indice di rischio dell'opera (I_R minimo):

Viadotto VI 14				
ELEMENTO	MECCANISMO	PGA CAPACITÀ [g]	PGA DOMANDA [g]	I_R
Appoggi SLV	resistenza	0.140	0.233	0.600
Perdita appoggio SLC	cinematico	> 0.285	0.285	> 1
Spalle SLV	pressoflessione	> 0.233	0.233	> 1
Spalle SLV	taglio	0.233	0.233	1.00
OPERA				0.60

Viadotto VI 15				
ELEMENTO	MECCANISMO	PGA CAPACITÀ [g]	PGA DOMANDA [g]	I_R
Appoggi SLV	resistenza	0.136	0.249	0.545
Perdita appoggio SLC	cinematico	> 0.295	0.295	> 1
Spalle SLV	pressoflessione	> 0.249	0.249	> 1
Spalle SLV	taglio	> 0.249	0.249	>1
OPERA				0.545

La vulnerabilità sismica dell'opera è determinata dalla resistenza degli appoggi, che non sono in grado di fornire l'adeguata resistenza per l'azione sismica di progetto.