

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 NV 05

SCALA:

-

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

I A 5 F 0 1 D 0 9 C L N V 0 5 0 0 0 0 1 A

R	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Appro	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Definitiva	I. Lardani	Lug. 2019	S Di Spigno	Lug. 2019	F. Gernone	Lug. 2019	A. Vittozzi

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Cedline degli Ingegneri della Provincia di Roma
N° A.20783

File: IA6F03D09CLNV0500001A

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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

INDICE

1.	INTRODUZIONE	4
2.	RIFERIMENTI NORMATIVI	6
3.	ELABORATI DI RIFERIMENTO	6
4.	MATERIALI	7
5.	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO DI FONDAZIONE	7
6.	DESCRIZIONE DELL'OPERA	8
6.1	Descrizione delle carpenterie e delle armature	10
7.	ANALISI DEI CARICHI	14
7.1	Carichi permanenti g1, g2	14
7.2	Spinta del terreno	17
8.	AZIONE SISMICA	19
9.	FATTORE DI COMPORTAMENTO	25
10.	METODO DI ANALISI	25
10.1	Metodo di analisi delle pile - Ponti isostatici con pile a fusto unico (Reluis)	26
11.	RISULTATI DELLE ANALISI	29
11.1	Sistema fondazione-pila-appoggio-impalcato (modello 1)	29
11.2	Sistema fondazione-pila-impalcato (modello 2)	31
12.	VERIFICHE DI SICUREZZA	32
12.1	Appoggi	32
12.1.1	Indice di rischio in spostamento degli appoggi	34
12.1.2	Perdita dell'appoggio	35
12.1.3	Indice di rischio per perdita dell'appoggio	36
12.2	Pile	37
12.2.1	Curve di capacità delle pile	37
12.2.2	Verifica dei meccanismi duttili (spostamento)	40
12.2.3	Verifica dei meccanismi fragili (taglio)	44
12.2.4	Indice di rischio in resistenza delle pile	46
12.3	Verifica strutturale dei pali di fondazione	47
12.3.2	Indice di rischio in resistenza dei pali	53

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

13. CONCLUSIONI54

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	<i>Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente relazione è la definizione della vulnerabilità sismica del Cavalcavia NV05 – cavalcavia Provinciale Papalione 18+662 (ex18+486), che scavalca la linea Ferrandina Matera.

L'opera si compone di 3 campate da 21m con un impalcato di larghezza 13m e schema statico di travi poggiate.



Figura 1 – Vista dell'opera

La risposta sismica dell'opera determina delle soggezioni alla sicurezza della sottostante linea ferroviaria. Pertanto il presente studio è volto a valutare l'entità di tali soggezioni. Considerata la tipologia di opera, l'obiettivo ricercato è ottenibile attraverso l'esecuzione di un'analisi sismica del cavalcavia limitata alle sole strutture relative alla campata di scavalco.

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

- Collasso degli elementi verticali
- Collasso degli apparecchi d'appoggio;
- Perdita d'appoggio delle travi;
- Collasso delle fondazioni.

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	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 di calcolo	35
Sezioni trasversali impalcato	31
Pianta e sezioni long	40
Carpenteria spalle e fondazioni	41
Armatura spalle pile	42
Sezione trasversale e trave	43

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

4. MATERIALI

La tabella seguente riassume le caratteristiche dei materiali impiegate nell'analisi sismica dell'opera, rimandando, per maggiori informazioni circa prove effettuate e livello di conoscenza raggiunto alla specifica relazione illustrativa (IA5F03D09ROVI0000003A).

Pile	Meccanismi duttili	Meccanismi fragili
resistenza a compressione cls f_c (Mpa)	16.67	11.11
resistenza a trazione armatura f_y (Mpa)	312.5	272.7
deformazione ultima del calcestruzzo ϵ_{cc}	0.35%	-
deformazione di snervamento armatura ϵ_{sy}	0.19%	-
deformazione ultima armatura ϵ_{su}	4.0%	-

5. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

Dalle indagini effettuate sono stati ricavati i seguenti parametri per il terreno di fondazione:

Tipo di terreno	Argille subappenniniche [1 - 35] m	
Peso di volume	γ [kN/m ³]	18
Coesione drenata	c' [kPa]	20-30
Angolo di resistenza al taglio	ϕ' [°]	22-23
Resistenza a taglio non drenata	c_u [kPa]	60-400
Velocità delle onde di taglio	V_s [m/s]	160-500
Modulo di deformazione a taglio	G_0 [MPa]	50-300
Modulo di deformazione elastico	E_0 [MPa]	100-800

La falda si trova a 6m di profondità dal piano campagna.

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

6. DESCRIZIONE DELL'OPERA

L'opera oggetto delle analisi è un cavalcavia stradale che attraversa la linea ferroviaria Ferrandina-Matera a binario singolo, di lunghezza complessiva 63m. Il cavalcavia è costituito da tre campate in c.a.p. in semplice appoggio di luce pari a 21m (Lc=19.50m); l'opera presenta uno sghembo di 51° rispetto all'asse ferroviario.

Le pile sono realizzate da setti in c.a. a sezione rettangolare piena di spessore di poco superiore a un metro e mezzo. Le altezze delle due pile sono pari a 8m. Le fondazioni sono di tipo profondo su pali D800.

Le spalle sono costituite da strutture scatolari in c.a. (muro frontale di spessore 1.80m, muri andatori di spessore variabile tra 1.00m e 0.75m, zattera di fondazione di spessore 1.50m) con fondazione su pali D800.

Di seguito le tabelle riassuntive dei dati del cavalcavia in esame:

n° Pila	H pila [m]	dim. Fusto	Tipo Fondaz.	Dim. plinto	sp. Plinto [m]	n° pali	φ pali [mm]
P1	8	14.80x 1.54	su pali	15.44 x 6.43	1.5	8	800
P2	8	14.80x 1.54	su pali	15.44 x 6.43	1.5	8	800

Spalla	H muro [m]	sp. Muro [m]	Tipo Fondaz.	Dim. plinto	sp. Plinto [m]	n° pali	φ pali [mm]
SP. A	8	1.8	su pali	16.08x11.06	1.5	16	800
SP. B	5	1.8	su pali	16.08x11.07	1.5	16	800

Le travi d'impalcato poggiano su cuscinetti in gomma armata di dimensioni 14.5cm x 39.5cm x 4cm.

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

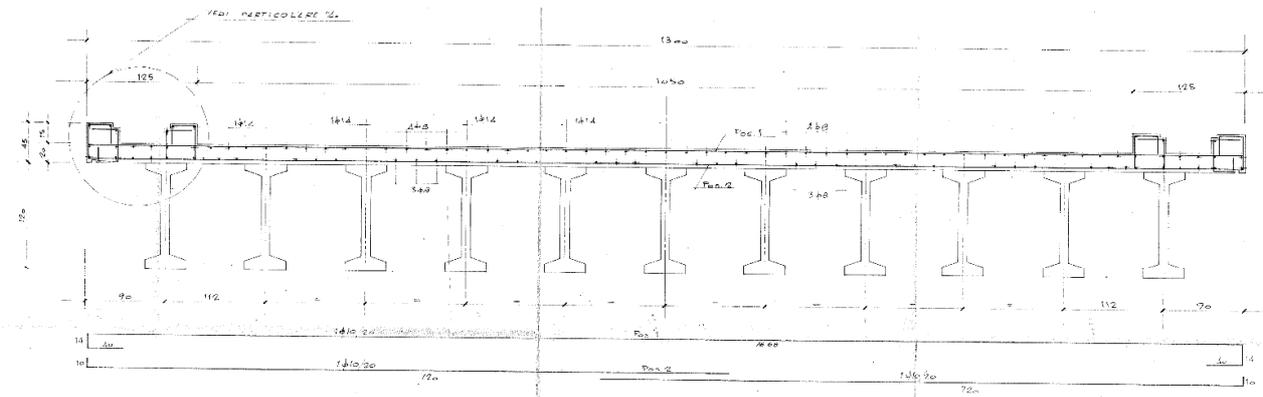


Figura 2 - Sezione trasversale impalcato

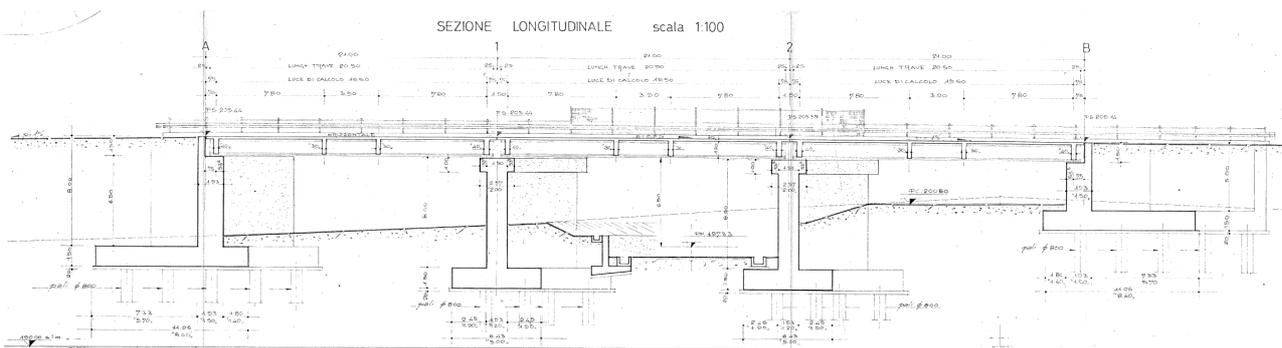


Figura 3 - Sezione Longitudinale

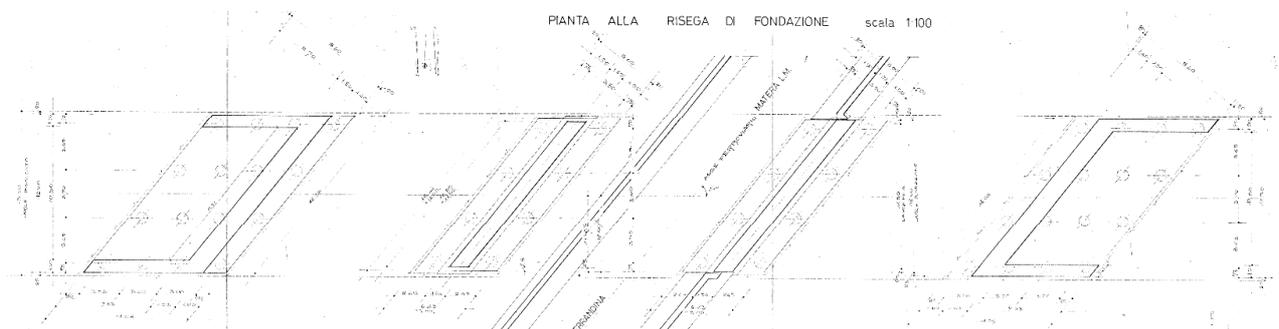


Figura 4 - Pianta

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

6.1 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; confermate dalle indagini realizzate sull'opera di cui alla relazione IA5F03D09ROVI0000003A. In particolare, per le analisi di interesse della presente relazione, si riporta il dettaglio delle armature delle pile:

armatura pile

plinto	longitudinali	sup	fi16/25
		inf	fi16/25
	trasversali	sup	fi16/25
		inf	fi26/12.5
	staffe		fi16/75x75

fusto	longitudinali	lato lungo	2x 92fi22
		lato corto	2x 8fi22
	staffe	fusto	fi12/75x75
		pulvino	fi14/12.5

I pali di fondazione, hanno diametro $d=0.8m$ e armatura costituita da:

armatura pali

sez 1	long	12fi18
	anelli	fi20/250
spirale superiore		fi8/10
sez 2	long	16fi18
	anelli	fi20/250
spirale inferiore		fi8/20

Di seguito il dettaglio delle tavole di progetto:

ARMATURA PALI ϕ 800

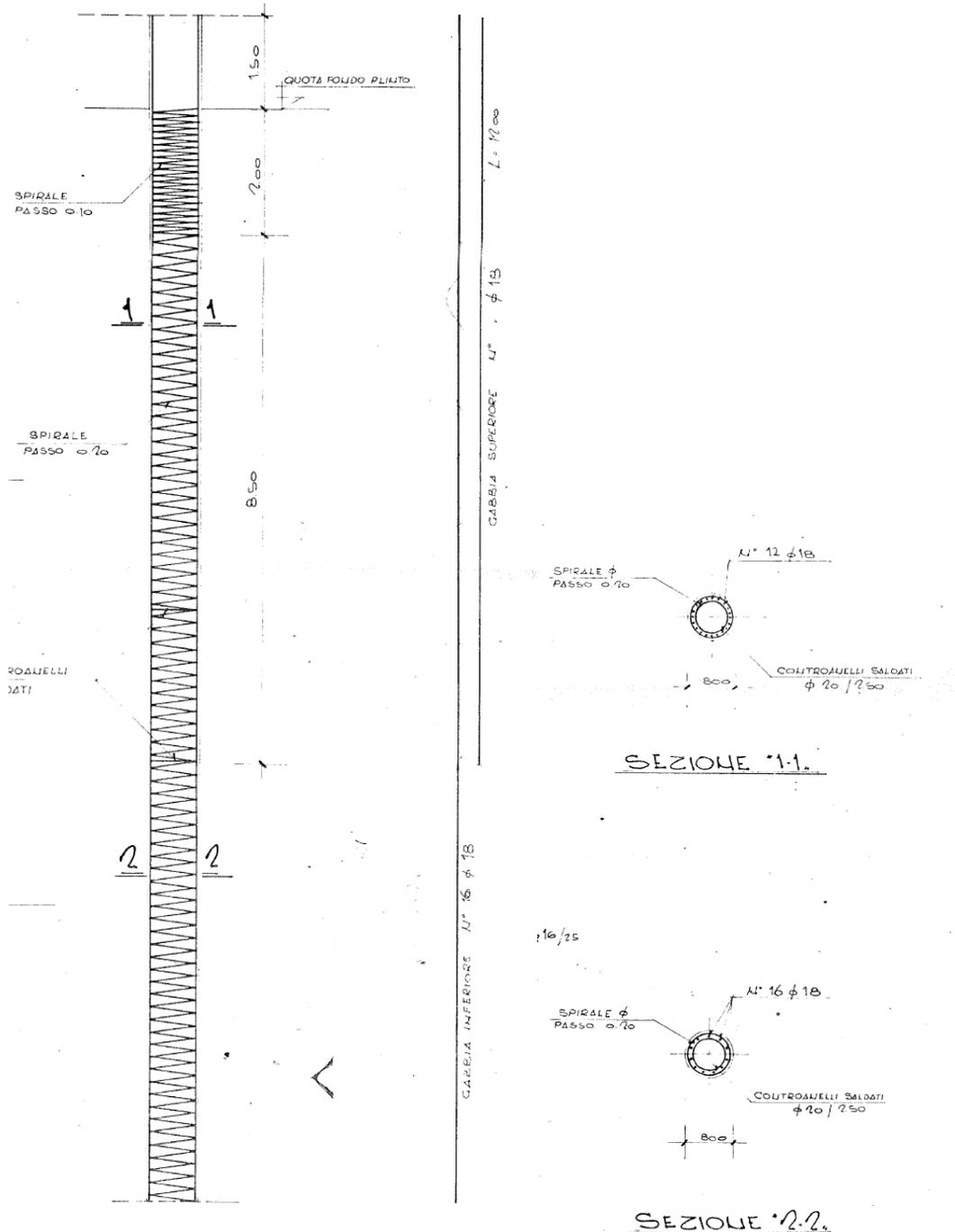


Figura 6 – Armatura del palo di fondazione



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

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione di calcolo-
Vulnerabilità NV05

COMMESSA

LOTTO

CODIFICA

DOCUMENTO

REV.

FOGLIO

IA5F

01

CL

NV0500001

A

13 di 54

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	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:

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

Bitume per pavimentazione:

$$\gamma_p = 20.00 \text{ KN/m}^3$$

Impermeabilizzante:

$$\gamma_i = 0.30 \text{ KN/m}^2$$

7.1 Carichi permanenti g1, g2

impalcato

travi

L trave	19.5	m
area trave	0.21	m ²
peso trave	5.25	kN/m
num travi	11	-
L trave	20.5	m
peso tot travi	1184	kN

trasversi

L trasversi	11.66	m
h trasversi	1.2	m
spessore trasversi testata	0.4	m
num trasversi testata	2	-
spessore trasversi campate	0.3	m
num trasversi campata	2	-
peso trasversi testata	280	kN
peso trasversi campata	210	kN

Pila

pulvino

h 1.00 m

B 12.50 m

L 2.00 m

peso pulvino **625 kN**

fusto

b 11.50 m

sp 1.54 m

H 8.00 m

peso pila **3542 kN**

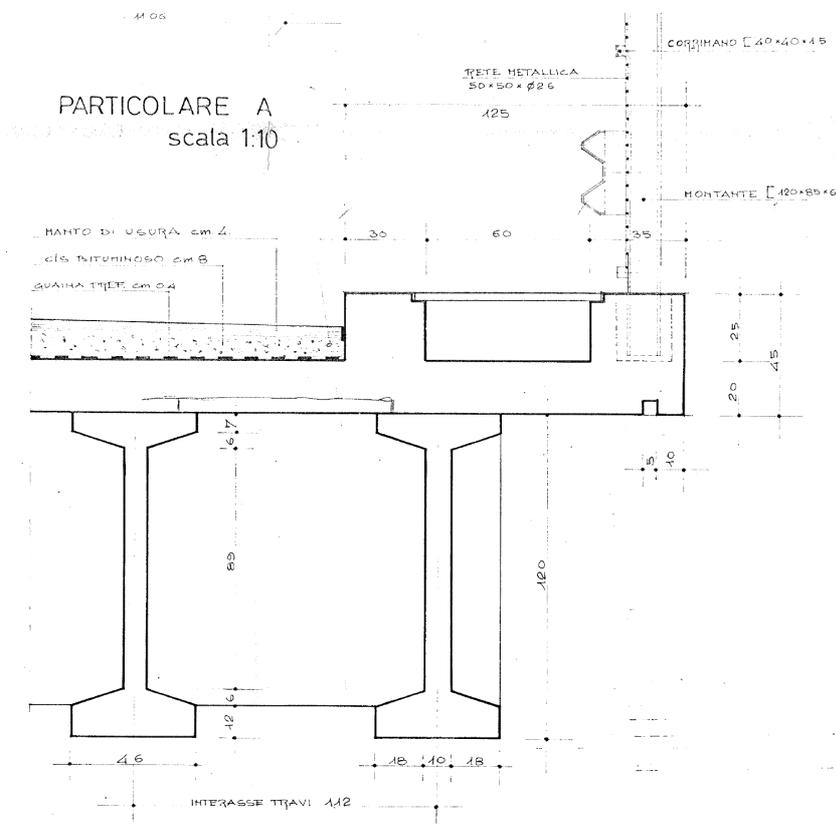


Figura 7 – Dettaglio pavimentazione

7.2 Spinta del terreno

Ai fini della valutazione delle sollecitazioni agenti in testa ai singoli pali di fondazione si considera, in aggiunta ai carichi provenienti dalla sovrastruttura, la spinta del terreno che agisce in direzione longitudinale, per una larghezza pari a quella del fusto della pila.

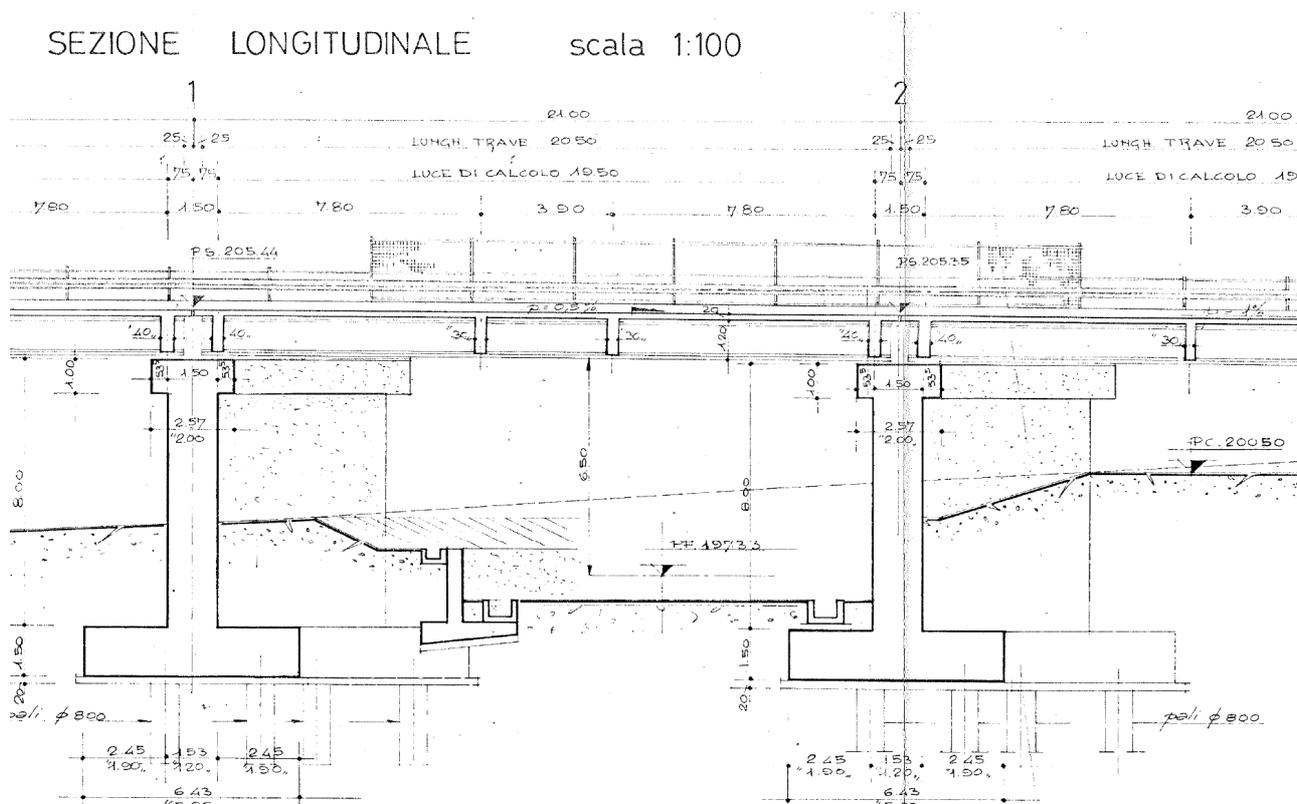


Figura 8 – dettaglio sezione longitudinale – rinterro pila

In condizione statica si considera una spinta triangolare a riposo, la cui risultante (per metro lineare di profondità) è data dall'espressione:

$$S_{statica} = \frac{1}{2} * k_0 * \gamma * h^2$$

Dove $k_0 = 1 - \text{sen}(\varphi')$

In condizione sismica si aggiunge la sovrappinta sismica ΔS (al metro di profondità), valutata secondo quanto previsto dall'EC8-5 Appendice E9:

$$\Delta S_{sismica} = PGA * \gamma * h^2$$



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

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione di calcolo-
Vulnerabilità NV05

COMMESSA

LOTTO

CODIFICA

DOCUMENTO

REV.

FOGLIO

IA5F

01

CL

NV0500001

A

18 di 54

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

8. 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 x 1 = 50 [anni]
Categoria di sottosuolo	=	C

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.

Per la determinazione della categoria di sottosuolo si fa riferimento alla relazione IA5F03D09ROVI0000003A.

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

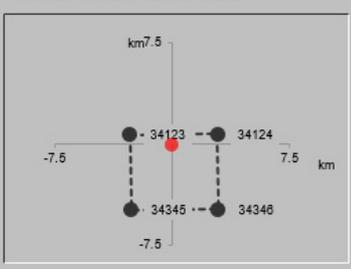
Grafici spettri di risposta

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

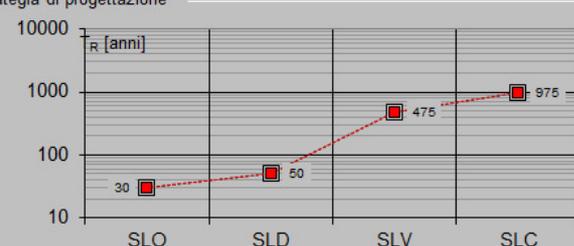
Tabella parametri azione

LEGENDA GRAFICO

----□---- Strategia per costruzioni ordinarie

----■---- Strategia scelta

Strategia di progettazione



SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	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

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_o 3 Regol. in altezza si ▼ info

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

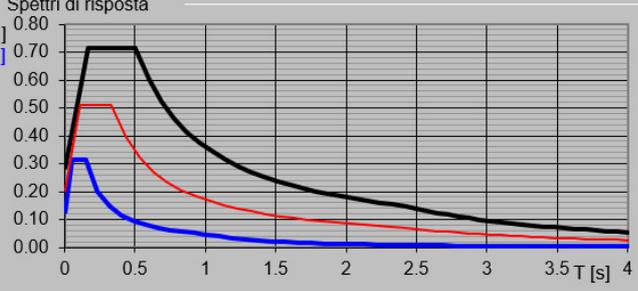
Elaborazioni
 Grafici spettri di risposta ▶▶▶
 Parametri e punti spettri di risposta ▶▶▶

$S_{d,o}$ [g]

$S_{d,v}$ [g]

S_e [g]

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

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

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

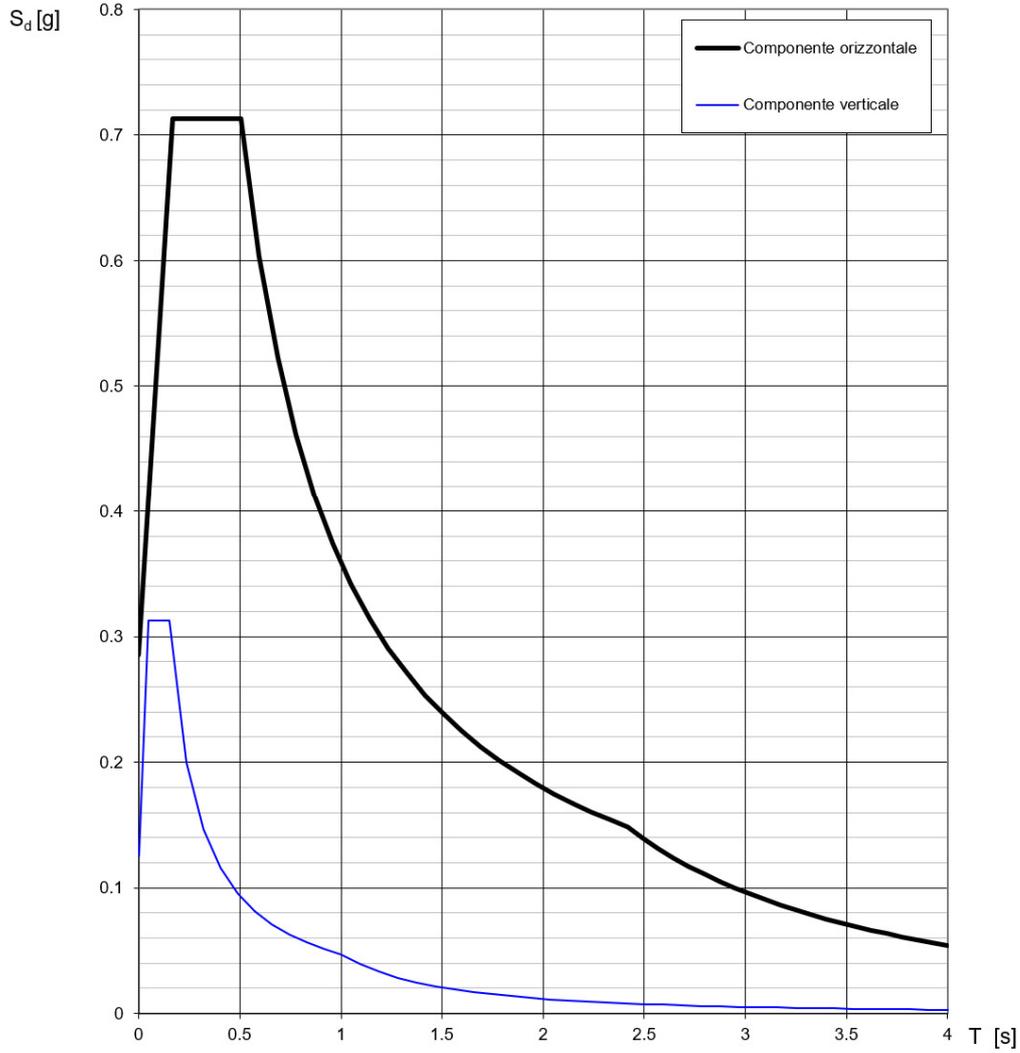


Figura 9- Spettro elastico SLC

Stato limite di danno - SLD

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato **SLD** info

Risposta sismica

Categoria di sottosuolo **C** info

$S_S =$ 1.500

$C_C =$ 1.556 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

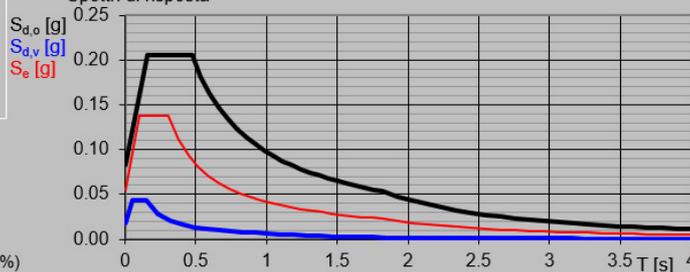
Elaborazioni

Grafici spettri di risposta

Parametri e punti spettri di risposta

- 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: SLD

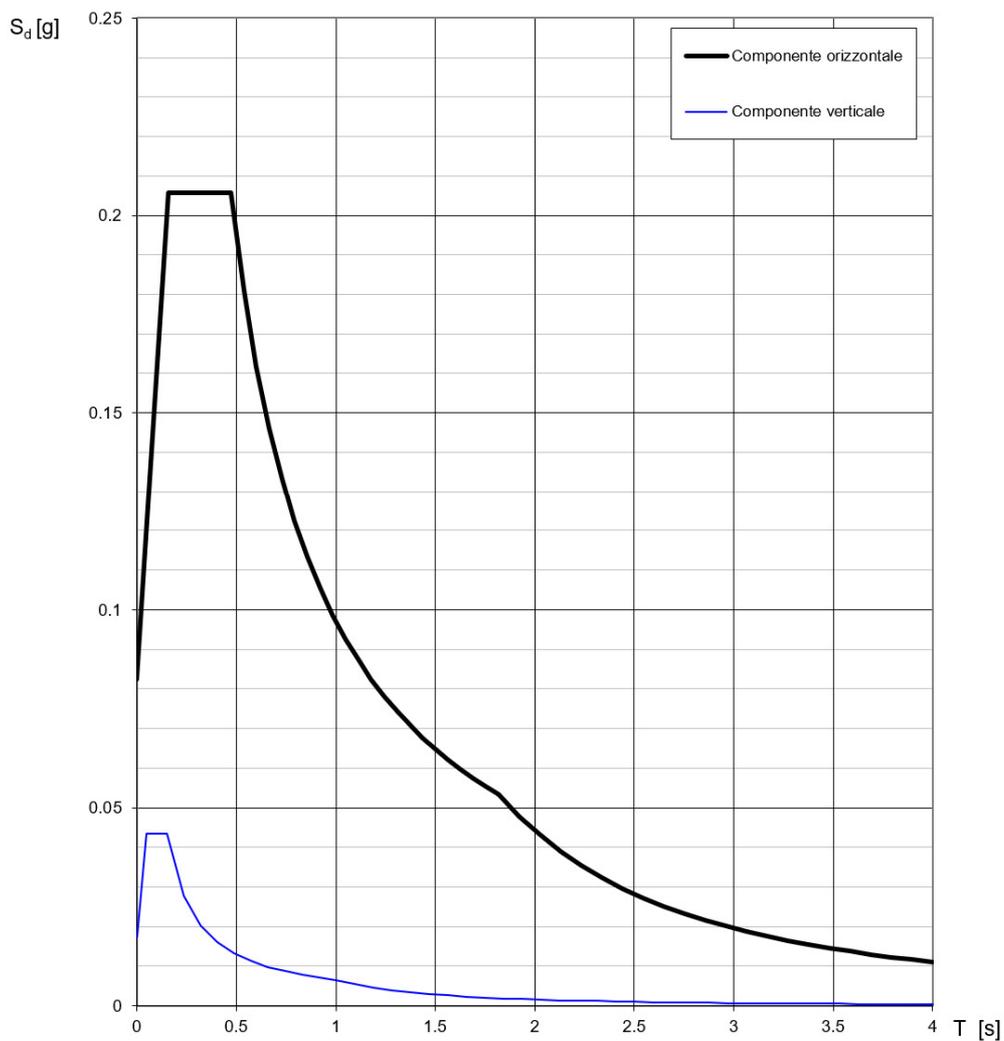


Figura 10- Spettro elastico SLD

	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

9. FATTORE DI COMPORTAMENTO

Il fattore di struttura viene utilizzato, ove non si eseguano delle analisi dinamiche in campo non lineare, secondo quanto indicato al par. 3.2.3.5 delle NTC18, quale fattore riduttivo delle forze corrispondenti allo spettro elastico che “... *tiene conto in modo semplificato della capacità dissipativa anelastica della struttura, della sua sovraresistenza, dell’incremento del suo periodo proprio a seguito delle plasticizzazioni ...* “. Per la struttura in esame viene scelto un **fattore di struttura** minimo pari ad **1.5**, in accordo con la tab. 7.3.II delle NTC18.

10. METODO DI ANALISI

Lo schema statico del cavalcavia in esame, dal punto di vista dei carichi verticali, può essere considerato ad impalcati semplicemente poggianti su ogni singola campata in quanto sono presenti, in corrispondenza di ciascuna pila, dei giunti di espansione in soletta.

Per quanto riguarda invece il comportamento statico e soprattutto dinamico nel piano orizzontale dell’impalcato, esso è fortemente influenzato da quello degli appoggi elastomerici armati su cui sono disposte le travi, infatti questi particolari tipi di apparecchio realizzano un vincolo intermedio tra gli apparecchi di tipo fisso e quelli di tipo mobile. In effetti essi permettono le rotazioni intorno ad un qualsiasi asse e le traslazioni in una qualunque direzione del loro piano. Gli spostamenti consentiti mobilitano però delle reazioni antagoniste che tendono a far riprendere agli apparecchi la loro configurazione indeformata. La caratteristica di questi appoggi è pertanto quella di trasmettere sotto forma di reazioni antagoniste delle spinte orizzontali di intensità proporzionale alle corrispondenti traslazioni. Ne consegue che un apparecchio di appoggio in gomma può essere considerato sia come un appoggio fisso con limitazione della reazione orizzontale, sia come un appoggio mobile con limitazione della traslazione consentita.

Alla luce di quanto appena descritto la struttura in esame dovrebbe essere considerata come iperstatica, tuttavia nel caso in esame si assume la semplificazione di trattare l’opera come isostatica e di analizzare la vulnerabilità sismica delle sole strutture che interessano la campata centrale di scavalco della ferrovia. Infatti l’attenzione dello studio di vulnerabilità è concentrato sull’infrastruttura ferroviaria e d’altronde l’assunzione di isostaticità risulta senz’altro conservativa per le pile centrali nella situazione attuale, mentre per la situazione di progetto rappresenta la condizione realistica, qualora, come ragionevolmente ci si attende, l’intervento di miglioramento/adequamento sismico si risolva nella sostituzione degli appoggi e/o l’introduzione di ritegni sismici.

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

Sotto tali ipotesi l'analisi sismica dell'opera prende spunto dalla procedura semplificata proposta in "Linee guida e manuale applicativo per la valutazione della sicurezza sismica e il consolidamento dei ponti esistenti in c.a." (Reluis), introducendo degli adattamenti opportuni, legati alla presenza dei dispositivi di appoggio in gomma.

La risposta sismica dell'opera viene valutata impiegando due modelli distinti:

- 1) Il primo modello analizza la risposta sismica del sistema composto da 4 elementi *fondazione-pila-appoggio-impalcato*.
- 2) Nel secondo modello la risposta sismica viene analizzata omettendo il contributo di deformabilità e flessibilità dell'appoggio in gomma, considerando cioè l'impalcato rigidamente connesso alla pila (sistema con tre elementi *fondazione-pila-impalcato*).

Il primo modello viene impiegato per verificare gli attuali dispositivi di appoggio e la sicurezza nei confronti della caduta dell'impalcato per perdita d'appoggio delle travi, mentre il secondo modello viene utilizzato per verificare la capacità resistente delle sottostrutture (pile e fondazioni).

Nel paragrafo seguente si riporta la descrizione del metodo originale proposto da Reluis

10.1 Metodo di analisi delle pile - Ponti isostatici con pile a fusto unico (Reluis)

Il modello di riferimento è costituito da una mensola verticale a massa distribuita lungo l'altezza, sulla quale grava la massa del pulvino e dell'impalcato. In direzione trasversale all'asse del ponte ogni pila costituisce in tutti i casi un oscillatore indipendente, mentre in direzione longitudinale, nell'ipotesi che siano previsti dei ritegni sismici, il sistema è ancora a un grado di libertà, caratterizzato dalla somma delle masse afferenti alle singole pile e dalla forza di richiamo somma delle forze delle singole pile.

Il procedimento proposto consiste in un'analisi statica non lineare semplificata, nella quale il legame forza-spostamento in sommità dell'oscillatore considerato si ottiene con semplici passaggi a partire dai legami momento-curvatura alla base delle pile.

La massa efficace della pila da considerare concentrata in sommità è data, per pile a sezione costante, dalla somma del 30% della massa della pila e della massa del pulvino.

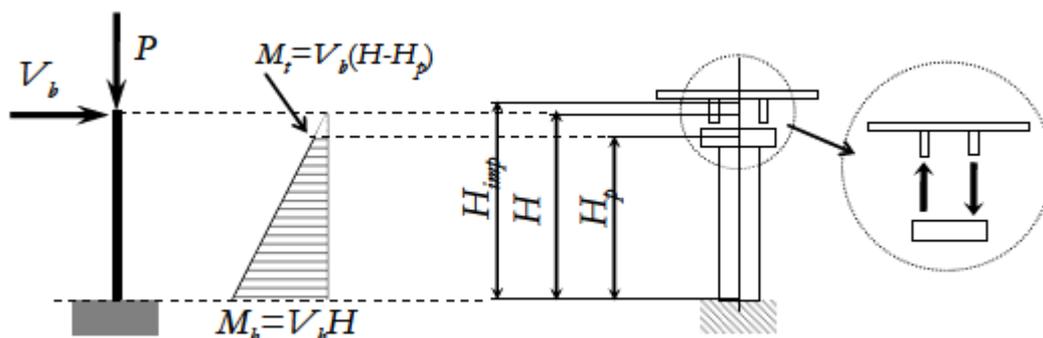
La massa totale per la generica pila vale quindi:

$$m = 0.3m_{pila} + m_{puls} + m_{imp}$$

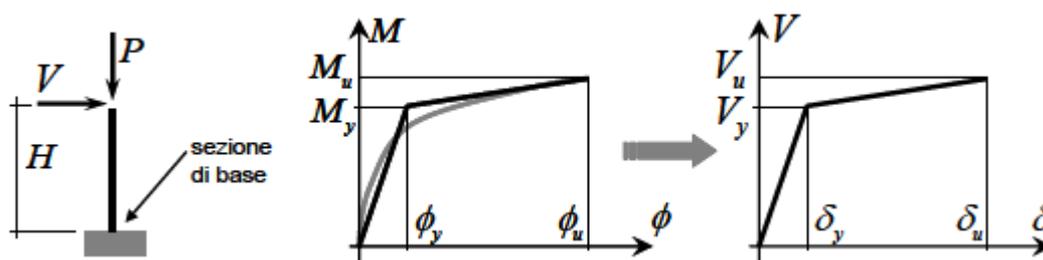
L'altezza di tale massa dalla base per l'analisi in direzione trasversale è data dall'espressione:

$$H \cong \frac{(m_{puls} + 0.3m_{pila})H_p + m_{imp}H_{imp}}{m}$$

Per l'analisi in direzione longitudinale, l'altezza efficace è pari alla distanza del piano degli apparecchi di appoggio dall'estradosso della fondazione.



Il primo passo consiste nella determinazione del legame momento-curvatura della sezione di base nel piano di flessione considerato e per il valore del carico assiale agente. La curva così ottenuta viene successivamente bilinearizzata come indicato schematicamente.



Nell'ipotesi che la pila si mantenga in campo elastico fino al raggiungimento del momento di snervamento M_y alla base, il corrispondente spostamento in sommità è dato dall'espressione:

$$\delta_y = \frac{1}{v} \phi_y H^2 / 3$$

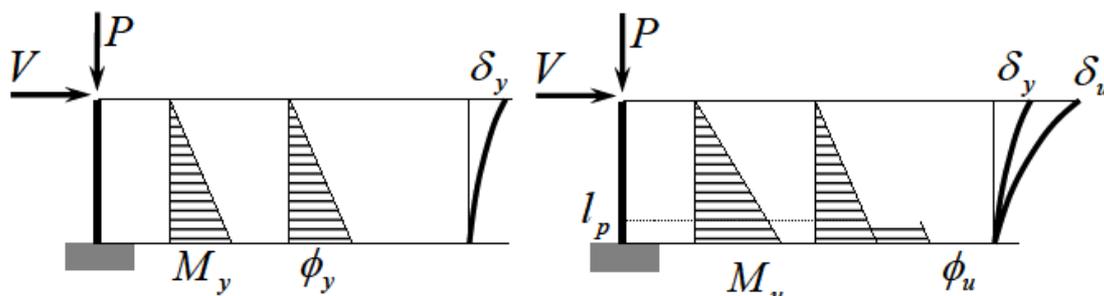
Dove la curvatura di snervamento ϕ_y risulta dalla bilinearizzazione del legame di sezione e $v = 1.2$ è il fattore di correzione che tiene conto della maggiore rigidezza della porzione al di sopra della zona plasticizzata.

Lo spostamento ultimo in sommità della pila si ottiene aggiungendo a quello di snervamento il contributo della rotazione plastica nella zona plasticizzata alla base:

$$\delta_s = \delta_y + (\phi_s - \phi_y) \cdot l_p (H - l_p / 2)$$

dove ϕ_u è la curvatura minima tra quelle corrispondenti allo schiacciamento del calcestruzzo, $\epsilon_{cum} = \epsilon_{c,max}$, e alla rottura per trazione dell'acciaio, $\epsilon_{sum} = \epsilon_{s,max}$. Per l'estensione della porzione di pila soggetta a plasticizzazione si può fare riferimento all'espressione:

$$l_p \approx 0.10 \cdot H_p$$



In direzione trasversale il periodo elastico della singola pila si ottiene dall'espressione:

$$T = 2\pi \sqrt{m_i / k} = 2\pi \sqrt{m_i \delta_y / V_y}$$

Il corrispondente spostamento massimo, da utilizzare ai fini della verifica di deformabilità della pila, è fornito dallo spettro di risposta elastico in spostamento:

$$\delta_{max} = S_{D_e}(T) \quad T \geq T_c \text{ o } q^* \leq 1$$

$$\delta_{max} = \frac{S_{D_e}(T)}{q^*} \left[1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T} \right] \quad T < T_c$$

Dove:

$$q^* = m S_e(T) / V_y$$

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

11. RISULTATI DELLE ANALISI

11.1 Sistema fondazione-pila-appoggio-impalcato (modello 1)

La fondazione, in quanto di tipo profondo, viene schematizzata come un incastro alla base della pila, mentre l'impalcato è considerato esclusivamente come massa eccitata. Pertanto lo schema di riferimento per l'analisi dinamica risulta quello di una mensola caratterizzata da una rigidità elastica ottenuta dal funzionamento in serie dell'elemento pila e appoggi (per ciascuna direzione d'analisi).

$$K_1 = \left(\frac{1}{K_{pila}} + \frac{1}{K_{appoggi}} \right)^{-1}$$

dove

$$K_{pila} = \frac{3EJ}{H^3}$$

$$K_{appoggi} = n \frac{G_g A_g}{s}$$

con

EJ rigidità elastica della sezione in c.a. rispetto alla direzione analizzata

H altezza della pila

n numero di appoggi

G_g modulo di taglio della gomma (neoprene) che salvo diversa indicazione di assume pari a 0.9MPa

A_g area in pianta del singolo appoggio

s spessore netto della gomma del cuscinetto di appoggio

In definitiva la risposta elastica del sistema è caratterizzata da un periodo di vibrazione (per ciascuna direzione considerata)

$$T_1 = 2\pi\sqrt{M/K_1}$$

con M massa dell'impalcato calcolata secondo la procedura suggerita da Reluis.

rigidezza pile 1 e 2

b	11.50	m
sp	1.54	m
H trasv	9.86	m
H long	8.00	m
E cls	32000	Mpa
E cls	3.20E+07	KN/m2

	J trasv	195.2	m ⁴
	J long	3.50	m ⁴
3EJ/H ³	K trasv	1.96E+07	kN/m
	K long	6.56E+05	kN/m

Dove H trasversale è stata calcolata considerando i seguenti parametri:

m pulvino	625	kN
m pila	3542	kN
m imp	3918	kN
m	5606	kN
Hp	8.5	m
H imp	10.44	m

rigidezza appoggio

l1	0.145	m
l2	0.395	m
A	0.057	m ²
num strati gomma	4	-
sp 1 strato	0.01	m
s_tot	0.04	m
G	900	kN/m ²
num appoggi	11	-
K neoprene=GA/sp.	1289	kN/m
K tot app.	1.42E+04	kN/m

rigidezza totale

K trasv.	1.42E+04	kN/m
K long.	1.39E+04	kN/m

calcolo periodo

M	571	ton
T trasv	1.262	s
T long	1.275	s

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

11.2 Sistema fondazione-pila-impalcato (modello 2)

Il modello di calcolo è del tutto analogo al precedente con l'unica differenza che non è presente l'elemento di appoggio. Il sistema elastico è dunque governato dal comportamento della pila:

$$K_2 = K_{pila}$$

dove

$$K_{pila} = \frac{V_y}{d_y}$$

V_y e d_y sono rispettivamente il taglio e lo spostamento corrispondenti alla prima plasticizzazione della sezione di base della pila.

In definitiva la risposta elastica del sistema è caratterizzata da un periodo di vibrazione (per ciascuna direzione considerata):

$$T_2 = 2\pi\sqrt{M/K_2}$$

con M massa dell'impalcato calcolata secondo la procedura suggerita da Reluis.

rigidezza di prima plasticizzazione

K trasv.	1.08E+06	kN/m
K long.	9.67E+04	kN/m

calcolo periodo

M	571	ton
T trasv	0.145	s
T long	0.483	s

NB. I diagrammi forza spostamento bilinearizzati sono forniti successivamente nel capitolo relativo alle verifiche delle pile.

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12. VERIFICHE DI SICUREZZA

12.1 Appoggi

La caratteristica fondamentale degli appoggi in neoprene armato è quella di trasmettere sotto forma di reazioni antagoniste delle spinte orizzontali di intensità proporzionale alle corrispondenti traslazioni che parallelamente si verificano tra i loro piani superiore ed inferiore.

Per questi particolari tipi di vincoli quindi le verifiche da effettuare devono essere in generale relative sia alla forza effettivamente trasmissibile che ai massimi spostamenti compatibili con la loro geometria.

La capacità in termini di massimi **spostamenti orizzontali** tra i due piani superiore ed inferiore dell'appoggio può essere stimata, cautelativamente, come:

$$d_{C,app} = h_{gomma}$$

ossia assumendo una deformazione a taglio pari a 45°.

La verifica è soddisfatta se:

$$d_{D,app} \leq d_{C,app}$$

I valori dei coefficienti di sicurezza **p = Domanda/Capacità** vengono prima determinati per le due direzioni principali, longitudinale e trasversale, quindi vengono combinati e verificati secondo la seguente espressione:

$$\sqrt{\left(\frac{D_x}{C_x}\right)^2 + \left(\frac{D_y}{C_y}\right)^2} \leq 1$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

Verifica in spostamento SLC

d tot trasv sisma	0.113	m
d tot long sisma	0.114	m

direzione trasversale

<u>Domanda:</u>	δ pila	0.0001	m
	δ appoggio	0.1124	m
<u>Capacità:</u>	δ max appoggio = sp.	0.04	m
	ρ_y	2.81	

direzione longitudinale

<u>Domanda:</u>	δ pila	0.002	m
	δ appoggio	0.111	m
<u>Capacità:</u>	δ max appoggio = sp.	0.04	m
	ρ_x	2.78	

combinazione delle direzioni

$\rho < 1$	3.95	Non verificato
------------	-------------	-----------------------

Verifica in spostamento SLD

d tot trasv sisma	0.030	m
d tot long sisma	0.031	m

direzione trasversale

<u>Domanda:</u>	δ pila	0.000022	m
	δ appoggio	0.0304	m
<u>Capacità:</u>	δ max appoggio = sp.	0.04	m
	ρ_y	0.76	

direzione longitudinale

<u>Domanda:</u>	δ pila	0.001	m
	δ appoggio	0.030	m
<u>Capacità:</u>	δ max appoggio = sp.	0.04	m
	ρ_x	0.75	

combinazione delle direzioni

$\rho < 1$	1.07	Non verificato
------------	-------------	-----------------------

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12.1.1 Indice di rischio in spostamento degli appoggi

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R degli appoggi 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):

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

SLC	Capacità	Domanda
PGA [g]	0.077	0.286
Tr [anni]	44	975
I_R	0.268	

SLD	Capacità	Domanda
PGA [g]	0.077	0.083
Tr [anni]	44	50
I_R	0.928	

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12.1.2 Perdita dell'appoggio

Per non avere la caduta dell'impalcato dalla sottostruttura, 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	1.393 -
Tc	0.503 s
TD	2.420 s
vs	270 m/s
x	20.5 m
dgi=dgj	0.0853 m
d ij max	0.151 m
d ij (x) = d_{eg}	0.0352 m

 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- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

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

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

d pila 1	0.114 m
d pila 2	0.114 m
d_{es}	0.161 m

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

L	20.5 m
α	1.0E-5 1/°C
Δt	30°C m
d_{Dt}	0.006 m

Si ottiene:

Domanda:

$$d_{tot} = 0.60 \text{ m}$$

Capacità:

$$L_{\text{disponibile appoggio}} = 1.04 \text{ m}$$

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

12.1.3 Indice di rischio per perdita dell'appoggio

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					
	Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12.2 Pile

12.2.1 Curve di capacità delle pile

Le curve di capacità delle pile sono state ricavate attraverso un procedimento semplificato a partire dallo studio della sezione di base, che è stato effettuato con il programma VCA SLU ver. 7.5 del prof. Piero Gelfi a distribuzione gratuita. Questo programma permette di individuare la corrispondenza tra momento e curvatura di sezione, $M-\Phi$, (considerando l'influenza del carico assiale) utilizzando dei legami dei materiali non lineari: un legame elasto-plastico senza incrudimento per l'acciaio ed un legame a parabola-rettangolo per il calcestruzzo (i parametri caratteristici di tali materiali sono quelli già descritti nei precedenti paragrafi).

Il comportamento delle pile è stato schematizzato come quello di una mensola elastica con plasticità concentrata alla base (cerniera plastica), pertanto esso risulta completamente definito dal comportamento della sezione di base.

La curva taglio - spostamento risulta una curva lineare a tratti ottenuta applicando le seguenti relazioni.

1a) **Spostamento di snervamento** $d_y = \frac{1}{v} \varphi_y \frac{H^2}{3}$, con φ_y curvatura di sezione allo snervamento e $v=1.2$ fattore di correzione che tiene conto della maggiore rigidità della porzione al di sopra della zona plasticizzata;

1b) **Spostamento ultimo** $d_u = d_y + (\varphi_u - \varphi_y) l_p (H - \frac{l_p}{2})$, dove φ_u è la curvatura di sezione ultima (corrispondente a $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ e/o $\varepsilon_s = \varepsilon_{su}$) e l_p risulta la lunghezza cerniera plastica assunta pari a $l_p=0.1H$, con H altezza della pila.

A tali spostamenti sono associati i relativi tagli:

2a) $V_y = \frac{M_y}{H}$, con H altezza della pila e M_y momento allo snervamento della sezione di base;

2b) $V_u = \frac{M_u}{H}$, con H altezza della pila e M_u momento ultimo della sezione di base.

Parametri di input

Materiali

cls	fcd = fcm/FC	16.67	MPa
acc	fyd = fym/FC	312.5	MPa

N di compressione = 8085 kN

Sezione resistente direzione longitudinale:

BxH = 1150x154 cm

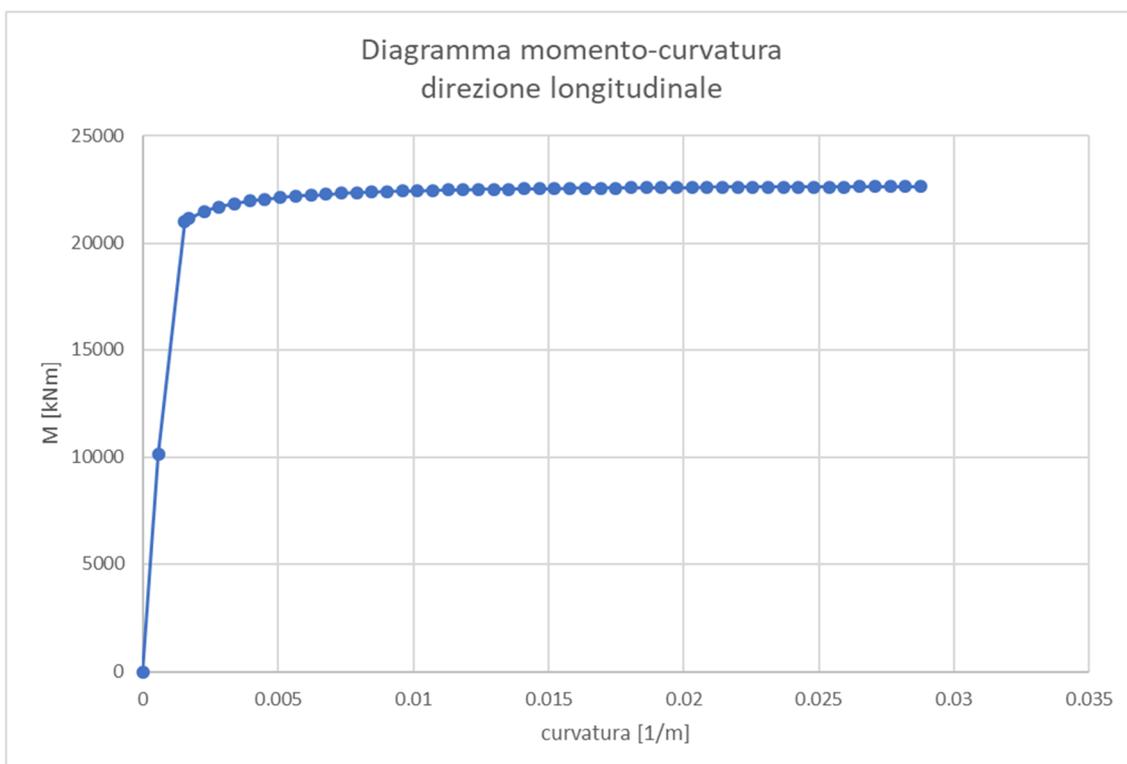
Armatura verticale: 92φ22 = 349.72 cm² per ogni lato

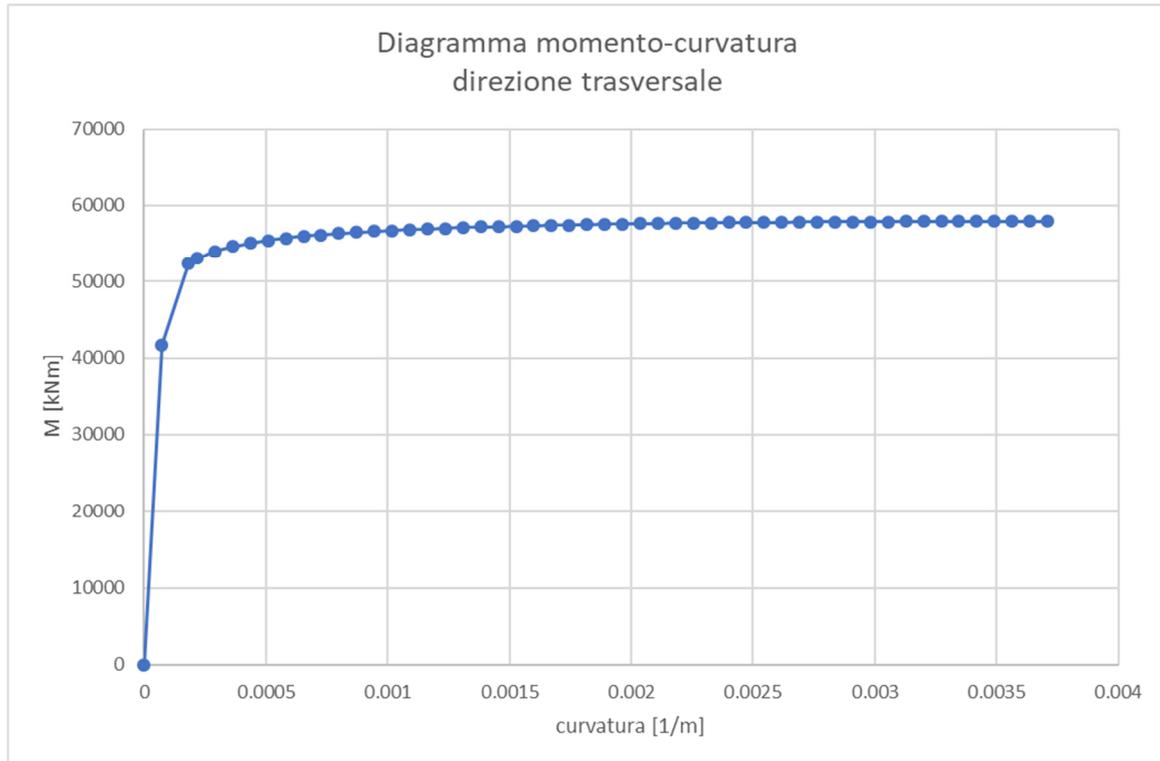
Sezione resistente direzione trasversale:

BxH = 154x1150 cm

Armatura verticale: 8φ22 = 30.41 cm² per ogni lato

Di seguito si riportano i diagrammi momento curvatura delle sezioni di base:





 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12.2.2 Verifica dei meccanismi duttili (spostamento)

Di seguito si riportano le curve taglio-spostamento delle pile, derivanti dalle curve momento-curvatura.

Si assume quale capacità di spostamento in testa pila lo spostamento ultimo diviso un fattore di sicurezza γ_{el} pari a 1.5:

$$d_{c,pila} = \frac{d_u}{\gamma_{el}}$$

La verifica risulta soddisfatta se:

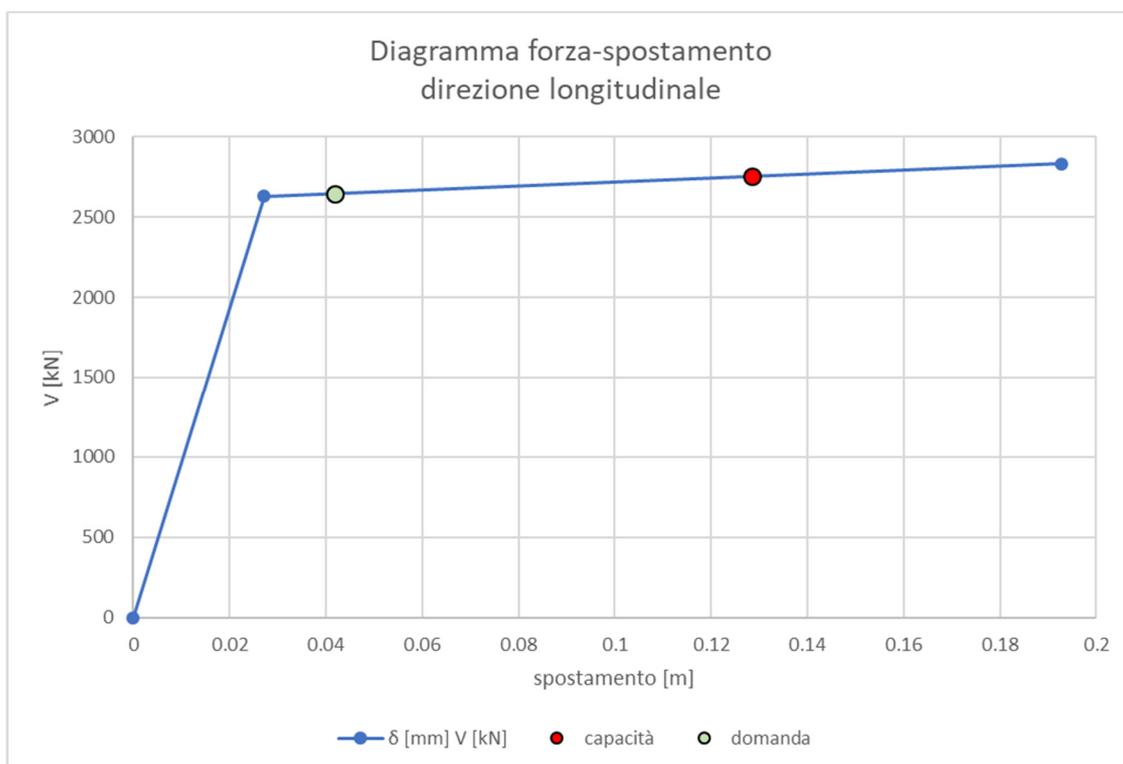
$$d_{D,pila} \leq d_{c,pila}$$

I valori dei coefficienti di sicurezza $\rho = \text{Domanda/Capacità}$ vengono prima determinati per le due direzioni principali, longitudinale e trasversale, quindi vengono combinati e verificati secondo la seguente espressione:

$$\sqrt{\left(\frac{D_x}{C_x}\right)^2 + \left(\frac{D_y}{C_y}\right)^2} \leq 1$$

Direzione longitudinale

H long	8.00 m
massa	5606 kN
l _p	0.80 m
φ _y	1.53E-03 1/m
φ _u	2.88E-02 1/m
δ _y	0.027 m
δ _u	0.193 m
V _u	2830 kN
V _y	2628 kN
k	9.67E+04 kN/m
T	0.483 s
T _c	0.503 s
q*	1.521 -
Se (T)	0.713 g
Sd(T)	0.0413 m
δ max	0.0419 m
δu* = δu / γ _{el}	0.1285 m



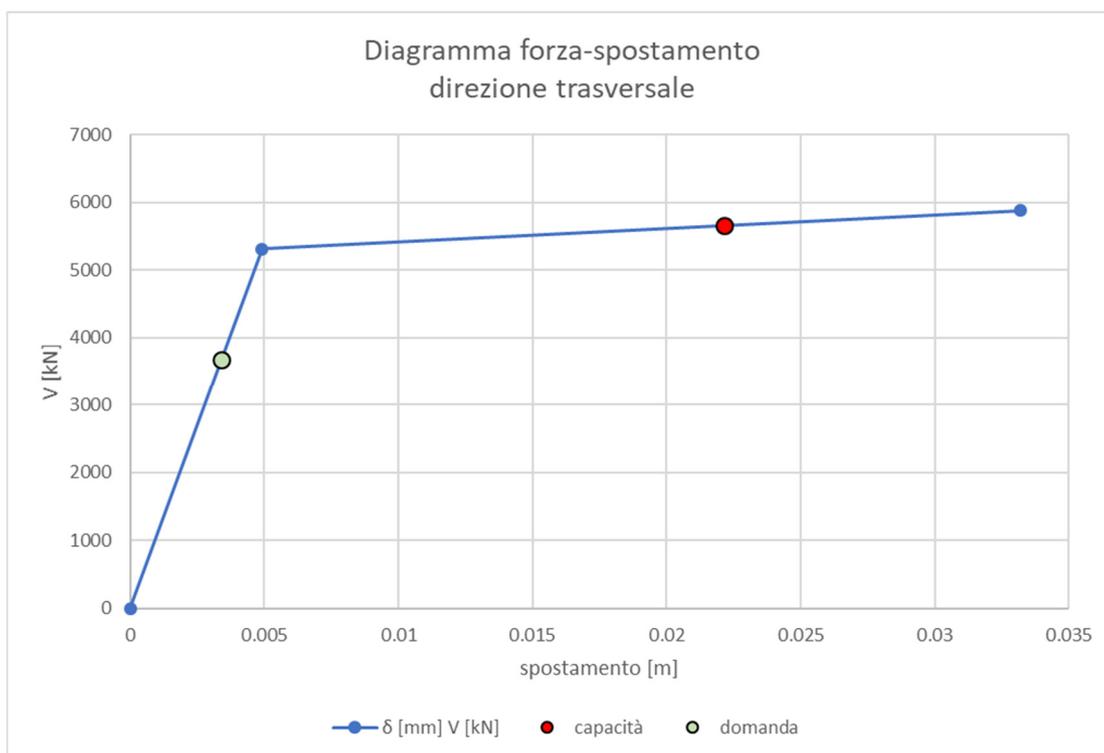
	δ [mm]	V [kN]	k
	0	0	-
δ_y	0.027	2628	96713
δ_u	0.193	2830	1220

	δ [mm]	V [kN]
capacità	0.1285	2752
domanda	0.0419	2646

ρ_{long}	0.33	<1
---------------	------	----

Direzione trasversale

H trasv	9.86 m
massa sommità	5606 kN
lp	0.85 m
ϕy	1.82E-04 1/m
ϕu	3.71E-03 1/m
δy	4.92E-03 m
δu	3.32E-02 m
Vu	5880 kN
Vy	5312 kN
k trasv	1.08E+06 kN/m
T	0.145 s
Tc	0.503 s
q*	1.000 -
Se (T)	0.655 g
Sd(T)	0.003 m
δ max	0.0034 m
$\delta u^* = \delta u / \gamma_{el}$	0.0221 m



	δ [mm]	V [kN]	k
	0	0	-
δy	0.005	5312	1079928
δu	0.033	5880	20103

	δ [mm]	V [kN]
capacità	0.0221	5658
domanda	0.0034	3673

ρ_{trav}	0.15	<1
----------------------	------	----

Combinando i coefficienti nelle due direzioni si ottiene:

$$\rho = 0.361 < 1$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12.2.3 Verifica dei meccanismi fragili (taglio)

La domanda in termini di taglio sulle pile viene ricavata dal diagramma forza spostamento della pila nella direzione analizzata, in corrispondenza dello spostamento sismico atteso per lo stato limite di collasso.

La forza resistente a taglio viene calcolata con la seguente formula, che fornisce la resistenza come somma dei contributi del calcestruzzo, dello sforzo normale e delle armature trasversali:

$$V_u = V_c + V_N + V_s \quad V_c = 0.8A_c k \sqrt{f_c} \quad V_N = N \frac{h-x}{2L_s} \quad V_s = \frac{A_{sw}}{s} f_{yz} [C8.8.5.5]$$

La capacità in termini di taglio alla base della pila viene assunta pari alla resistenza ultima calcolata secondo la formulazione precedente diviso un coefficiente di sicurezza γ_{el} pari a 1.5:

$$V_{C,pila} = V_u / \gamma_{el}$$

La verifica risulta soddisfatta se:

$$V_{D,pila} \leq V_{C,pila}$$

I valori dei coefficienti di sicurezza $\rho = \text{Domanda/Capacità}$ vengono prima determinati per le due direzioni principali, longitudinale e trasversale, quindi vengono combinati e verificati secondo la seguente espressione:

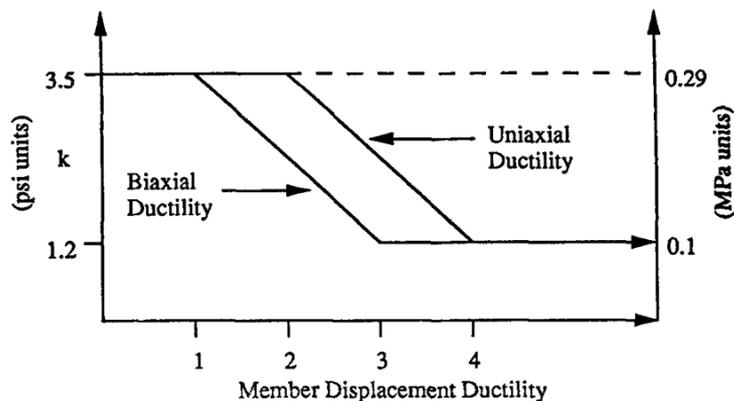
$$\sqrt{\left(\frac{D_x}{C_x}\right)^2 + \left(\frac{D_y}{C_y}\right)^2} \leq 1$$

Di seguito si esplicita il calcolo della resistenza a taglio della pila:

materiali

$f_{cd} = f_{cm} / FC / \gamma_c$	11.1	Mpa
$f_{yd} = f_{ym} / FC / \gamma_s$	271.7	Mpa

Per il calcolo del coefficiente $k(\mu\Delta)$ si fa riferimento al seguente abaco:



Verifica a taglio direzione longitudinale

h	1.54	m	altezza totale sezione
x	0.0994	m	profondità asse neutro
N	8500	kN	sforzo normale compressione
Lv	8.00	m	luce di taglio
Ac	16416000	mm ²	area sez cls interna alle staffe
db	22	mm	diametro medio barre long
As tot	69908.96	mm ²	
$\mu\Delta = \delta \max / \delta y$	1.54	-	duttilità
$k(\mu\Delta)$	0.256	MPa	
fi staffe	12	mm	
passo	750	mm	
Asw	1695.6	mm ²	
n bracci	15	-	
z	1320.30	mm	
Vc	11190	kN	
VN	765	kN	
Vs	811	kN	
Vu	12767	kN	
γ_{el}	1.25		
V domanda taglio	2646	kN	
V resistente sez c.a.	10214	kN	
px	0.259		

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

Verifica a taglio direzione trasversale

h	11.5	m	altezza totale sezione
x	0.665	m	profondità asse neutro
N	8500	kN	sforzo normale compressione
Lv	9.86	m	luce di taglio
Ac	16416000	mm ²	area sez cls interna alle staffe
db	22	mm	diametro medio barre long
As tot	6079.04	mm ²	
$\mu\Delta = \delta \max / \delta y$	0.69	-	duttilità
k($\mu\Delta$)	0.290	MPa	
fi staffe	12	mm	
passo	750	mm	
Asw	226.08	mm ²	
n bracci	2	-	
z	10284.30	mm	
Vc	12695	kN	
VN	4672	kN	
Vs	842	kN	
Vu	18210	kN	
γ_{el}	1.25		
V domanda taglio	3673	kN	
V resistente sez c.a.	14568	kN	
ρ_y	0.252		

Verifica a taglio combinata

ρ_x	0.259	
ρ_y	0.252	
$\rho < 1$	0.362	OK

12.2.4 Indice di rischio in resistenza delle pile

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R delle pile, 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:

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

12.3 Verifica strutturale dei pali di fondazione

Per i plinti fondati su pali si individuano, per la combinazione di carico SLC, le azioni di compressione e taglio derivanti dalle sovrastrutture, calcolate secondo lo schema di redistribuzione rigida delle azioni:

RIPARTIZIONE DELLE SOLLECITAZIONI SUI PALI DI FONDAZIONE

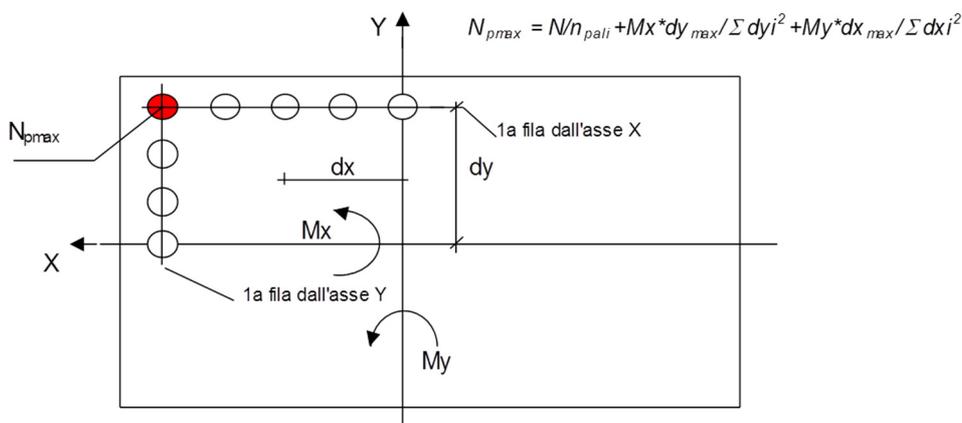


Figura 11– Metodo di calcolo delle azioni sulla palificata

Si effettuano le verifiche a pressoflessione e taglio del palo, considerando le combinazioni delle azioni di verifica corrispondenti rispettivamente allo sforzo assiale massimo, minimo, taglio massimo. Il momento massimo agente sul palo viene valutato considerando la lunghezza elastica del palo

$L_0 = (4E_p * J / E_s)^{1/4}$ dove:

- E_p = Modulo elastico del palo
- E_s = Modulo elastico del terreno = 25 Mpa
- J = Momento di inerzia della sezione del palo

Da cui: $M_{max} = \frac{H L_0}{2}$

Per il viadotto in esame viene assunto un coefficiente $L_0 = 3.30$ m, valore plausibile per il tipo di terreno di fondazione presente in sito.

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

12.3.1.1 Sollecitazioni dei pali di fondazione

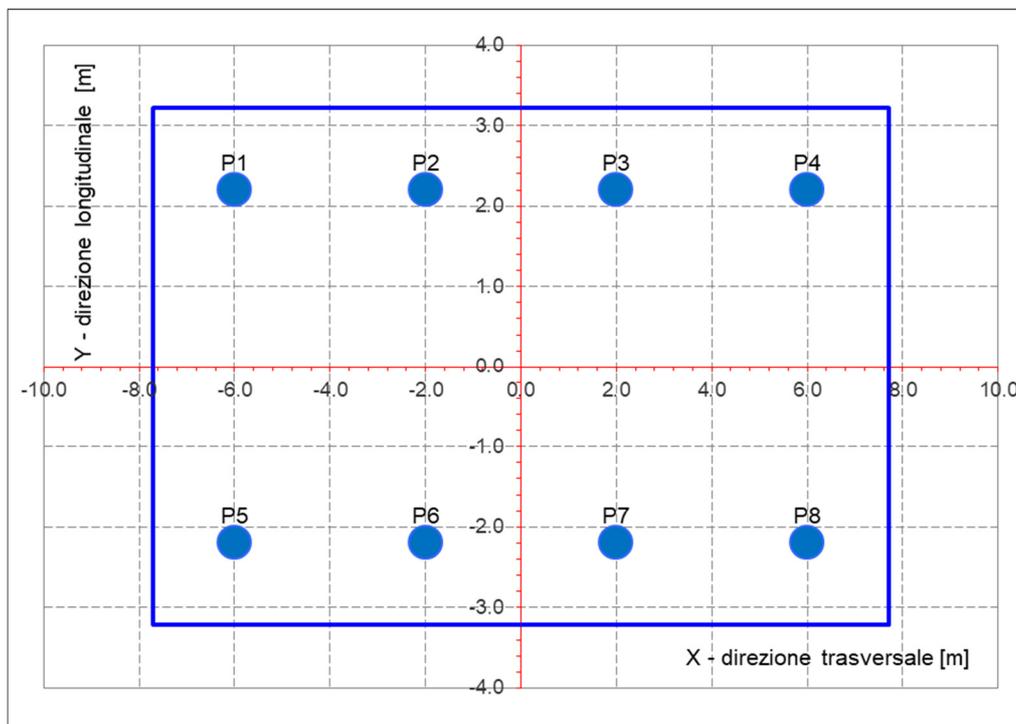
Come descritto nel paragrafo 6.2 della presente relazione, si valutano i contributi di taglio e momento longitudinali, applicati alla base della fondazione, dovuti alla spinta del terreno in condizione statica e sismica (SLC).

h rinterro	3.50	m
γ terreno	18	kN/m ³
φ'	22	°
B pila	12.50	m
h fondaz.	1.50	m
h tot	5.00	m
PGA	0.285	g
$k_0 = 1 - \sin\psi$	0.625	-
S statica	1759	kN
M (S statica)	2932	kNm
ΔS sismica	1606	kN
M (ΔS sismica)	4015	kNm
Fh_long terreno	3365	kN
M long terreno	6946	kNm

Complessivamente, considerando l'azione di spinta del terreno e i carichi derivanti da impalcato e sottostruttura, si sintetizzano nella tabella che segue le sollecitazioni agenti all'intradosso della fondazione in corrispondenza del baricentro della palificata:

	N	M long	M trasv	V long	V trasv
	kN	kNm	kNm	kN	kN
SLC long	11808	32082	0	6011	0
SLC trasv	11808	0	41715	0	3673

Si calcolano gli sforzi assiali in combinazione SLC, ripartiti sui vari pali:



Comb.	Palo 1	Palo 2	Palo 3	Palo 4	Palo 5	Palo 6	Palo 7	Palo 8
SLC long	3299	3299	3299	3299	-347	-347	-347	-347
SLC trasv	-88	955	1997	3040	-88	955	1997	3040

Le sollecitazioni di verifica del palo più sollecitato sono le seguenti:

	N_{max}	N_{min}
	[kN]	[kN]
SLC long	3299	-347
SLC trasv	3040	-88

	T_{media}	M_{max}
	[kN]	[kNm]
	751	1177
	459	719

12.3.1.2 Verifica a presso-flessione del palo

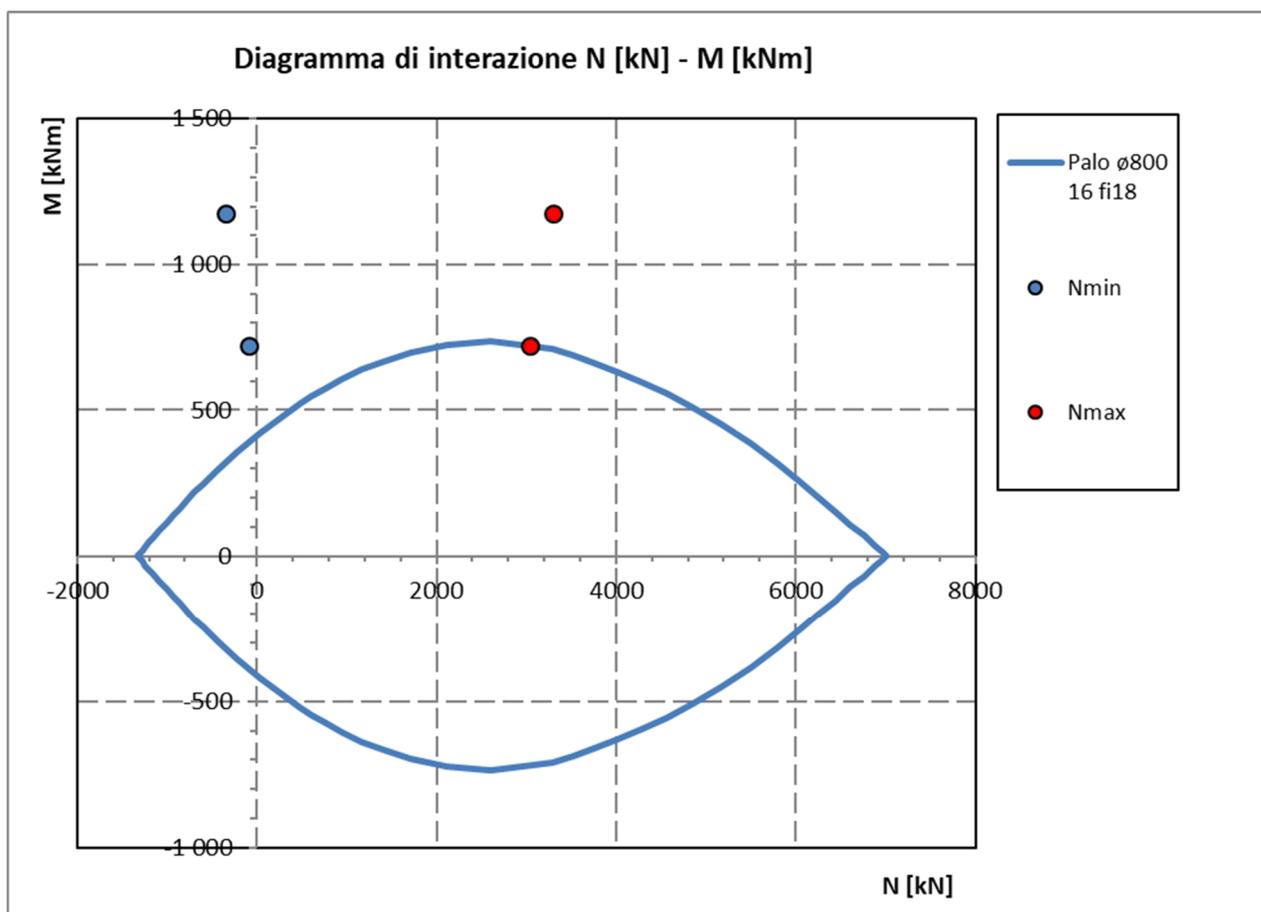
La verifica è soddisfatta se la domanda è inferiore alla capacità:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

I valori dei coefficienti di sicurezza $\rho = \text{Domanda/Capacità}$ vengono prima determinati per le due direzioni principali, longitudinale e trasversale, quindi vengono combinati e verificati secondo la seguente espressione:

$$\sqrt{\left(\frac{D_x}{C_x}\right)^2 + \left(\frac{D_y}{C_y}\right)^2} \leq 1$$

Longitudinalmente il palo è armato con 16 ϕ 18.



	Ned	MEd	MRd(N)	ρ
	[kN]	[kNm]	kNm	[-]
SLC long (Nmin)	-347	1177	321	3.672
SLC trasv (Nmin)	-88	1177	391	3.008
SLC long (Nmax)	3299	1177	707	1.664
SLC trasv (Nmax)	3040	719	718	1.002

Combinando i coefficienti nelle due direzioni si ottiene il coefficiente ρ globale:

	ρ_x	ρ_y	$\rho (<1)$
SLC (Nmin)	3.672	3.008	4.75
SLC (Nmax)	1.664	1.002	1.94

La verifica a pressoflessione del palo **non** risulta soddisfatta.

Relazione di calcolo- Vulnerabilità NV05	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01	CL	NV0500001	A	52 di 54

12.3.1.3 Verifica a taglio dei pali di fondazione

Le verifiche a taglio vengono condotte considerando l'armatura della spirale $\phi 8/100$.

I valori dei coefficienti di sicurezza $\rho = \text{Domanda/Capacità}$ vengono prima determinati per le due direzioni principali, longitudinale e trasversale, quindi vengono combinati e verificati secondo la seguente espressione:

$$\sqrt{\left(\frac{D_x}{C_x}\right)^2 + \left(\frac{D_y}{C_y}\right)^2} \leq 1$$

Calcolo della capacità

resist. Calcestruzzo	f_{cm}	20	N/mm ²
	f_{cd}	11	N/mm ²
diametro	Φ	800	mm
Area sezione	A	502655	mm ²
copriferro	c	50	mm
Area sezione rettangolare equivalente	A_{eq}	419877	mm ²
altezza utile equivalente	d	623	mm
larghezza equivalente	b_w	674	mm
altezza equivalente	h_{eq}	746	mm
sforzo assiale dovuto ai carichi o precompressione	N	0	N
	σ_{cp}	0.000	N/mm ²
	α_{cp}	1.00	
Acciaio	f_{ym}	375	N/mm ²
FeB38K	f_{yd}	272	N/mm ²
diametro staffe (spille)	ϕ_w	8	mm
Area staffa (spilla)	A_{ϕ_w}	50	mm ²
0.9 d	z	561	mm
passo spirale	s_w	100	mm
	n° bracci	2	
angolo di inclinazione biella compressa	θ	22.9	°
deve essere compreso tra 1 e 2.5	$\cot(\theta)$	2.37	
angolo di inclinazione armatura rispetto asse palo	α	90	°
	$\cot(\alpha)$	0.00	
	A_{s_w} / s_w	1.01	mm ² /mm
Taglio resistente per "taglio trazione"	V_{Rsd}	363	kN
Taglio resistente per "taglio compressione"	V_{Rcd}	751	kN

taglio resistente V_{Rd} 363 kN

Domanda

taglio longitudinale sollecitante	V_{ed_x}	751	kN
taglio trasversale sollecitante	V_{ed_y}	459	kN

Si ottengono i seguenti coefficienti:

ρ_x (longitudinale)	2.07
ρ_y (trasversale)	1.26
ρ	2.42

$$\rho = 2.42 > 1$$

La verifica a taglio non è soddisfatta.

12.3.2 Indice di rischio in resistenza dei pali

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R dei pali, 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).

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

Indice di rischio per i pali di fondazione – duttile

SLC	Capacità	Domanda
PGA [g]	0.078	0.286
Tr [anni]	46	975
I_R	0.27	

Indice di rischio per i pali di fondazione - fragile

SLC	Capacità	Domanda
PGA [g]	0.118	0.286
Tr [anni]	98	975
I_R	0.41	

 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- Vulnerabilità NV05</i>	COMMESSA IA5F	LOTTO 01	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0500001	REV. A

Si conclude che le verifiche strutturali dei pali non sono verificate.

13. 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):

ELEMENTO	MECCANISMO	PGA CAPACITÀ [g]	PGA DOMANDA [g]	I_R
Appoggi SLC	distorsione	0.077	0.286	0.268
Appoggi SLD	distorsione	0.077	0.083	0.928
Perdita appoggio SLC	cinematico			>1
Pile SLC	pressoflessione			>1
Pile SLC	taglio			>1
Pali di fondazione SLC	pressoflessione	0.078	0.286	0.272
Pali di fondazione SLC	taglio	0.118	0.286	0.413
OPERA				0.268

La vulnerabilità sismica dell'opera è determinata dagli appoggi realizzati in *pad* in neoprene armato di limitato spessore (4cm), che evidentemente non sono in grado di fornire l'adeguata resistenza e deformabilità per l'azione sismica di progetto; tuttavia è escludibile la possibilità di caduta dell'impalcato per perdita di appoggio delle travi.

Le pile si rivelano adeguate, per la parte in elevazione, mentre qualche insufficienza viene individuata relativamente alle verifiche a taglio dei pali di fondazione per il sisma di progetto allo stato limite ultimo.