

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

*Analisi Pushover*

SCALA:

-

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


I A 5 F    0 3    D    0 9    C L    V I 0 0 0 0    0 0 1    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione Esecutiva	G. Grimaldi	Mar. 2019	S. Di Spigno	Mar. 2019	F. Gernone	Mar. 2019	A. Vitti	

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


File: IA5F03D09CLVI0000001A

n. Elab.:


 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>

## INDICE

1. PREMESSA .....	3
2. RIFERIMENTI.....	3
3. MATERIALI.....	3
4. ANALISI DEI CARICHI.....	4
4.1 Carichi permanenti.....	4
5. AZIONE SISMICA.....	8
6. COMBINAZIONI.....	9
7. SET DI PILE .....	10
7.1 Pile H<13m.....	10
7.1.1 Pila bassa.....	10
7.1.2 Pila alta.....	11
7.2 Pile H>13m.....	11
7.2.1 Pila bassa.....	11
7.2.1 Pila alta.....	12
7.3 Pila esagonale.....	12
7.4 Pila media H=7.5m.....	13
8. MODELLAZIONE.....	14
9. ANALISI PUSH-OVER.....	15
9.1 Gruppo 1 .....	17
9.2 Gruppo 2.....	18
9.3 Confronti.....	19
9.4 Convalidazione numerica.....	23
10. DETERMINAZIONE DELLA FORZA SPOSTAMENTO BILINEARE DI UNO SDOF .....	27
11. DETERMINAZIONE DELLO SPOSTAMENTO DI RIFERIMENTO .....	30
11.1 Meccanismo tagliante.....	30
11.2 Instabilità delle barre longitudinali.....	33
12. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA.....	38
12.1 Procedura utilizzata per la determinazione della domanda e della capacità.....	38
12.2 Determinazione della massa inerziale equivalente e del fattore di partecipazione.....	43
12.3 Determinazione della domanda.....	44

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

12.4	Determinazione della capacità.....	45
12.5	Vulnerabilità Sismica.....	47
13.	RIEPILOGO DEI RISULTATI .....	51
14.	APPENDICE.....	52
14.1	Terreno B .....	52
14.1.1	<i>Pila H&lt;13m</i> .....	52
14.1.1.1	Pila bassa .....	52
14.1.1.2	Pila alta .....	55
14.1.2	<i>Pila H&gt;13m</i> .....	58
14.1.2.1	Pila bassa .....	58
14.1.2.2	Pila alta .....	61
14.1.3	<i>Pila esagonale</i> .....	64
14.1.4	<i>Pila media H=7.5m</i> .....	67
14.2	Terreno C .....	70
14.2.1	<i>Pila H&lt;13m</i> .....	70
14.2.1.1	Pila bassa .....	70
14.2.1.2	Pila alta .....	73
14.2.2	<i>Pila H&gt;13m</i> .....	76
14.2.2.1	Pila bassa .....	76
14.2.2.2	Pila alta .....	79
14.2.3	<i>Pila esagonale</i> .....	82
14.2.4	<i>Pila media H=7.5m</i> .....	85
14.3	Terreno E .....	88
14.3.1	<i>Pila H&lt;13m</i> .....	88
14.3.1.1	Pila bassa .....	88
14.3.1.2	Pila alta .....	91
14.3.2	<i>Pila H&gt;13m</i> .....	94
14.3.2.1	Pila bassa .....	94
14.3.2.2	Pila alta .....	97
14.3.3	<i>Pila esagonale</i> .....	100
14.3.4	<i>Pila media H=7.5m</i> .....	103

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

## 1. PREMESSA

La presente relazione descrive la procedura di definizione della curva di capacità e la relativa performance strutturale, ovvero in relazione alla domanda sismica di riferimento se ne definisce lo stato di fatto.

Nello specifico si sono effettuate le analisi su diverse pile che sono rappresentative di caratteristiche comuni a più viadotti come geometria, armatura ed altezze.

## 2. RIFERIMENTI

- [1] D.M. 17 gennaio 2018 (G.U. 20 febbraio 2018 n. 42) - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».
- [2] 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.
- [3] RFI DTC SI PS MA IFS 001 C - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 2 – Ponti e Strutture
- [4] P. Fajfar, 2002. “Structural analysis in earthquake engineering – a breakthrough of simplified non-linear methods” Published by Elsevier Science Ltd. All rights reserved 12th European Conference on Earthquake Engineering Paper Reference 843
- [5] Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. 2006 – IUSS Press: “Displacement based seismic design of structures”, Pavia, Italy
- [6] 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

## 3. MATERIALI

Per le caratteristiche meccaniche dei materiali si demanda alla Relazione IA5F03D09ROVI0000001.

Riassumendo:

Resistenza del CLS desunta da progetto storico

$$f_c = 20 \text{ N/mm}^2$$

Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA IA5F	LOTTO 03	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI0000001	REV. A	FOGLIO 4 di 106
----------------------------------	------------------	-------------	----------------	------------------------	-----------	--------------------

Tensione di snervamento dell'Acciaio desunta da progetto storico  $f_y = 375 \text{ N/mm}^2$

Tensione ultima dell'Acciaio desunta da progetto storico  $f_u = 375 \text{ N/mm}^2$

Coefficienti di sicurezza per meccanismi duttili:

coef di sicurezza  $\gamma_d = 1.25$

coef parziale del calcestruzzo  $\gamma_c = 1$

coef parziale dell'acciaio  $\gamma_s = 1$

Coefficienti di sicurezza per meccanismi fragili:

coef di sicurezza  $\gamma_d = 1.25$

coef parziale del calcestruzzo  $\gamma_c = 1.5$

coef parziale dell'acciaio  $\gamma_s = 1.15$

#### 4. ANALISI DEI CARICHI

I carichi verticali adottati sono coerenti con la Relazione del progetto storico del 1985.

##### 4.1 Carichi permanenti

###### Impalcato

Area di una trave =  $1 \text{ m}^2$

Peso travi	1x29x3x25	2175 kN
Ringrosso in corrispondenza dei traversi	1.5x0.9x1.80x2x3x25	364 kN
Traversi di testata	1.80x5.40x0.40x2x25	194 kN
Traversi di campate	1.80x5.40x0.30x2x25	146 kN
Soletta	7.40x0.25x30x25	1388 kN
Cordoli	2x(0.20x0.25)x30x25	75 kN
Para-Ballast	2x(0.20x0.50)x30x25	150 kN
Ballast	4x0.70x30x18	1512 kN
Impermeabilizzante	7.4x30x30	666 kN
Corrimano e canalette	4x30	120 kN
Per un peso complessivo		G1+G2 ~ 6800 kN

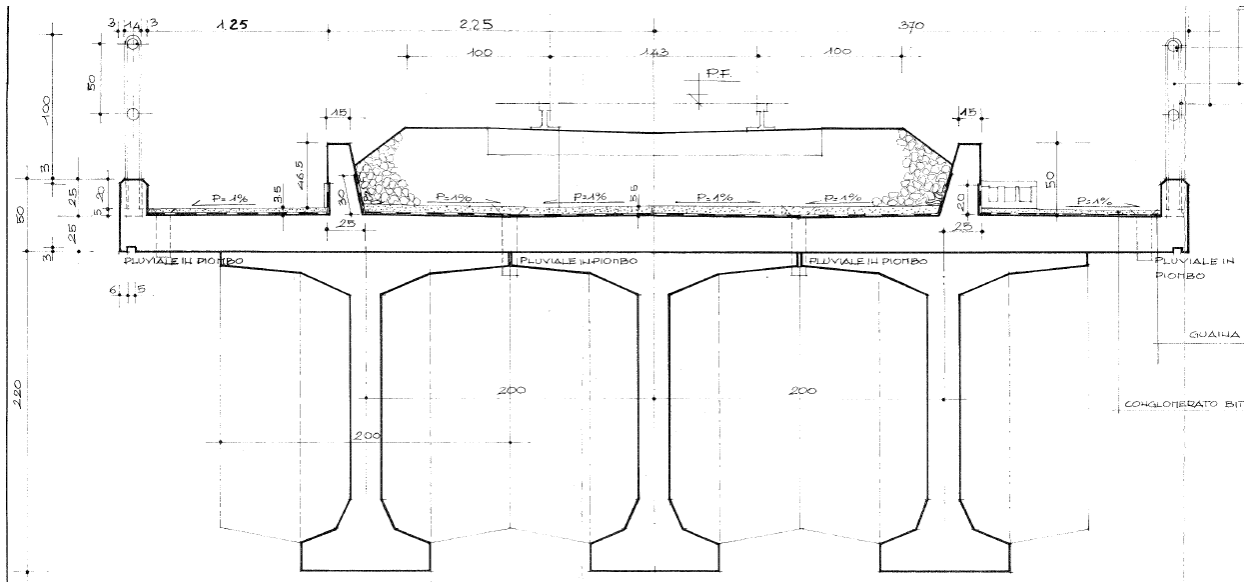


Figura 1 - Sezione trasversale impalcato



### Pulvino

Altezza netta del pulvino

Peso pulvino

1.60x3.20x5.50x25

704 kN

Ritegni

$(0.9 \times 5.5 + 4 \times 1 \times 1.15) \times 0.3 \times 25$

71.6 kN

Per un peso complessivo

**G1 ~ 775 kN**

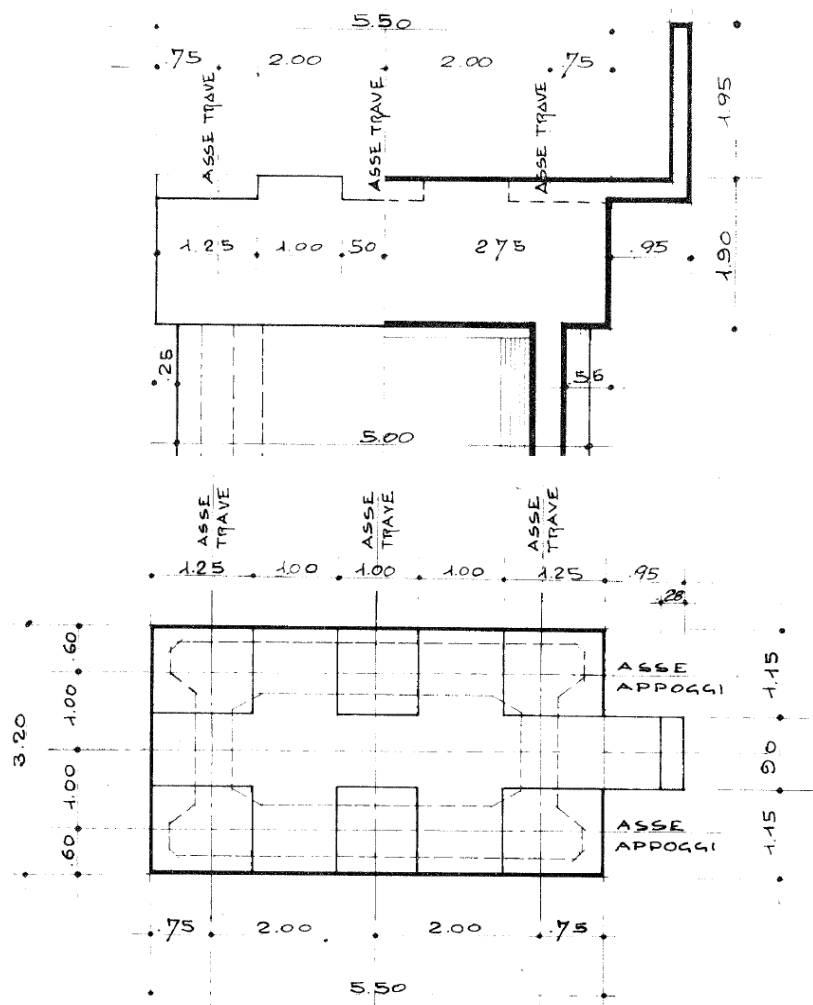


Figura 3 - Pianta e prospetto pulvino



Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	03	CL	VI000001	A	8 di 106

### Carico accidentale

Treno di tipo A                      132x2x12.20+80.0x(30-12.20x2)                      3668 KN

Peso sulla singola pila                      **Q ~ 3670 kN**



Figura 4 - Schema treno

## 5. AZIONE SISMICA

Lo spettro di progetto è stato identificato nel rispetto del §2.4 e del §3.2, ossia in funzione della relazione specifica di caratterizzazione sismica. Si riporta in Figura 5 lo spettro elastico allo SLV per una utile visione nel caso di terreno E.

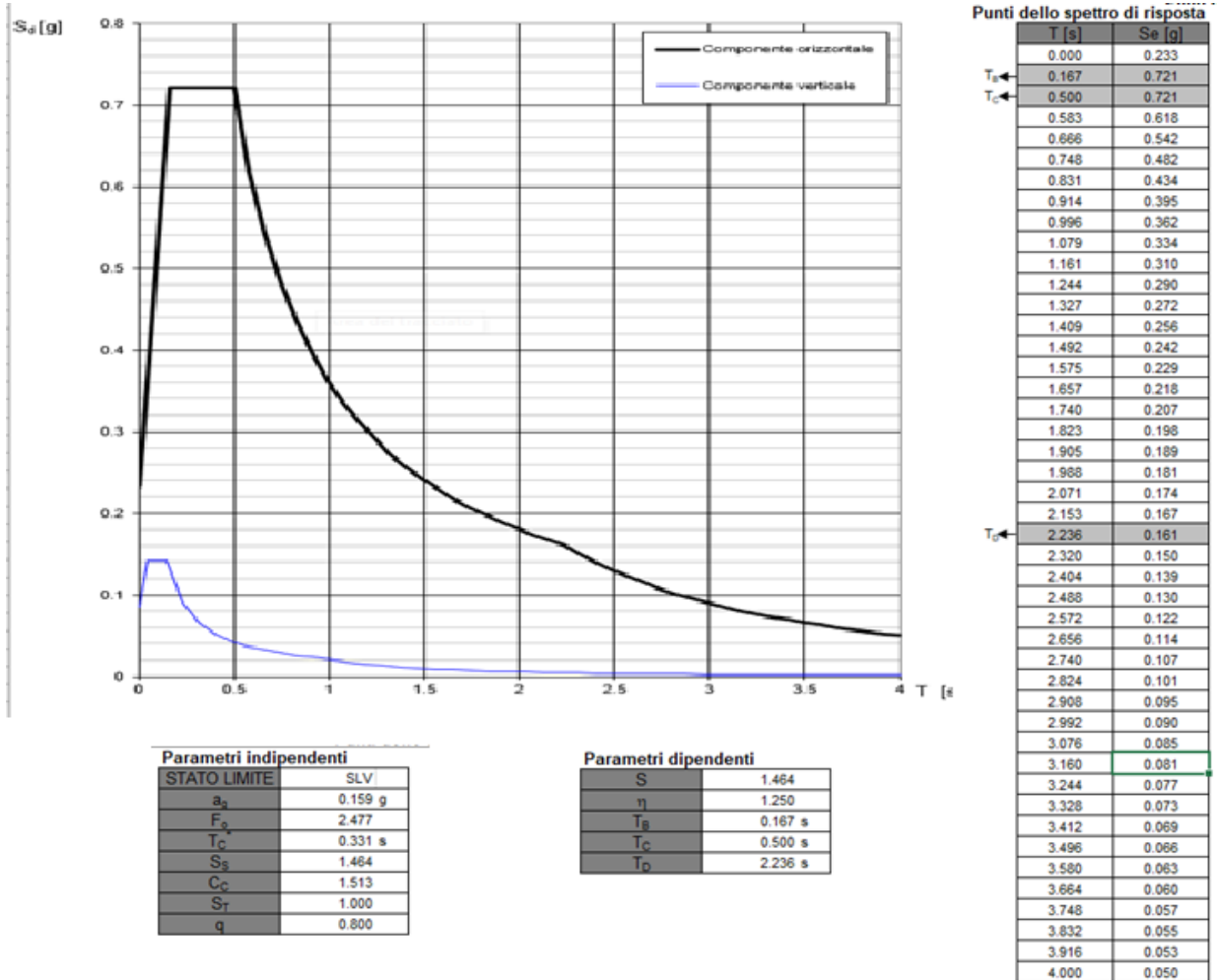


Figura 5 - spettro elastico SLV di riferimento

Nei risultati riportati nell'ultimo paragrafo, ogni classe di pila è stata associata adeguatamente alla tipologia di terreno relativa allo specifico viadotto.

## 6. COMBINAZIONI

Le combinazioni di carico adottate nelle successive analisi sono di seguito riportate. Riassumendo secondo §2.5.3 e §5.1.3.12, si è adottato un'azione in testa della pila:

$$E = G1 + G2 + 0.2Q \sim 8310 \text{ kN}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

H (m)	Area (m <sup>2</sup> )	N pila (kN)	N tot base (kN)
3.85	6.476	623.31	8933
<b>12.7</b>	<b>6.476</b>	<b>2056.13</b>	<b>10366</b>
13.3	6.476	2153.27	10463
17.3	6.476	2800.87	11111
10.7	12.278	3284.36	11594

La procedura di analisi è riportata in seguito in maniera completa sulla pila rappresentativa del Gruppo  $H < 13m$ : pila 6 del viadotto Marchese\_VI10.

## 7. SET DI PILE

Come descritto precedentemente le analisi sono state svolte su un set di pile rappresentative di tutti i viadotti.

Dagli elaborati originali è possibile osservare come la carpenteria delle pile è costante su tutta la linea, eccetto per 5 pile appartenenti al viadotto Basento\_VI01.

La distinzione è sul quantitativo di armature che per altezze minori di 13m sia pari a 116fi16, mentre per pile di altezza maggiore di 13m è pari a 116fi16+116fi26.

### 7.1 Pile $H < 13m$

#### 7.1.1 Pila bassa

La pila più bassa di questa categoria appartiene al viadotto Basento\_VI01, con altezza pari a 3.85m. Le staffe di diametro fi14 hanno un passo di 0.25m con infittimento pari a 0.125m per un'altezza prossima al metro nella zona critica.

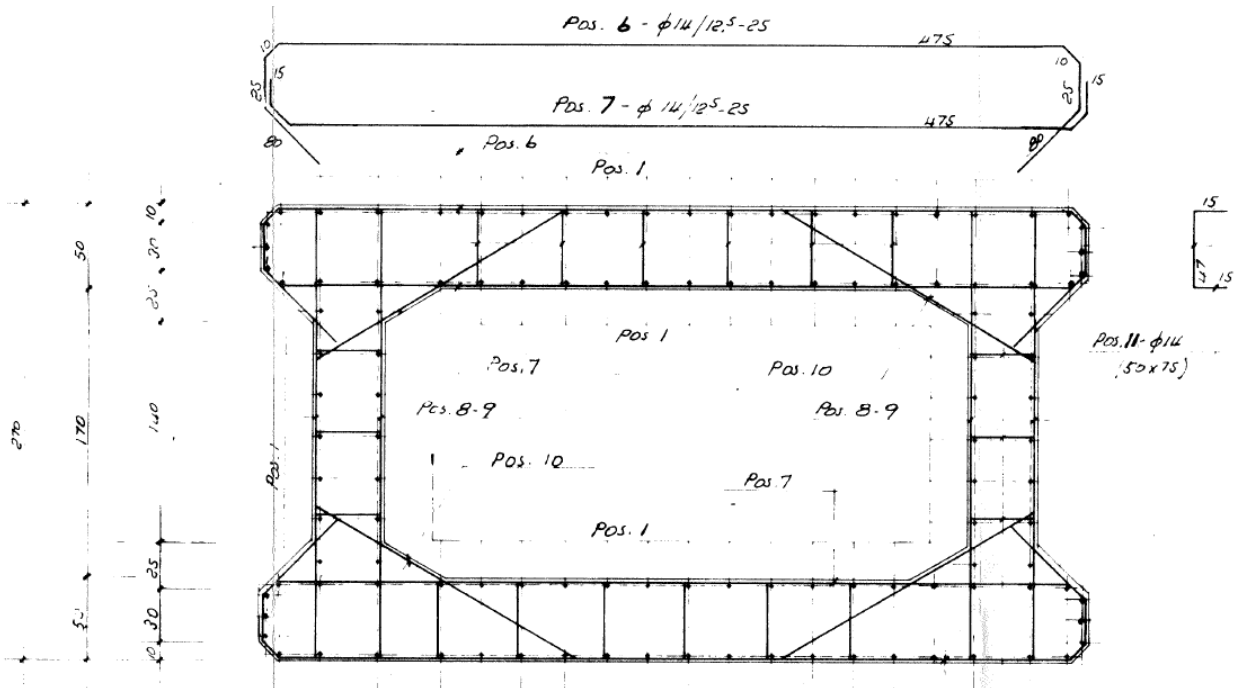


Figura 6 – Sezione tipologia pila >13m - 116fi16

Area:	6.476	m <sup>2</sup>
Perimetro:	25.842	m

Momenti principali rispetto al baricentro	I:	6.531	m <sup>4</sup>
	J:	16.127	m <sup>4</sup>

### 7.1.2 Pila alta

Per la carpenteria e la disposizione dell'armatura si rimanda alla Figura 6. La pila di riferimento per questa altezza è la pila 9 del viadotto Ridola\_VI12 con un'altezza di 12.70m, quindi con armatura di 116fi16.

## 7.2 Pile H>13m

### 7.2.1 Pila bassa

La pila 6 del viadotto Marchese\_VI10 rappresenta la pila di altezza minore armata con 116fi16+116fi26, con altezza del fusto pari a 13.20m. Le staffe di diametro fi14 hanno un passo di 0.25m con infittimento pari a 0.125m per un'altezza prossima al metro nella zona critica.

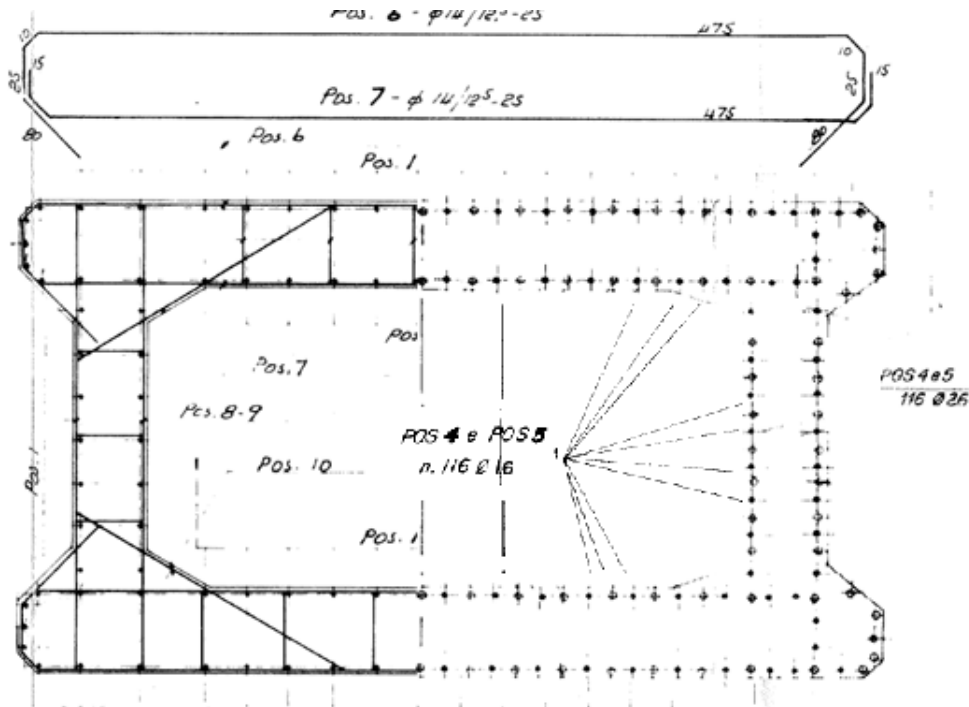


Figura 7 - Sezione tipologica pila  $H > 13m$  – 116f16+116f26

Area:	6.476	m <sup>2</sup>
Perimetro:	25.842	m

Momenti principali rispetto al baricentro	I:	6.531	m <sup>4</sup>
	J:	16.127	m <sup>4</sup>


### 7.2.1 Pila alta

Per la carpenteria e la disposizione dell'armatura si rimanda alla Figura 7. La pila di riferimento per questa altezza è la pila 7 del viadotto Ridola\_VI12 con un'altezza di 17.3, quindi con armatura di 116f16+116f26.

### 7.3 Pila esagonale

Cinque pile di altezza pressoché costante, appartenenti al viadotto Basento\_VI01, hanno una sezione esagonale, armata con 102f26 ed armata a taglio con staffe di diametro f14 e passo di 0.25m. Nella zona critica, prossima la metro, si ha un infittimento pari a 0.125m. La pila di riferimento è la P12 con altezza di 10.70m.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>

## 8. MODELLAZIONE

Per le specifiche della procedura di modellazione, analisi e verifica si riporta, come già detto, il dettaglio della *pila 6 del viadotto Marchese\_VI10*.

Individuate le carpenterie della pila in esame e identificate le caratteristiche dei materiali, si è proceduto alla modellazione a fibre sul software di calcolo MIDAS civil.

Si ricorda che i valori di calcolo utilizzati sono stati opportunamente scalati del fattore di confidenza  $FC=1.2$

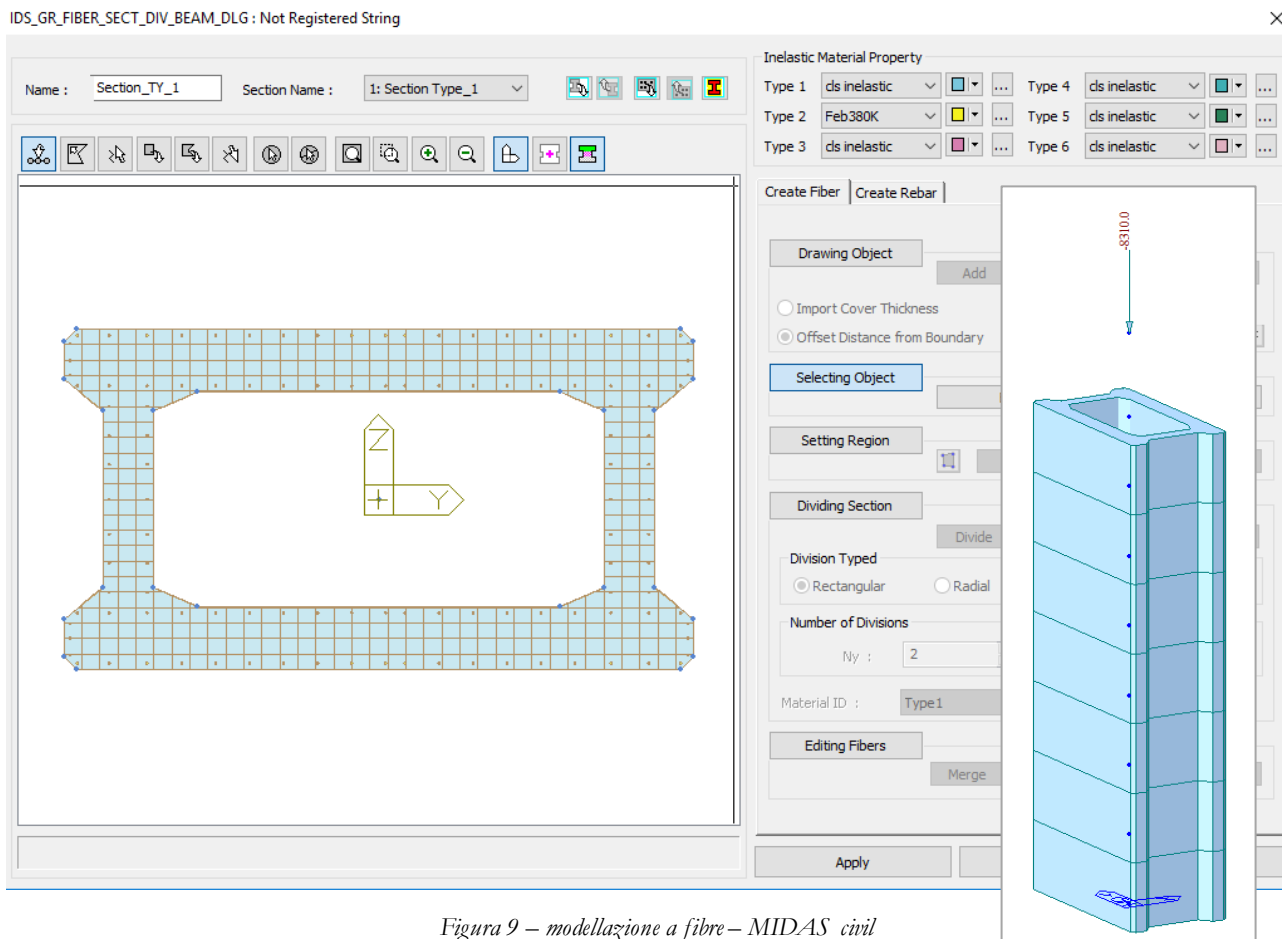



Figura 9 – modellazione a fibre – MIDAS civil

Il comportamento non lineare dei materiali è stato valutato secondo il modello di Mander per il calcestruzzo e di Menegotto-Pinto per le barre di armatura.

	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>15 di 106</b>

**Inelastic Material Model**

Name :

Material Type :

Hysteresis Model :

Reference Material :

Concrete Type

Unconfined Concrete : Cover Concrete

Confined Concrete : Core Concrete

Material() and section() data are only referred to during a file import. Modified material() and section() data will not be updated. Re-importing a file is not required.

Unconfined Concrete Data

fco' : Unconfined Concrete Strength   N/m<sup>2</sup>

eco : Unconfined Concrete Strain

Corresponding to fco' (generally eco=0.002 can be assumed)

Ec : Elastic Modulus of Concrete

N/m<sup>2</sup>

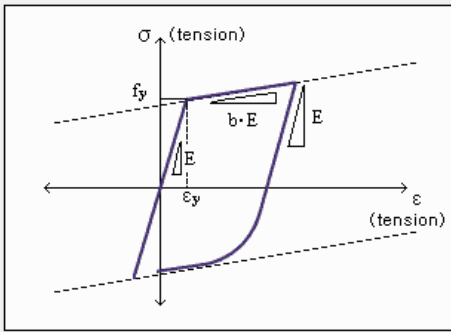
**Inelastic Material Model**

Name :

Material Type :

Hysteresis Model :

Reference Material :



Skeleton Curve

fy	<input type="text" value="31250000"/> N/m <sup>2</sup>	Ro	<input type="text" value="20"/>
E	<input type="text" value="200000000"/> N/m <sup>2</sup>	a1	<input type="text" value="18.5"/>
b	<input type="text" value="0.001"/>	a2	<input type="text" value="0.15"/>

Figura 10 - Materiali anelastici adottati su MIDAS civil

## 9. ANALISI PUSH-OVER

Per l'individuazione del comportamento elasto-plastico della singola pila si è proceduto con un'analisi non lineare statica. Nel rispetto della normativa italiana (§7.3.4.2) tale analisi deve essere condotta secondo due tipologie di distribuzioni identificate mediante due Gruppi.

Nello specifico i fattori di partecipazione nelle due direzioni principali sono maggiori del 75% con conseguente scelta di un gruppo 1, proporzionale alle forze statiche, e di un gruppo 2 proporzionale alle masse.

Tenendo in considerazione la tipologia di vincoli tra impalcato e pila si è considerata una massa concentrata in testa della pila per il comportamento longitudinale (fisso-scorrevole) in quanto il trasferimento delle azioni sismiche è puramente di taglio, e una massa posta ad una altezza pesata di 2.20 m dall'estradosso pulvino per simulare l'appoggio fisso trasversale che fornisce anche un momento.



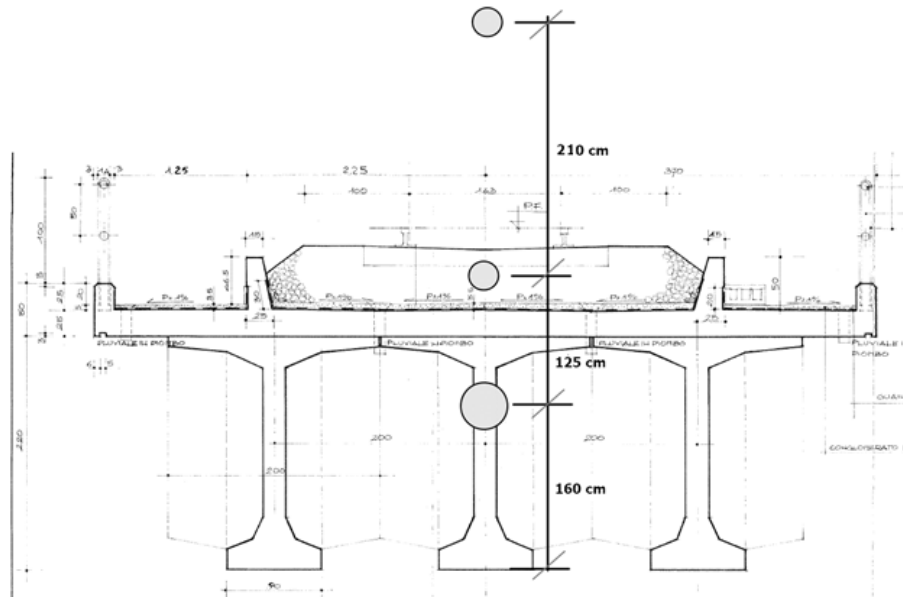


Figura 11 - schema masse principali

masse	G (kN)	H (m)
treno	733.6	4.95
ballast	1662	2.85
Impalcato	5128	1.6

h equivalente	2.20	m
---------------	------	---

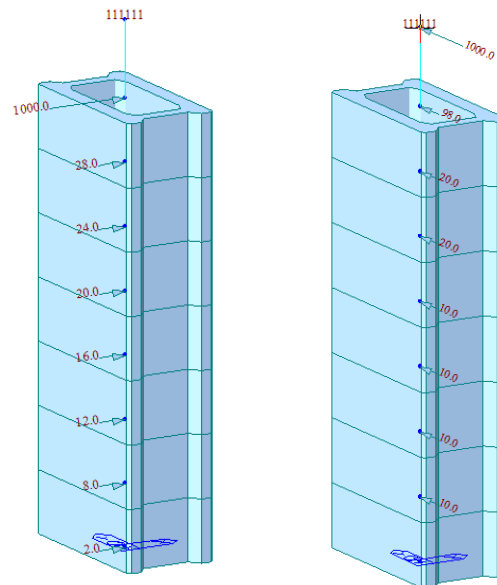


Figura 12 - differenziazione delle distribuzioni longitudinali e trasversali

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

## 9.1 Gruppo 1

Suddividendo la pila in più elementi e attribuendo il peso proprio alla sezione è possibile identificare la massa su ogni nodo e quindi applicare una distribuzione di forze. Utilizzando una proporzionalità rispetto alle forze statiche:

$$F_i = F_h z_i \frac{W_i}{\sum z_i W_i} = S_d(T_1) \frac{\lambda}{g} W z_i \frac{W_i}{\sum z_i W_i}$$

Volendo semplicemente identificare una forma, l'accelerazione in funzione del primo modo di vibrare non ha influenza, per cui è possibile identificare una distribuzione denominata P e normalizzata rispetto al valore massimo:

Nodo	M (kN)	z (m)	M z	P (KN)	P normalizzato (KN)
1	8445	12.7	107245.15	9187.007	1.000
2	269	11.1125	2989.2625	256.071	0.028
3	269	9.525	2562.225	219.489	0.024
4	269	7.9375	2135.1875	182.908	0.020
5	269	6.35	1708.15	146.326	0.016
6	269	4.7625	1281.1125	109.745	0.012
7	269	3.175	854.075	73.163	0.008
8	134.5	1.5875	213.51875	18.291	0.002

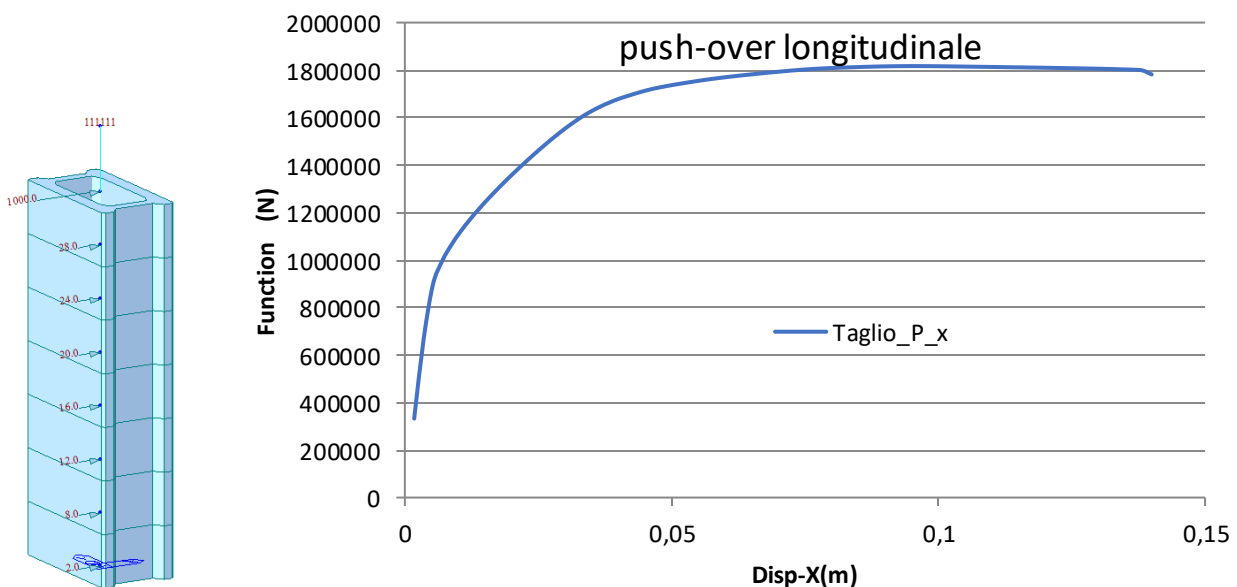


Figura 13 - Analisi push-over Gruppo 2 - comportamento longitudinale

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

## 9.2 Gruppo 2

La distribuzione secondaria desunta da un andamento uniforme di accelerazione lungo l'altezza della costruzione porta all'identificazione di una forza proporzionale alla massa. Volendo semplicemente identificare una forma, anche in questo caso non influisce il valore dell'accelerazione, quindi normalizzando rispetto al valore massimo si ottiene la distribuzione desiderata.

nodo	M (kN)	A (KN)	A normalizzato (KN)
1	8445	8445	1.000
2	269	269	0.032
3	269	269	0.032
4	269	269	0.032
5	269	269	0.032
6	269	269	0.032
7	269	269	0.032
8	134.5	134.5	0.016

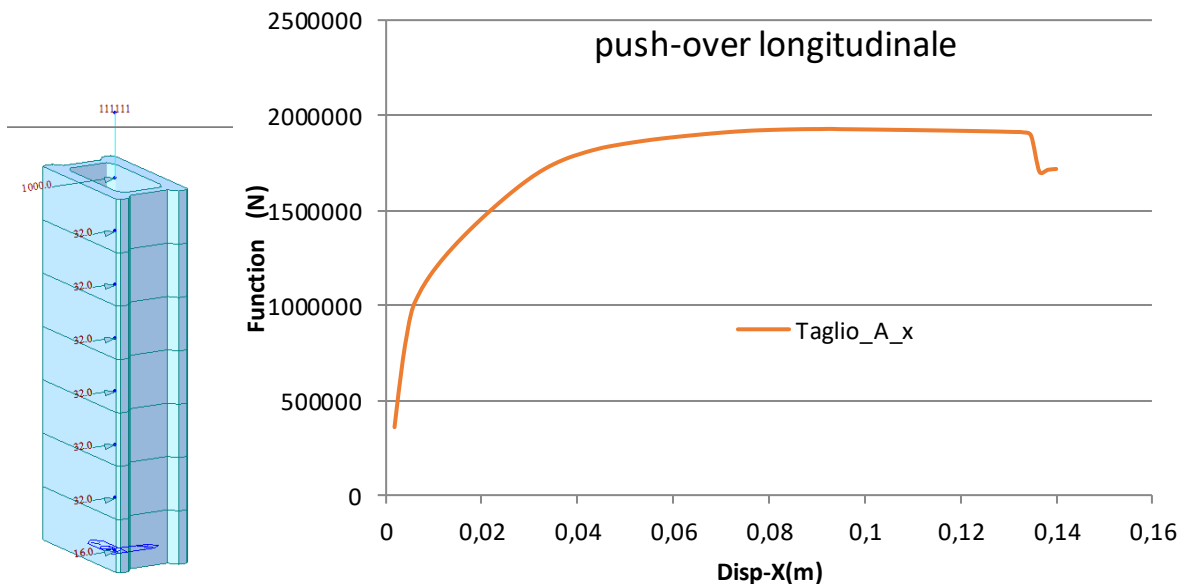


Figura 14 - Analisi push-over Gruppo 1 - comportamento longitudinale

	<p><b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b></p> <p><b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>					
<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>19 di 106</b>

### 9.3 Confronti

Per una convalidazione analitica si è eseguita anche una analisi push-over con forza concentrata in testa alla pila (Taglio\_F\_). Si riportano per completezza i risultati in entrambe le direzioni.

Time History Analysis Result of Fiber Sections

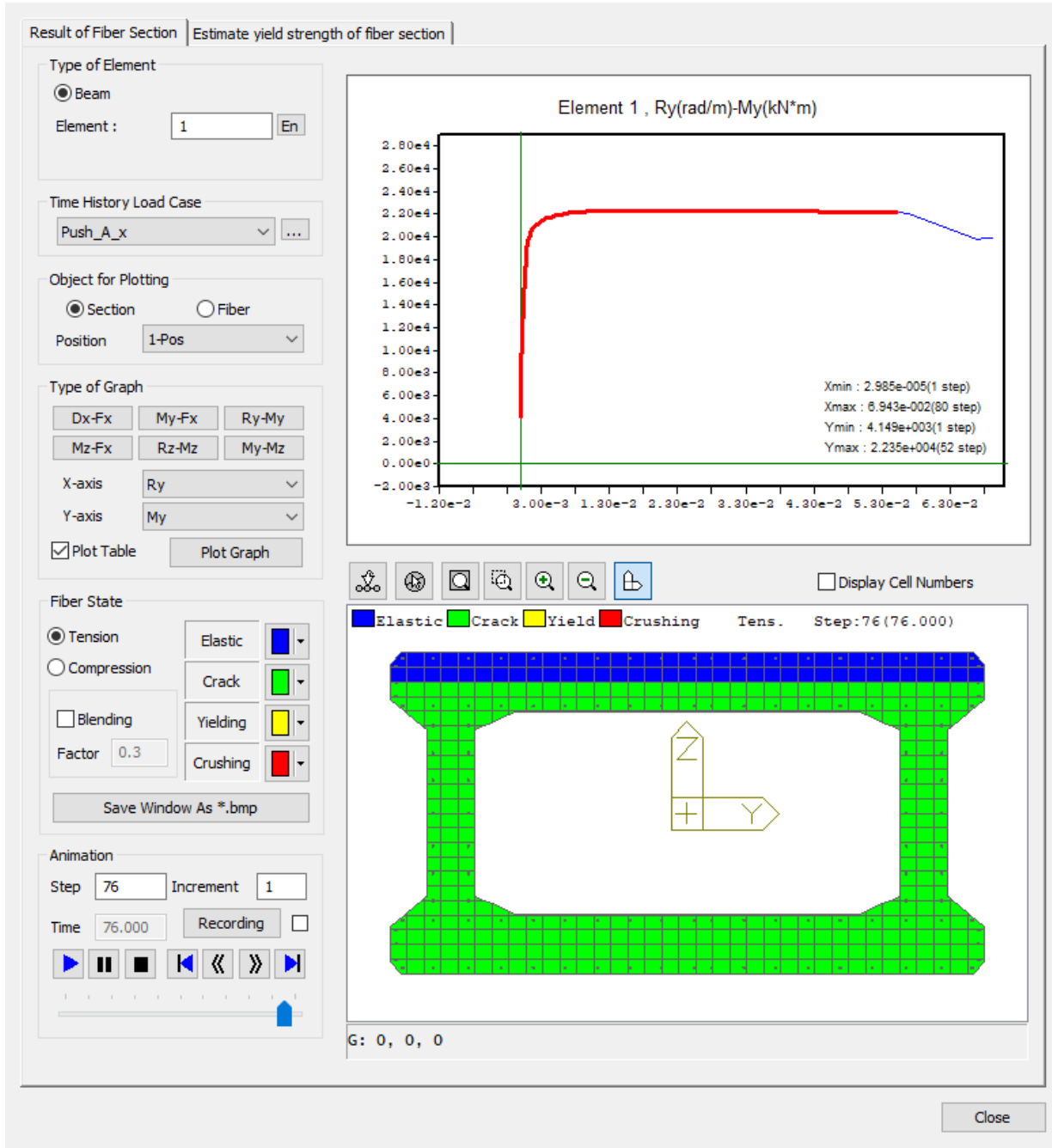


Figura 15 - Momento curvatura a fibre direzione debole

Time History Analysis Result of Fiber Sections

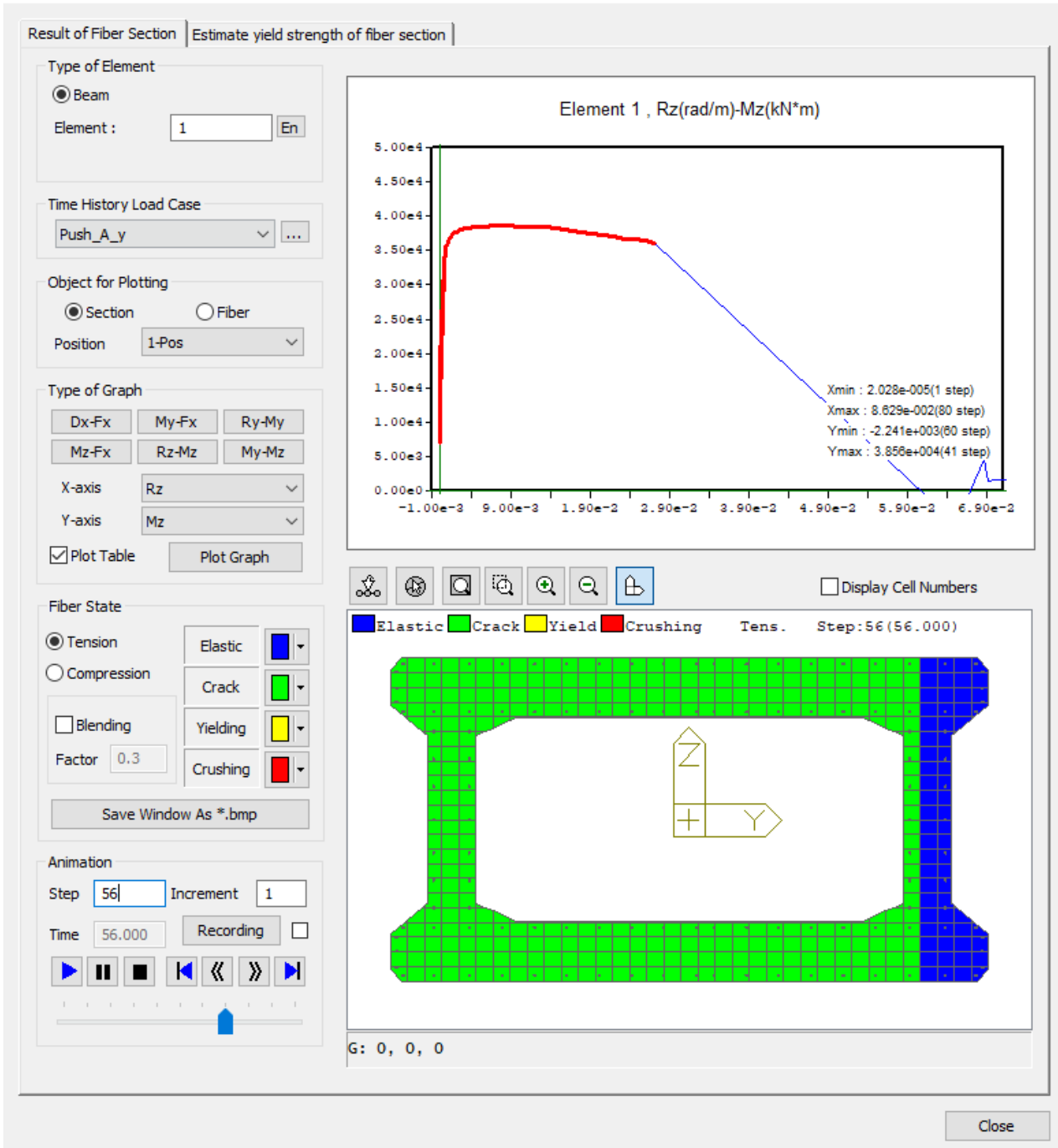


Figura 16 - Momento curvatura a fibre direzione forte

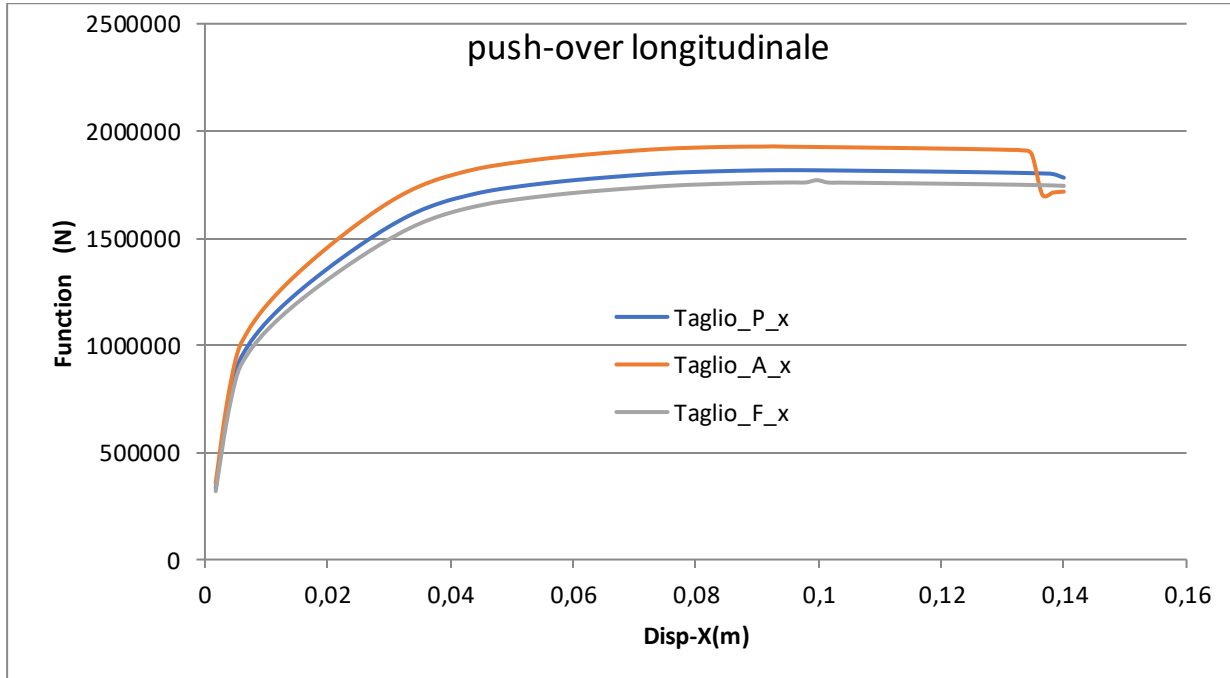


Figura 17 - Confronto push-over direzione debole

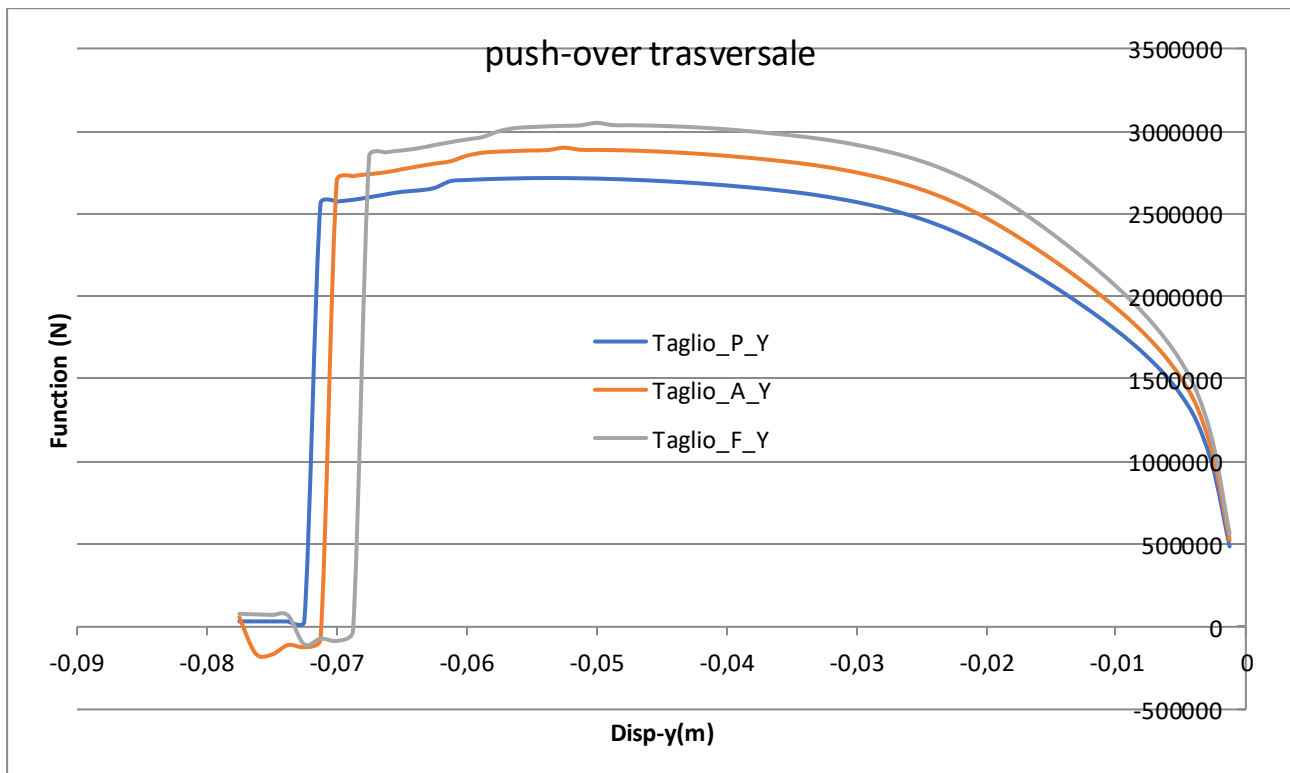


Figura 18 - Confronto push-over direzione forte

#### 9.4 Convalidazione numerica

A partire dal momento curvatura della sezione di base è possibile ottenere la forza spostamento analitica per il controllo dell'affidabilità del codice di calcolo adottato come richiesto dalla norma (§10.2). Da un apposito programma di calcolo (VCAslu) si identifica la suddetta curva dalla quale si ricava la bilineare associata tramite il criterio delle aree uguali.

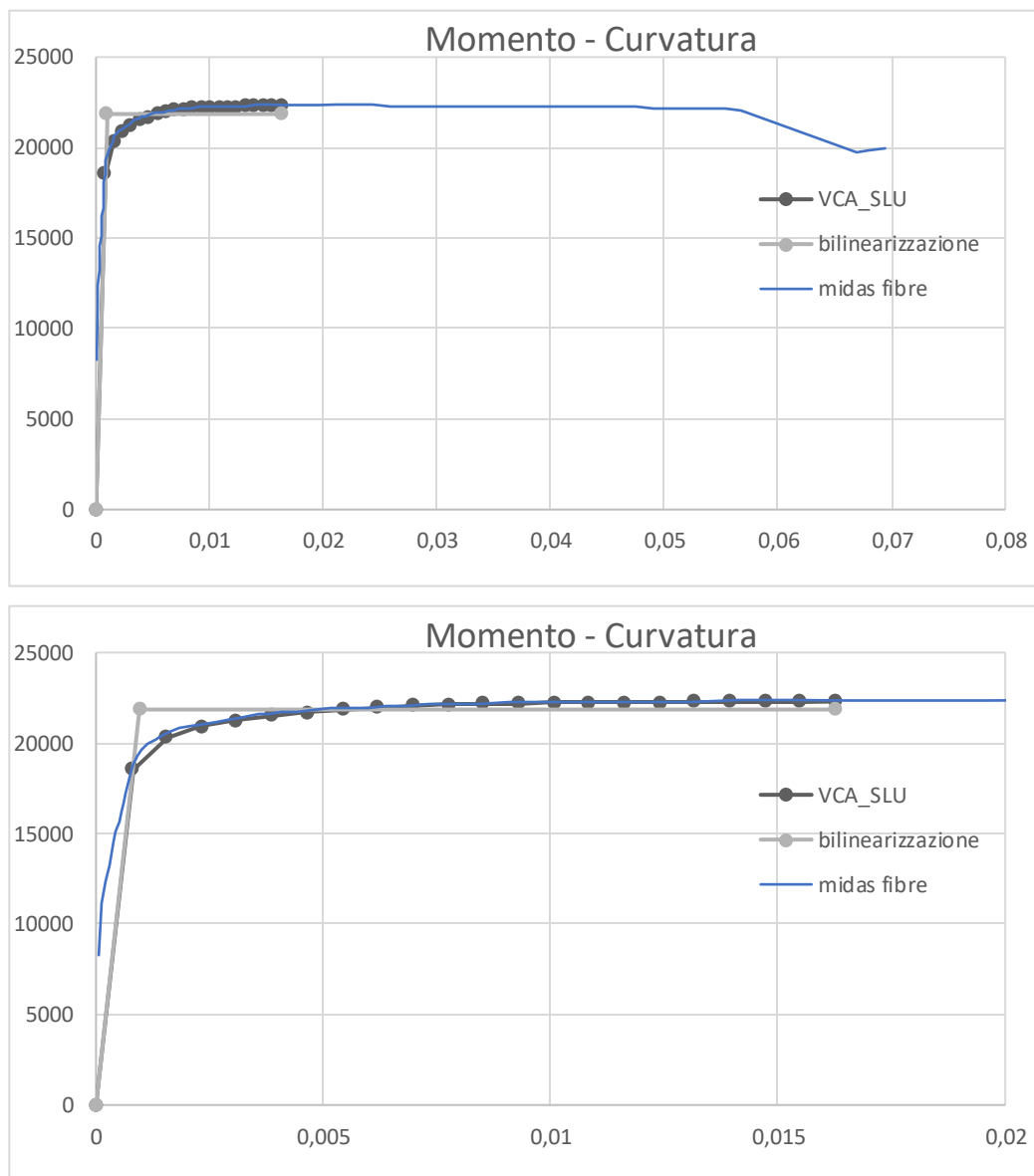


Figura 19 - momento curvatura direzione debole



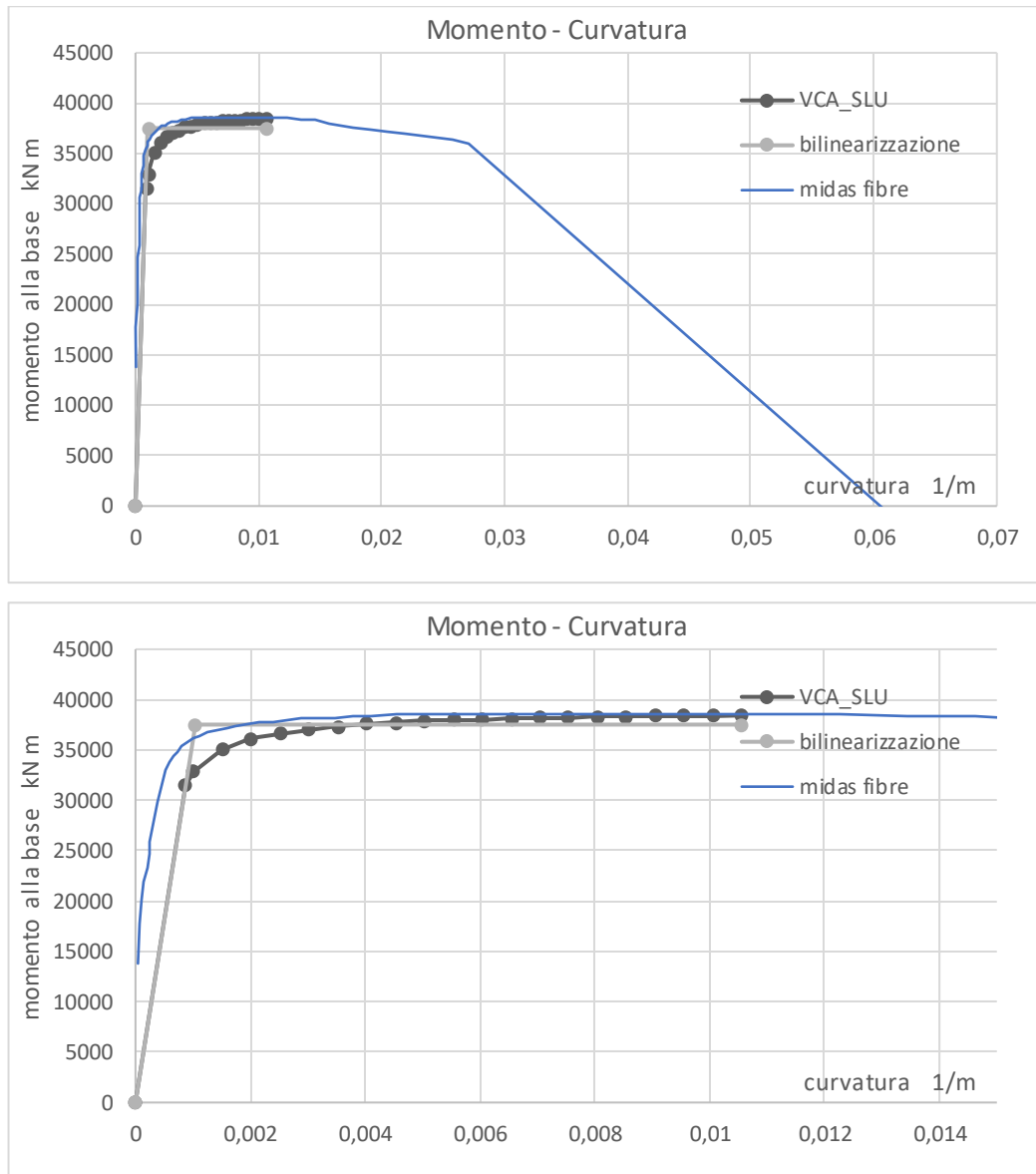


Figura 20 - momento curvatura direzione forte

Secondo trattazioni di letteratura Priestley2006 è possibile ottenere il comportamento di elemento tramite le seguenti relazioni:

Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA IA5F	LOTTO 03	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI0000001	REV. A	FOGLIO 25 di 106
----------------------------------	------------------	-------------	----------------	------------------------	-----------	---------------------

$$\Delta_y = \phi_y H^2 / 3$$

where  $H$  is the effective height, and the plastic displacement  $\Delta_p = \Delta_u - \Delta_y$  by

$$\Delta_p = \phi_p L_p H$$

Mentre per il passaggio da flessione a taglio basta dividere per l'altezza effettiva  $H$ . Si sono considerate anche le equazioni secondo Reluis per le quali:

$$H \cong \frac{(W_{piv} + 0.3W_{pila})H_p + W_{imp} H_{imp}}{W_{piv} + 0.3W_{pila} + W_{imp}}$$

La lunghezza di cerniera plastica è pari a:

$$l_p = 0.1 \times H_p$$

Gli spostamenti di snervamento e ultimo alla quota del baricentro delle masse sono dati dalle espressioni (2.24) e (2.25):

$$\delta_y = \frac{\phi_y H^2}{3\nu}$$

$$\delta_u = \delta_y + (\phi_u - \phi_y) l_p \left( H - \frac{l_p}{2} \right) :$$

dove  $\nu = 1.2$  tiene conto della maggiore rigidità della parte di pila non fessurata. La forza massima è data dall'espressione:

$$V_y = \frac{M_y}{H}$$

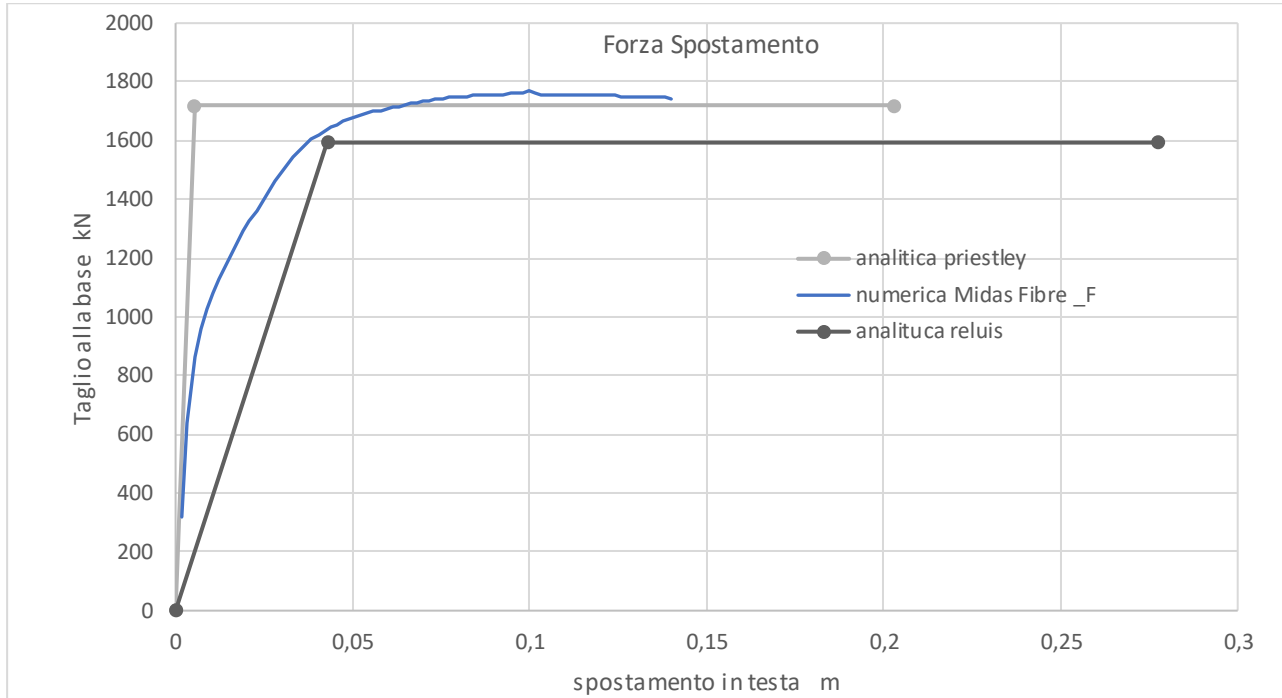


Figura 21 - Confronto analitico / numerico forza - spostamento direzione debole

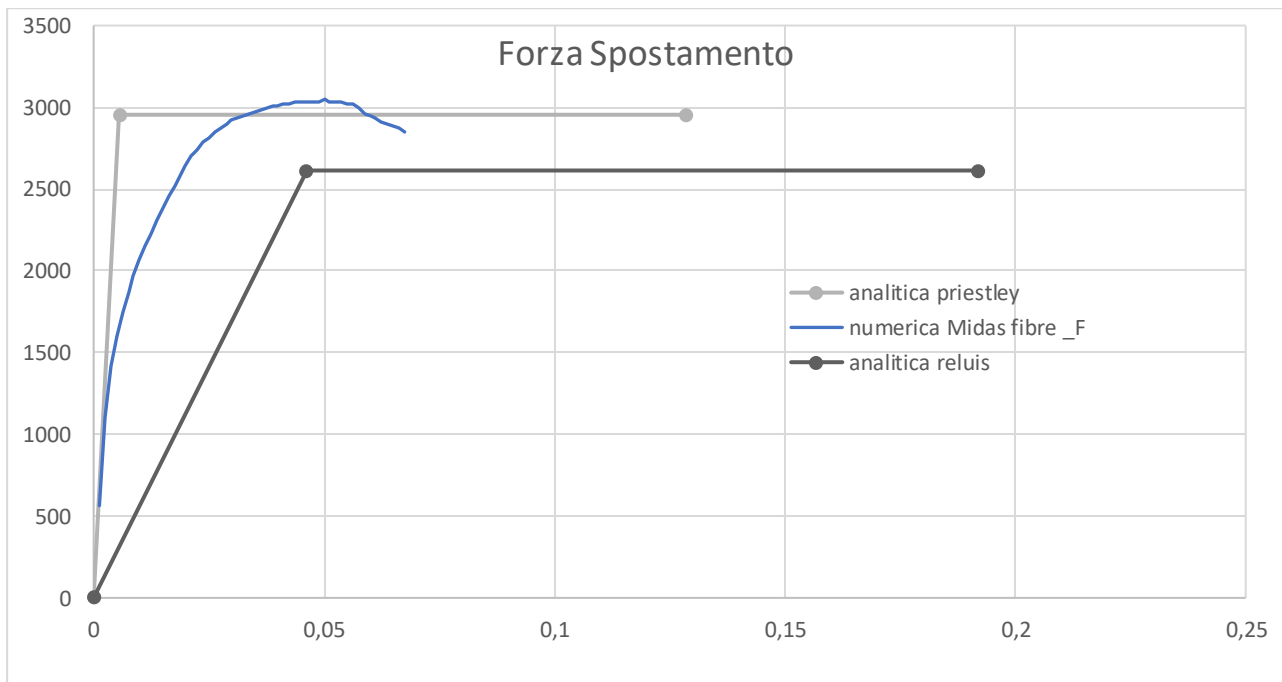


Figura 22 - Confronto analitico / numerico - forza spostamento direzione forte

	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>27 di 106</b>

## 10. DETERMINAZIONE DELLA FORZA SPOSTAMENTO BILINEARE DI UNO SDOF

La forza-spostamento di una struttura è ottenuta mediante un'analisi statica non lineare. In questa tipologia di analisi i due aspetti principali sono: la distribuzione delle forzanti e il metodo di valutazione della capacità e/o domanda sismica.

Nel caso specifico di analisi su una pila la distribuzione delle forzanti ha una minor influenza nella risposta strutturale essendo sostanzialmente uno SDOF. È comunque necessario identificare il sistema ad un grado di libertà, secondo C7.3.4.2, per identificare una curva bilineare che sarà la base di partenza per la definizione della domanda sismica e della capacità.

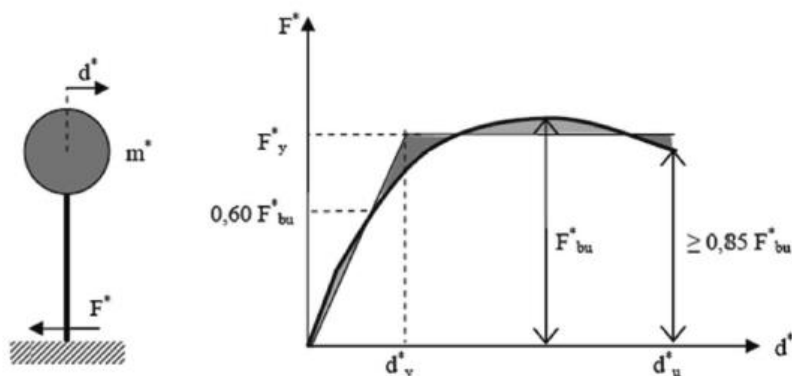


Figura C7.3.1 – Sistema e diagramma bilineare equivalente

Il processo di bilinearizzazione è il medesimo adottato per il momento curvatura, per il quale l'energia associata deve risultare invariata. Imponendo questa condizione alla curva pushover in direzione debole, si ottiene:

### Direzione Debole

Area curva	217.9
Area bil	217.9

Fu	1846.292931	KN
du	0.130737958	m
Fsecante	1292.405051	KN
Fy	1812.4	KN
dy	0.021	m

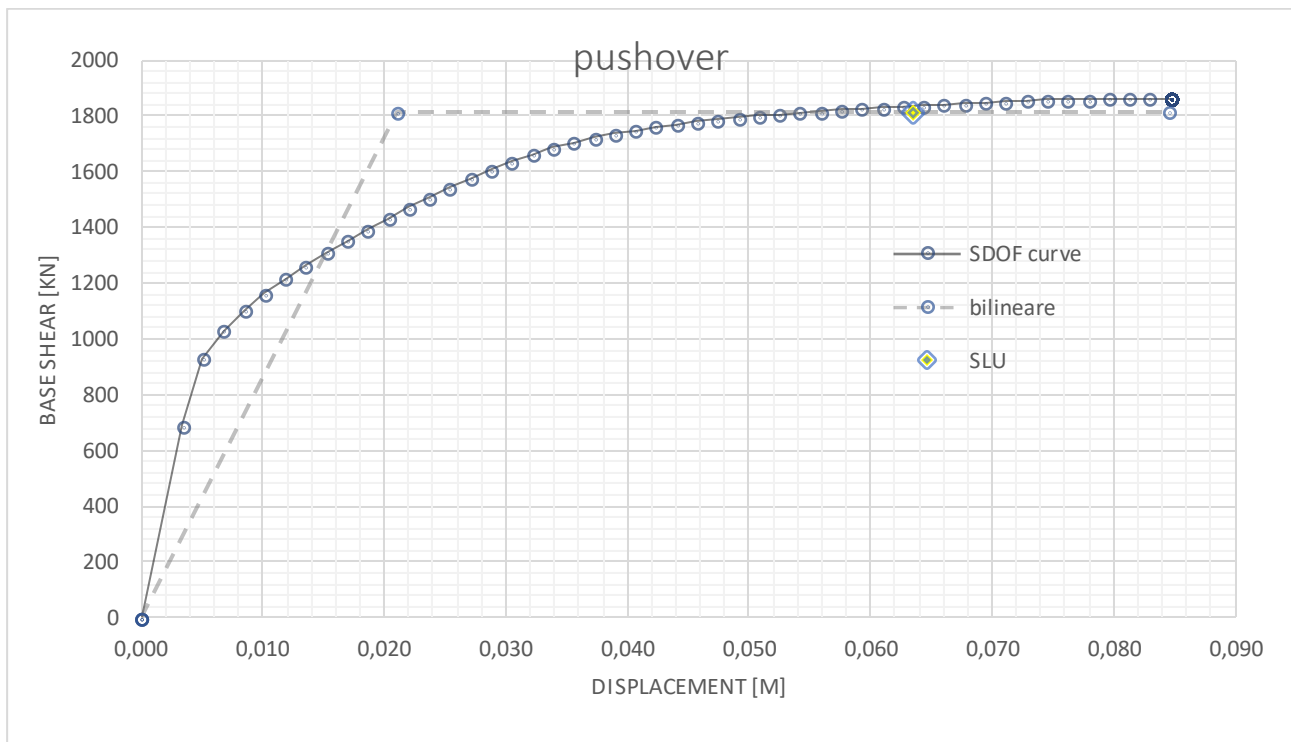


Figura 23 - bilinearizzazione pushover longitudinale

Dove il punto finale rappresenta la SLC e lo SLV è preso come quota parte di quest'ultimo secondo quanto riportano nel C.8.7.2.3.3:

$$D_{SLV} = 3/4 D_{SLC} = 0.063 \text{ m}$$

Direzione Forte

Area curva	<b>280.4</b>
Area bil	280.4

Fu	2804.979528	KN
du	0.116846403	m
Fsecante	<b>1963.48567</b>	KN
Fy	2783.8	KN
dy	0.032	m

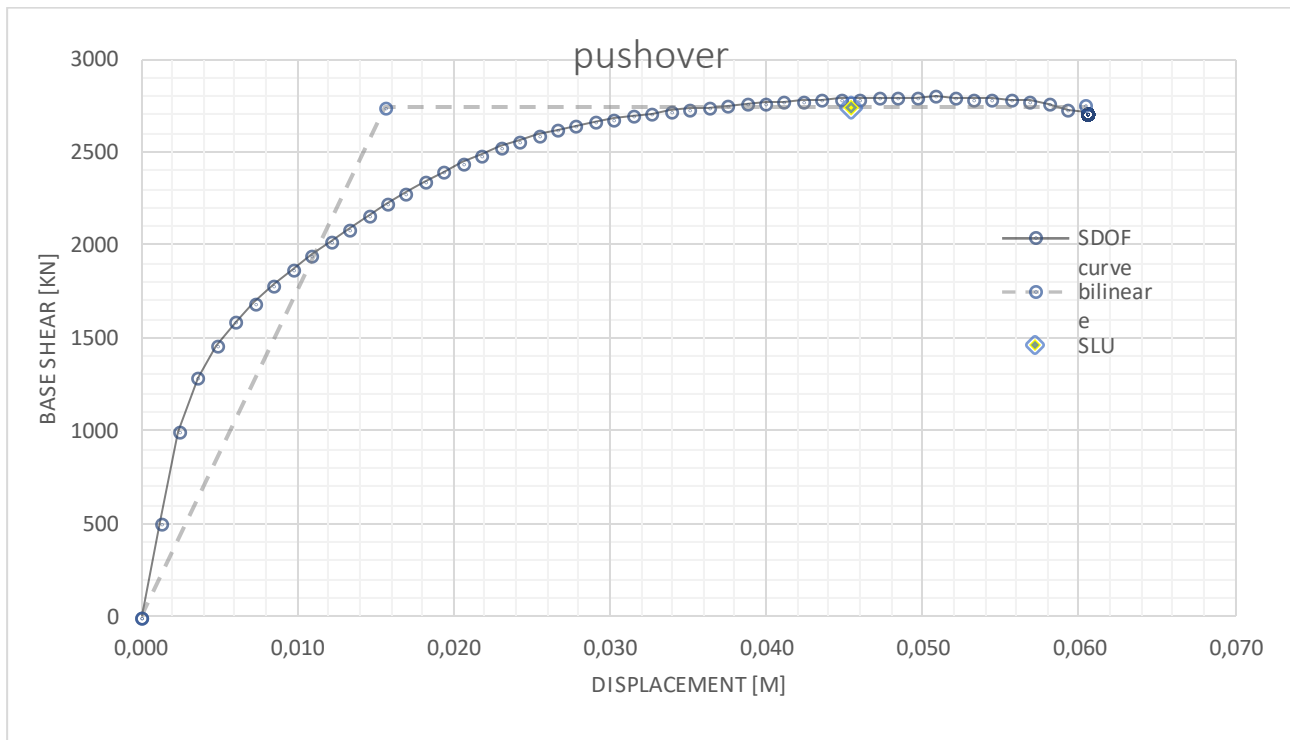


Figura 24 - bilinearizzazione pushover trasversale

$$D_{SLV} = 3/4 D_{SLC} = 0.045 \text{ m}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

## 11. DETERMINAZIONE DELLO SPOSTAMENTO DI RIFERIMENTO

Nella definizione del punto di performance sono stati valutati ulteriori meccanismi che, nella pila in esame, non hanno modificato il meccanismo di collasso. Nello specifico è necessario verifiche se prima del raggiungimento dello spostamento  $D_{SLV}$  si instaurano meccanismi che ne limitano il comportamento duttile.

### 11.1 Meccanismo tagliante

Secondo quanto scritto C.8.8.5.5 si è eseguita la valutazione della resistenza a taglio della pila con gli specifici accorgimenti del §8.5.4.

direzione 1 – debole

NTC C.8.8.5.5

area sezione cls	Ag	2160000	mm <sup>2</sup>	
area sezione cls netto	Ac	1820000	mm <sup>2</sup>	
armatura long	ϕlong	16	mm	
numero ferri long	n long	116		
area barra long	As	201.1	mm <sup>2</sup>	
percentuale meccanica	ptot	0.0108		
diametro staffa	ϕtrasv	14	mm	
numero di bracci	nb	4		
area staffa	Asw	615.8	mm <sup>2</sup>	
passo staffe	s	250	mm	
duttilità	k	0.29		
taglio calcestruzzo	Vc	1407	kN	
assiale	N	10365	kN	
asse neutro	x	1.005895015	m	
lunghezza di taglio	Ls	12.7	m	
contributo per assiale	VN	691.3	kN	
area totale staffe	Asw	615.8	mm <sup>2</sup>	
contributo staffe	Vs	1617.6	kN	
coef. elastico	γel	1.25		
resistenza totale per 1 valore di dutt.	Vrd tot	3026		2973

NTC 4.1.2.3.5.2

resistenza ridotta	$v_{fc}$	5.56	Mpa
--------------------	----------	------	-----

Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA IA5F	LOTTO 03	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI0000001	REV. A	FOGLIO 31 di 106
----------------------------------	------------------	-------------	----------------	------------------------	-----------	---------------------

braccio delle forze interne	$z=0.9d$	238.5	238.5
larghezza biella	bw	70	cm
inclinazione staffe	$\alpha$	90	gradi
inclinazione biella	$\vartheta$	24.7	gradi
resistenza puntoni	Vc	3519	kN
resistenza staffe	Vs	3519	kN
taglio resistente	Vr	3519.4	kN

\* (puntone variabile)

direzione 2 - forte

NTC C.8.8.5.5

area sezione cls	Ag	4380000	mm <sup>2</sup>
area sezione cls netto	Ac	3852000	mm <sup>2</sup>
armatura long	$\phi$ long	26	mm
numero ferri long	n long	160	
area barra long	As	201	mm <sup>2</sup>
percentuale meccanica	$\rho$ tot	0.0053	
dimetro staffa	$\phi$ trasv	14	mm
numero di bracci	nb	2	
area staffa	Asw	615.8	mm <sup>2</sup>
passo staffe	s	250	
duttilità	k	0.29	
taglio calcestruzzo	Vc	2979	
assiale	N	11110	KN
asse neutro	x	1.67	m
lunghezza di taglio	Ls	12.7	m
contributo per assiale	VN	1121.5	kN
area totale staffe	Asw	615.8	mm <sup>2</sup>
contributo staffe	Vs	2643.0	kN
coef elastico	$\gamma$ el	1.25	
resistenza totale per 1 valore di dutt	Vrd tot	5395	kN

NTC 4.1.2.3.5.2

resistenza ridotta	$\nu$ f c	5.6	Mpa
braccio delle forze interne	z	389.7	cm
larghezza biella	bw	90	cm
inclinazione staffe	$\alpha$	90	gradi
inclinazione biella	$\vartheta$	21.8	gradi
resistenza puntoni	Vc	6719	kN



resistenza staffe

Vs

6608

kN

Resistenza a taglio sezione

Vr

6608

kN

\*automatico più critico (puntone variabile)

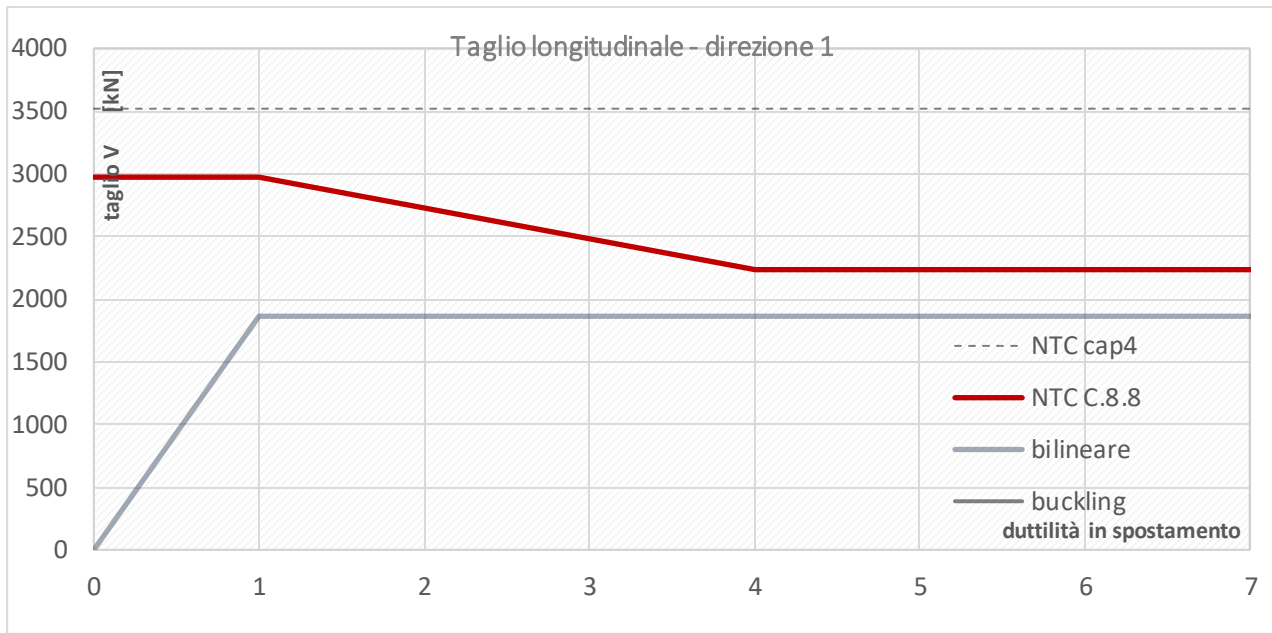


Figura 25 - interazione flessione taglio - dir. Longitudinale

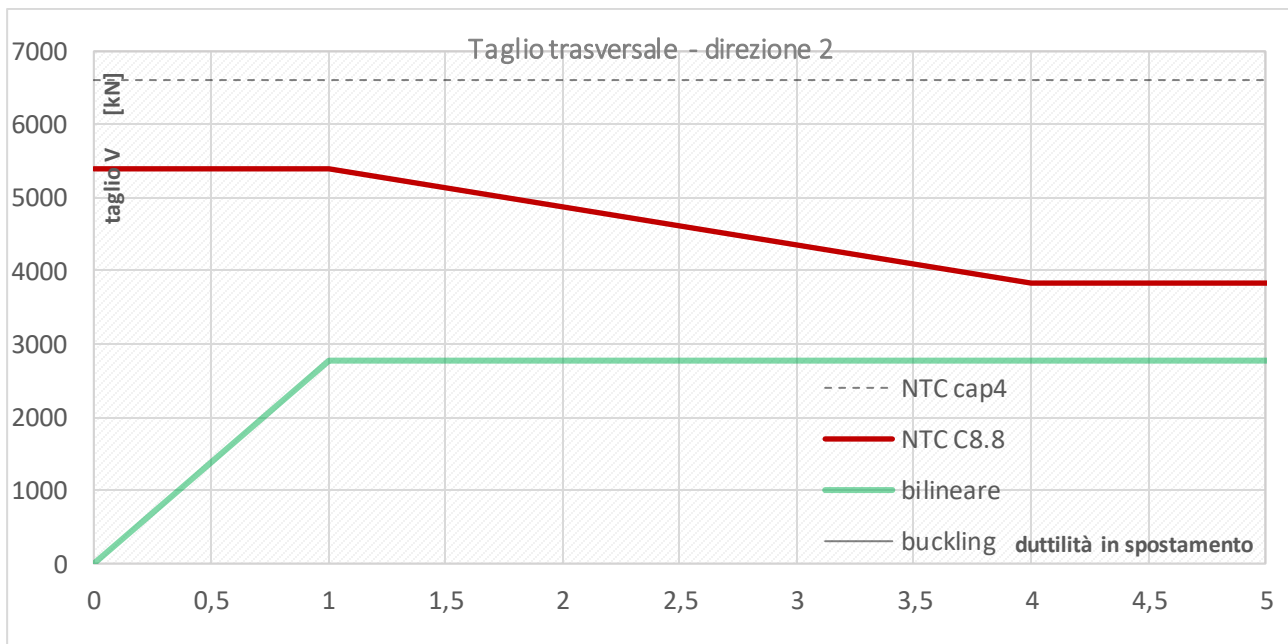



Figura 26 - interazione flessione taglio - dir. trasversale

	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>33 di 106</b>


È possibile notare come l'interazione dei fenomeni possa comportare una rottura anticipata rispetto alla flessione pura. Di fatto, per alcune pile del viadotto lo spostamento ultimo di riferimento è stato identificato dal punto d'intersezione tra le due curve. Nel calcolo della vulnerabilità (IR, IS-V,  $\zeta_E$ ) il punto di performance tenuto in considerazione è sempre stato valutato come:

$$\Delta_{\text{performance}} = \min \begin{cases} \Delta_{SLV} = \% \Delta_{SLV} \\ \Delta_{\text{taglio}} \\ \Delta_{\text{buckling}} \end{cases}$$

## 11.2 Instabilità delle barre longitudinali

Si è utilizzata una formulazione semplificata proposta da Berry and Eberhard 2005 per identificare uno spostamento di buckling rappresentativo del fenomeno. L'articolo e le campagne sperimentali associate sono improntati su colonne di edifici con sezione, armature e snellezze variabili.

Questa trattazione si basa sulla definizione di curvatura plastica normalizzata che dipende prevalentemente dal carico assiale gravante sulla sezione; riscrivendo questa relazione Berry permette di ottenere la relativa deformazione delle barre che porta all'instabilità. La capacità delle barre, in termini di caratteristiche meccaniche e percentuali geometriche, è sostanzialmente racchiusa in questa deformazione, che entra implicitamente all'interno delle diverse formulazioni a breve riportate. Nello specifico la trattazione permette di ottenere una qualsiasi grandezza di interesse (curvatura, spostamento e drift) per via diretta, ed essendo tra loro connesse, i coefficienti tarati sulle sperimentazioni possono rimanere i medesimi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

$$\Delta_{bb} = \lambda f_y / 3E_s L^2 / D + L C_0 (1 + C_1 \rho_{eff}) \left(1 - C_2 P / A_g f_c\right)^{-1} \left(1 + C_3 L / D + C_4 f_y d_b / D\right)$$

$$\Delta_{bb} = 0.0325 L \left(1 + k_e \rho_{eff} d_b / D\right) \left(1 - P / A_g f_c\right) \left(1 + L / 10D\right) \text{ formulazione semplificata}$$

$$\theta_{pla\_bb} = L C_0 (1 + C_1 \rho_{eff}) \left(1 - C_2 P / A_g f_c\right)^{-1} \left(1 + C_3 L / D + C_4 f_y d_b / D\right)$$

$\lambda$  = parametro di approssimazione della curvatura elastica

$L$  = altezza totale pila     $\rho_{eff} = \rho_s f_y / f_c$  = rapporto volumetrico trasversale

$d_b$  = diametro barre long.     $D$  = altezza sezione in direzione del sisma

$P$  = carico assiale     $A_g$  = area di cls     $C$  = coeff.

Figura 27- relazioni empiriche (Berry and Eberhard 2005)

Vista la natura della campagna sperimentale, lo spostamento di buckling si è valutato con tutte le formulazioni e successivamente presa la più vincolante; per cui a seconda della formulazione adottata si è giunti allo spostamento di buckling per mezzo di:

$$\chi_{pla\_bb} = \theta_{pla\_bb} / L_p$$

$$\Delta_{pla\_bb} = \chi_{pla\_bb} L_p L_{cant}$$

$$\Delta_{bb} = \Delta_{pla\_bb} + \Delta_y$$

Geometria Staffe	$\lambda$	$k_e$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
Rettangolari	2.14	40	0.019	1.650	1.797	0.012	0.072
Circolari	2.45	150	0.006	7.190	3.129	0.651	0.227

Figura 28 - Coefficienti di calibrazione per la formulazione del buckling (Berry and Eberhard 2005)

Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	03	CL	VI0000001	A	35 di 106

buckling di calcolo	$\Delta_{bb}$	<b>0.186</b>
---------------------	---------------	--------------

**Direzione 1 – debole/longitudinale**

azione assiale	P	10365
lunghezza cantilever	Lc	12.70
altezza sezione	D	2.7
resistenza calcestruzzo	f c	16.7
area calcestruzzo	Ag	2.2
area armatura long	As	23323

diametro barre long	$\varphi$	16
resistenza acciaio barre long	fy	275.4
lunghezza strain penetration	Lsp	0.10
lunghezza cerniera plastica	Lp	1.27
lunghezza di riferimento	Leff	12.80
diametro staffe	db	0.026

resistenza acciaio	fy	275.4
passo staffe	s	0.25
area armatura trasversale	Asw	0.00062
percentuale volumetrica	$\rho_s$	0.00114028
parametro per curvatura	$\lambda$	2.14
modulo elastico	Es	200000

percentuale armatura	$\rho_{eff}$	0.028
coefficiente buckling	Ke_bb	40

termine 1	1.01
termine 2	0.57
termine 3	1.47
$\Delta_{bb}$	<b>0.347</b>

**spostamento per buckling**

*formulazione semplificata*

C0	0.019
C1	1.65
C2	1.797
C3	0.012
C4	0.072

Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA IA5F	LOTTO 03	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI0000001	REV. A	FOGLIO 36 di 106
----------------------------------	------------------	-------------	----------------	------------------------	-----------	---------------------

termine 0	0.004619628
termine 1	0.019885925
termine 2	0.999224522
termine 3	1.173932367
<b><math>\Delta_{bb}</math></b>	0.355

**spostamento per buckling**

*formulazione completa, con ipotesi di curvatura elastica*

drift plastico per buckling	$\theta_{p\_bb}$	0.013143968
curvatura plastica di buckling	$\chi_{p\_bb}$	0.0103
spostamento plastico di buckling	$\Delta_{p\_bb}$	0.168
rotazione snervamento	$\theta_y$	0.21%
<b>drif totale di buckling</b>	<b><math>\theta_{bb}</math></b>	<b>1.53%</b>
curvatura di snervamento	$\chi_y$	0.0003
curvatura totale di buckling	$\chi_{bb}$	0.011
spostamento elastico	$\Delta_y$	0.018
<b>spostamento totale di buckling</b>	<b><math>\Delta_{bb}</math></b>	<b>0.186</b>

buckling di calcolo	<b>0.214</b>
---------------------	--------------

Direzione 2 – forte7trasversale

azione assiale	P	11110
lunghezza cantilever	Lc	17.30
altezza sezione	D	4.38
resistenza calcestruzzo	f c	11.11
area calcestruzzo	Ag	4.4
area armatura longitudinale	As	23323

diametro barre long	$\varphi$	16
resistenza acciaio barre long	f <sub>y</sub>	317
lunghezza strain penetration	L <sub>sp</sub>	0.18
lunghezza cerniera plastica	L <sub>p</sub>	0.67
lunghezza di riferimento	L <sub>eff</sub>	6.88
diametro staffe	d <sub>b</sub>	0.016

resistenza acciaio	f <sub>y</sub>	275.3623188
--------------------	----------------	-------------

Relazione di calcolo Pushover	COMMESSA IA5F	LOTTO 03	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI0000001	REV. A	FOGLIO 37 di 106
----------------------------------	------------------	-------------	----------------	------------------------	-----------	---------------------

passo staffe	s	0.25
area armatura trasversale	$A_{sw}$	0.00080
percentuale volumetrica	$\rho_s$	0.000734
parametro per curvatura	$\lambda$	2.14
modulo elastico	$E_s$	200000
percentuale armatura	$\rho_{eff}$	0.0182
coefficiente buckling	$K_{e\_bb}$	40
	termine 1	1.01
	termine 2	0.79
	termine 3	1.29
<b>spostamento per buckling</b> <i>formulazione semplificata</i>	<b><math>\Delta_{bb}</math></b>	<b>0.420</b>
	C0	0.019
	C1	1.65
	C2	1.797
	C3	0.012
	C4	0.072
	termine 0	0.002847716
	termine 1	0.019570637
	termine 2	0.999617422
	termine 3	1.107218582
<b>spostamento per buckling</b>	<b><math>\Delta_{bb}</math></b>	<b>0.311</b>
drift plastico per buckling	$\theta_{p\_bb}$	0.01567122
curvatura plastica di buckling	$\chi_{p\_bb}$	0.0123
spostamento plastico di buckling	$\Delta_{p\_bb}$	0.201
rotazione usnervamento	$\theta_y$	0.30%
<b>drif totale di buckling</b>	<b><math>\theta_{bb}</math></b>	<b>1.87%</b>
curvatura di snervamento	$\chi_y$	0.0003
curvatura totale di buckling	$\chi_{bb}$	0.013
spostamento elastico	$\Delta_y$	0.014
<b>spostamento totale di buckling</b>	<b><math>\Delta_{bb}</math></b>	<b>0.214</b>

Confrontando questo spostamento con quello ottenuto dalla push-over numerica non si ha interazione del fenomeno con il comportamento atteso.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>

## 12. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Secondo quanto descritto nel C.8.3: “le NTC introducono due nuovi parametri che costituiscono fattori indicativi per un rapido confronto tra l’azione sopportabile da una struttura esistente e quella richiesta per il nuovo:”

- $\zeta_E$ , definito come il rapporto tra l’azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l’azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul medesimo suolo e con le medesime caratteristiche (periodo proprio, fattore di comportamento ecc.). Il parametro di confronto dell’azione sismica da adottare per la definizione di  $\zeta_E$  è, salvo casi particolari, l’accelerazione al suolo  $a_g S$ .
- $\zeta_{vi}$ , definito come il rapporto tra il valore massimo del sovraccarico verticale variabile sopportabile dalla parte i-esima della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione.

Per il secondo rapporto  $\zeta_{vi}$  essendo i carichi di progetto gli stessi, esso risulta essere sempre pari all’unità. Per la valutazione del rapporto  $\zeta_E$  si riportano gli step adottati per la valutazione nel rispetto delle Norme e delle Linee Guida [6].

### 12.1 Procedura utilizzata per la determinazione della domanda e della capacità

Per l’analisi non lineare statica la circolare esplicativa al C.8.8.5.3 specifica come poter determinare la domanda di spostamento dell’oscillatore equivalente di un ponte esistente.

La determinazione del comportamento inelastico di riferimento viene ottenuta a partire da quella elastica:

$$\begin{cases} S_{Di}(T) = S_{De}(T) & T \geq T_C \\ S_{Di}(T) = \frac{S_{De}(T)}{q} \left[ 1 + (q-1) \frac{T_C}{T} \right] & T < T_C \end{cases} \quad [C8.8.5.1]$$

dove:

$$q = m S_e(T) / F_y$$

con

$$m = \sum m_i \Phi_i \quad e \quad F_y \quad \text{la massa e la resistenza dell’oscillatore equivalente.}$$

Questa procedura è sostanzialmente quella proposta da Fajfar, P 2000 ed introdotta negli Eurocodice8 come “N2 method”. Tale metodo si basa sulla ipotesi di egual spostamento con una

piccola correzione nel campo delle medio-grandi frequenze ( $T^* < T_c$ ) in quanto la duttilità associata a questo intervallo non è costante.

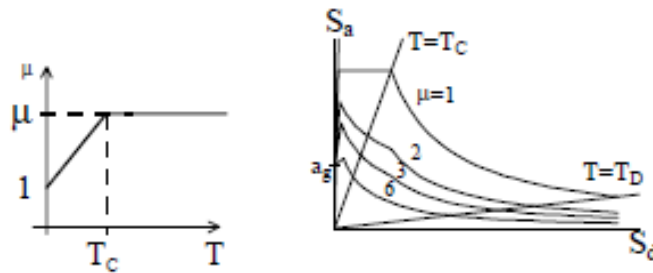


Figura 29 - relazione tra duttilità e spettro inelastico (Fajfar2000)

Allora partendo dallo spostamento è possibile definire uno specifico punto, punto di prestazione (PP), dato dall'intersezione del prolungamento della rigidezza elastica equivalente con quest'ultimo (Metodo A C7.3.4.2):

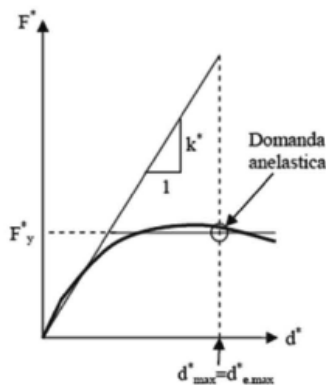


Figura C7.3.2a – Spostamento di riferimento per  $T \geq T_c$

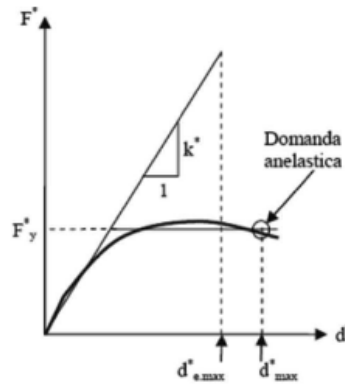


Figura C7.3.2b – Spostamento di riferimento per  $T < T_c$

$$d_{max}^* = d_{e,max}^* = S_{De}(T^*)$$

$$d_{max}^* = \frac{d_{e,max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] \geq d_{e,max}^*$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}}$$

dove  $m^* = \Phi M \tau$  e  $k^*$  è la rigidezza del tratto elastico della bilineare.

dove  $q^* = S_e(T^*)m^*/F_y^*$  è il rapporto tra la forza di risposta elastica e la forza di snervamento del sistema equivalente.

Se risulta  $q^* \leq 1$  allora si ha  $d_{max}^* = d_{e,max}^*$ .

È possibile riportare la forza-spostamento ed il PP all'interno della "Acceleration Displacement Response Spectrum (ADRS)" per poter identificare correttamente il  $\zeta_E$  che, salvo



particolari casi, è rappresentato dal confronto delle accelerazioni al suolo  $a_g$  S tra domanda e capacità.

La trasformazione della forza-spostamento dello MDOF deve essere prima riportata ad uno SDOF mediante il fattore di partecipazione modale  $\Gamma_1$ , e successivamente trasformata in accelerazione-spostamento per mezzo della massa inerziale del sistema equivalente  $m^*$ :

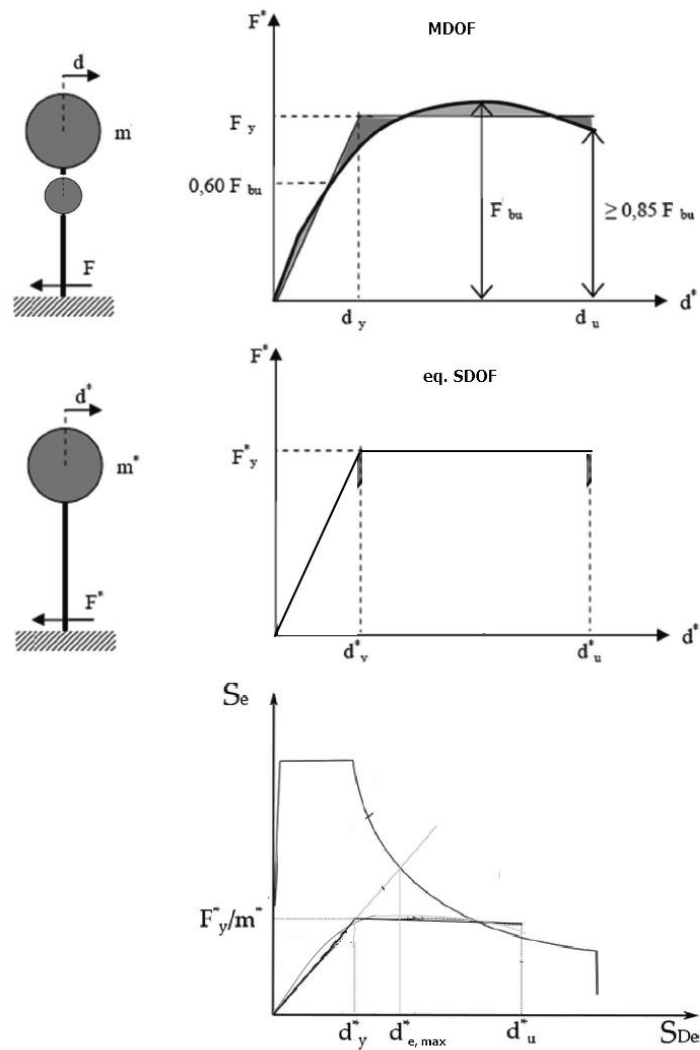


Figura 30 - trasformazione del sistema reale a singolo grado di libertà equivalente ed inserimento della pushover nella ADRS

	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>41 di 106</b>

La forza  $\bar{F}^*$  e lo spostamento  $d^*$  del sistema equivalente sono legati alle corrispondenti grandezze  $F_b$  e  $d_c$  del sistema reale dalle relazioni:

$$\bar{F}^* = F_b / \Gamma \quad [C7.3.3]$$

$$d^* = d_c / \Gamma \quad [C7.3.4]$$

dove  $\Gamma$  è il “fattore di partecipazione modale” definito dalla relazione:

$$\Gamma = \frac{\varphi^T M \tau}{\varphi^T M \varphi} \quad [C7.3.5]$$

Si riporta una Flowchart della procedura per maggior chiarezza:

**EQUIVALENT SDOF MODEL**

- a) Determine mass  $m^*$

$$m^* = \sum m_i \Phi_i$$

Note:  $\Phi_n = 1.0$ ,  $n$  denotes roof level

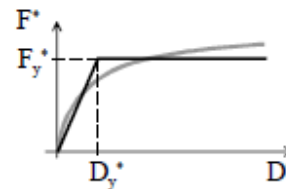
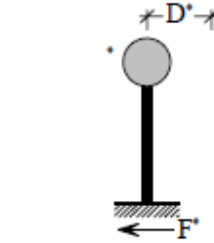
- b) Transform MDOF quantities ( $Q$ ) to SDOF quantities ( $Q^*$ )

$$Q^* = \frac{Q}{\Gamma}, \quad \Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2}$$

- c) Determine an approximate elasto-plastic force – displacement relationship

- d) Determine strength  $F_y^*$ , yield displacement  $D_y^*$ , and period  $T^*$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}}$$



- e) Determine capacity diagram (acceleration versus displacement)

$$S_a = \frac{F^*}{m^*}$$

**SEISMIC DEMAND FOR SDOF MODEL**

- a) Determine reduction factor  $R_\mu$

$$R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}}$$

- b) Determine displacement demand  $S_d = D^*$

$$S_d = \frac{S_{de}}{R_\mu} \left( 1 + (R_\mu - 1) \frac{T_C}{T^*} \right) \quad T^* < T_C$$

$$S_d = S_{de} \quad T^* \geq T_C$$

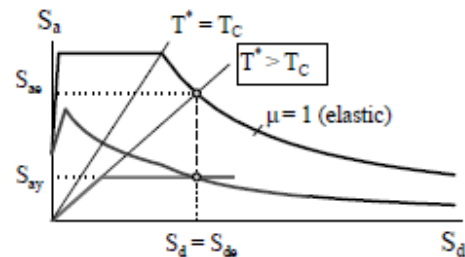
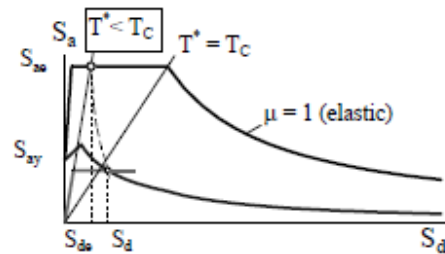


Figura 31 - procedura N2 (Fajfar 2000)

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>43 di 106</b>

## 12.2 Determinazione della massa inerziale equivalente e del fattore di partecipazione

Nel caso di una pila isolata, la massa partecipante è circa il 95% e il fattore di partecipazione che trasforma le forze e gli spostamenti ad un sistema ad un grado di libertà è assumibile pari a 1. Tramite una analisi modale è possibile identificare correttamente i parametri:

spostamenti modali del primo modo  $\Phi$

nodo	$\Phi$	$\Phi$	$\Phi$ normalizzato	masse nodali		
				$M_i$	$m_i \Phi_n$	$m_i \Phi_n^2$
0	0	0.033321	0	146.5	0	0
1	0.001544		0.046337145	293	13.57678	0.629109
2	0.00459		0.137750968	293	40.36103	5.559771
3	0.00888		0.266498604	293	78.08409	20.8093
4	0.014154		0.424777168	293	124.4597	52.86764
5	0.020154		0.604843792	293	177.2192	107.19
6	0.026627		0.799105669	293	234.138	187.101
7	0.033321		1	8456.5	8456.5	8456.5

massa relativa allo SDOF  
 percentuale di massa equivalente  
 fattore di partecipazione modale

$m^*$   
 %  
 $\Gamma$

<b>9124</b>	kN
<b>88%</b>	
<b>1.03</b>	

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI000001</b>	REV. <b>A</b>

### 12.3 Determinazione della domanda

Nel rispetto della procedura precedentemente delineate si riportano i dati in riferimento alla pila in esame nelle due direzioni principali del moto sismico.

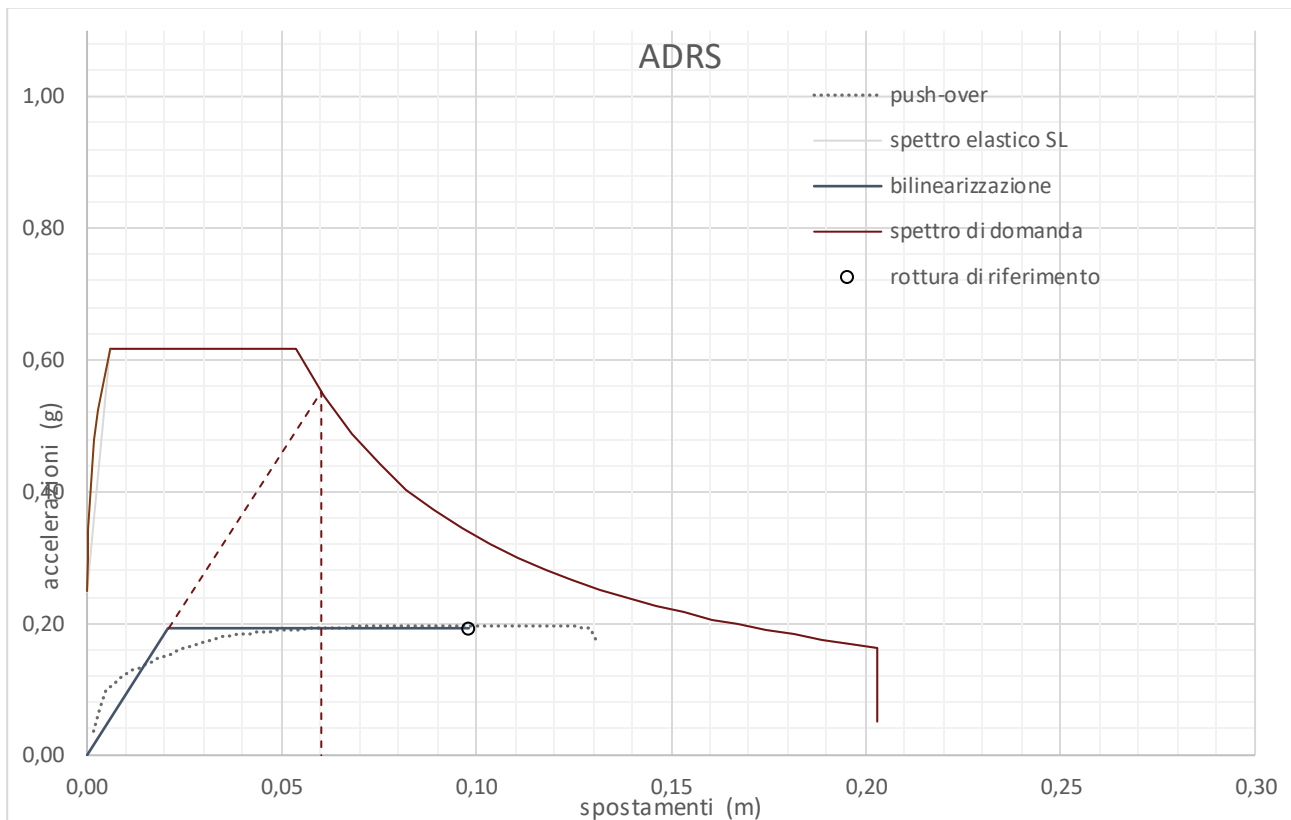


Figura 32 - Domanda Longitudinale

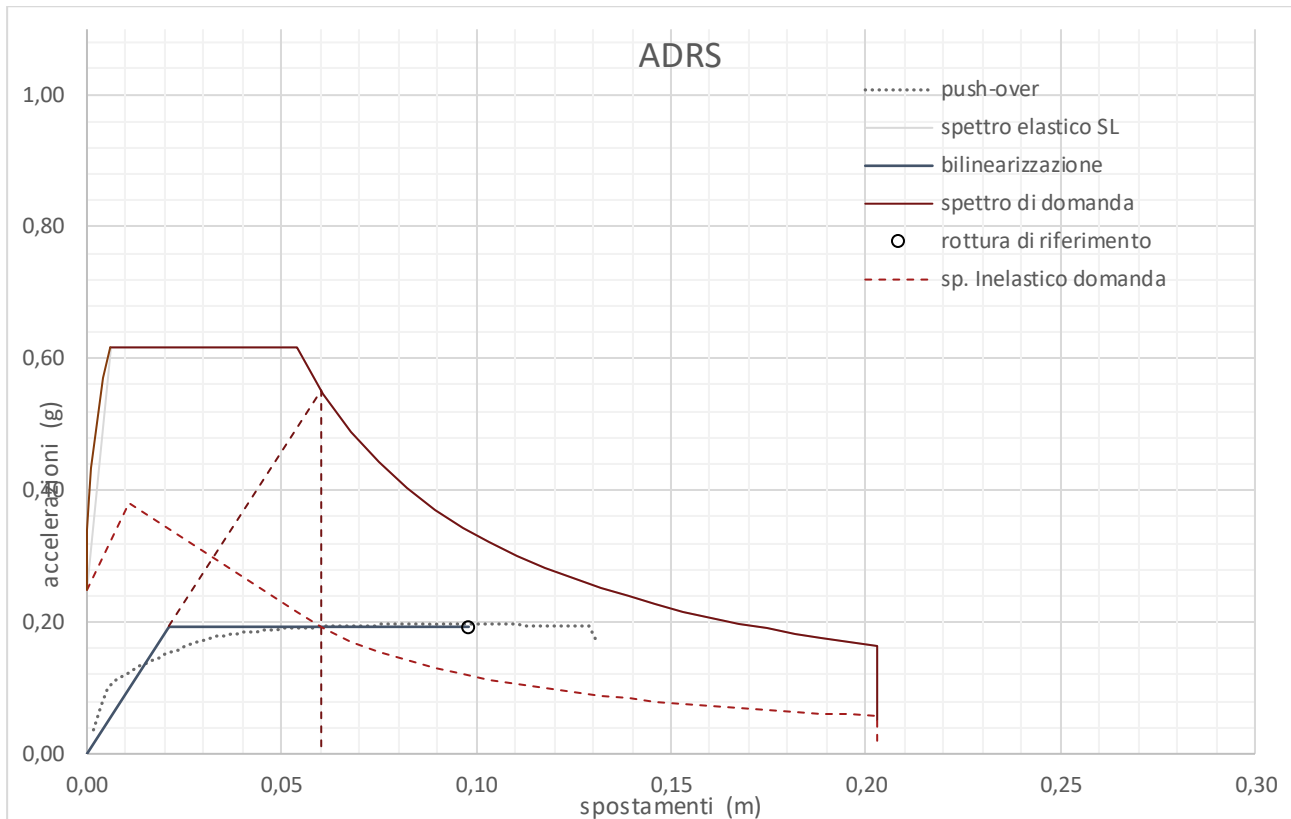


Figura 33 - Domanda trasversale

#### 12.4 Determinazione della capacità

La determinazione della capacità strutturale segue la logica del processo prima descritto ma questa volta lo spostamento inelastico è rappresentato dal punto ultimo della curva bilineare (PP), per cui a ritroso si identifica il punto elastico, si individua il punto d'intersezione con il prolungamento della rigidezza elastica dello SDOF ed infine si individua lo spettro elastico passante per il punto d'intersezione.

Questa procedura è iterativa in quanto per identificare lo spettro è necessario variare il TR, quindi i parametri indipendenti ad esso associati fino all'ottenimento di una perfetta coincidenza.

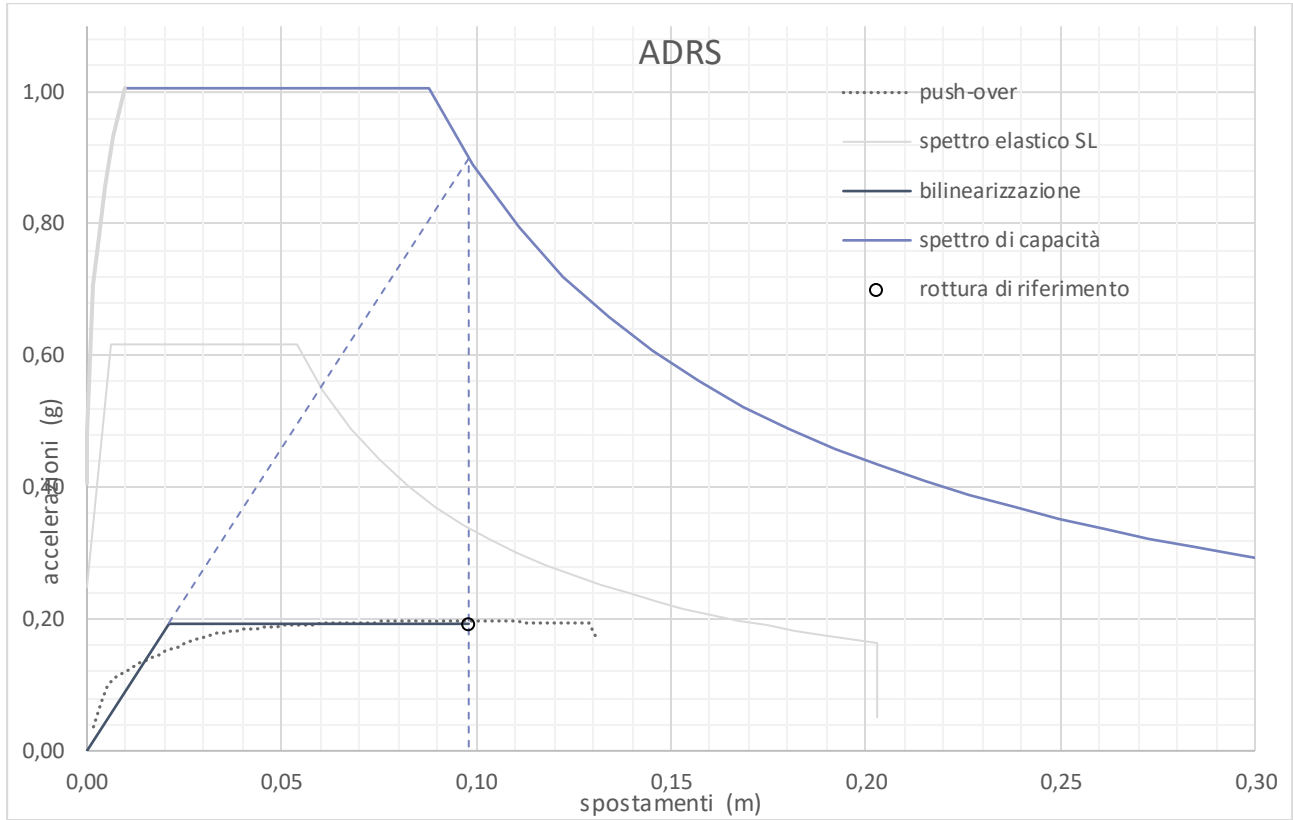


Figura 34 - Capacità Longitudinale

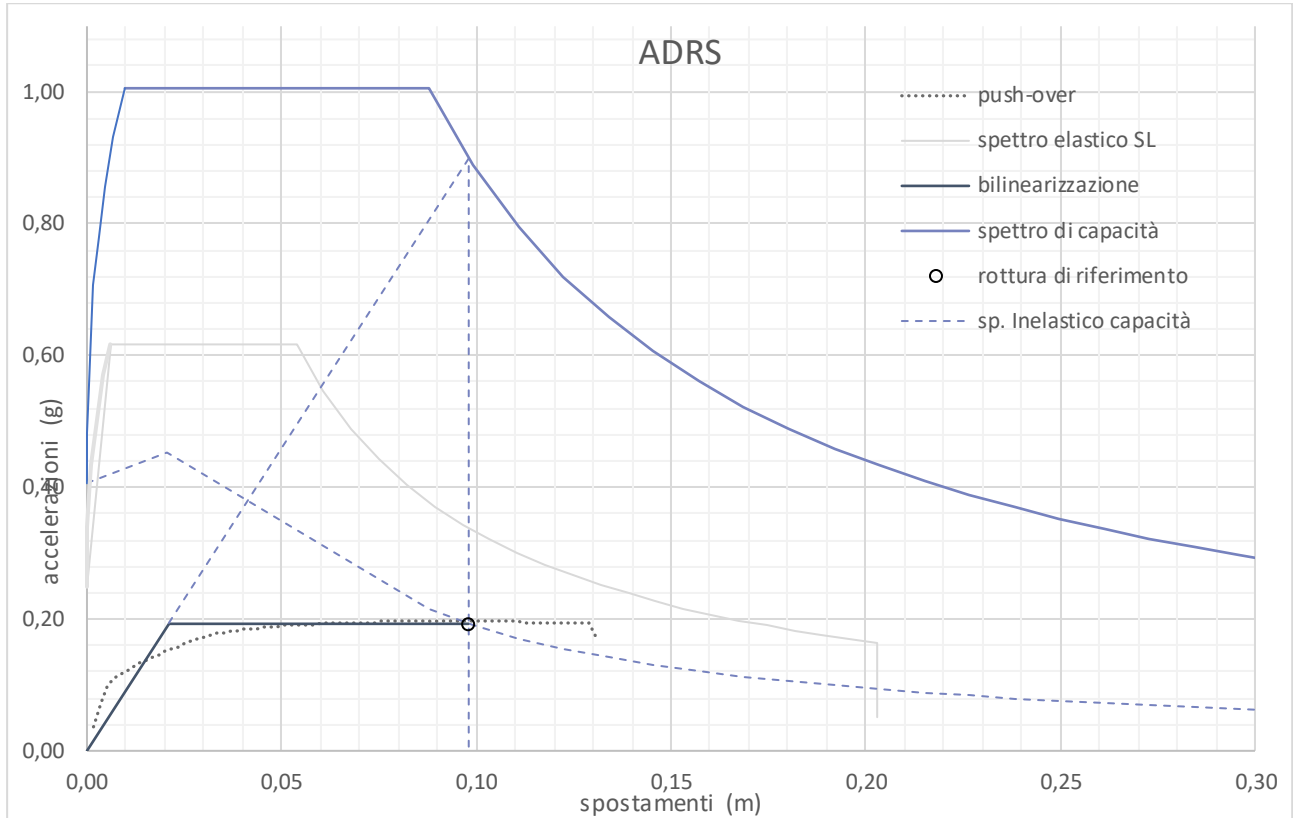


Figura 35 - Capacità Trasversale

In questo caso specifico, la rottura anticipata a taglio nel ramo elastico porta alla definizione di uno spettro inelastico coincidente con quello elastico.

### 12.5 Vulnerabilità Sismica

Mettendo in relazione la domanda e la capacità si identifica il suddetto parametro di riferimento per la valutazione della vulnerabilità sismica in duttilità.



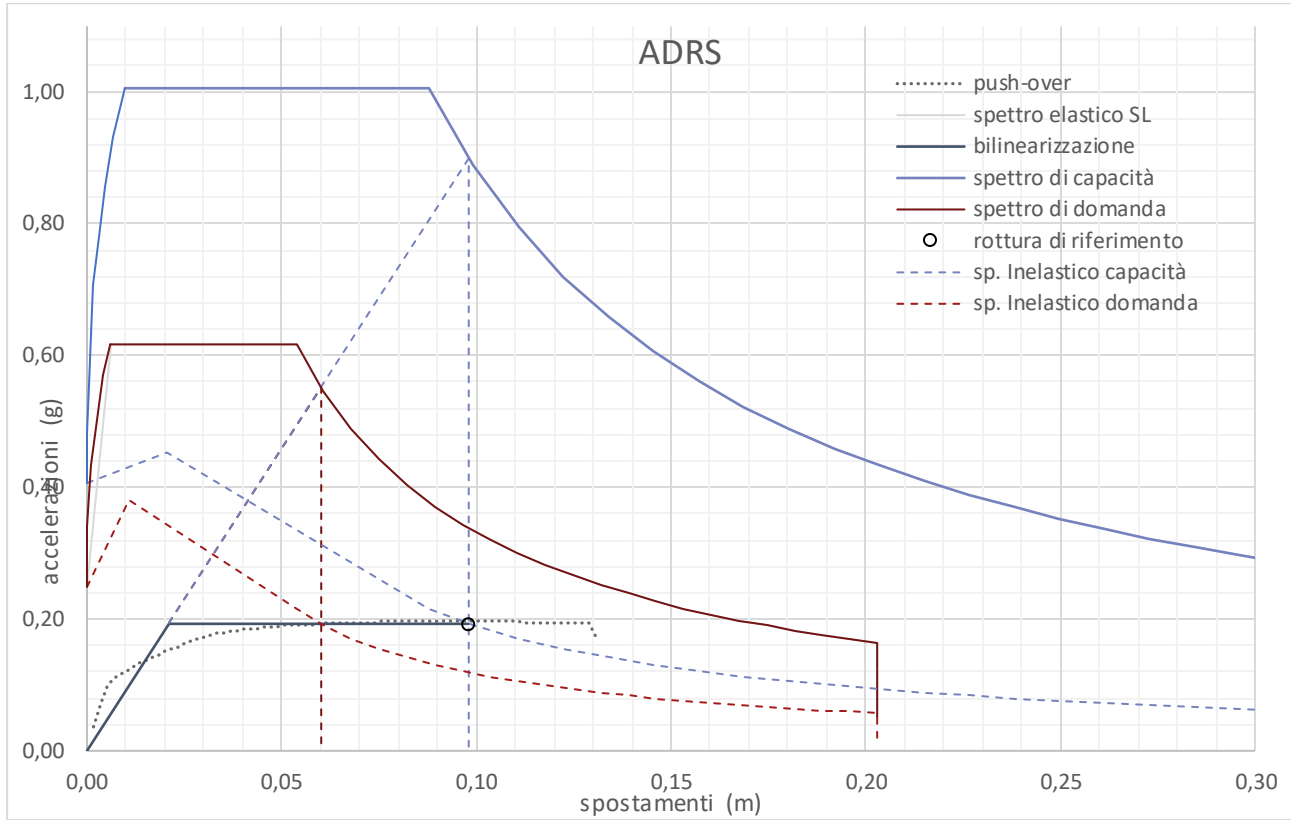


Figura 36 - confronto capacità/ domanda longitudinale

	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.06017	0.249062	0.158942	475	1.63
capacità	0.09805	0.406051	0.259126	2070	

Figura 37 - tabella riassuntiva comportamento Longitudinale

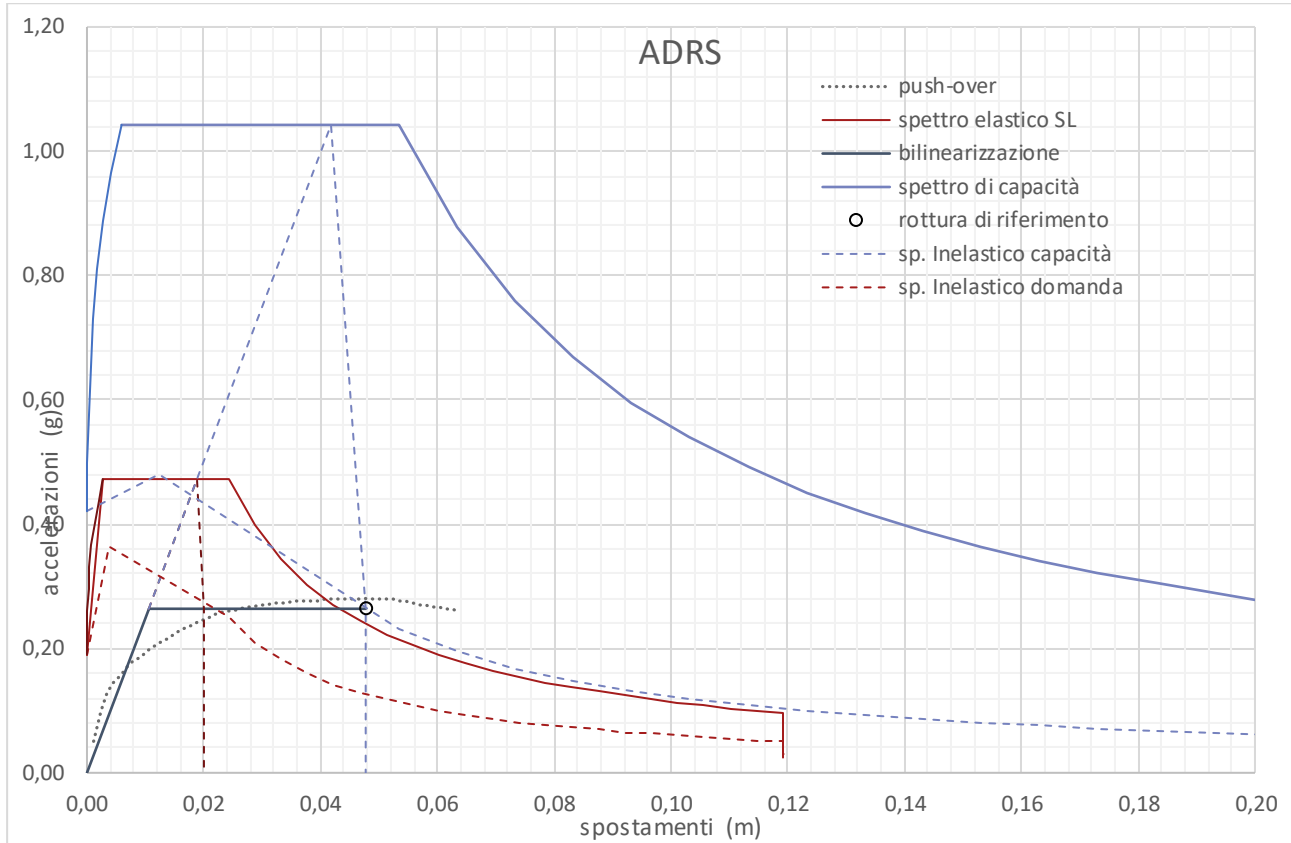


Figura 38 - confronto capacità/ domanda trasversale

	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta_E$
domanda	0.01894	0.190752	0.15896	475	2.21
capacità	0.04177	0.420776	0.350647	5289	

Figura 39 - tabella riassuntiva comportamento Trasversale

Da questi grafici è possibile vedere come il confronto della domanda inelastica o con la domanda elastica è il medesimo essendo alla base del metodo di verifica.

Bisogna specificare che, qualora la struttura risulti poco performante ( $Tr < 30$ anni) o troppo performante ( $Tr > 2475$ anni), è possibile identificare comunque il parametro  $\zeta_E$ , tramite uno spettro semplificato ottenuto mediante un fattore di scala applicato allo spettro di domanda.

Si riporta il confronto in una sola direzione:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	Relazione di calcolo <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

Per questo esempio di confronto si riporta la pila esagonale del Basento\_VI01:

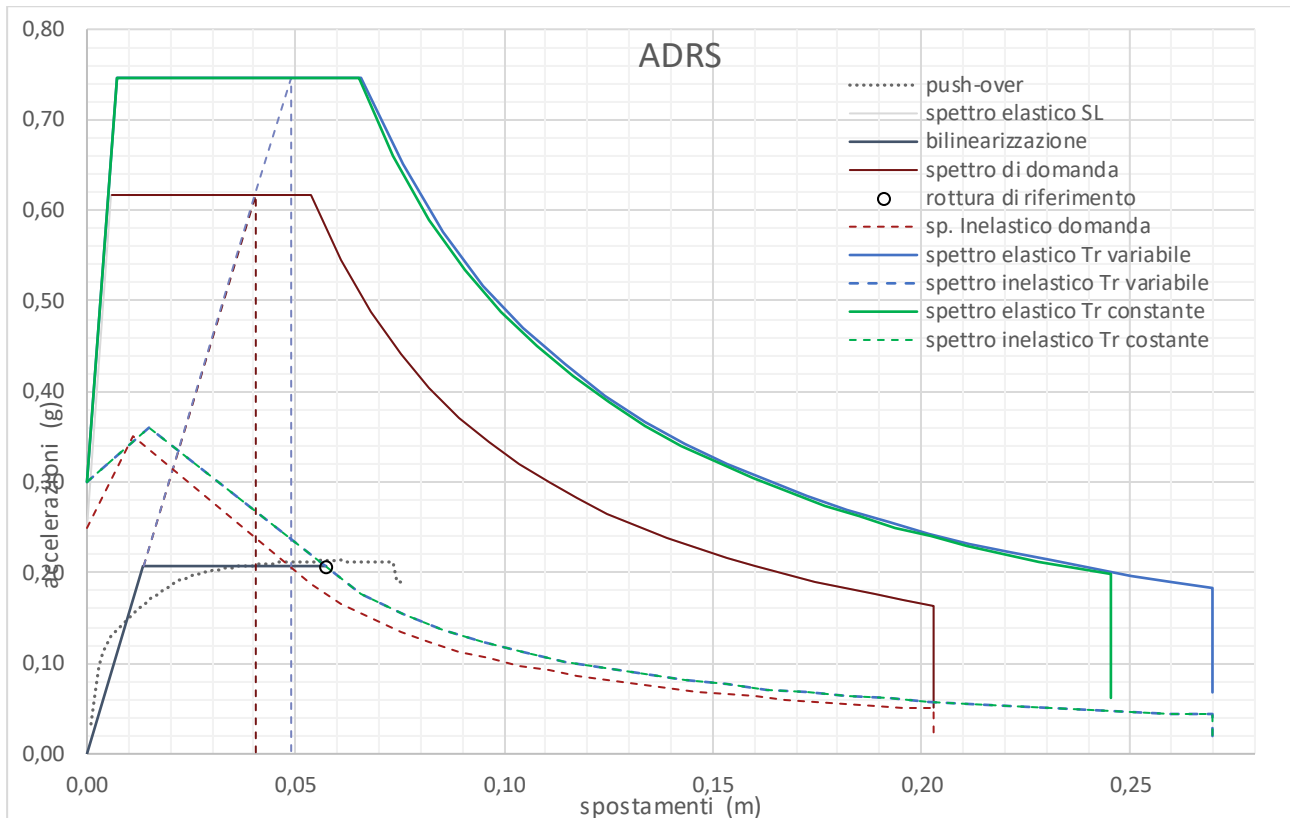



Figura 40 - Confronto metodo semplificato con metodo iterato su Tr

	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta_E$
domanda	0.04047	0.249062	0.158942	475	1.20
capacità	0.04895	0.29906	0.190849	1103	

	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta_E$
domanda	0.04047	0.249062	0.158942	475	1.21
capacità	0.04895	0.301212	0.192222	832	

Figura 41 - tabelle riassuntive

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>Nuova linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<i>Relazione di calcolo</i> <i>Pushover</i>	COMMESSA <b>IA5F</b>	LOTTO <b>03</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>VI0000001</b>	REV. <b>A</b>

### 13. RIEPILOGO DEI RISULTATI

Di seguito si riportano due tabelle riassuntive con i coefficienti di vulnerabilità ottenuti dall'analisi di cui sopra, svolte per terreni di categoria B, C e E. In appendice è riportata l'esplicitazione degli stessi.

		<b>TERRENO B</b>		
		pile <<13m	pila media 7.5	pile <13m
$\zeta^E$	trasversale	1.15	2.00	1.96
$\zeta^E$	longitudinale	0.79	1.14	2.67
		pile >13m	pile >>13m	pile esagonali
$\zeta^E$	trasversale	2.30	2.27	2.00
$\zeta^E$	longitudinale	4.65	1.26	2.04

		<b>TERRENO C</b>		
		pile <<13m	pila media 7.5	pile <13m
$\zeta^E$	trasversale	1.79	1.29	1.04
$\zeta^E$	longitudinale	0.71	0.77	1.01
		pile >13m	pile >>13m	pile esagonali
$\zeta^E$	trasversale	0.97	1.32	1.00
$\zeta^E$	longitudinale	1.54	0.76	1.20

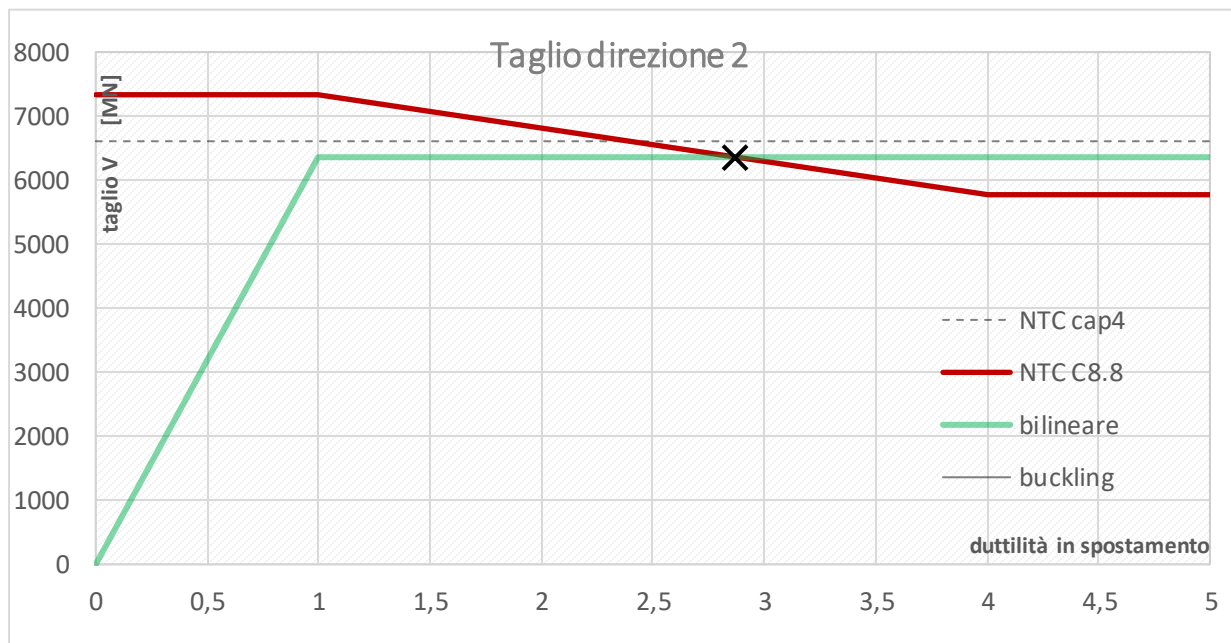
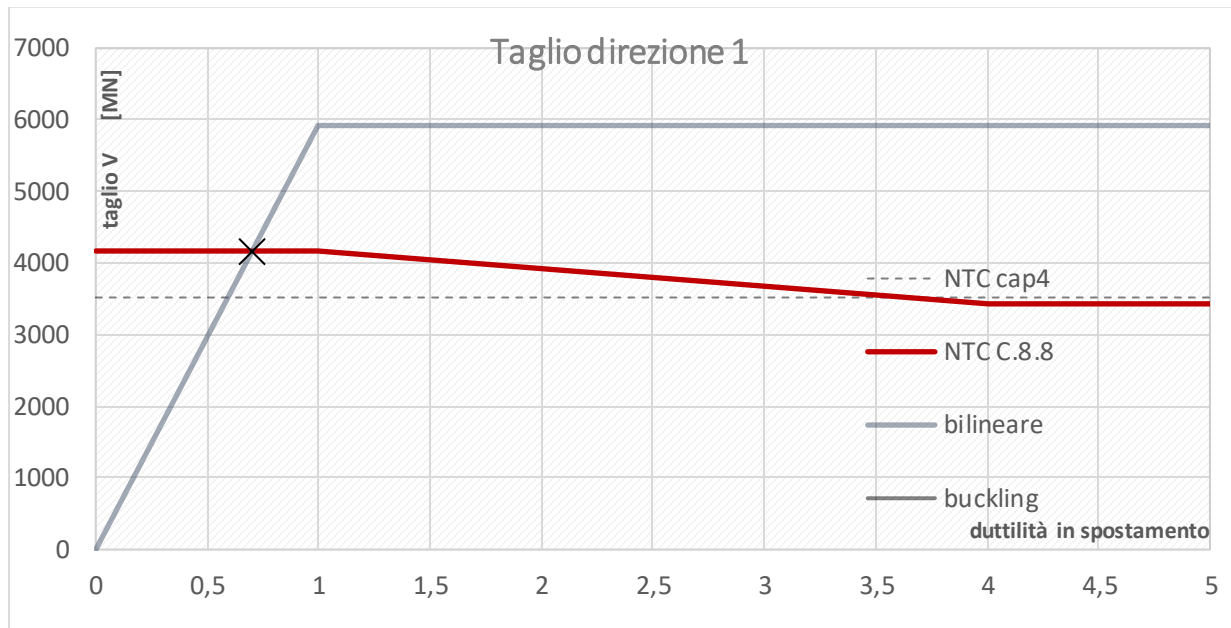
		<b>TERRENO E</b>		
		pile <<13m	pila media 7.5	pile <13m
$\zeta^E$	trasversale	1.99	1.29	1.20
$\zeta^E$	longitudinale	0.71	0.77	1.76
		pile >13m	pile >>13m	pile esagonali
$\zeta^E$	trasversale	1.05	1.46	1.00
$\zeta^E$	longitudinale	1.73	0.82	1.20

## 14. APPENDICE

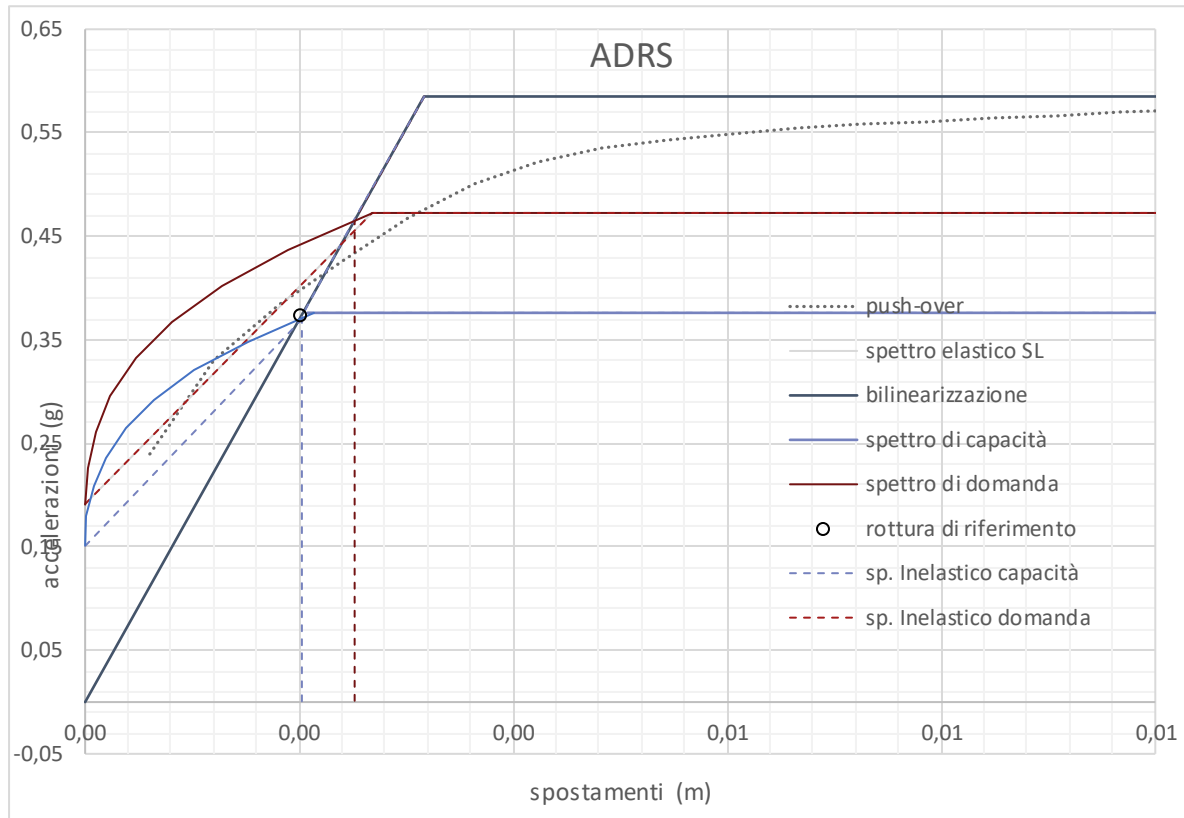
### 14.1 Terreno B

#### 14.1.1 Pile $H < 13m$

##### 14.1.1.1 Pila bassa

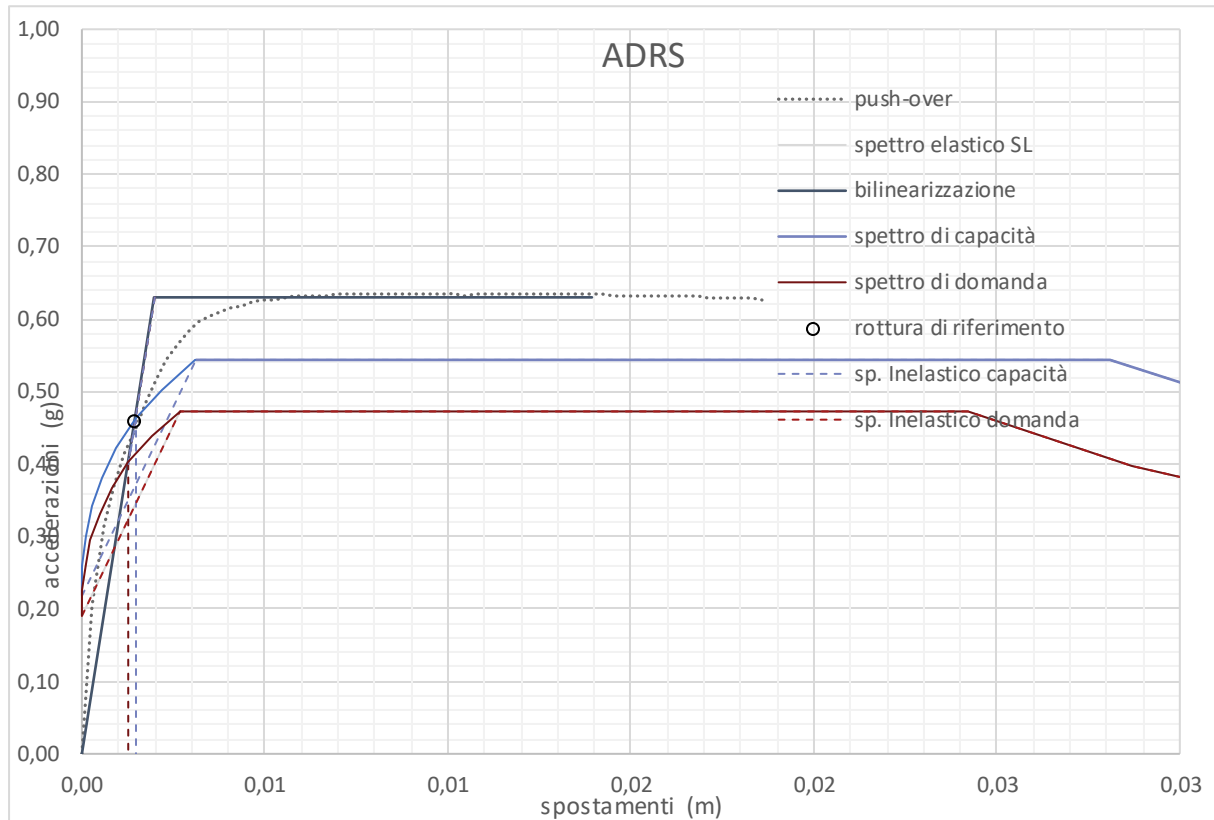


Longitudinale – direzione 1



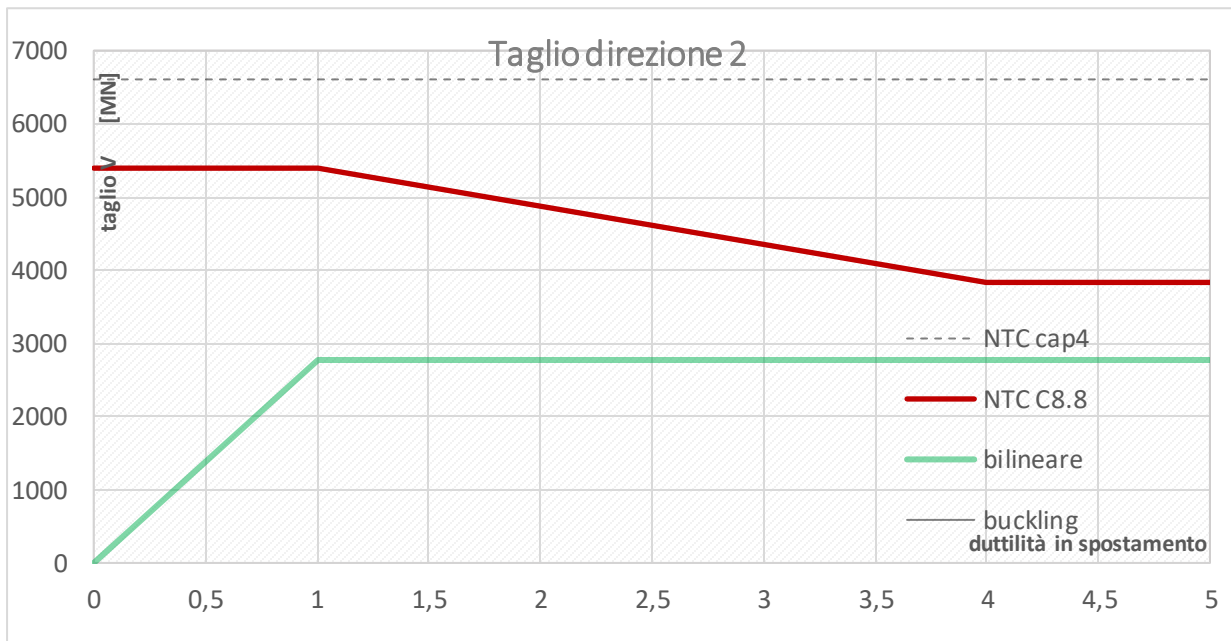
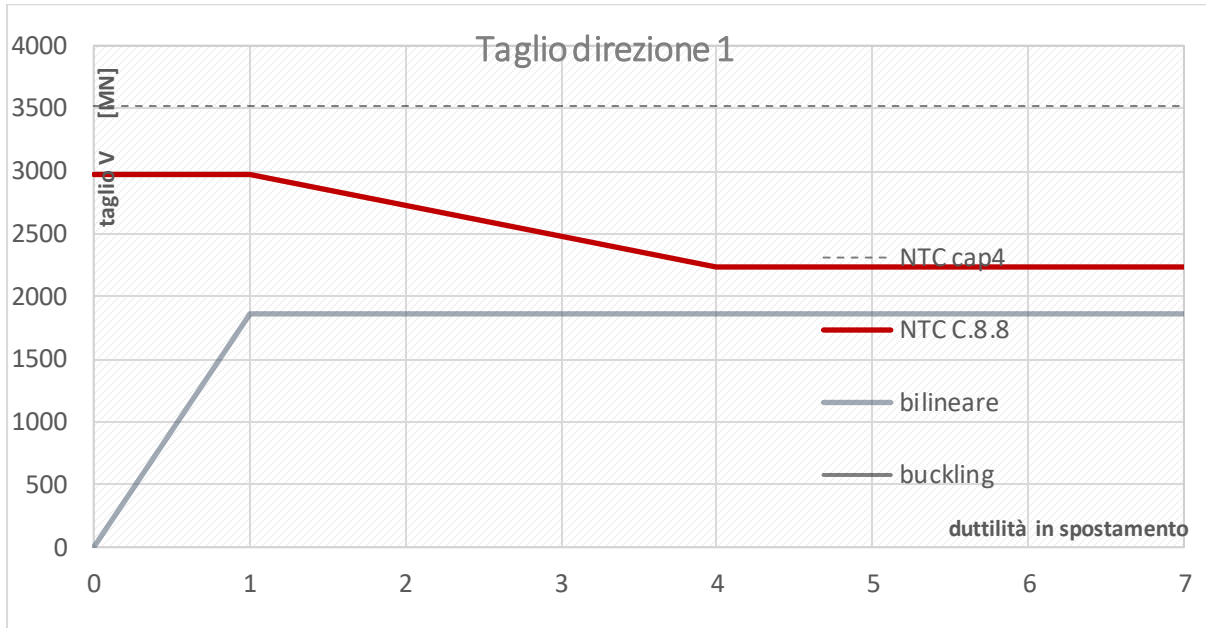
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00252	0.190752	0.15896	475	0.79
capacità	0.00203	0.151554	0.126295	292	

Trasversale – direzione 2



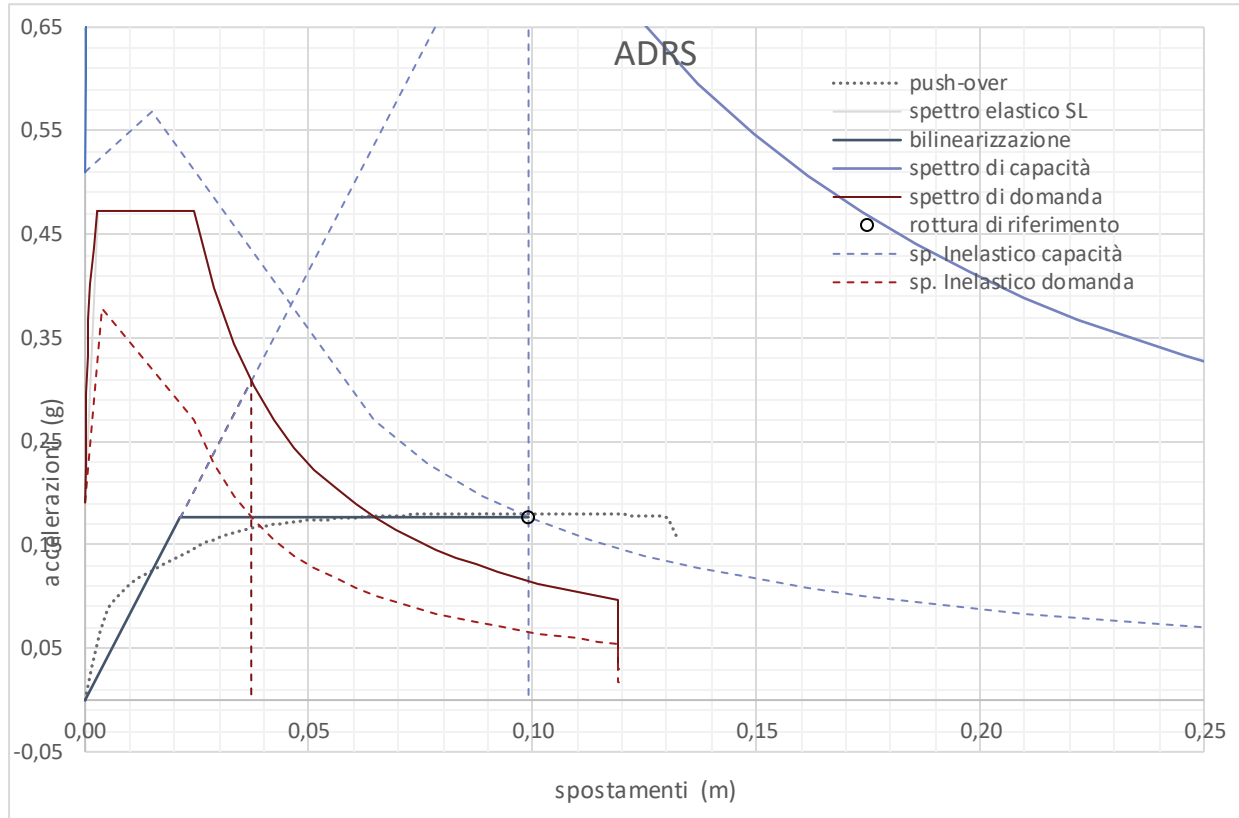
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00127	0.190752	0.15896	475	1.15
capacità	0.00145	0.218677	0.182231	717	

14.1.1.2 Pila alta



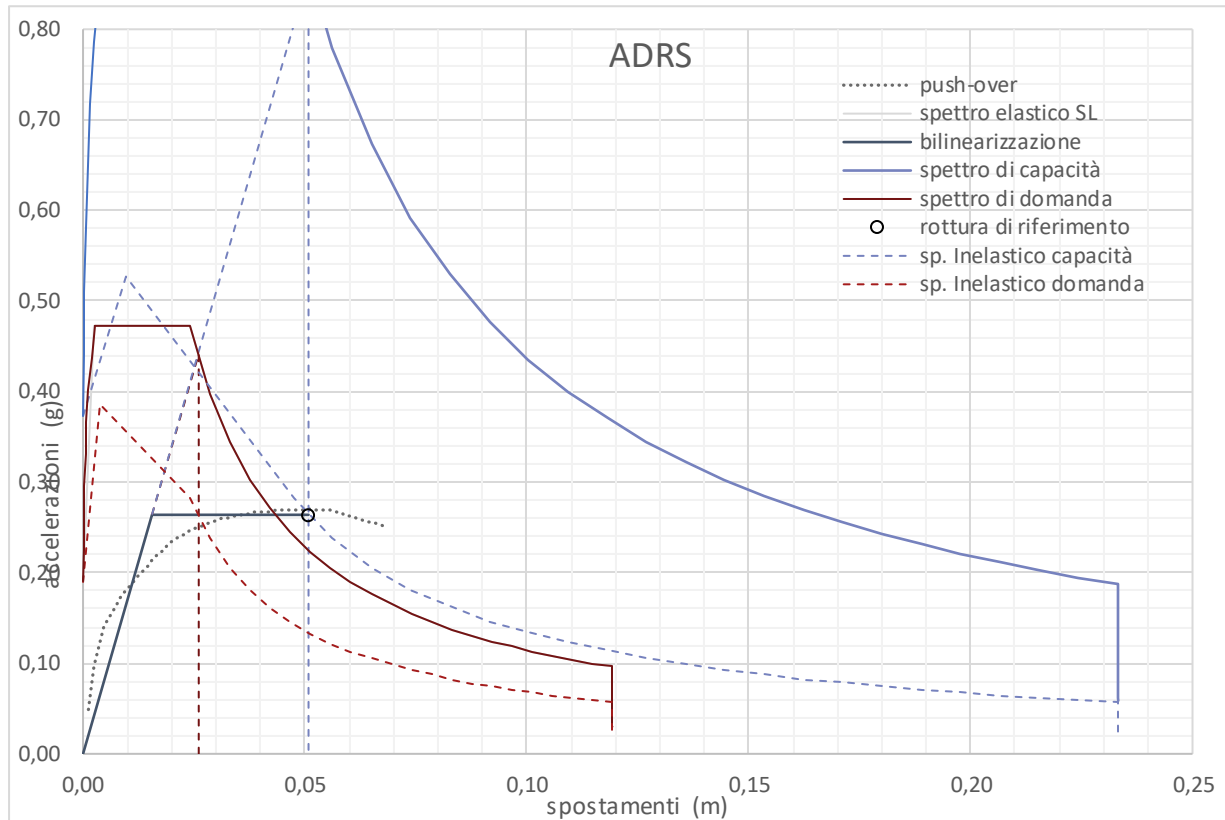


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.03711	0.190752	0.15896	475	2.67
capacità	0.09908	0.50974	0.424783	9600	

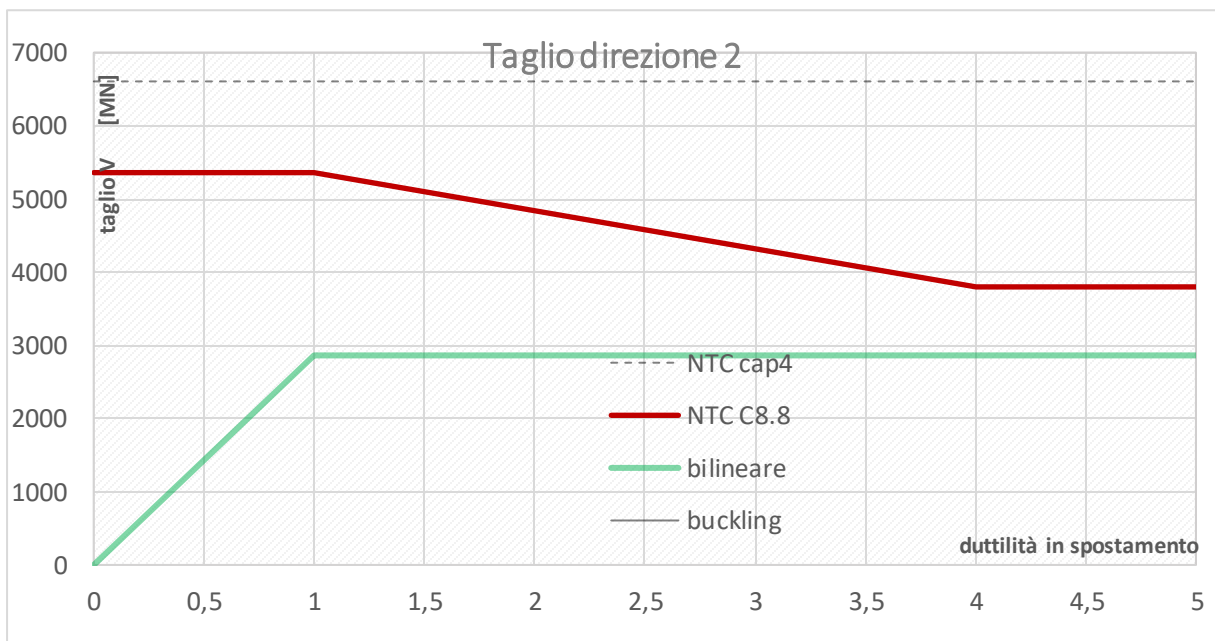
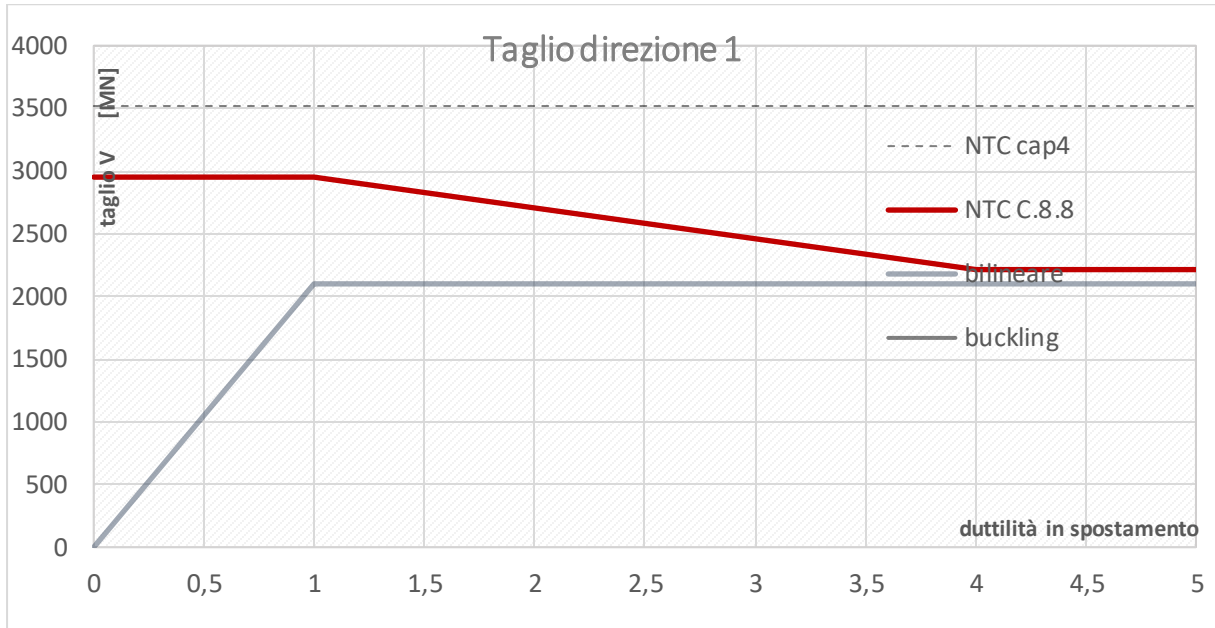
Trasversale – direzione 2



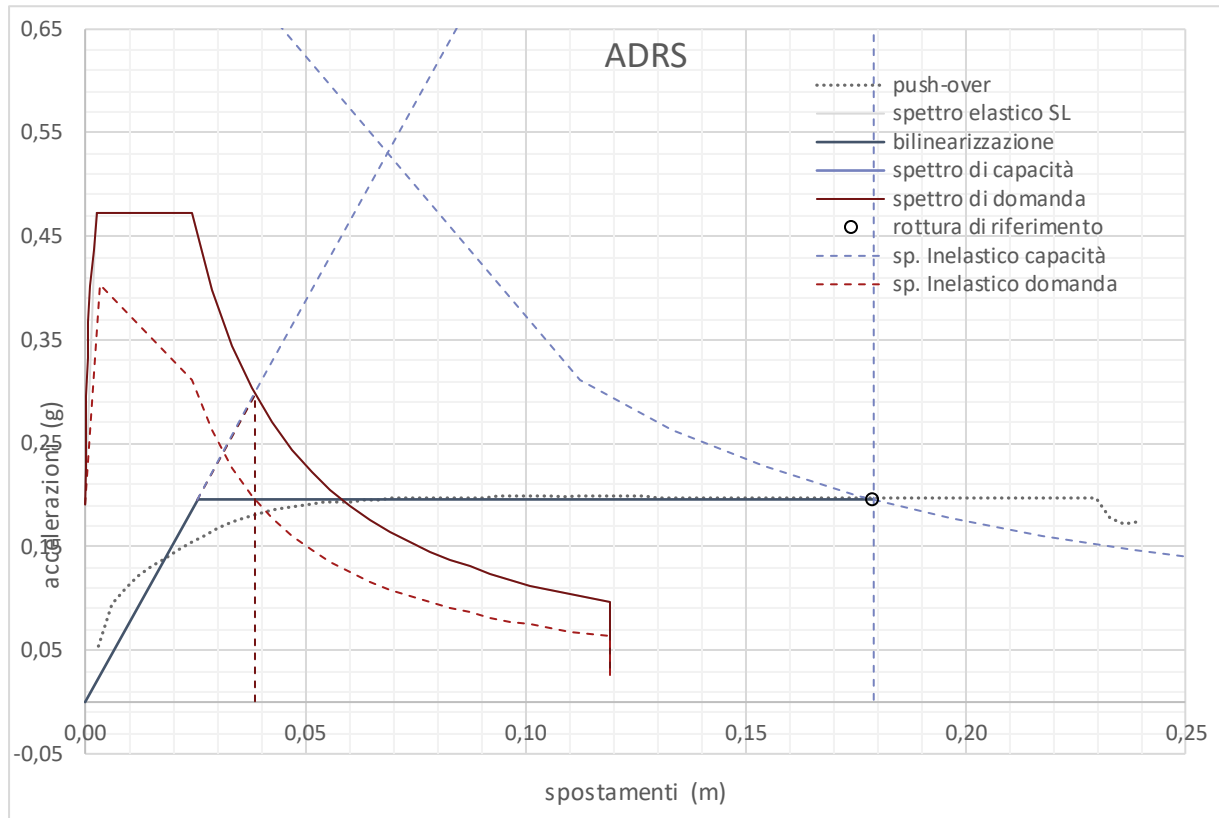
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.02607	0.190752	0.15896	475	1.96
capacità	0.05081	0.373067	0.310889	3639	

14.1.2 *Pile H>13m*

14.1.2.1 Pila bassa

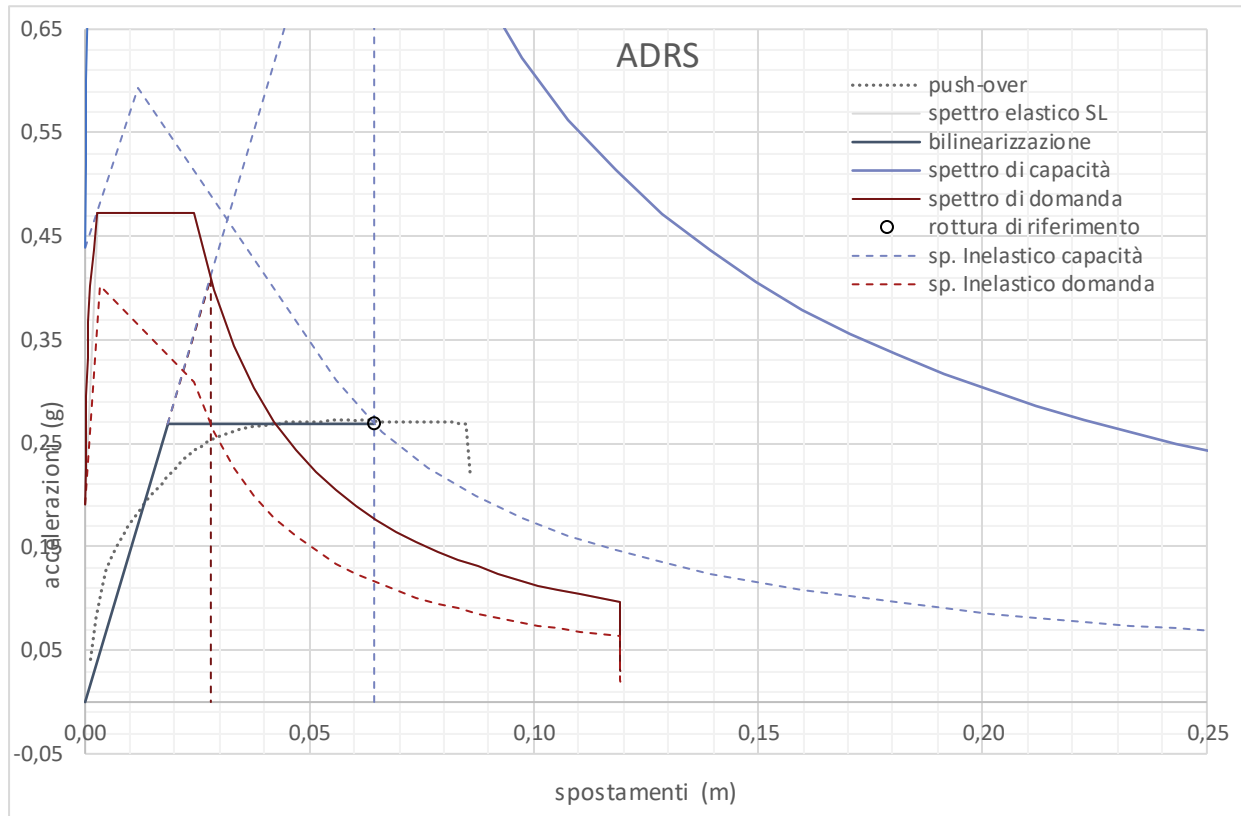


Longitudinale – direzione 1



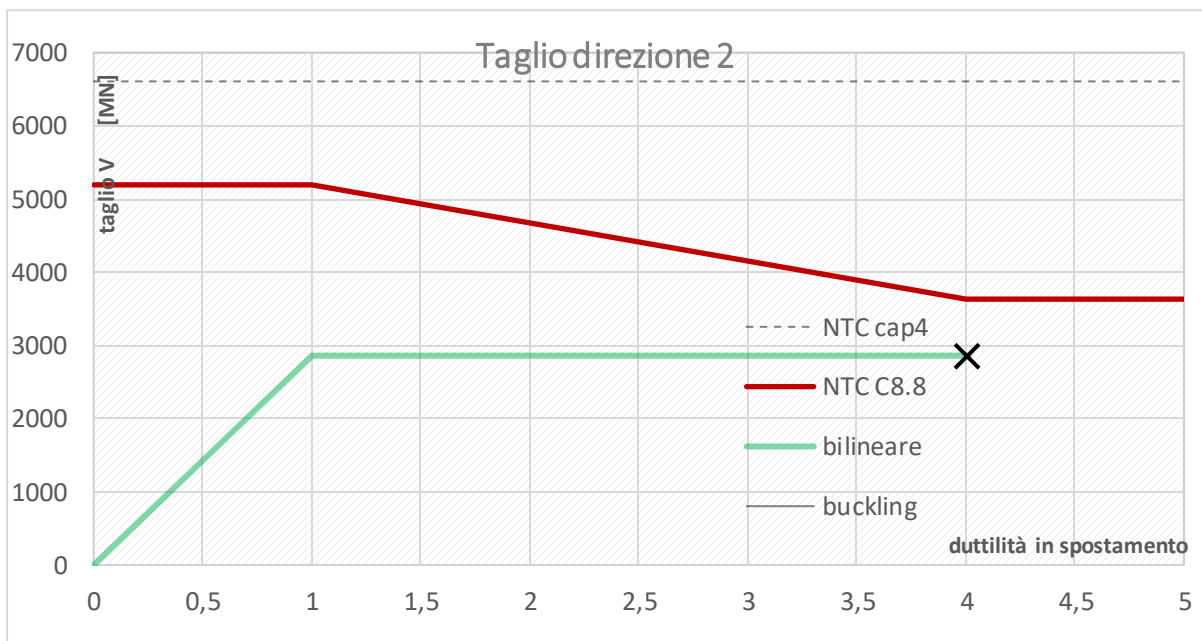
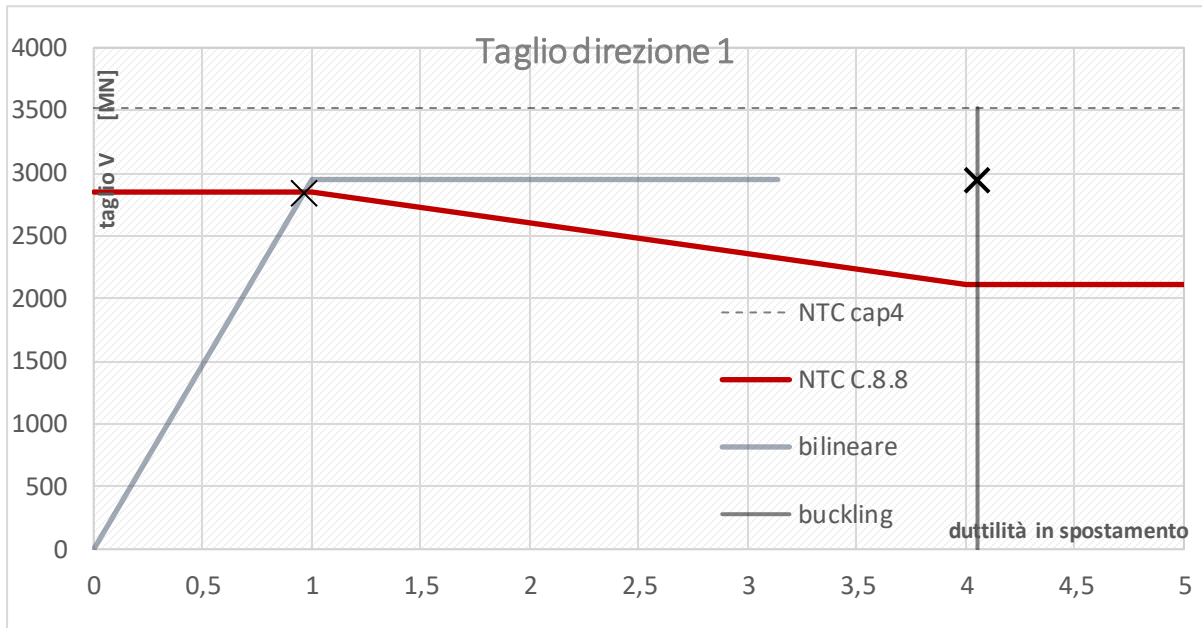
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.03859	0.190752	0.15896	475	4.65
capacità	0.17920	0.886519	0.738766	53167	

Trasversale – direzione 2

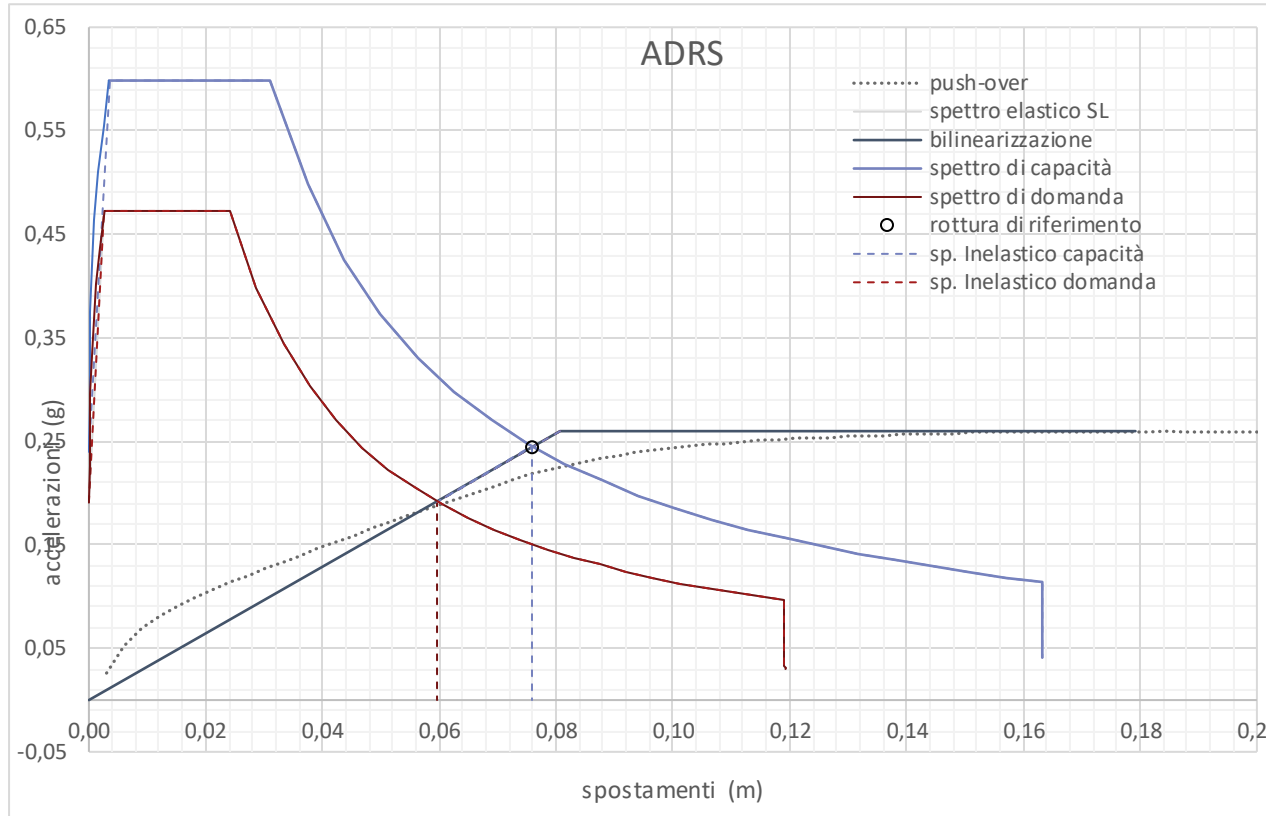


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.02802	0.190752	0.15896	475	2.30
capacità	0.06442	0.439451	0.366209	6054	

14.1.2.2 Pila alta

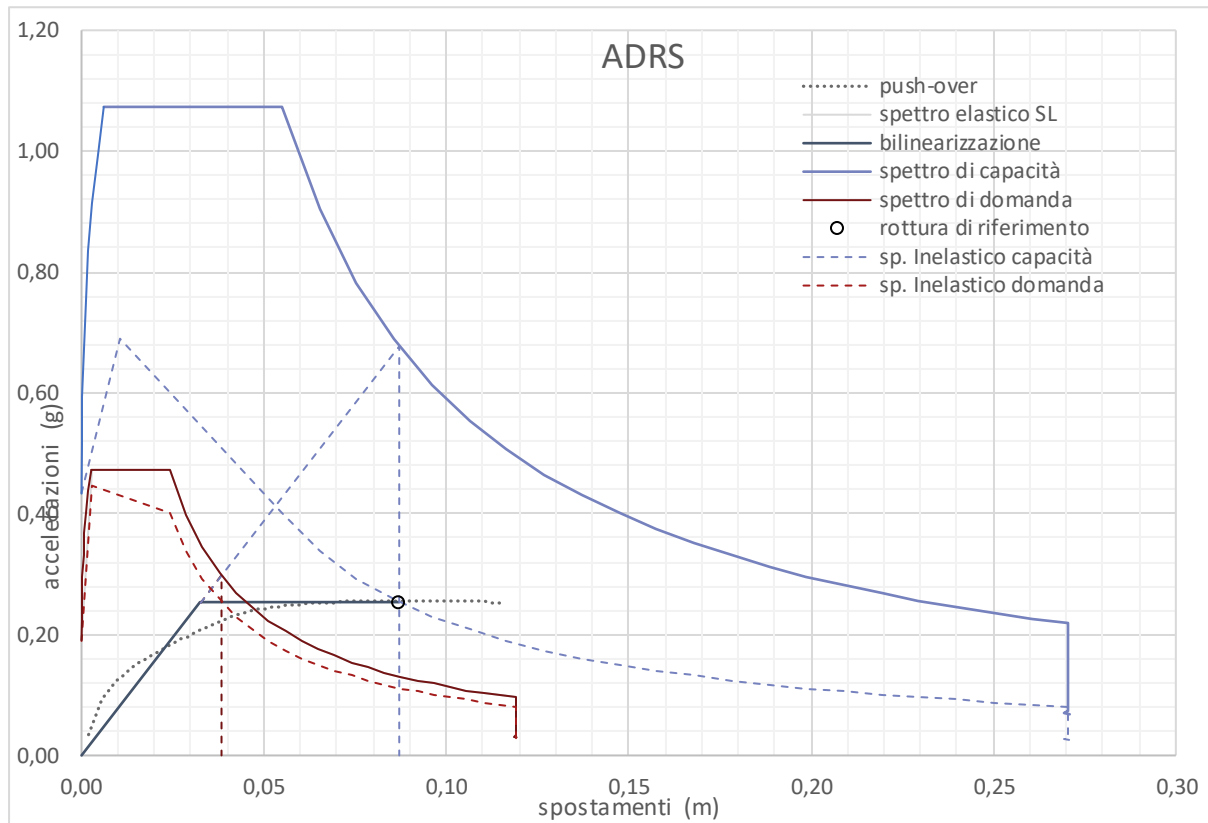


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.05961	0.190752	0.15896	475	1.26
capacità	0.07603	0.240133	0.200111	952	

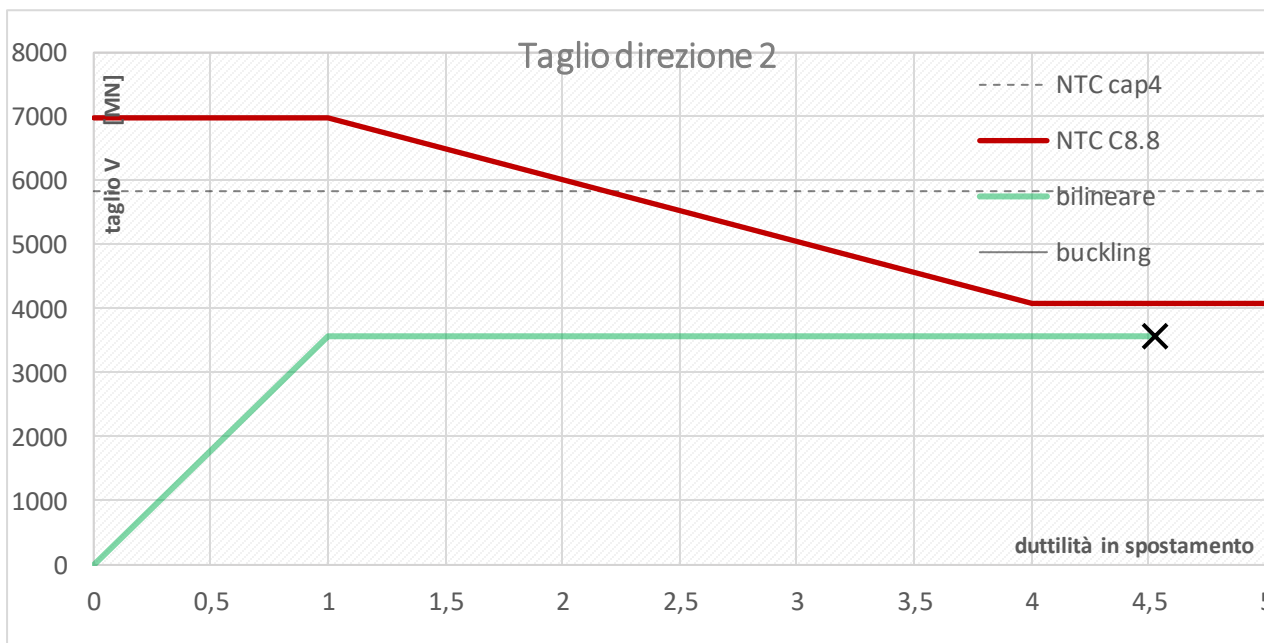
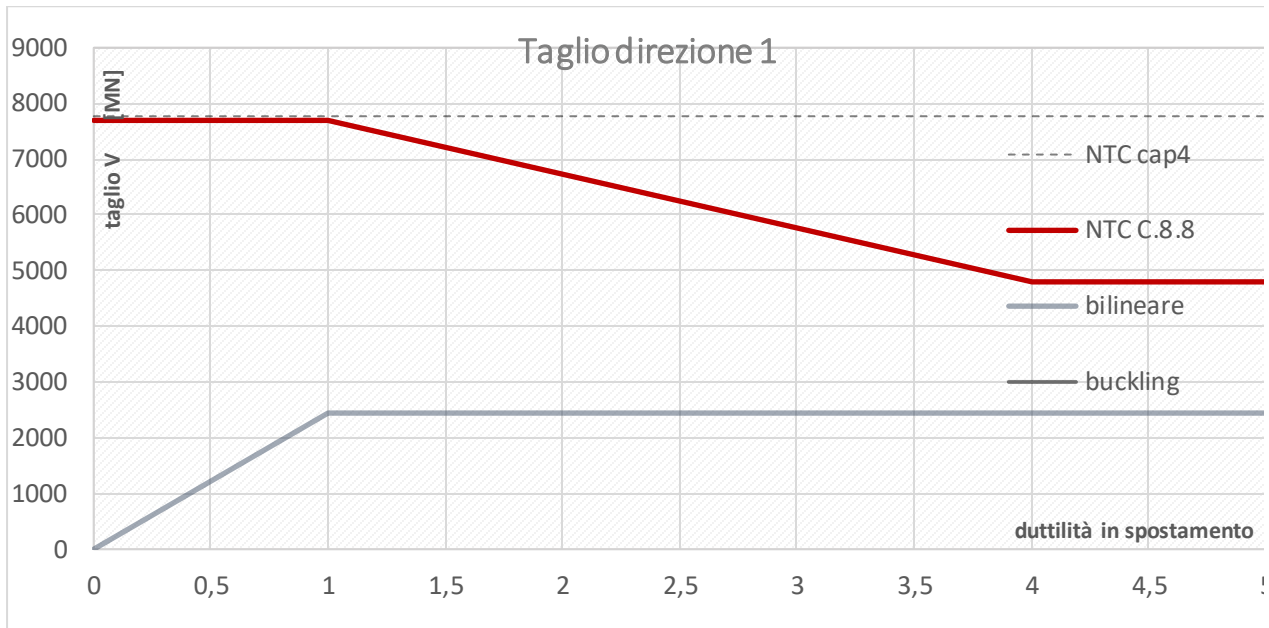
Trasversale – direzione 2



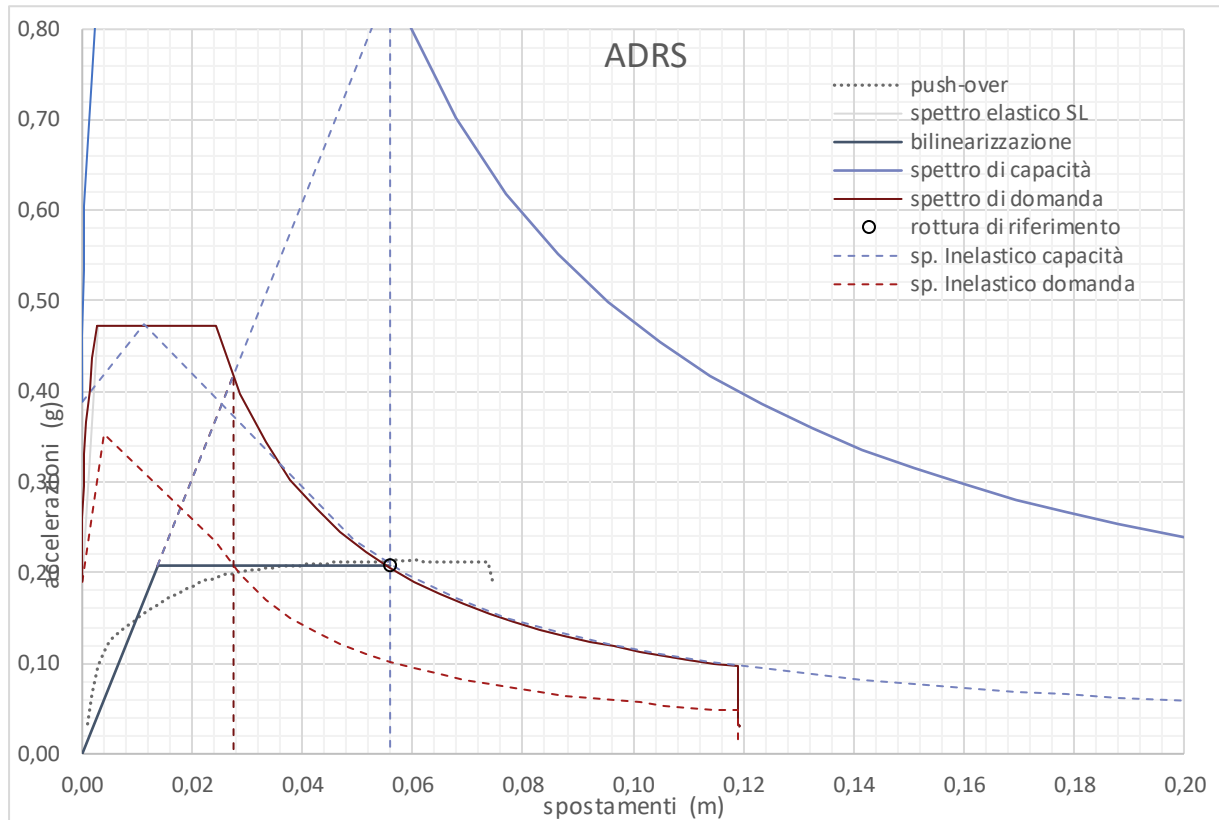
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.03838	0.190752	0.15896	475	2.27
capacità	0.08710	0.433235	0.361029	5791	



### 14.1.3 Pila esagonale

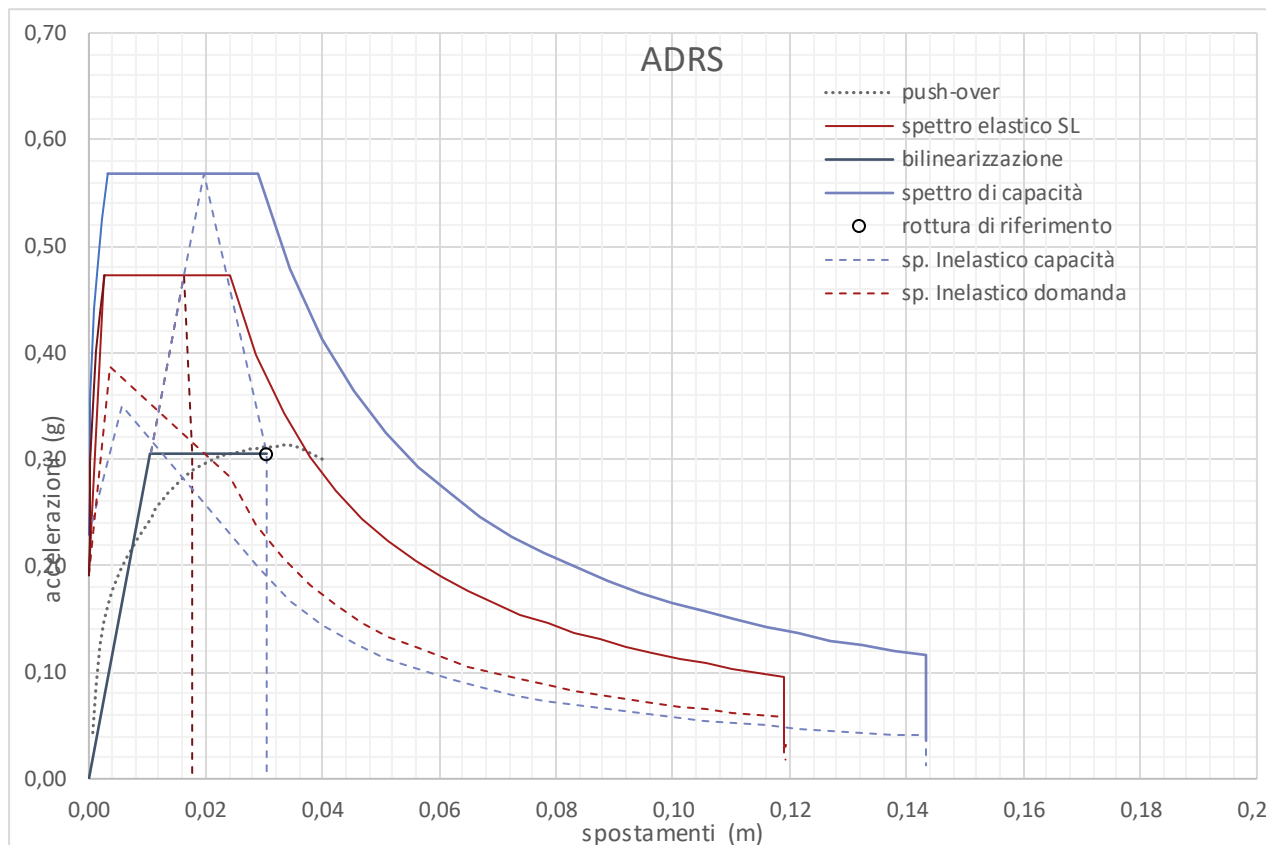


Longitudinale – direzione 1



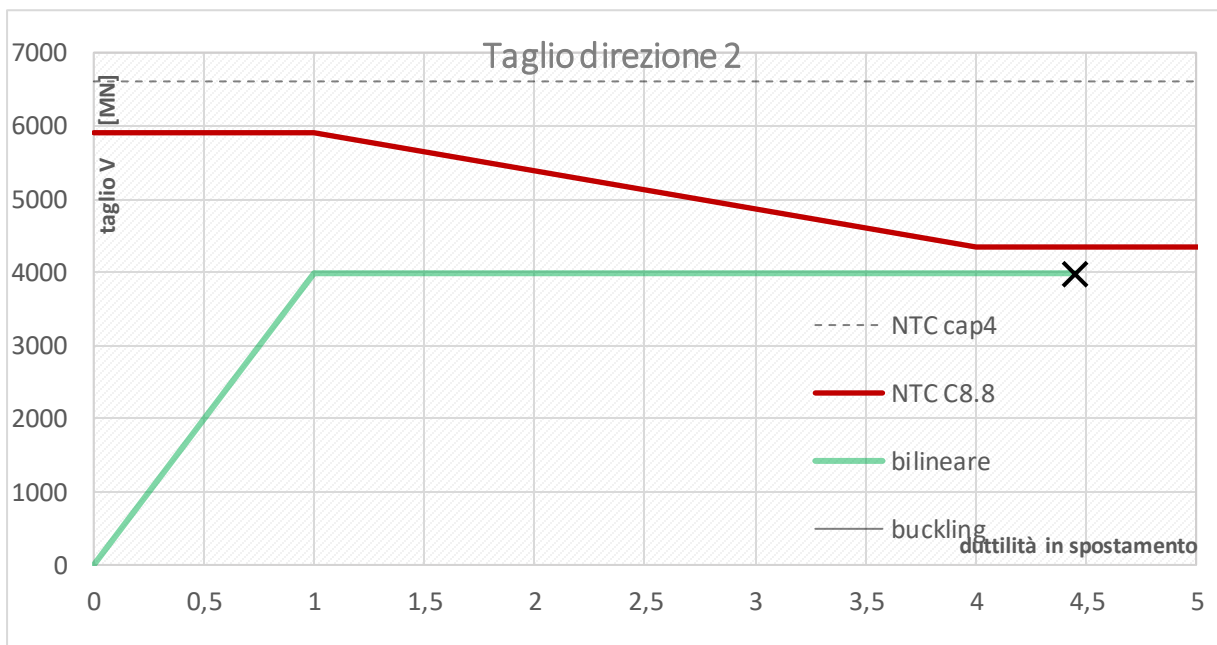
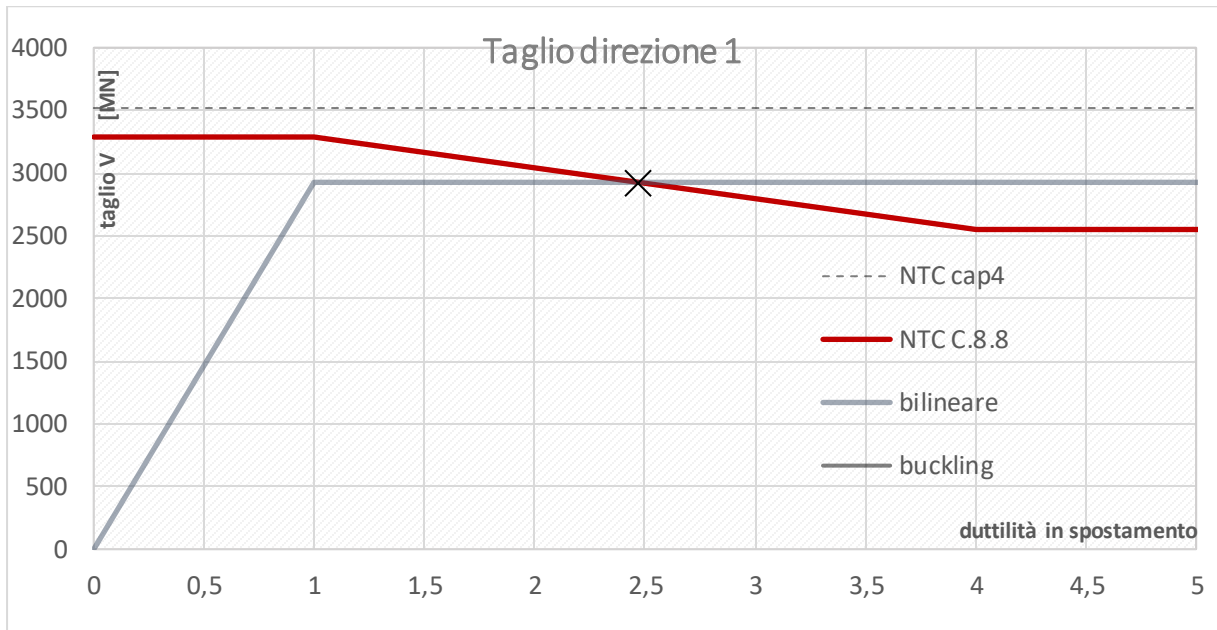
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.02746	0.190752	0.15896	475	2.04
capacità	0.05589	0.389343	0.324452	4155	

Trasversale – direzione 2

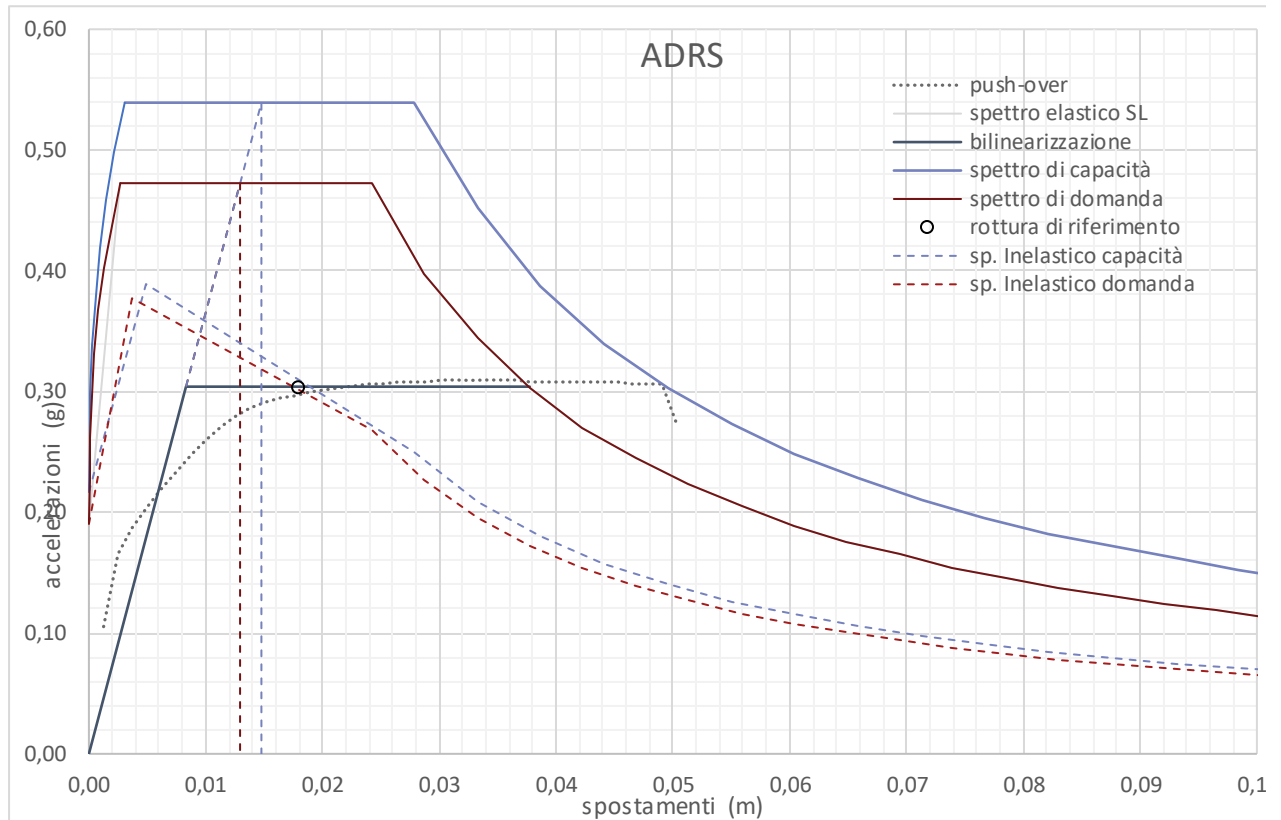


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.01644	0.190752	0.15896	475	2.00
capacità	0.01976	0.229268	0.191057	817	

14.1.4 Pila media  $H=7.5m$

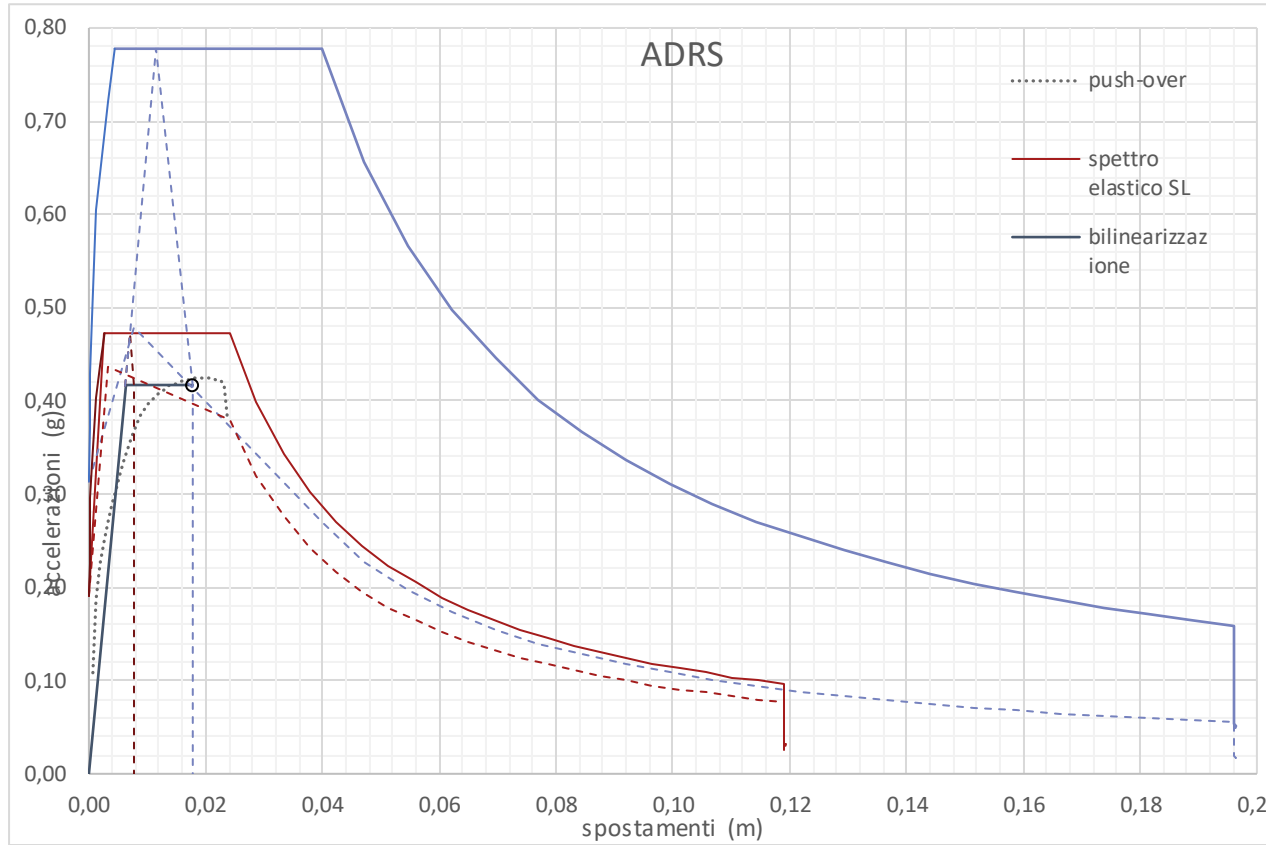


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.01294	0.190752	0.15896	475	1.14
capacità	0.01477	0.216927	0.180773	700	

Trasversale – direzione 2

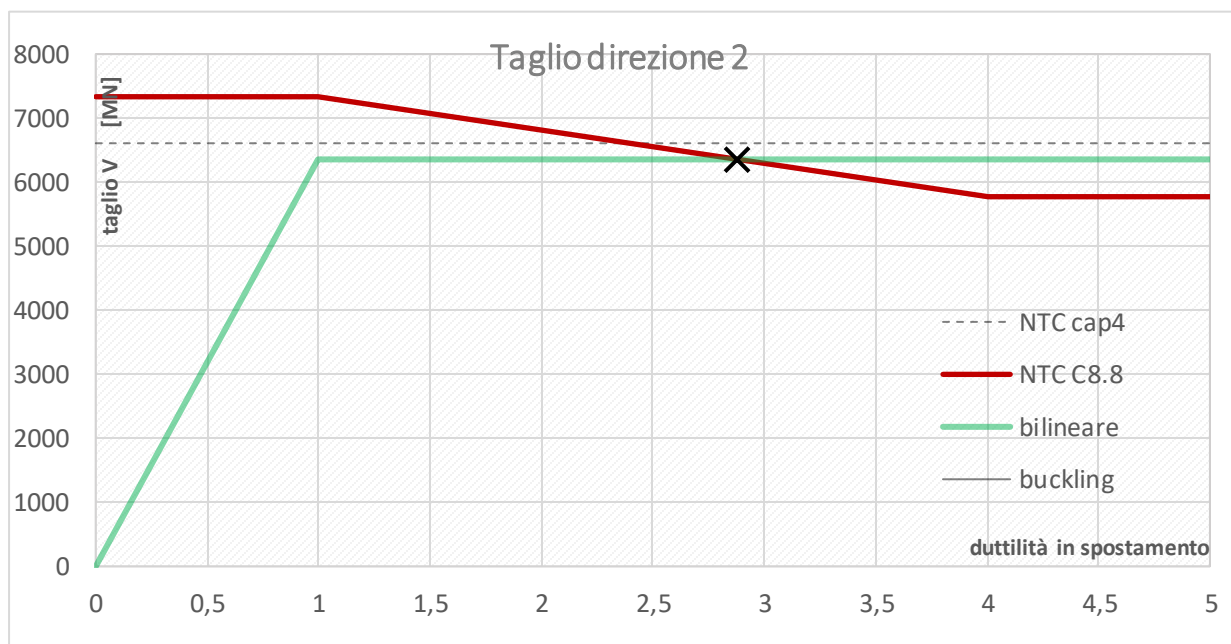
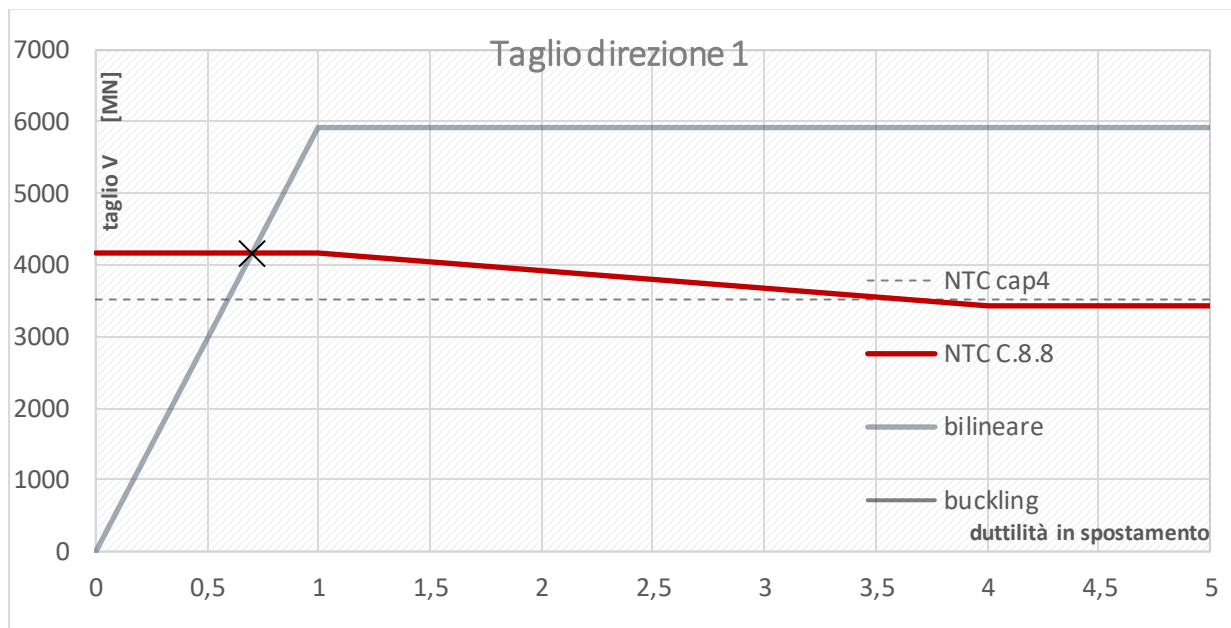


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00701	0.190752	0.15896	475	2.00
capacità	0.01155	0.313935	0.261612	2132	

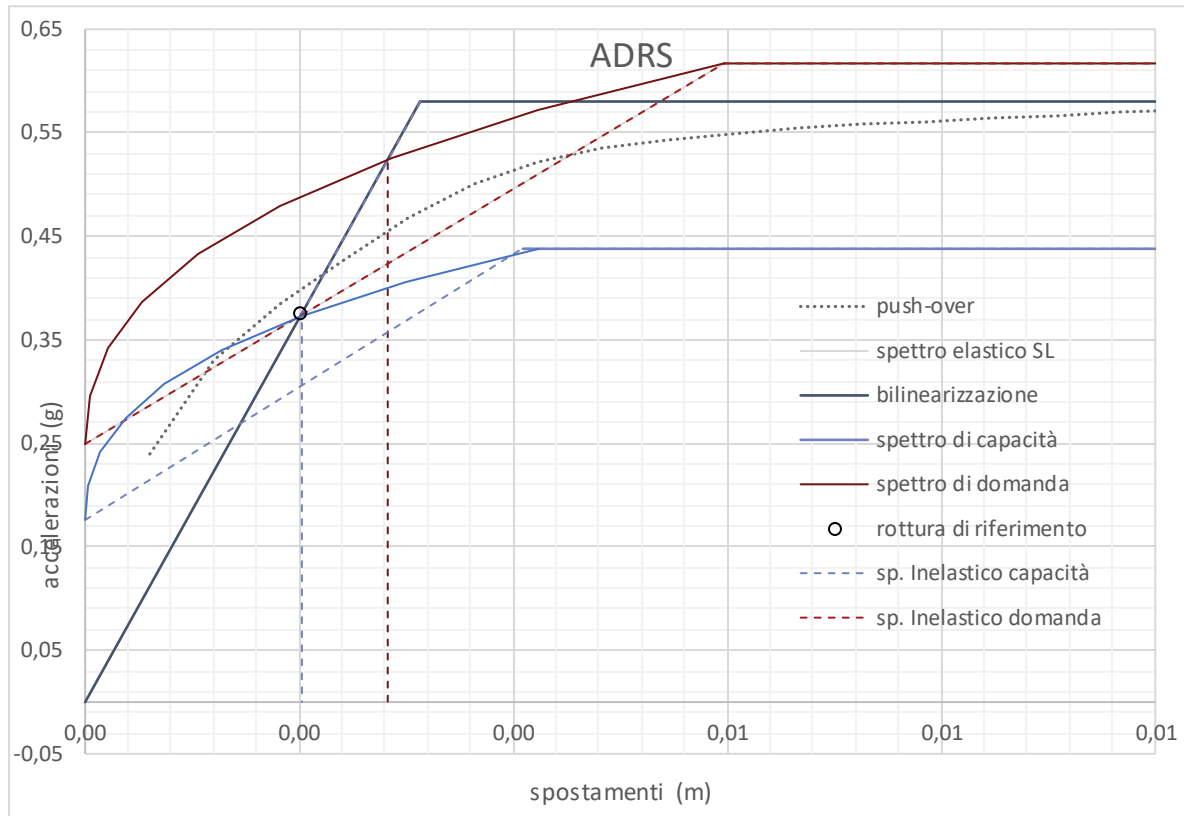
## 14.2 Terreno C

### 14.2.1 Pile $H < 13m$

#### 14.2.1.1 Pila bassa



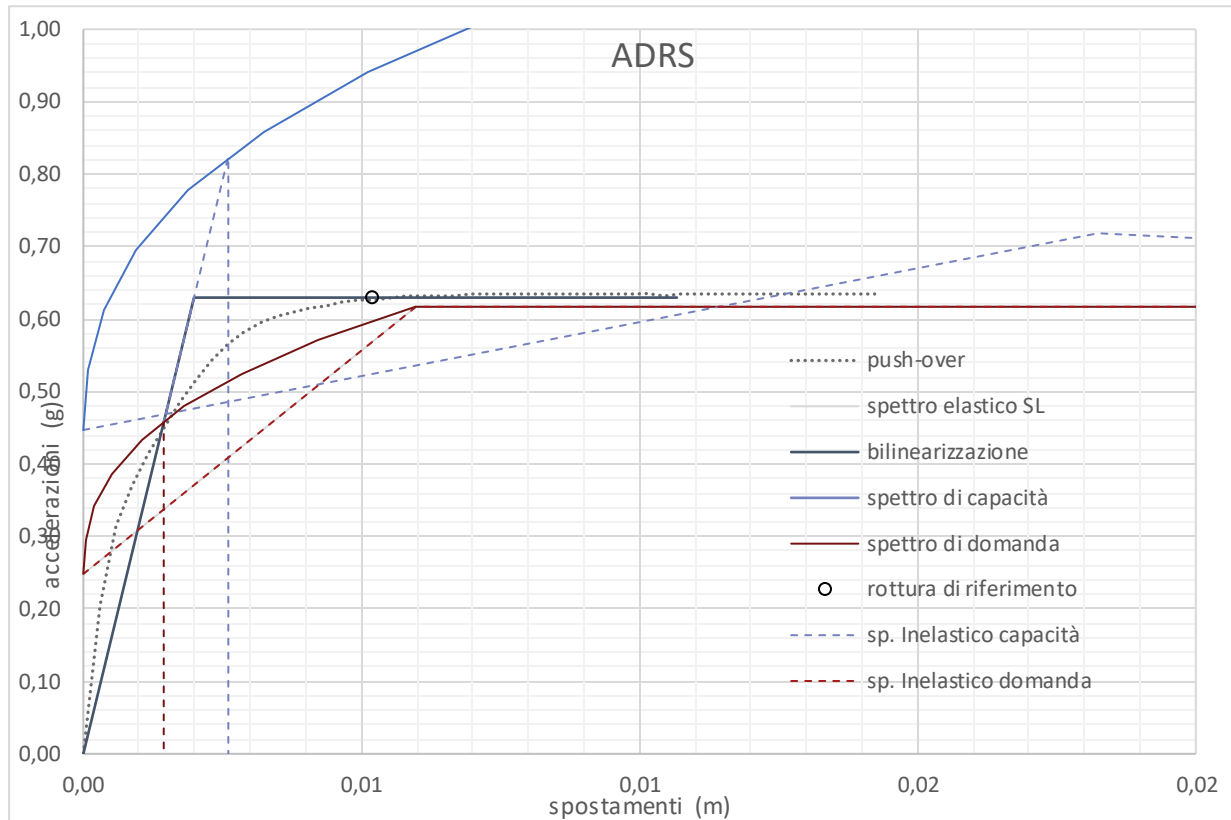
Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00283	0.249062	0.158942	475	0.71
capacità	0.00203	0.176325	0.112524	219	

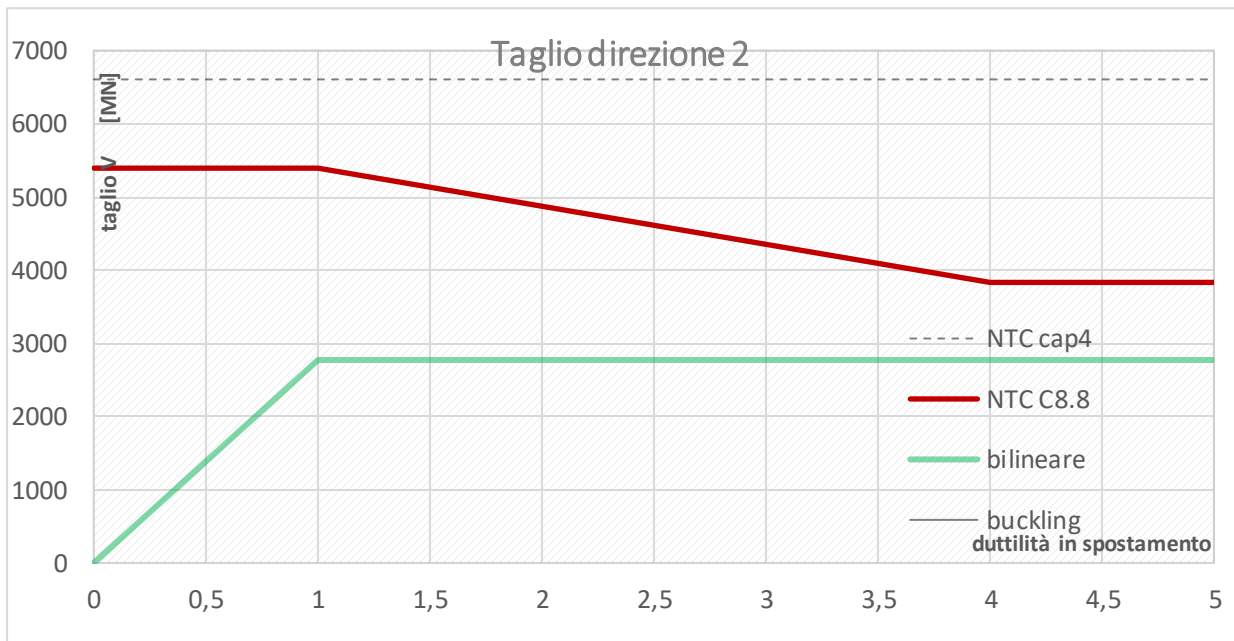
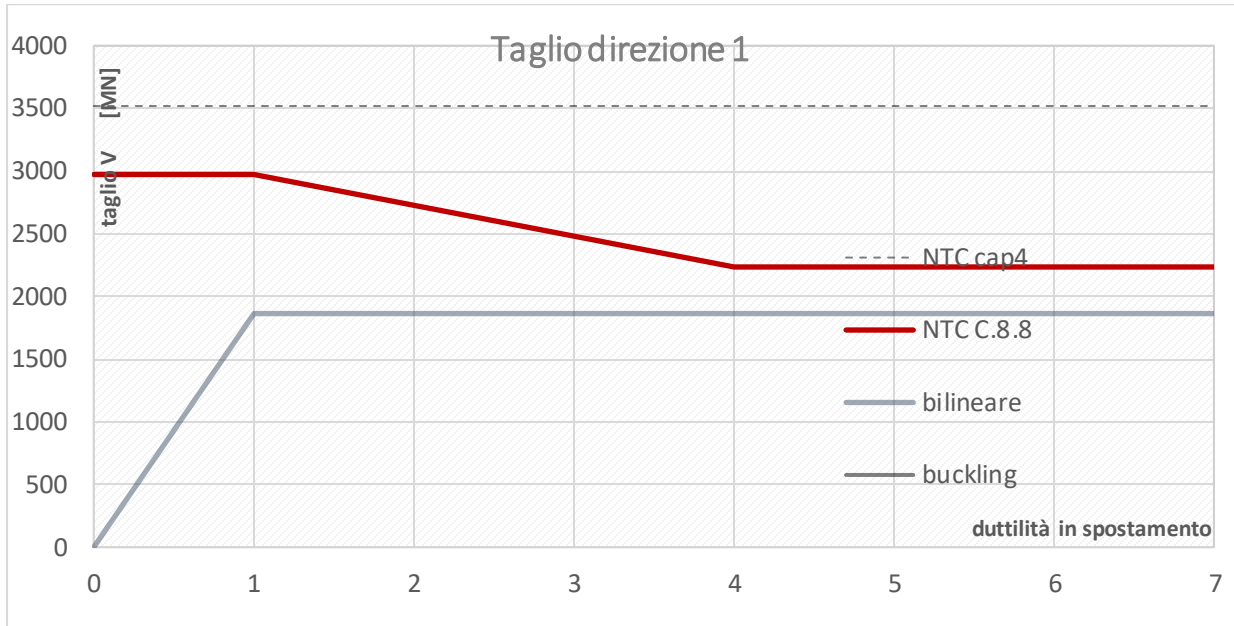


Trasversale – direzione 2

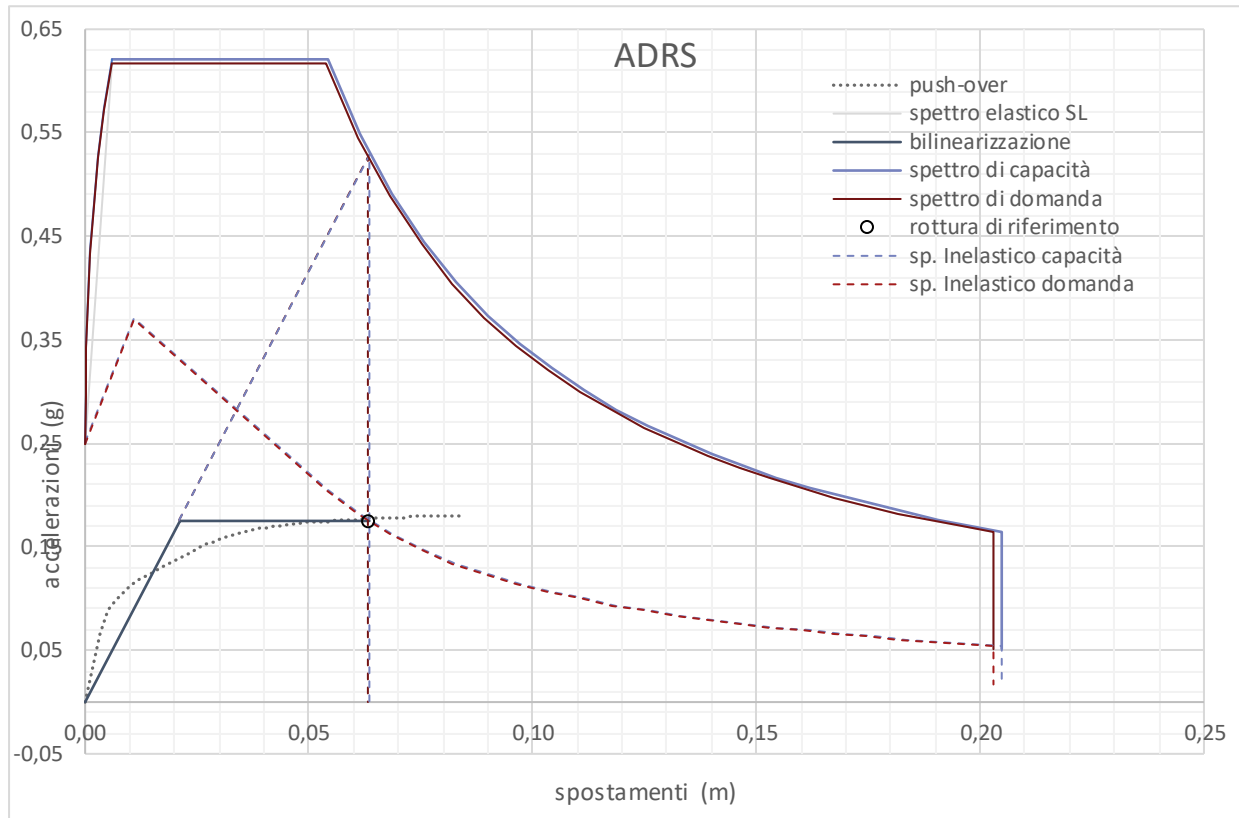


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00145	0.249062	0.158942	475	1.79
capacità	0.00261	0.446791	0.285125	2783	

14.2.1.2 Pila alta

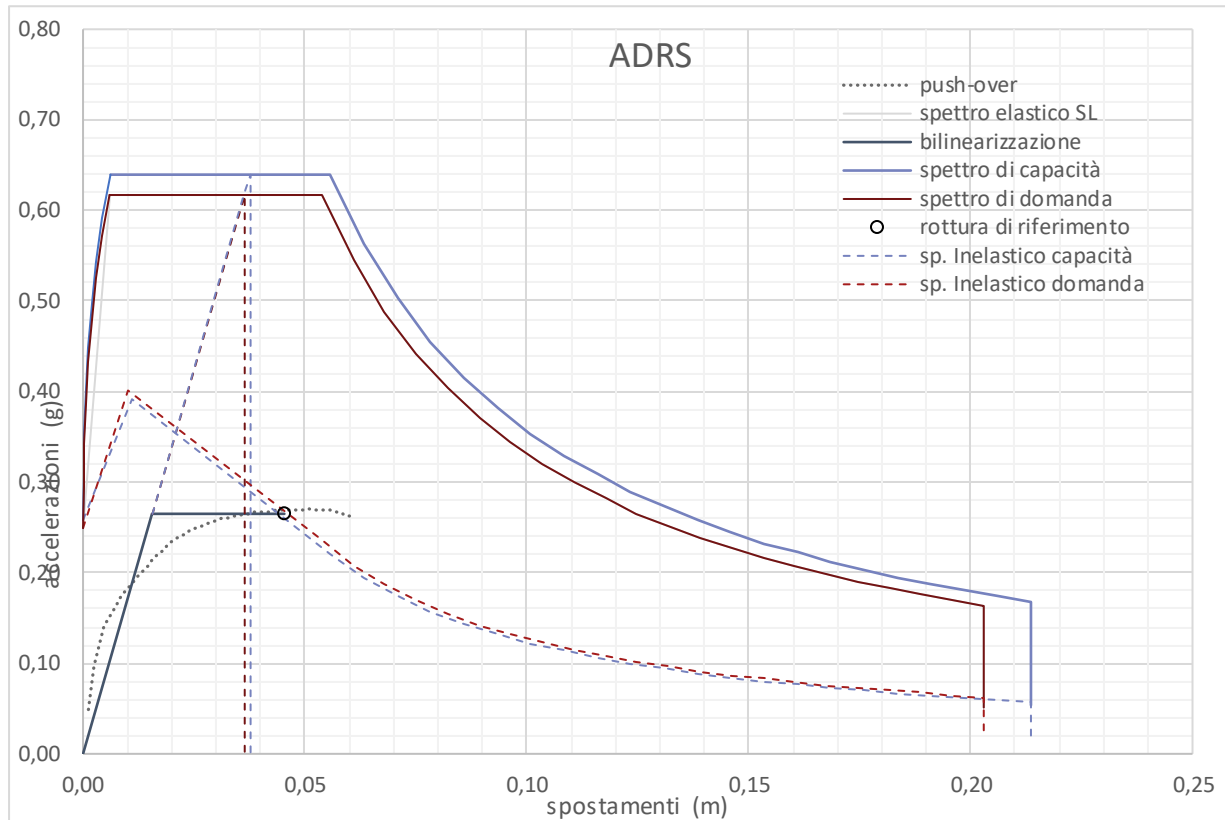


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta^E$
domanda	0.06318	0.249062	0.158942	475	1.01
capacità	0.06351	0.250602	0.159925	487	

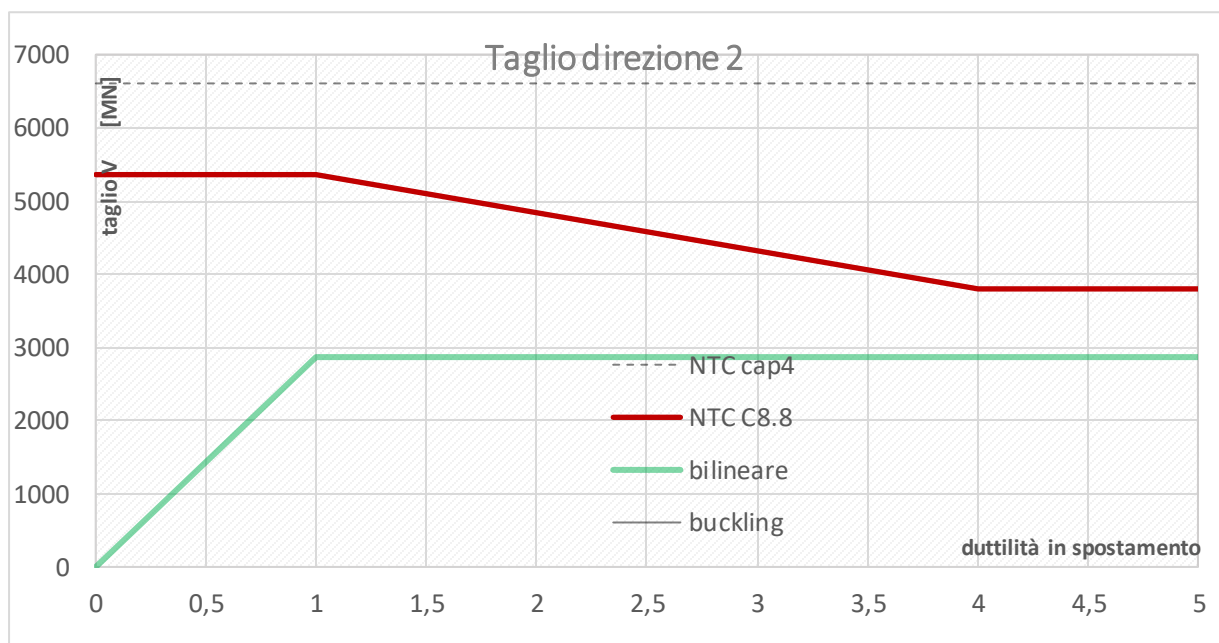
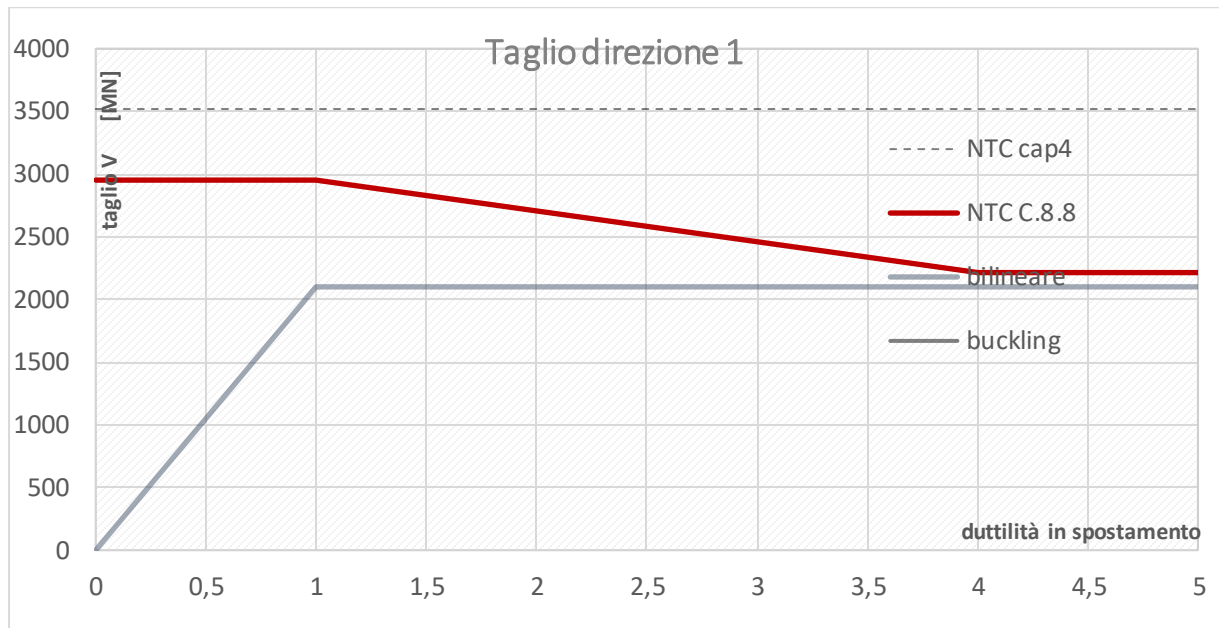
Trasversale – direzione 2



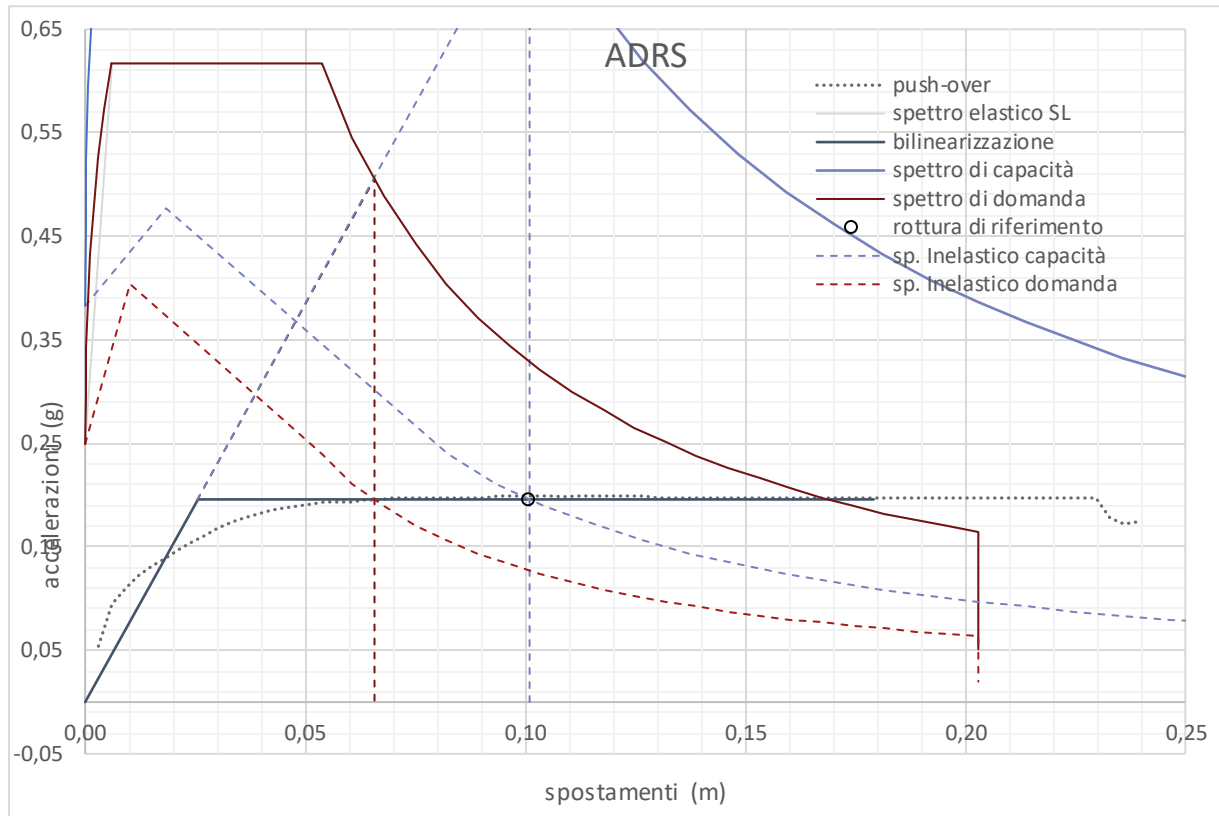
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.03643	0.249062	0.158942	475	1.04
capacità	0.03775	0.257801	0.164519	550	

### 14.2.2 Pile $H > 13m$

#### 14.2.2.1 Pila bassa

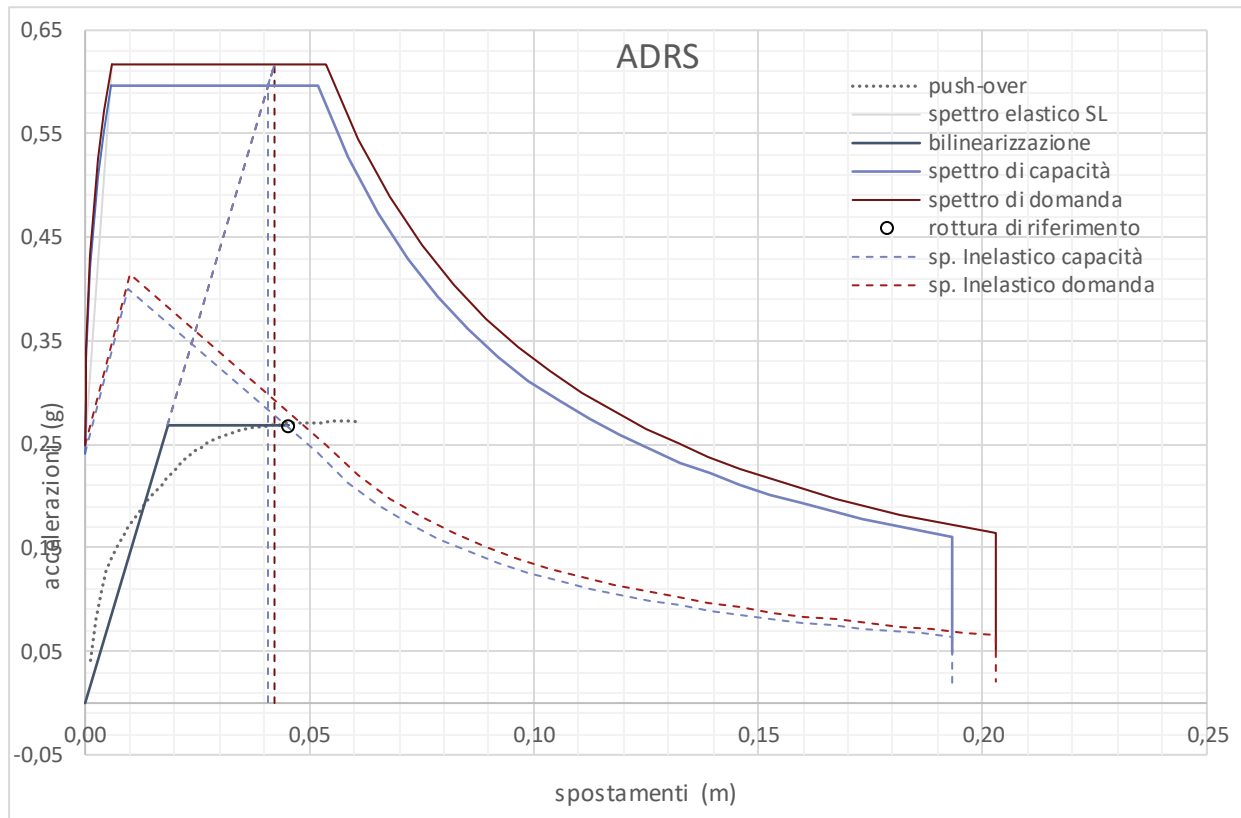


Longitudinale – direzione 1



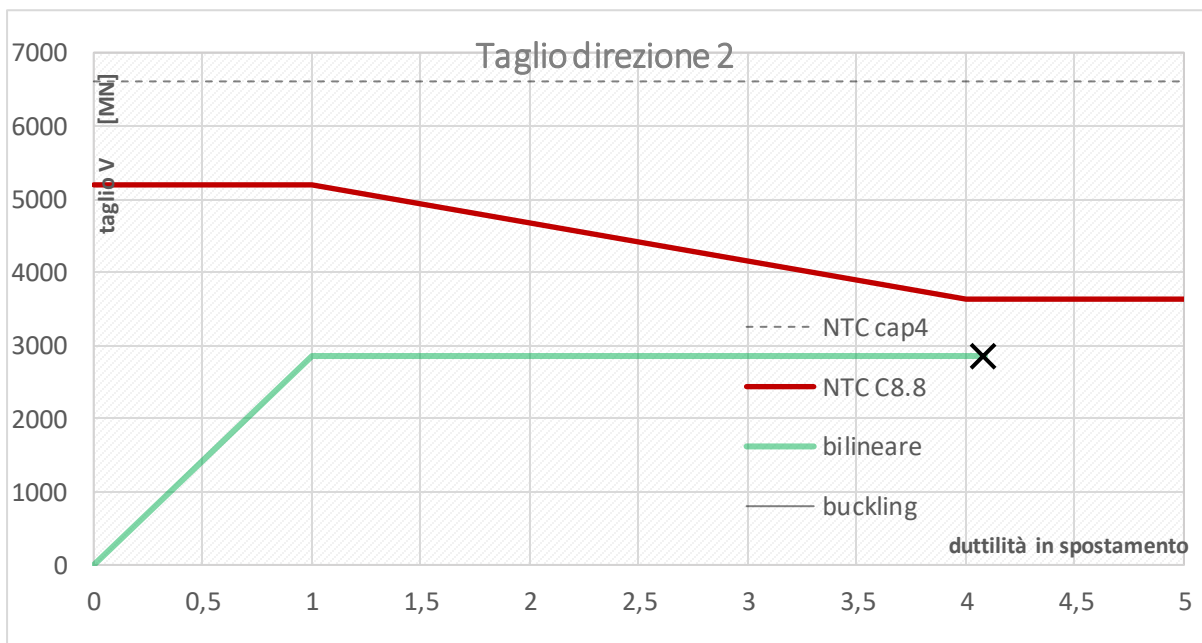
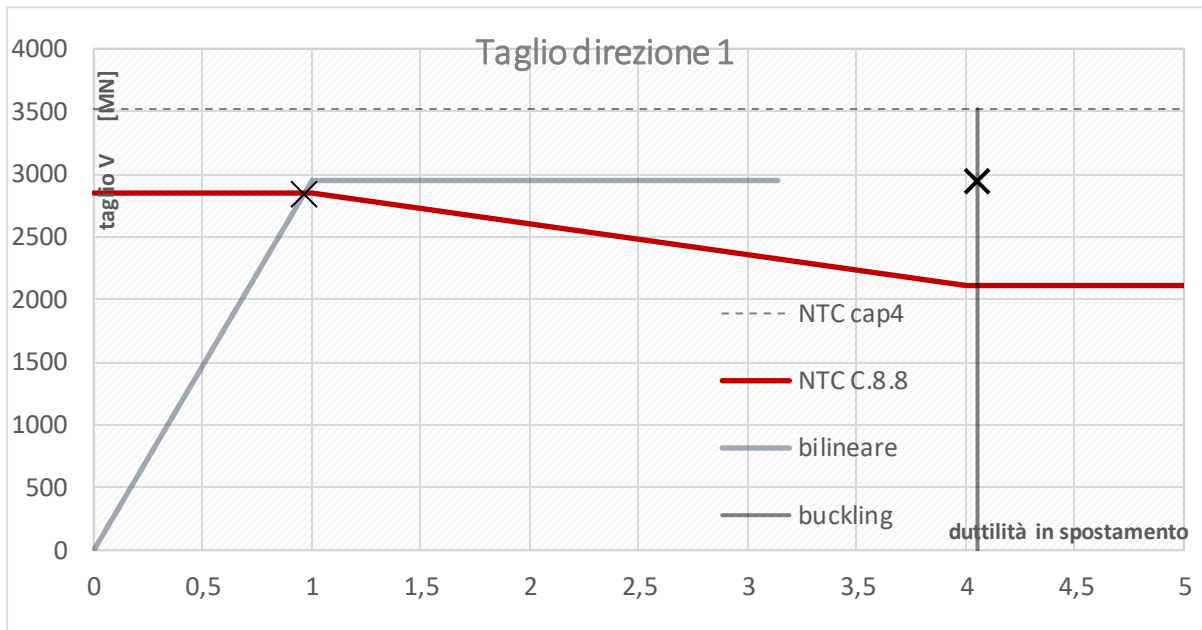
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.06576	0.249062	0.158942	475	1.54
capacità	0.10100	0.382977	0.244401	1729	

Trasversale – direzione 2



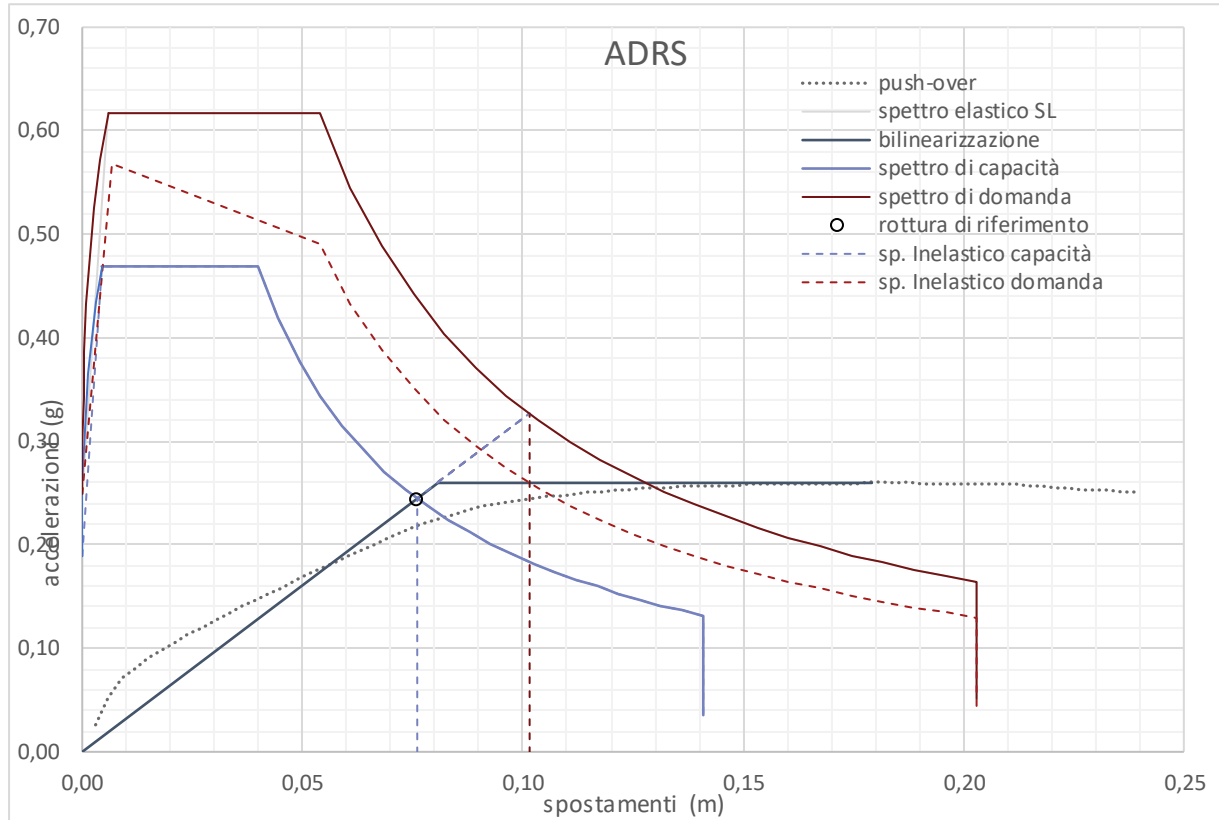
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.04220	0.249062	0.158942	475	0.97
capacità	0.04080	0.240697	0.153604	430	

14.2.2.2 Pila alta



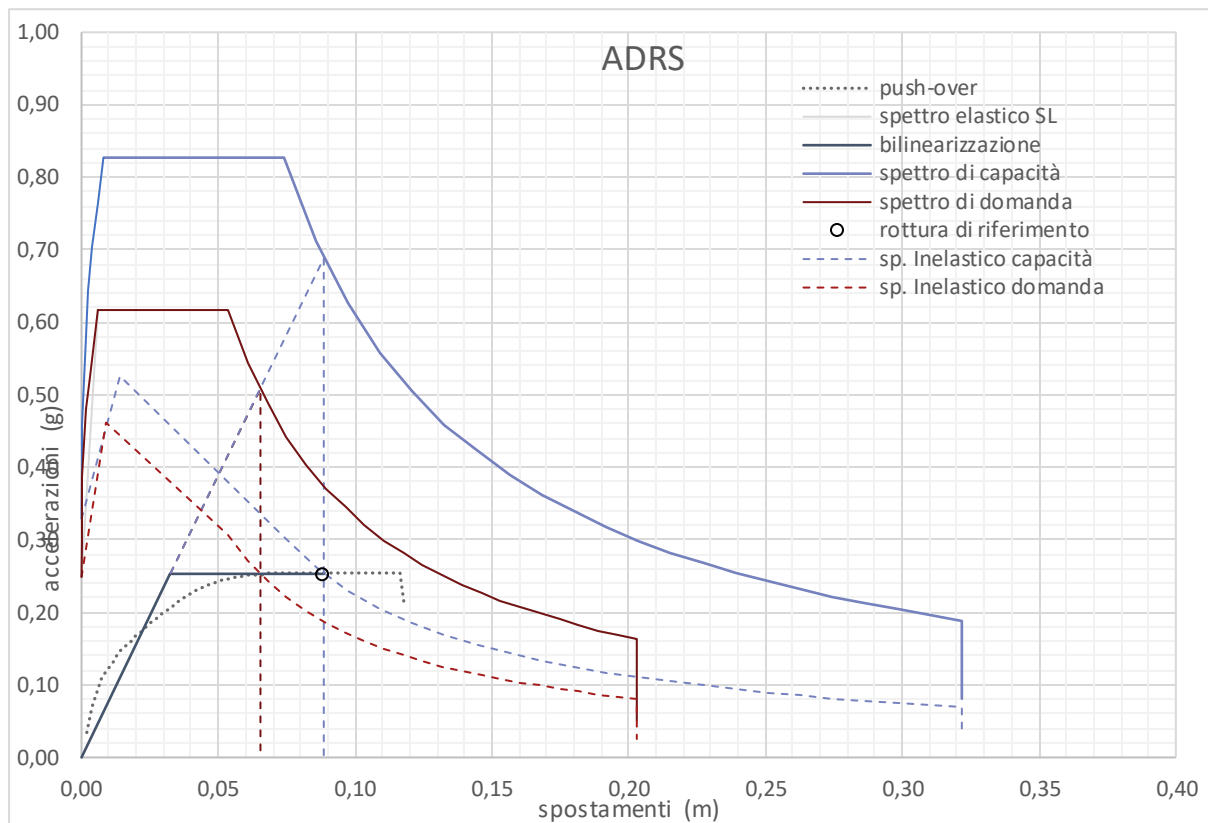


Longitudinale – direzione 1



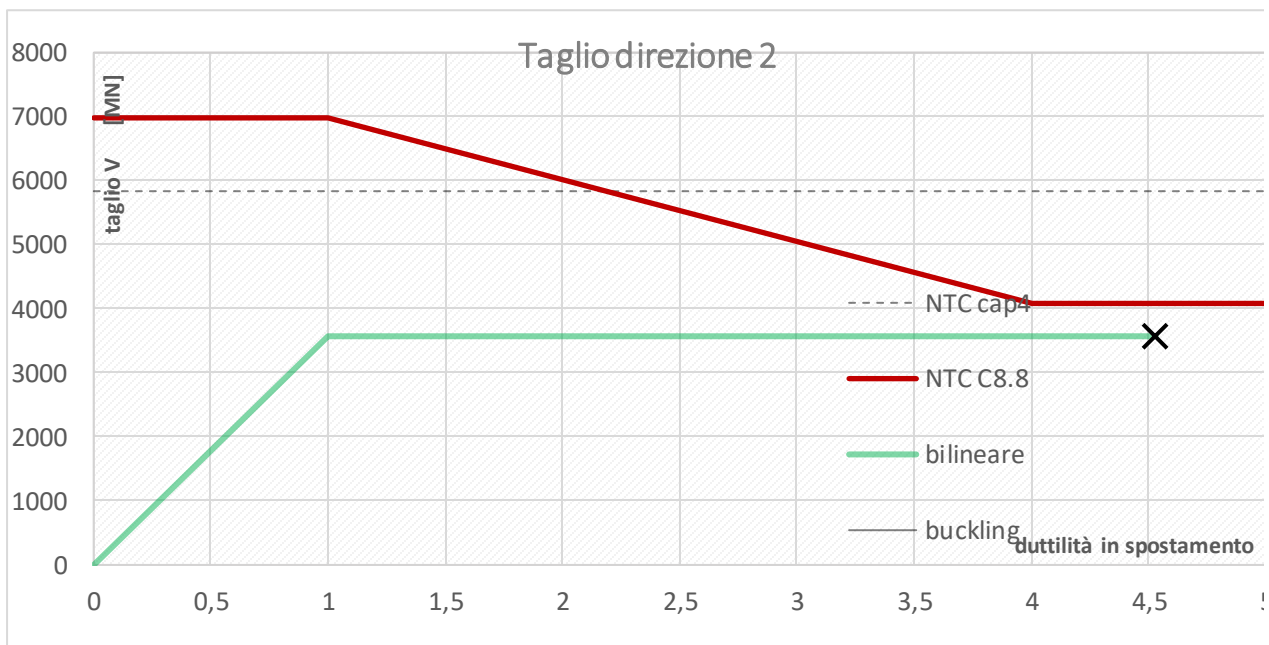
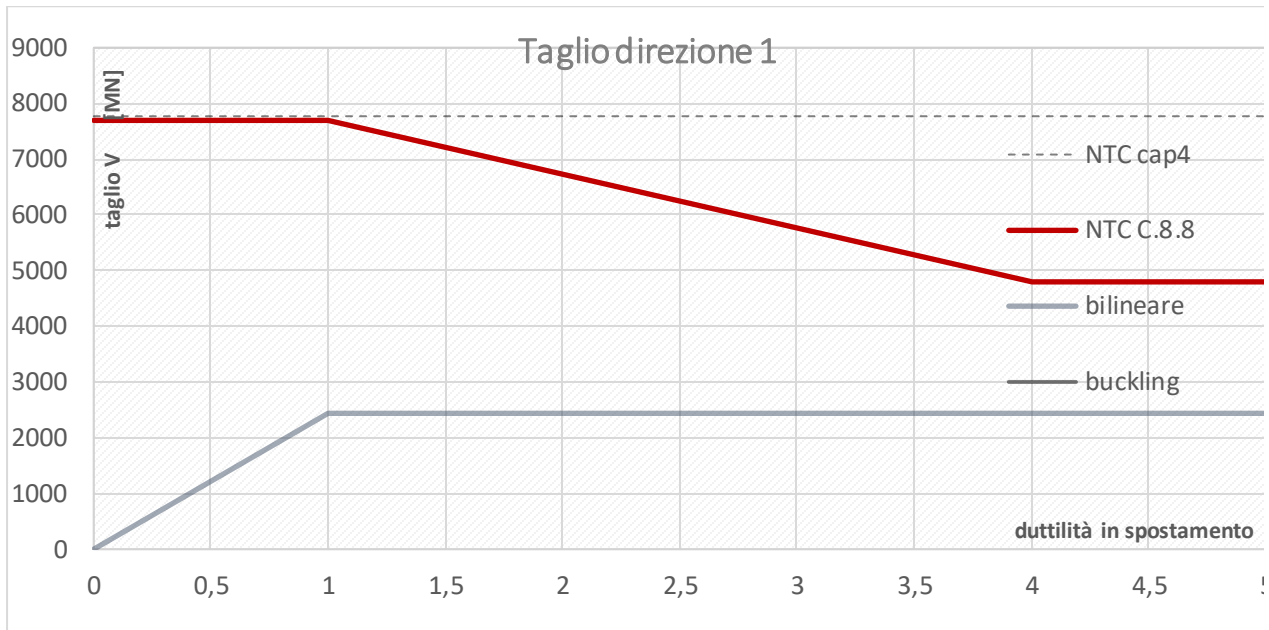
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.10153	0.249062	0.158942	475	0.76
capacità	0.07603	0.188917	0.12056	253	

Trasversale – direzione 2

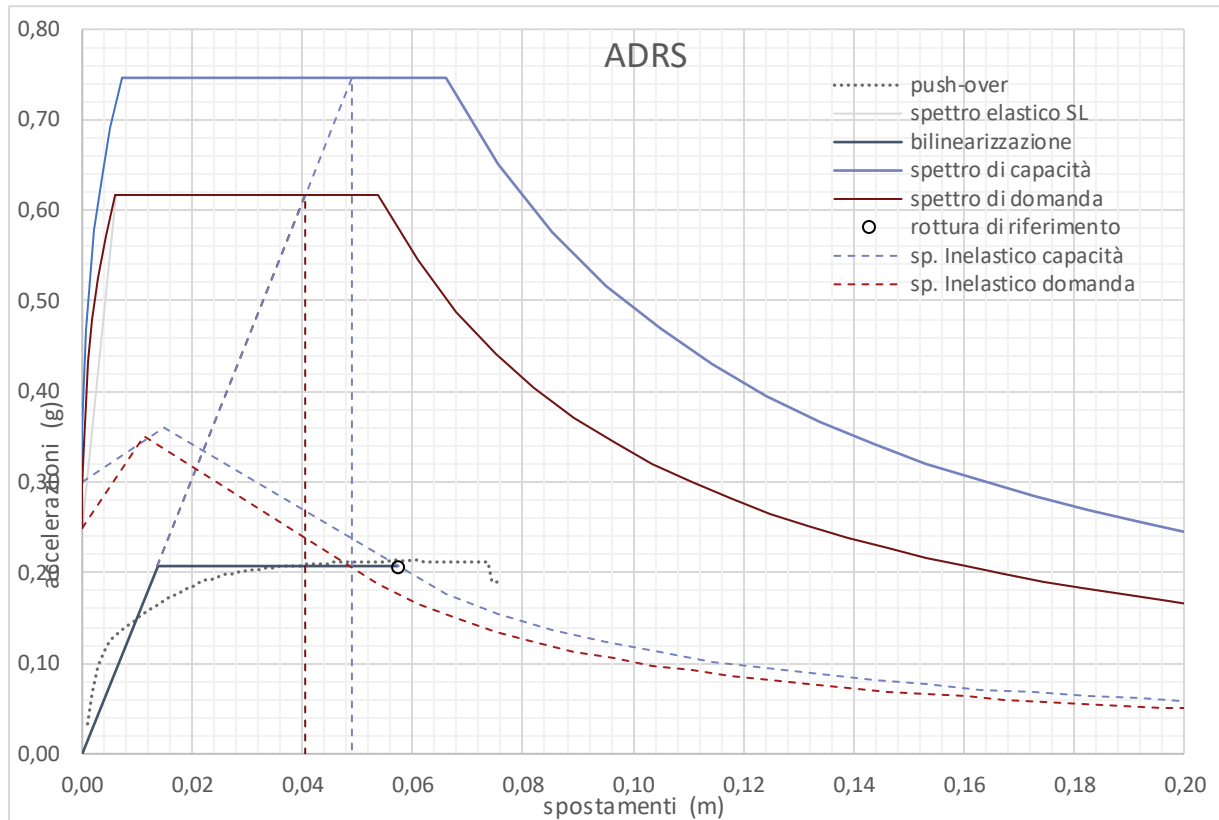


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.06541	0.249062	0.158942	475	1.32
capacità	0.08855	0.329786	0.210457	1948	

### 14.2.3 Pila esagonale

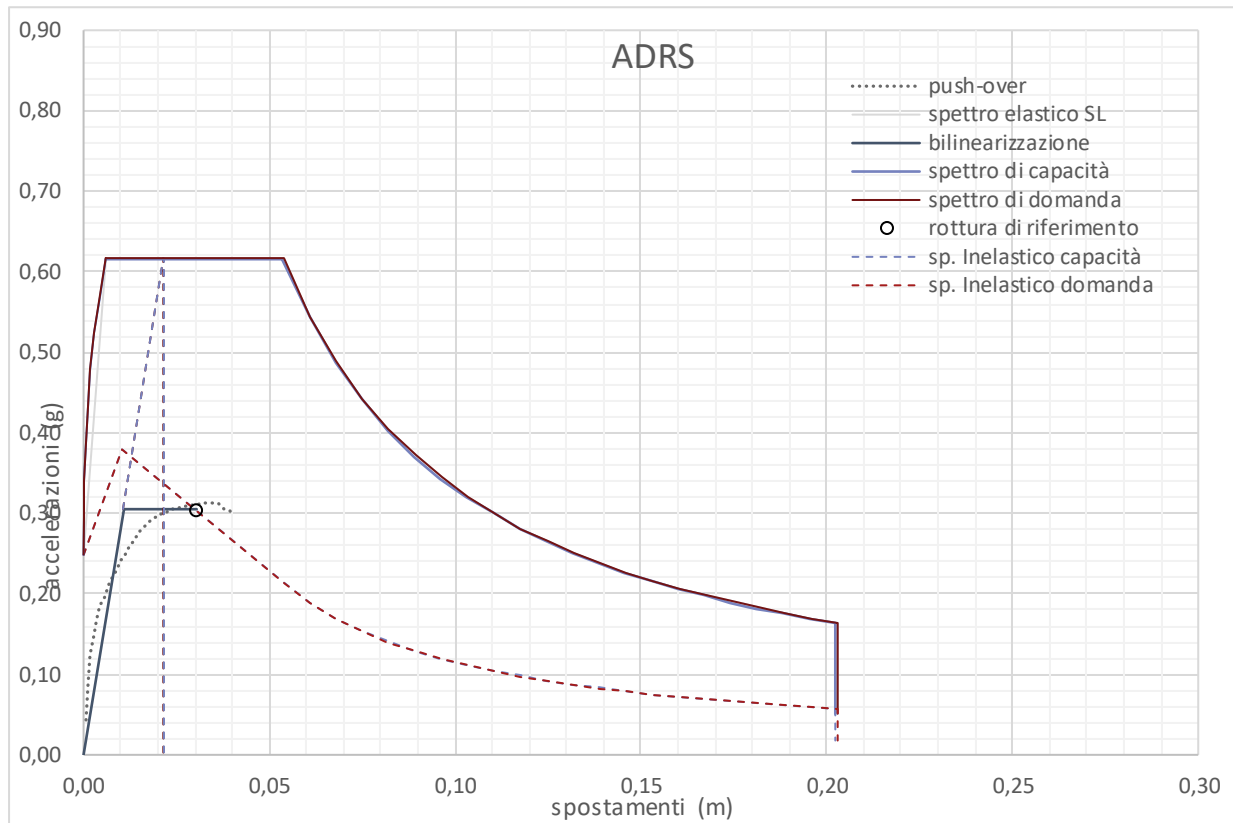


Longitudinale – direzione 1



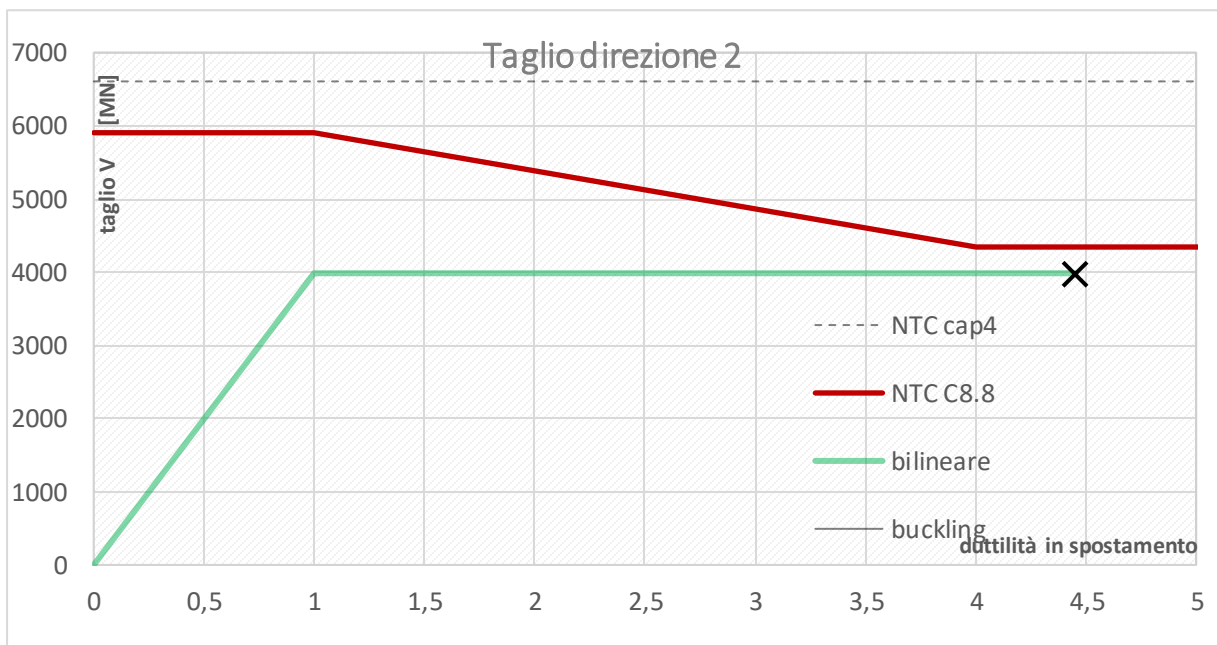
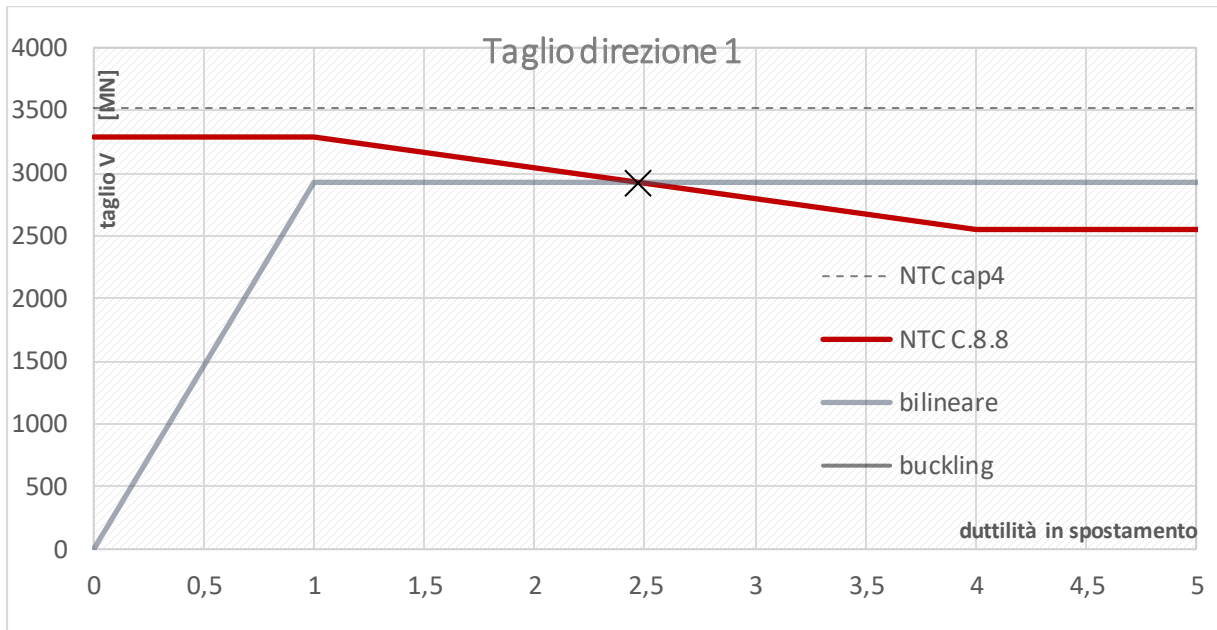
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.04047	0.249062	0.158942	475	1.20
capacità	0.04895	0.29906	0.190849	1103	

Trasversale – direzione 2

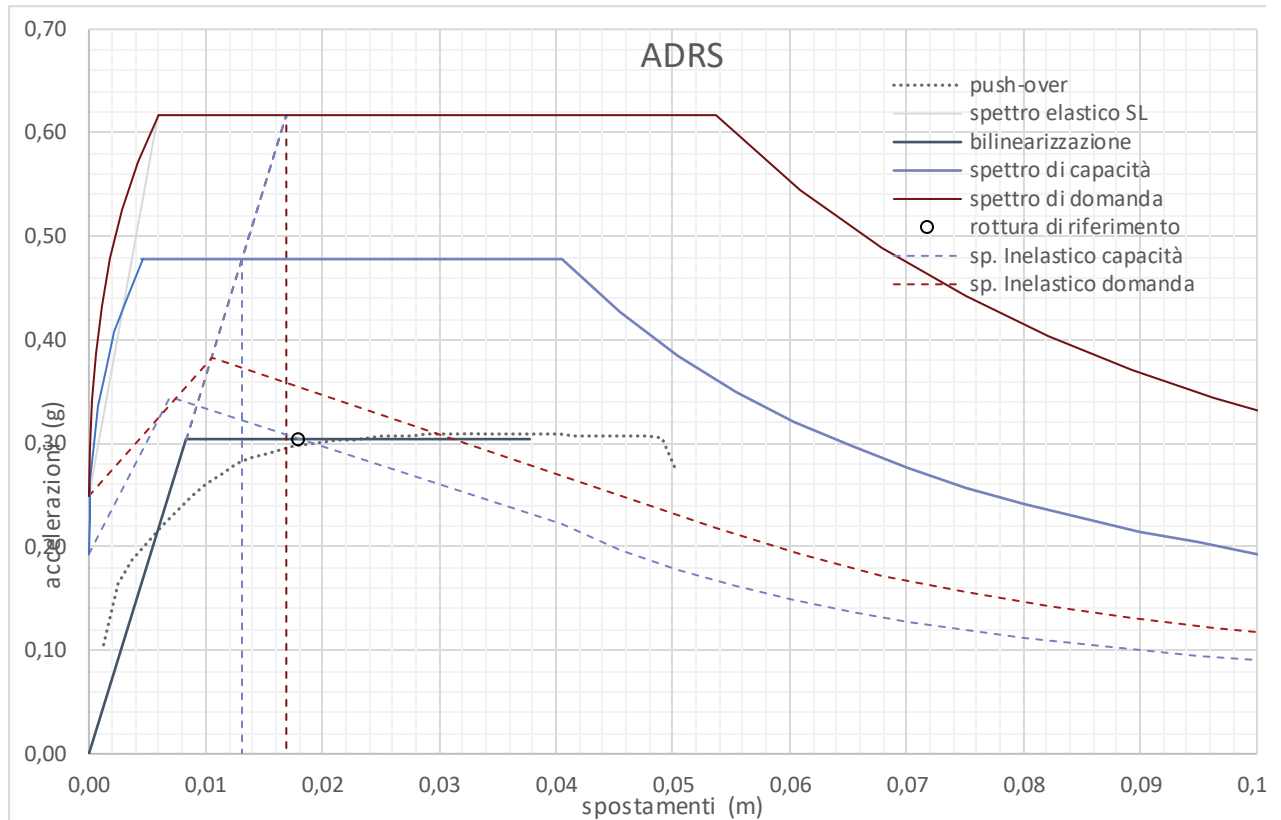


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta_E$
domanda	0.02147	0.249062	0.158942	475	1.00
capacità	0.02142	0.24852	0.158596	472	

14.2.4 *Pila media H=7.5m*

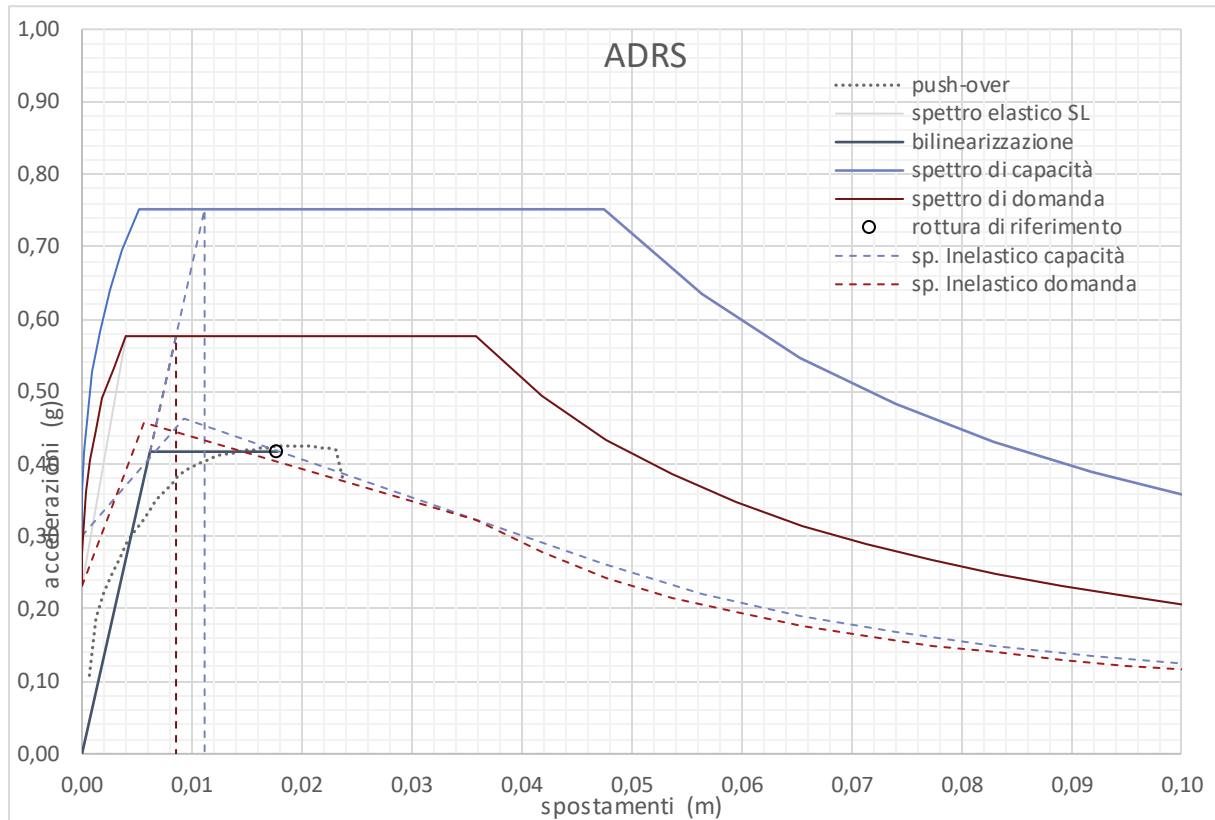


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta_E$
domanda	0.01690	0.249062	0.158942	475	0.77
capacità	0.01309	0.192556	0.122882	264	

Trasversale – direzione 2



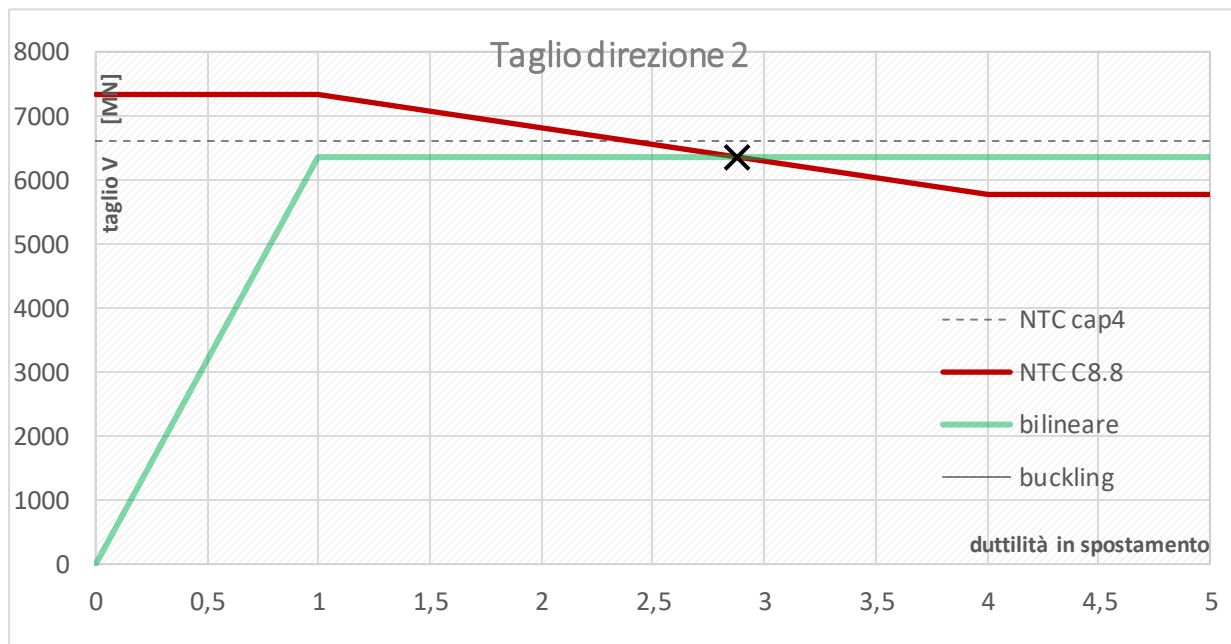
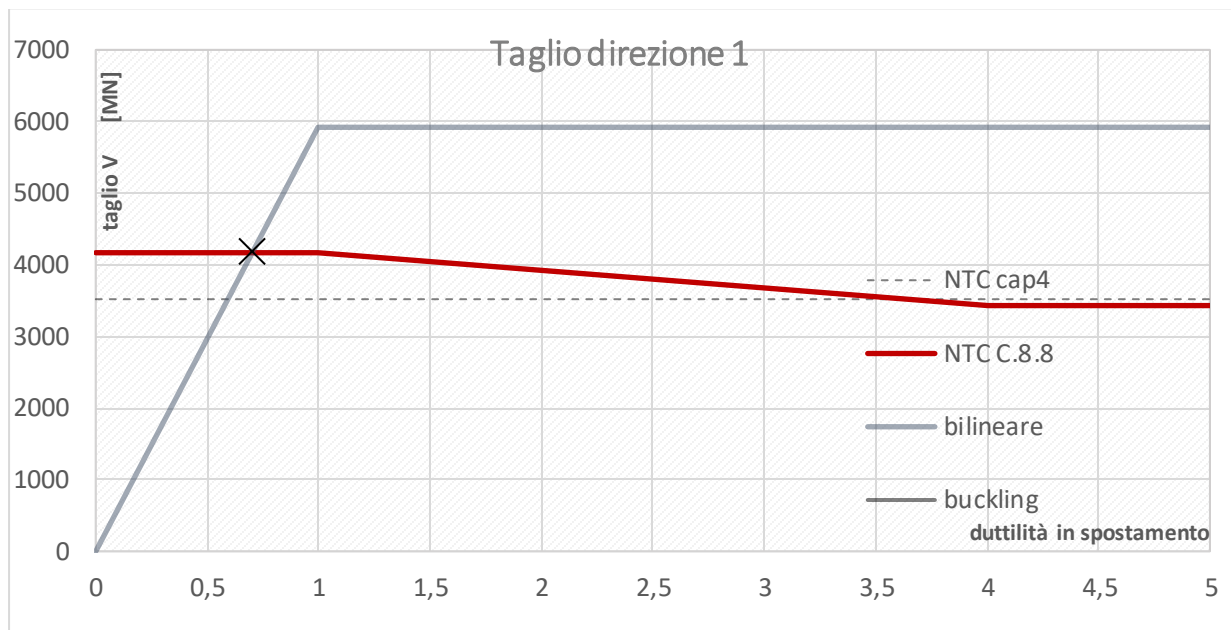
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00856	0.232673	0.15896	475	1.29
capacità	0.01116	0.300801	0.205505	1257	



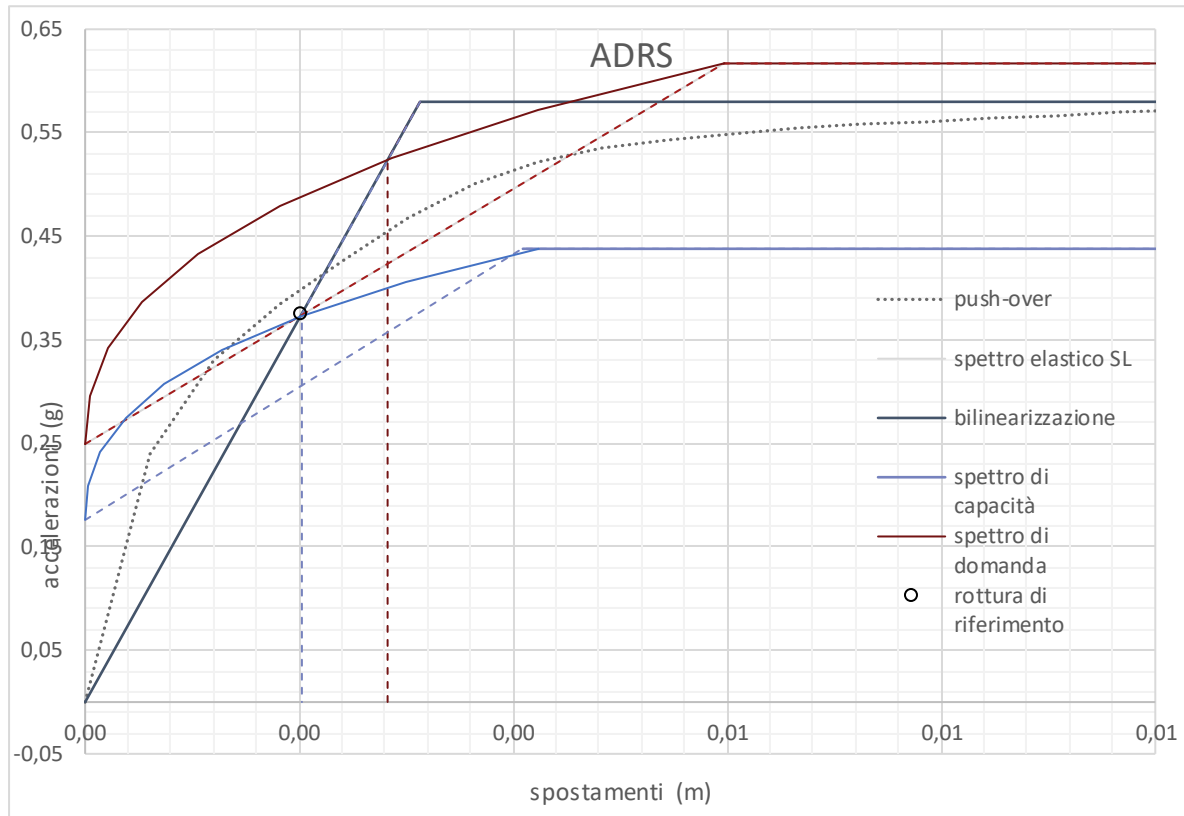
### 14.3 Terreno E

#### 14.3.1 Pile $H < 13m$

##### 14.3.1.1 Pila bassa

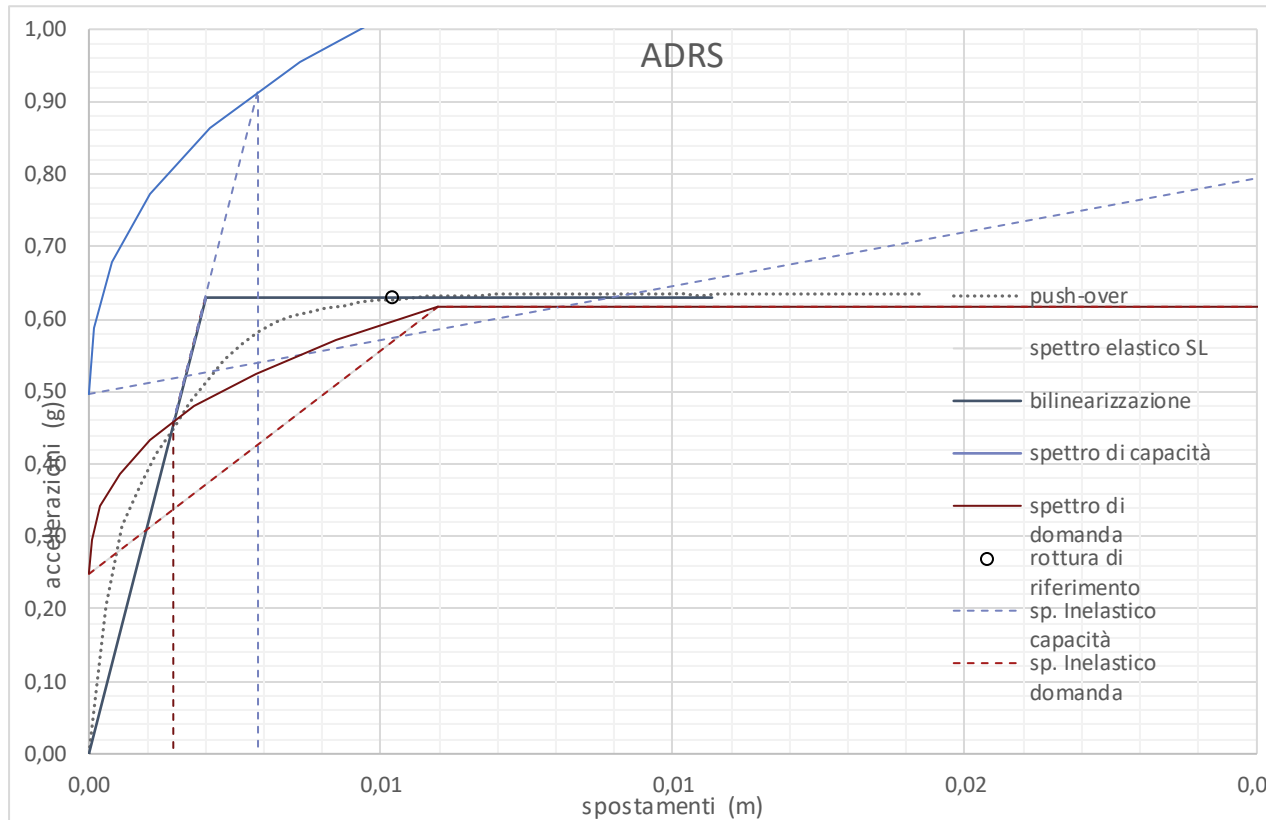


Longitudinale – direzione 1



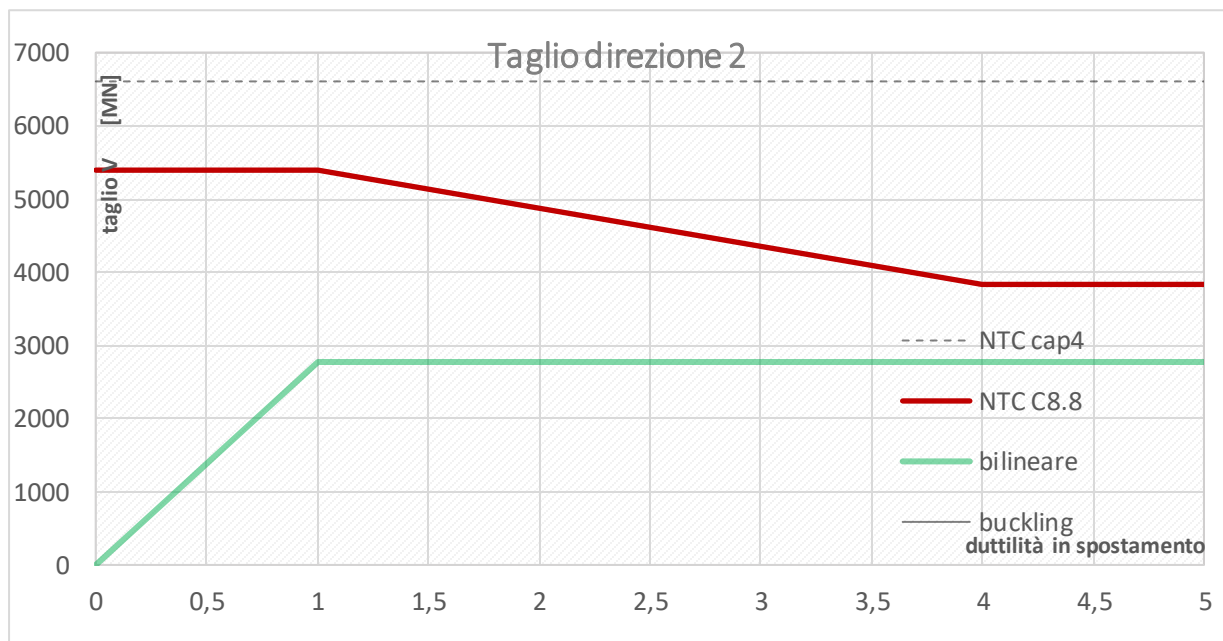
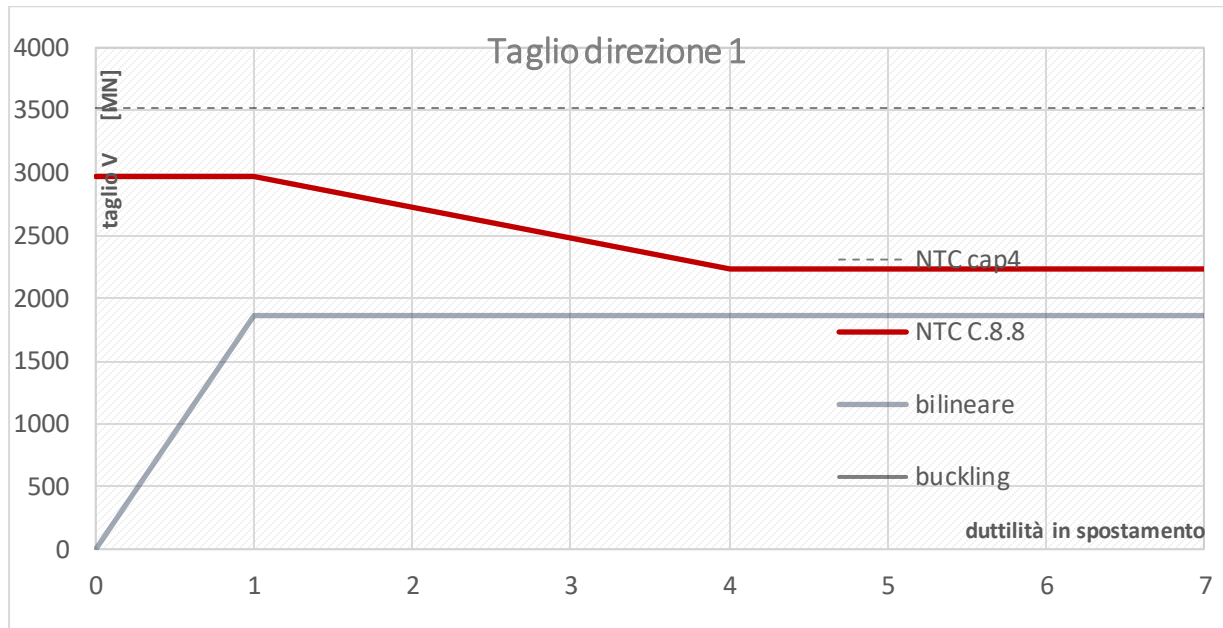
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00283	0.249062	0.158942	475	0.71
capacità	0.00203	0.176325	0.112524	219	

Trasversale – direzione 2

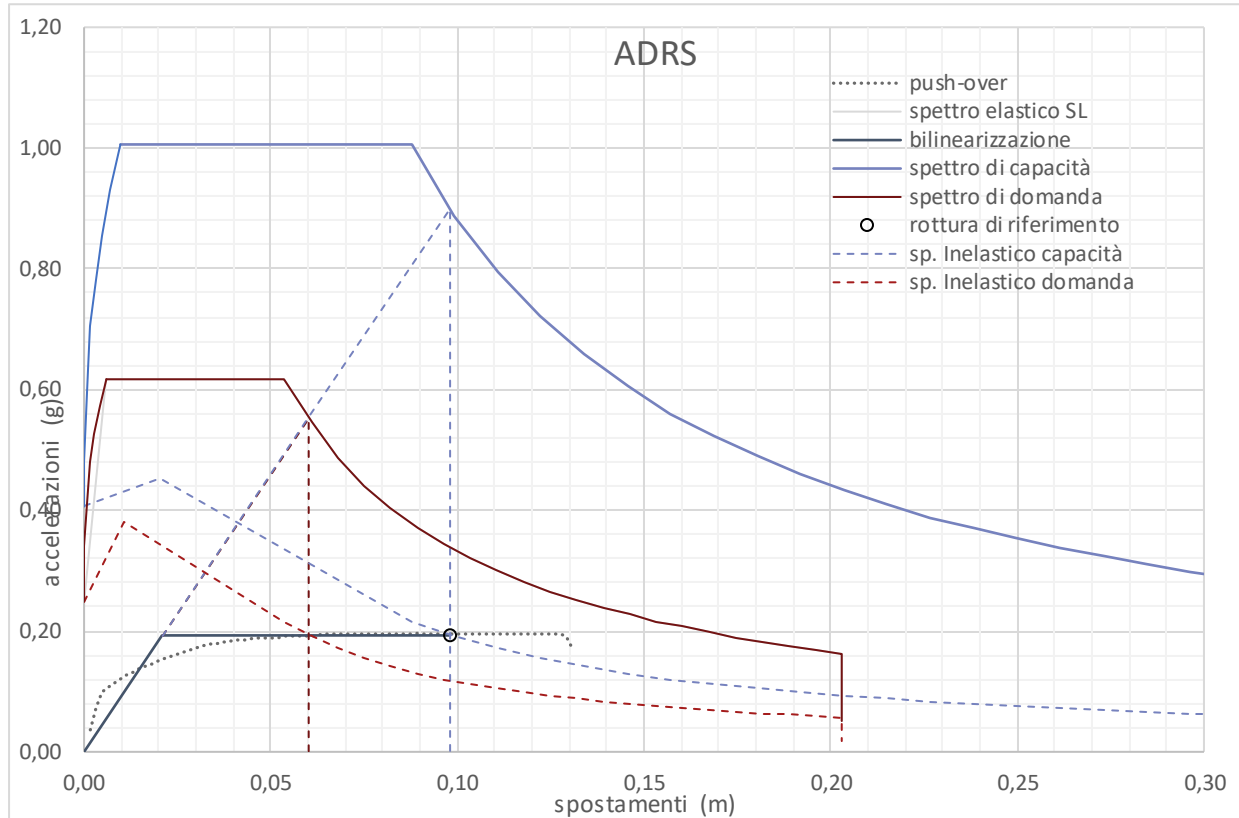


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00145	0.249062	0.158942	475	1.99
capacità	0.00290	0.496435	0.316806	3859	

14.3.1.2 Pila alta

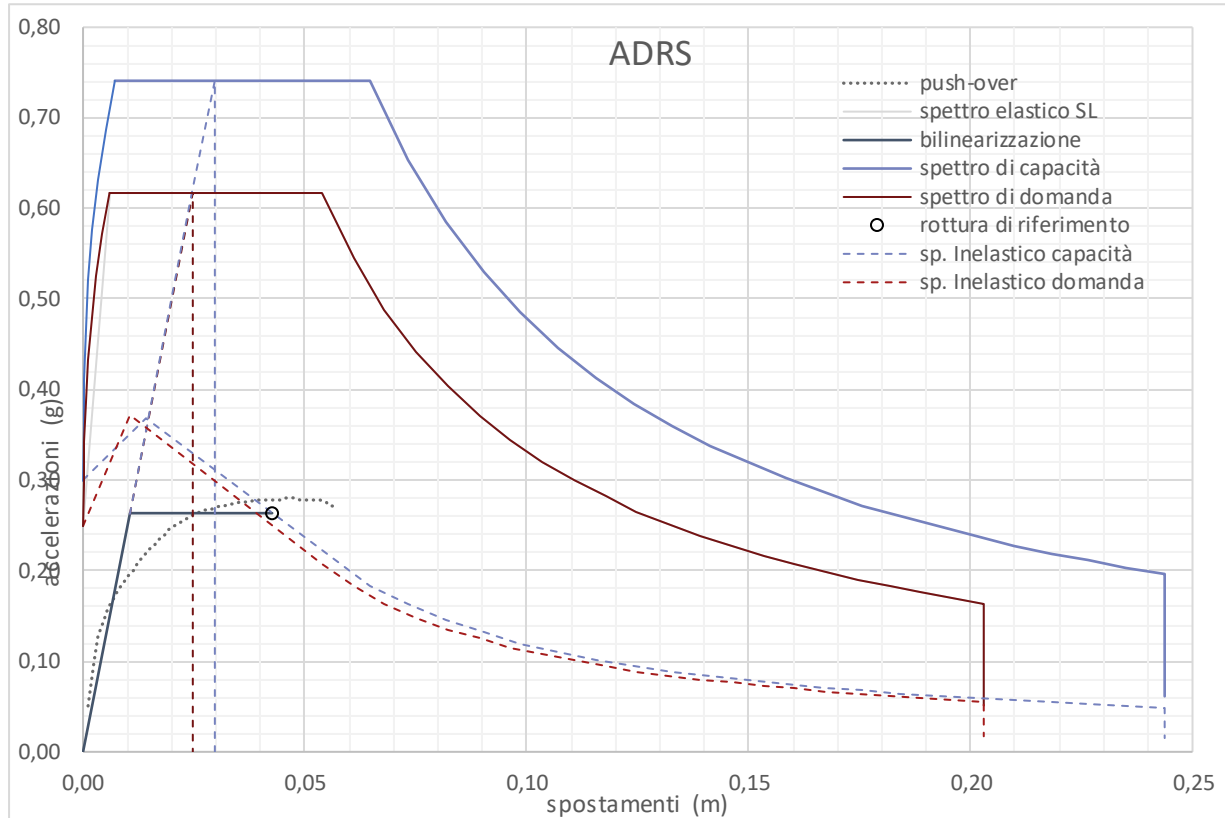


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta^E$
domanda	0.06017	0.249062	0.158942	475	1.63
capacità	0.09805	0.406051	0.259126	2070	

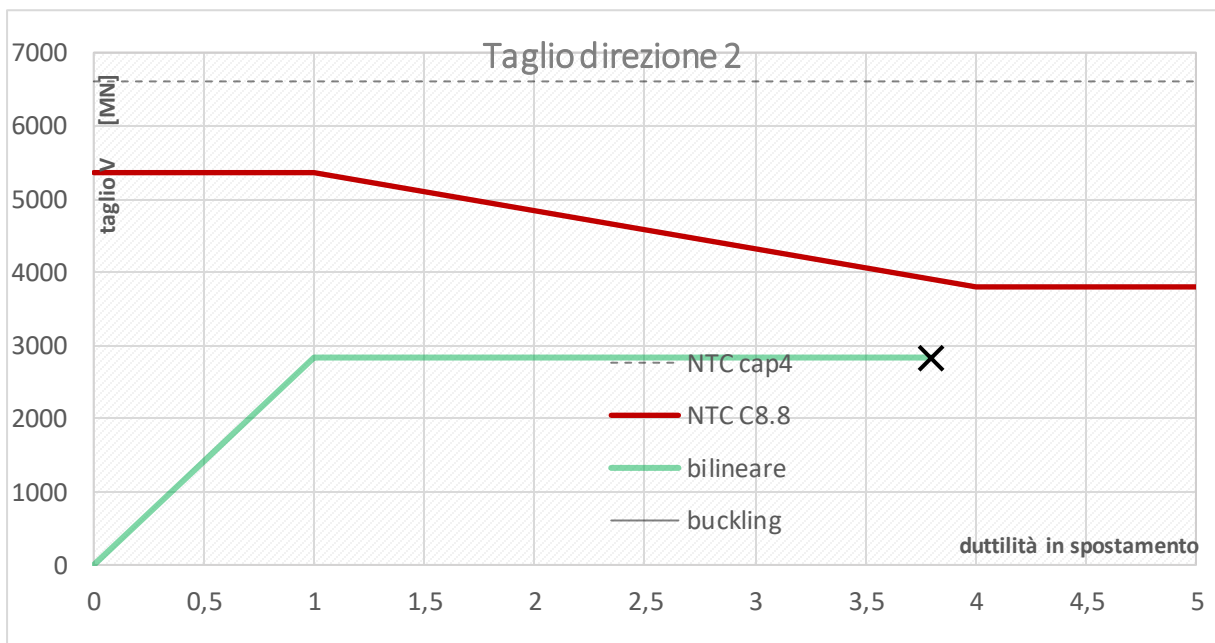
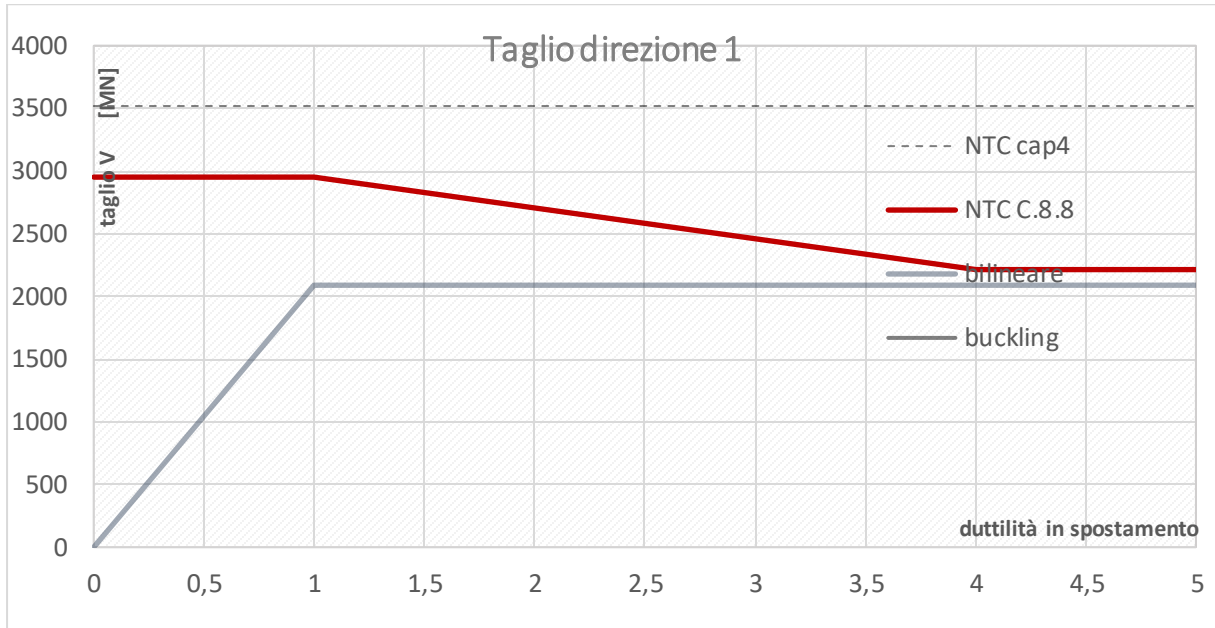
Trasversale – direzione 2



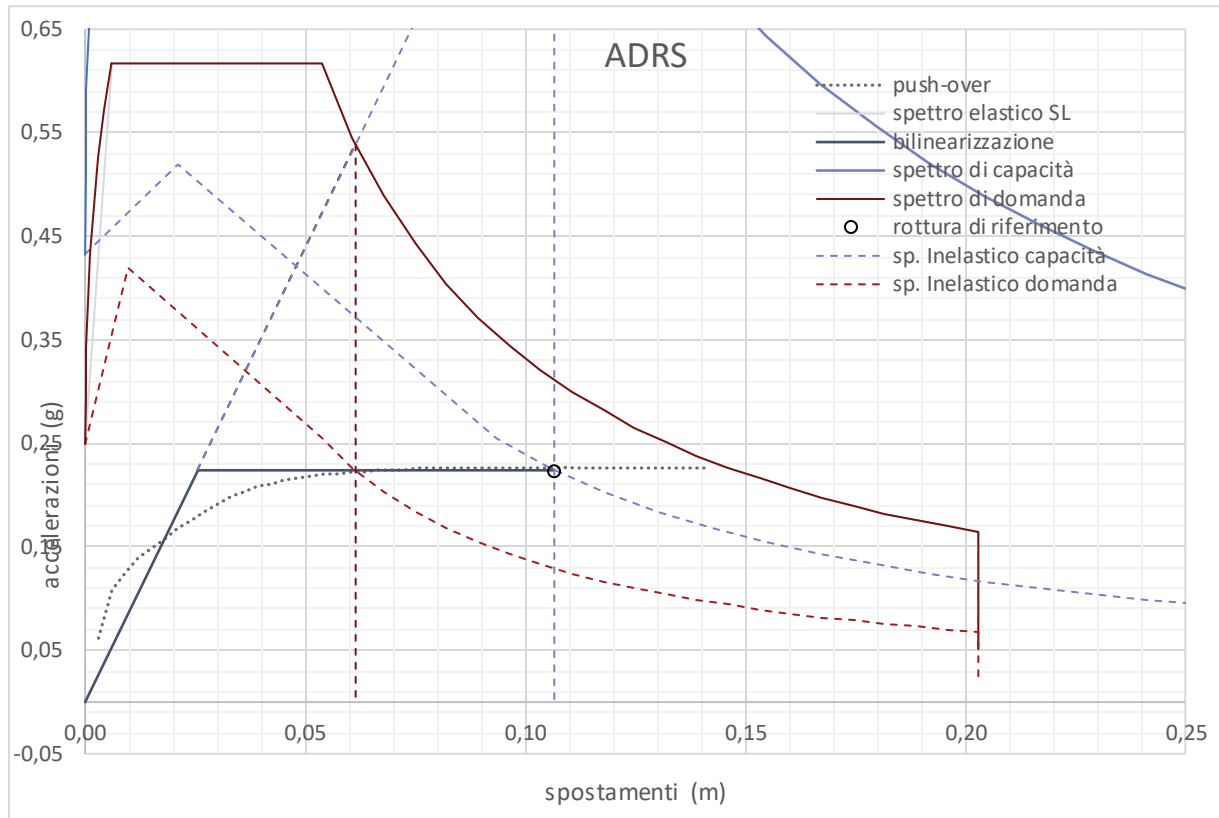
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.02473	0.249062	0.158942	475	1.20
capacità	0.02970	0.299089	0.190867	814	

14.3.2 *Pile H>13m*

14.3.2.1 Pila bassa



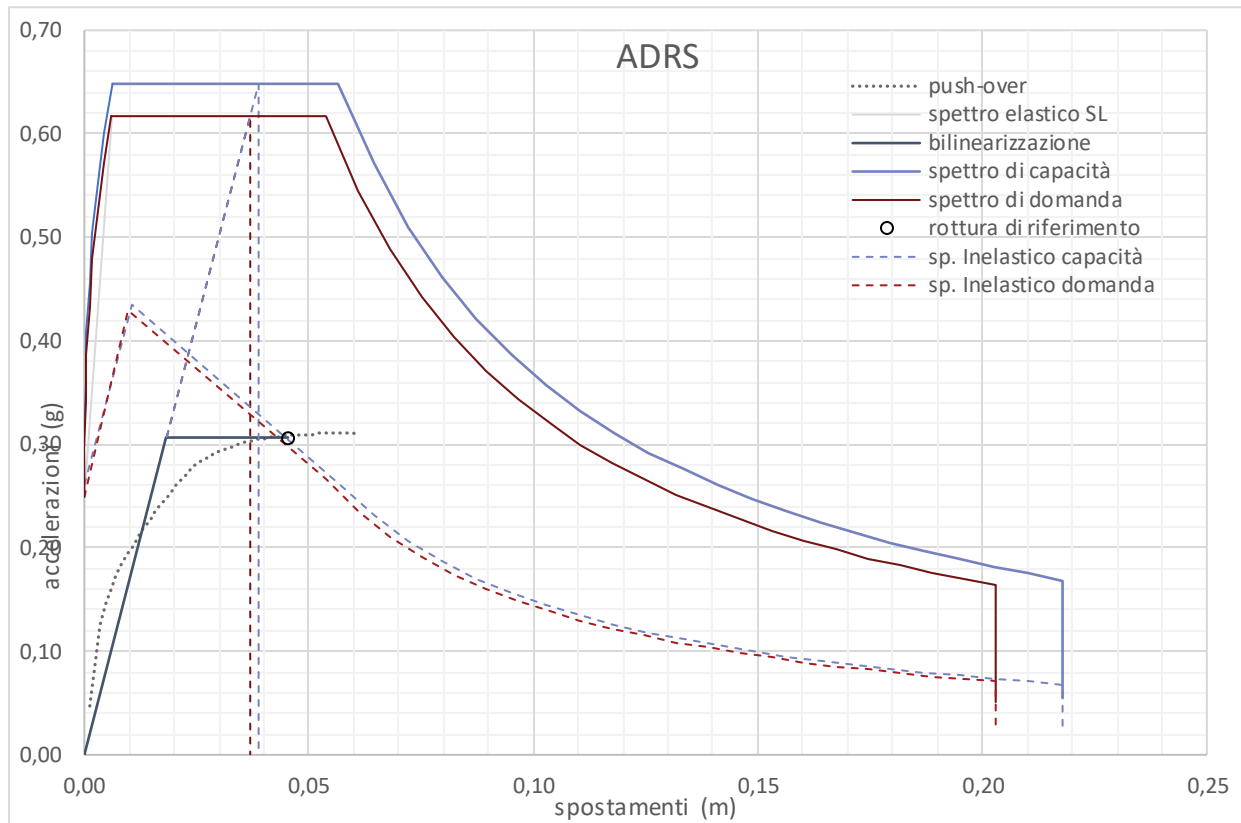
Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.06147	0.249062	0.158942	475	1.73
capacità	0.10661	0.432076	0.275735	2509	

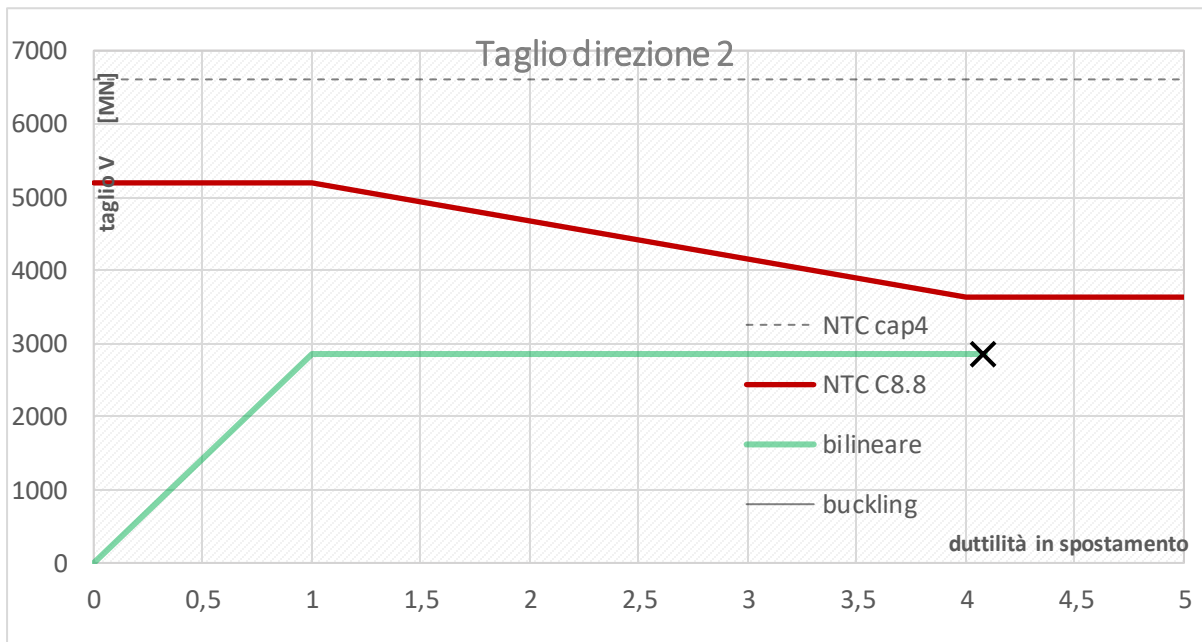
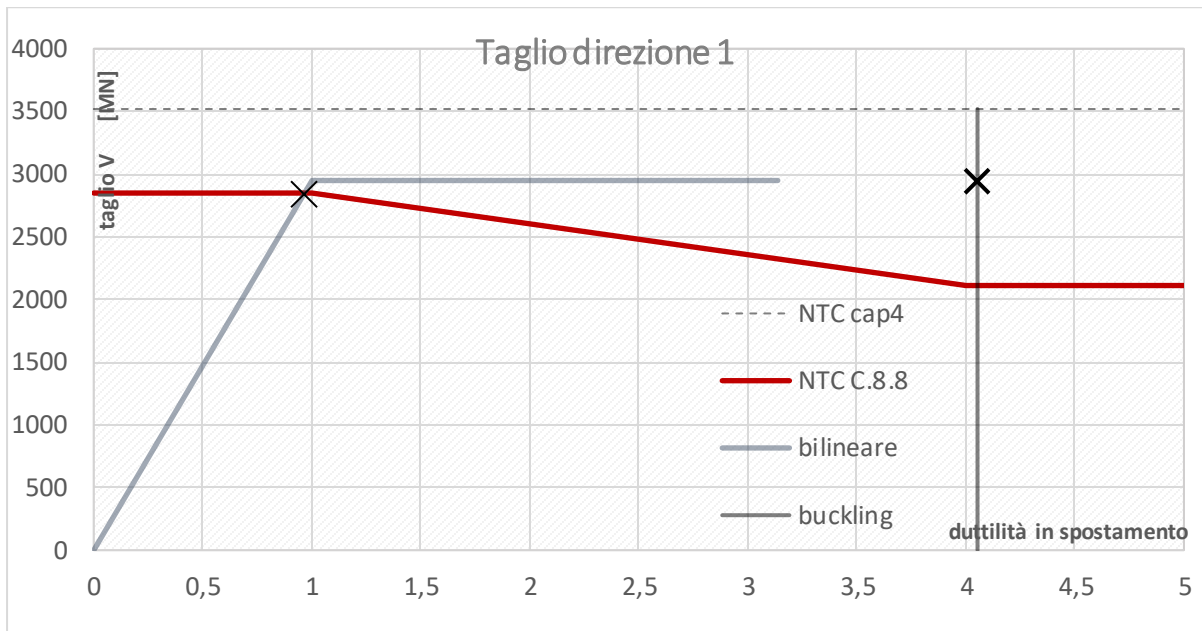


Trasversale – direzione 2

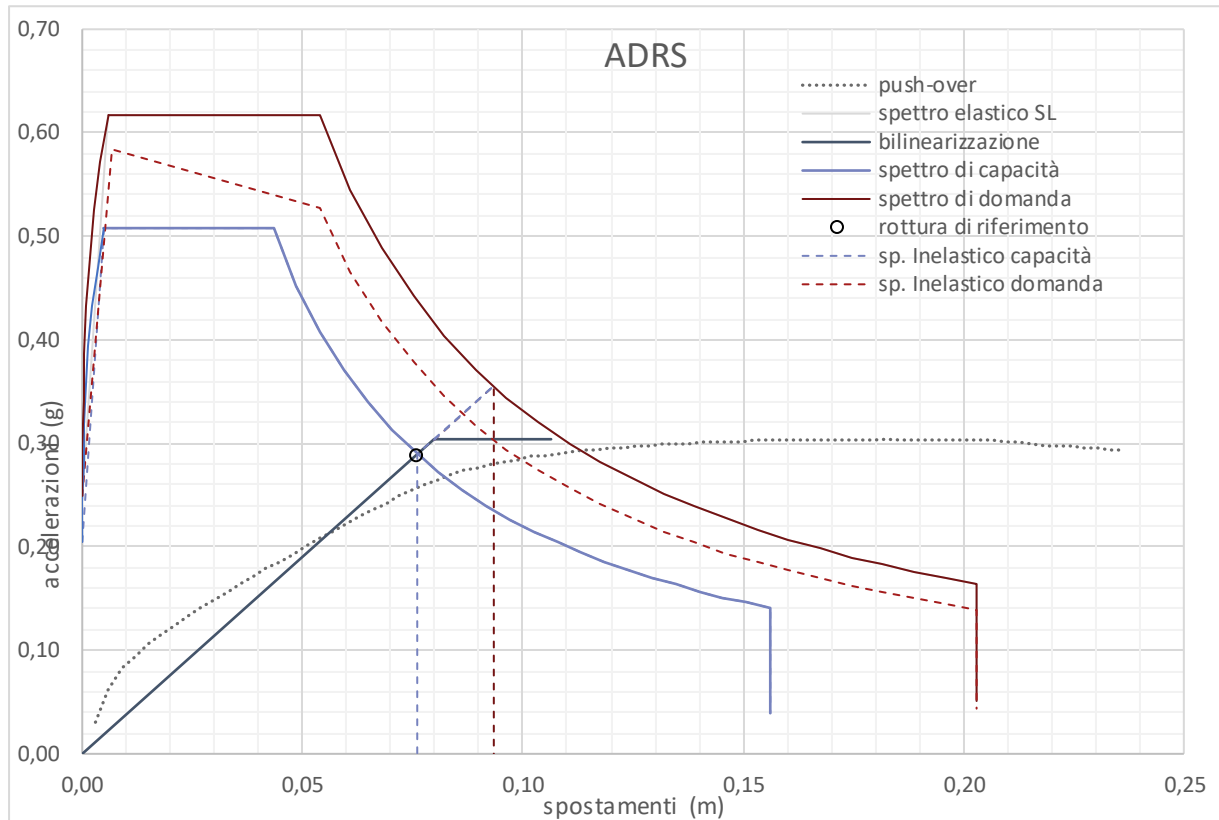


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.03694	0.249062	0.158942	475	1.05
capacità	0.03881	0.261215	0.166698	582	

14.3.2.2 Pila alta

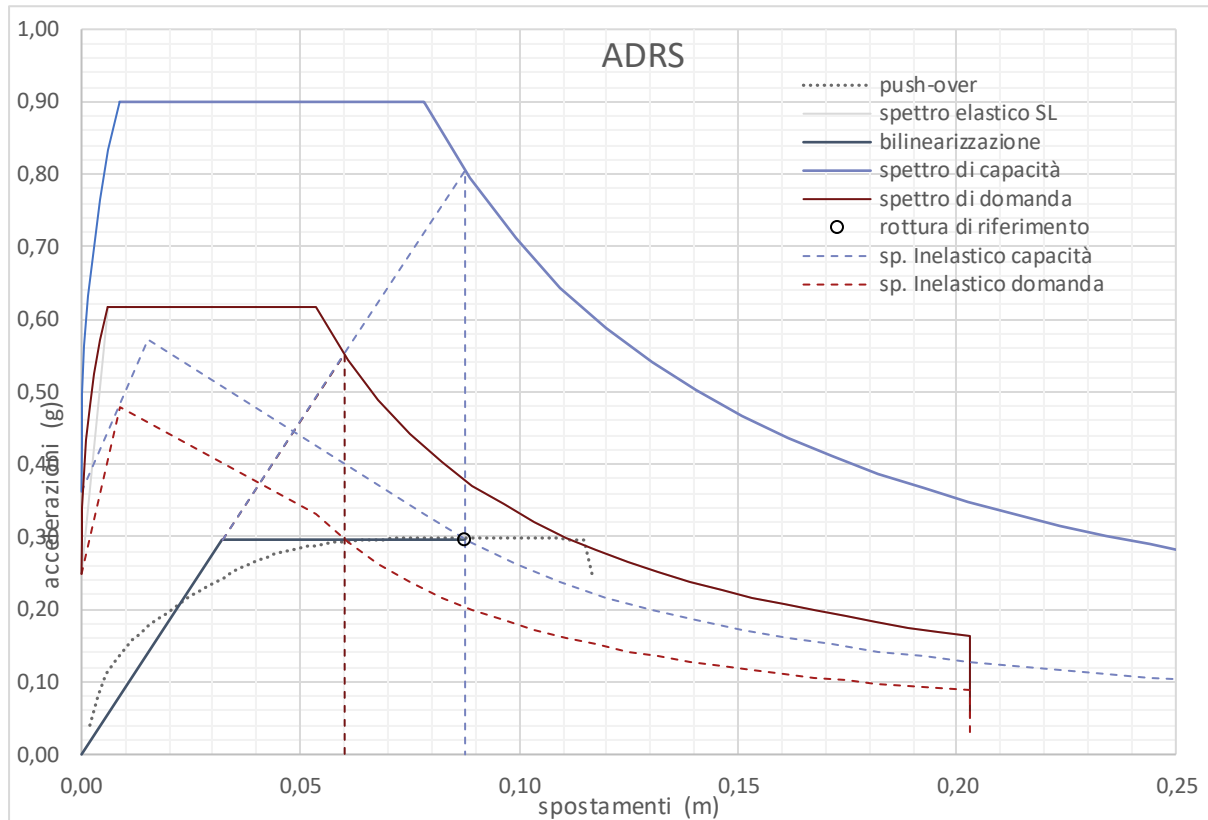


Longitudinale – direzione 1



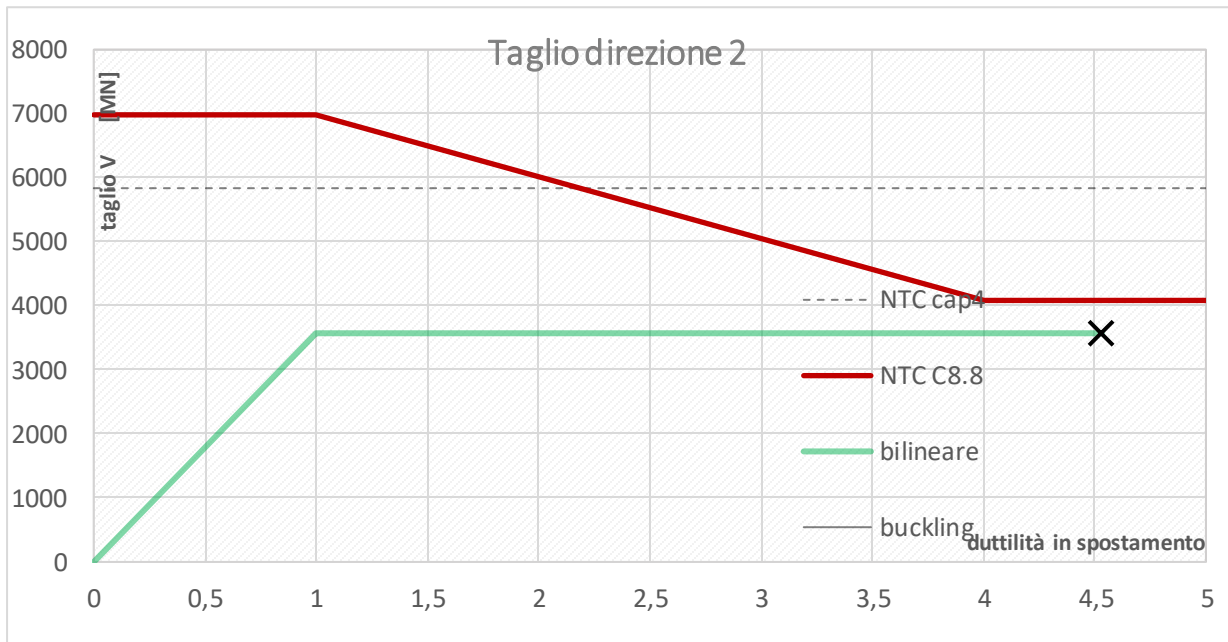
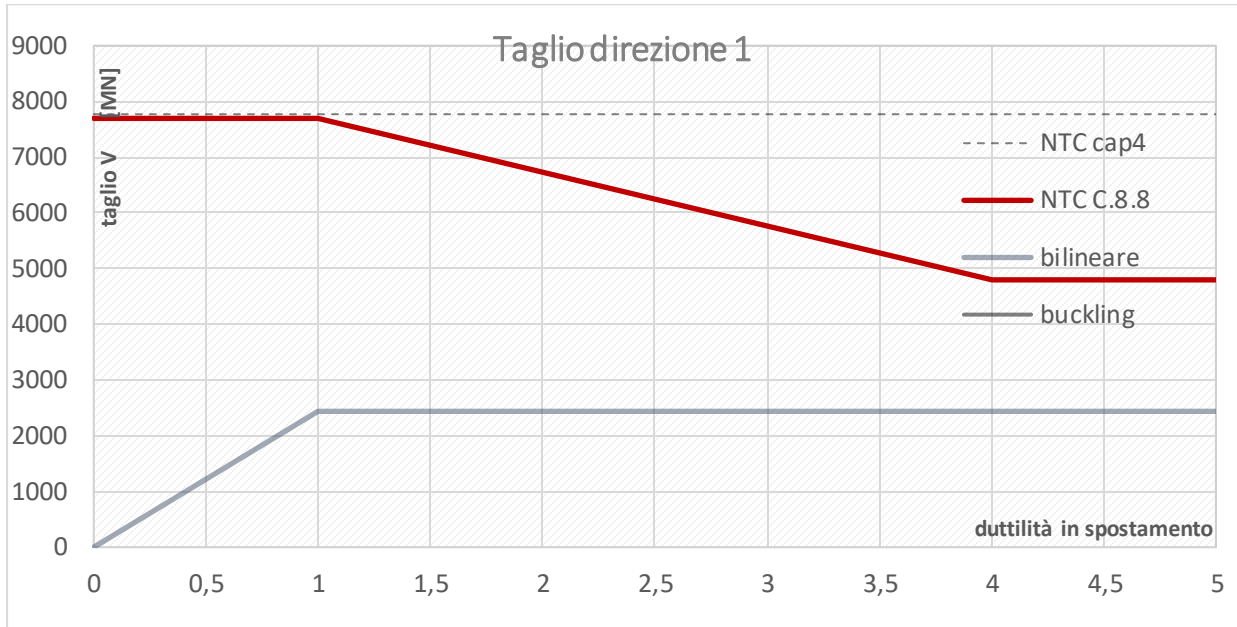
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.09340	0.249062	0.158942	475	0.82
capacità	0.07603	0.204706	0.130636	300	

Trasversale – direzione 2

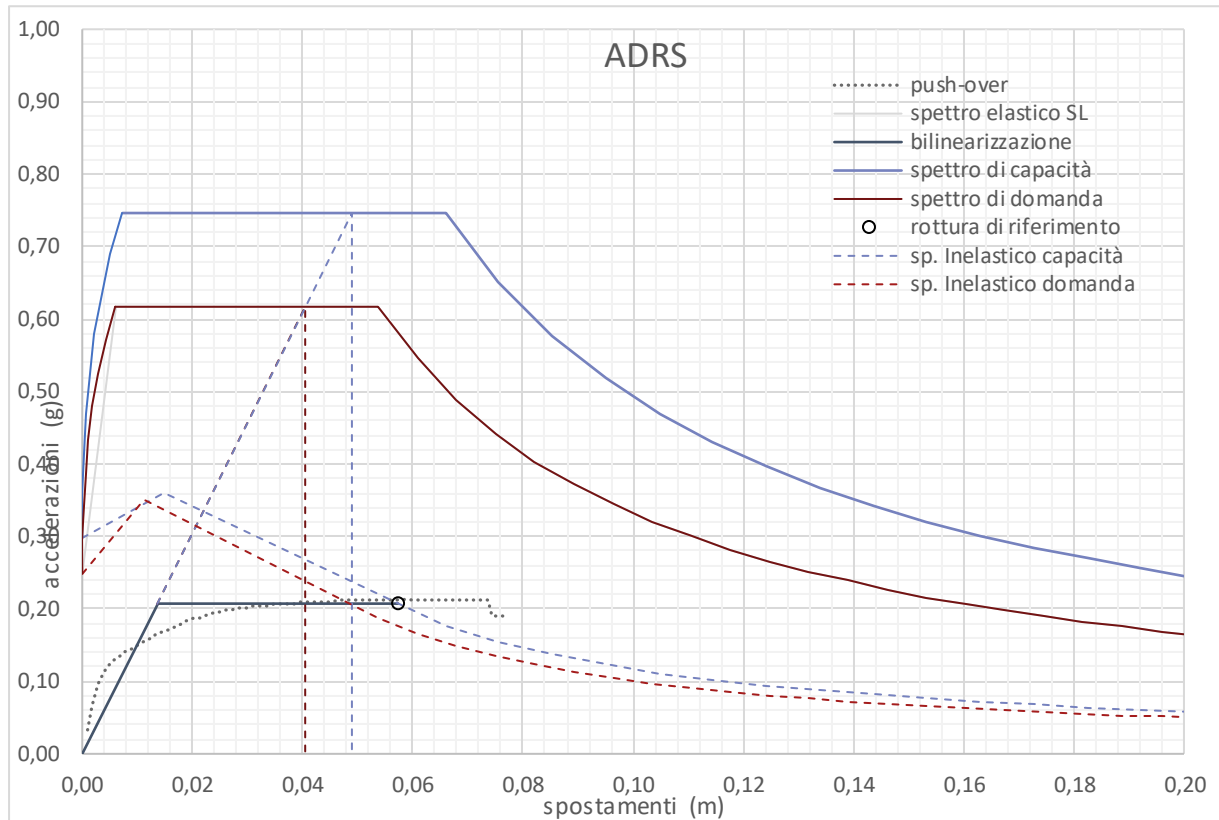


	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.06012	0.249062	0.158942	475	1.46
capacità	0.08763	0.36325	0.231813	1469	

### 14.3.3 Pila esagonale

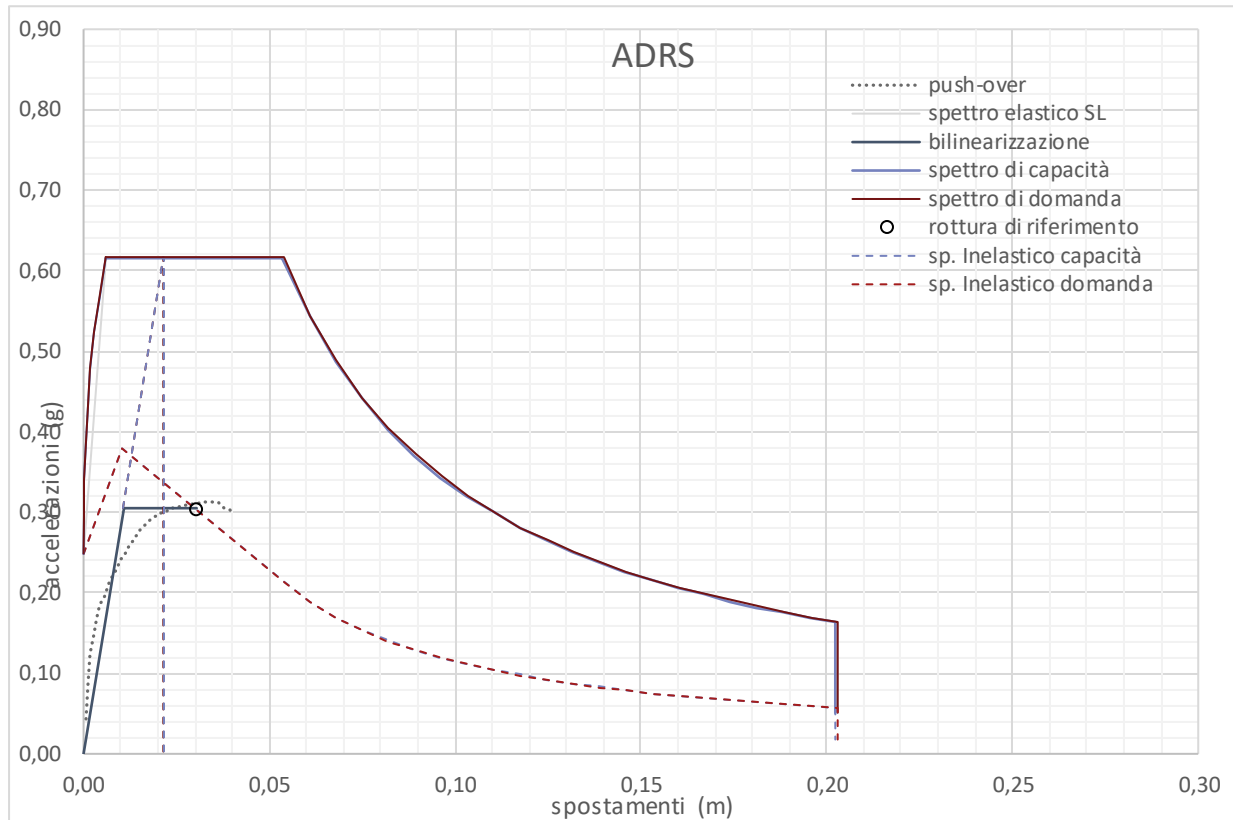


Longitudinale – direzione 1



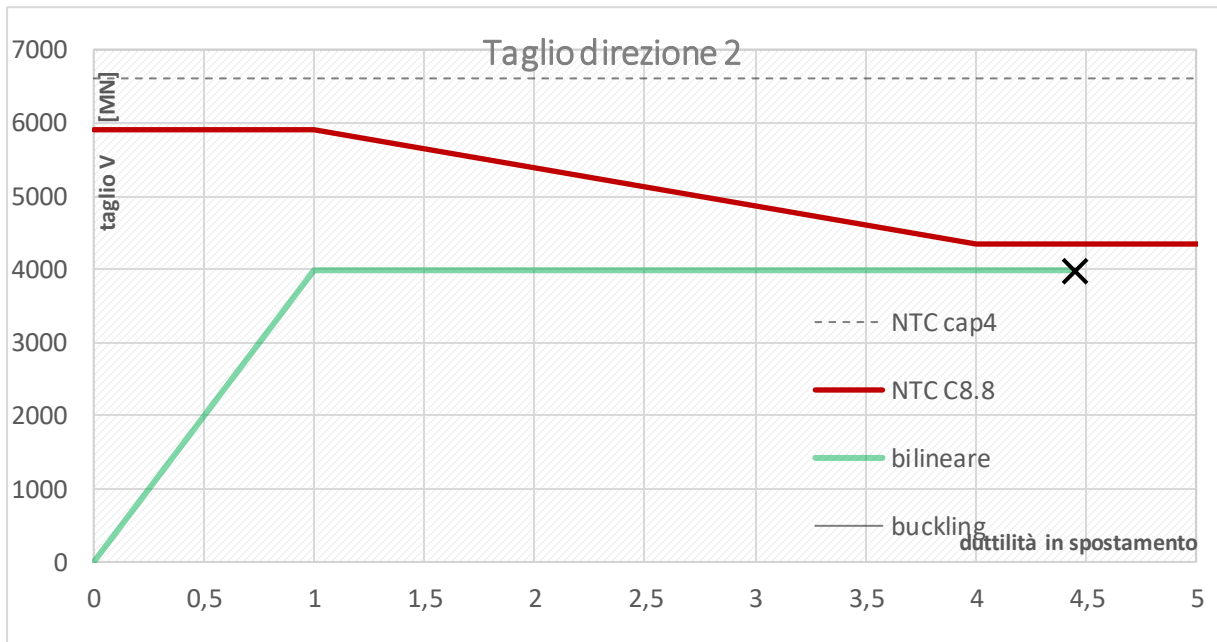
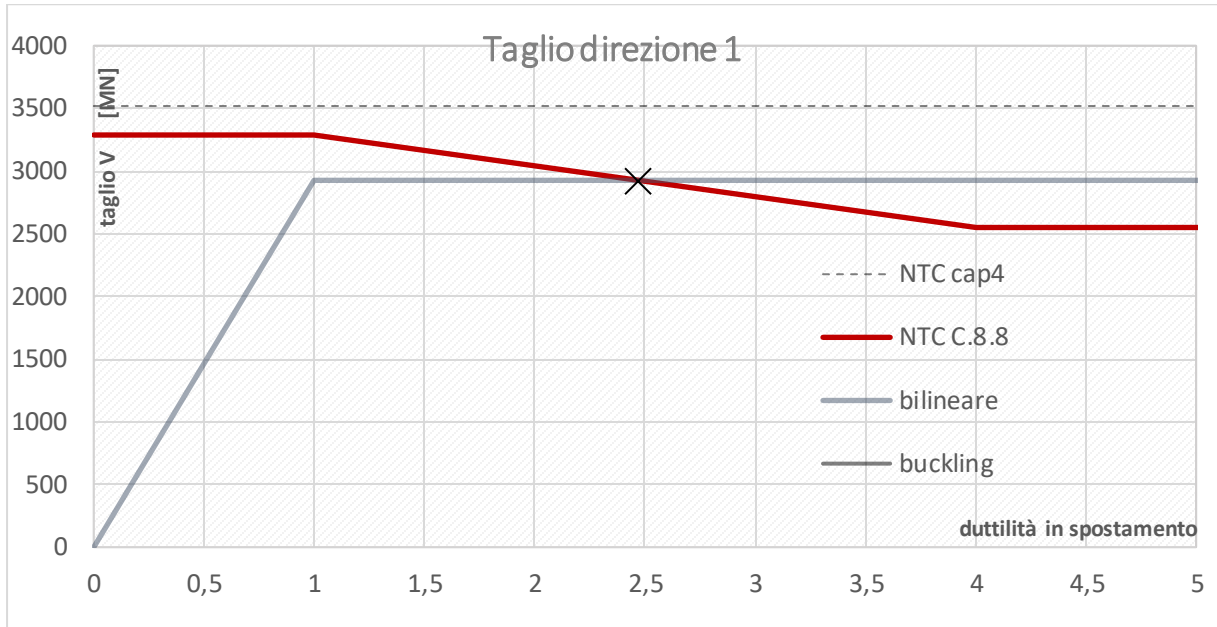
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta^E$
domanda	0.04047	0.249062	0.158942	475	1.20
capacità	0.04895	0.29906	0.190849	1103	

Trasversale – direzione 2



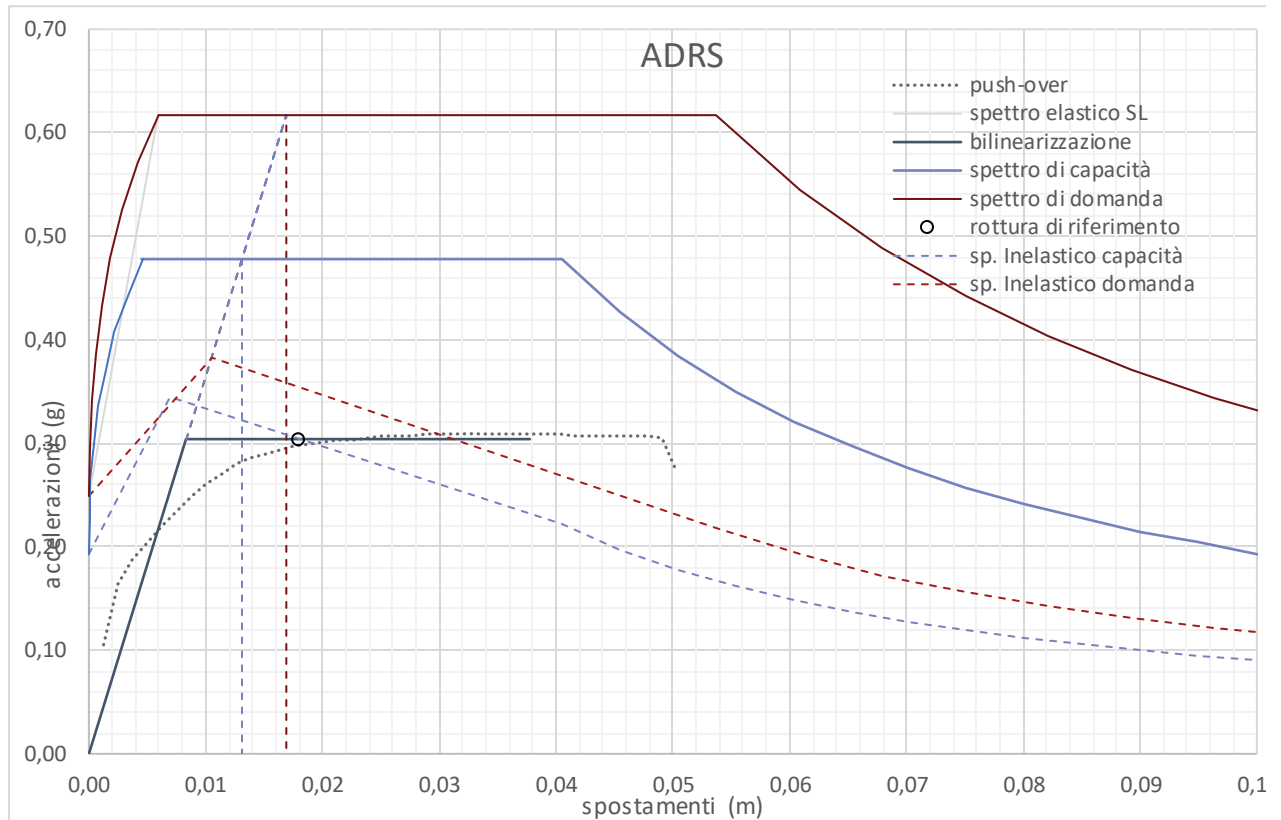
	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.02147	0.249062	0.158942	475	1.00
capacità	0.02142	0.24852	0.158596	472	

14.3.4 Pila media  $H=7.5m$



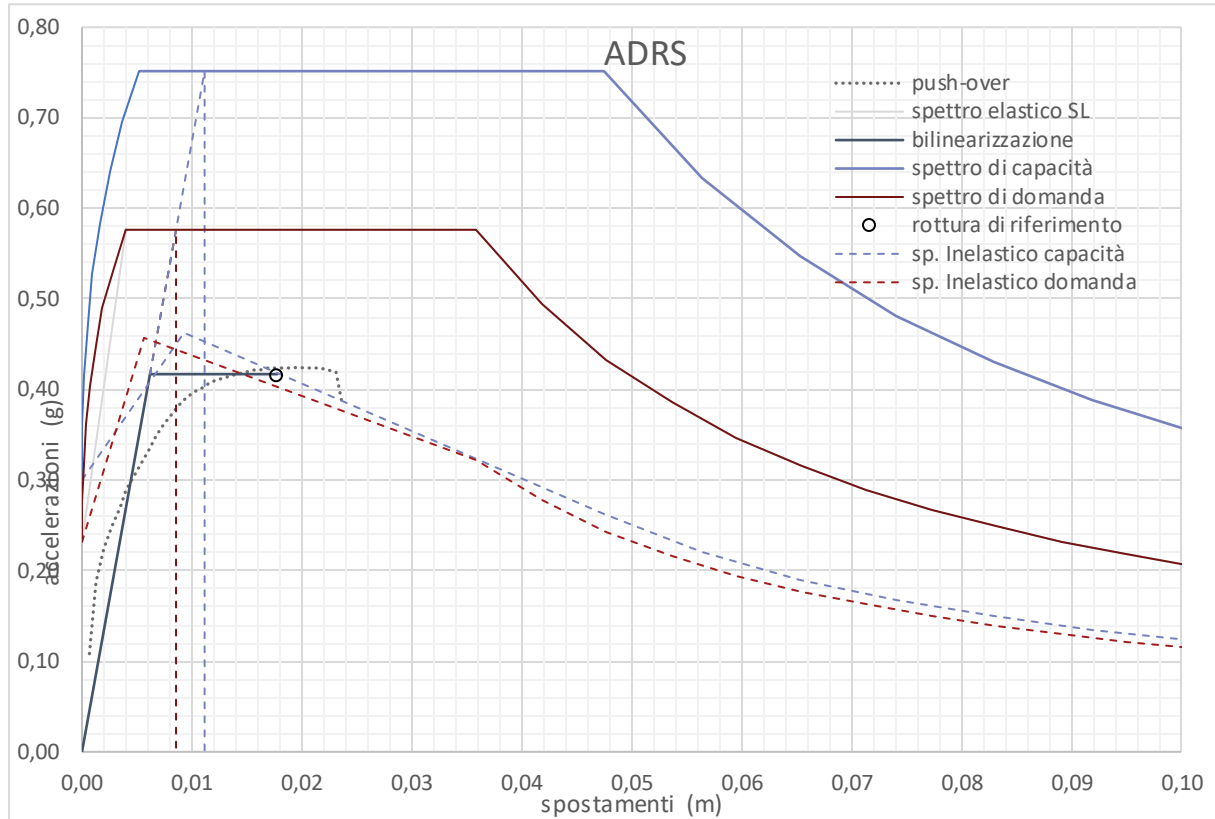


Longitudinale – direzione 1



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta_E$
domanda	0.01690	0.249062	0.158942	475	0.77
capacità	0.01309	0.192556	0.122882	264	

Trasversale – direzione 2



	Se	Sa	ag	Tr	$\zeta E$
domanda	0.00856	0.232673	0.15896	475	1.29
capacità	0.01116	0.300801	0.205505	1257	