

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

**LINEA A.V. /A.C. TORINO – VENEZIA Tratta VERONA – PADOVA**  
**Lotto funzionale Verona – Bivio Vicenza**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU**

GENERAL CONTRACTOR		DIRETTORE LAVORI	
IL PROGETTISTA INTEGRATORE Ing. Giovanni MALAVENDA ALBO INGEGNERI PROV. DI MESSINA n. 4503 Data:	Consorzio Iricav Due Ing. Paola Carmona Data:	Valido per costruzione Data:	Scala: -

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

I	N	1	7	1	0	E	I	2	C	L	L	C	0	0	0	0	K	0	4	A	0	0	1	D	0	1	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

	VISTO CONSORZIO SATURNO	
	Firma A.M. DE SIMONE <i>A.M. De Simone</i>	Data 23/09/2022

Progettazione :

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	IL PROGETTISTA
A	EMISSIONE	P. Gervacio <i>P. Gervacio</i>	23/09/22	D. Berlusconi <i>D. Berlusconi</i>	23/09/22	M. Albertini <i>M. Albertini</i>	23/09/22	
B								
C								

CIG. 8377957CD1

CUP: J41E91000000009

File: IN1710EI2CLLC0000K04A00.doc

Cod. origine:



Progetto cofinanziato dalla Unione Europea

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> <i>High Speed Railway Technologies</i>	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE				
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU		Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 2 di 18

## INDICE

<b>1.</b>	<b>GENERALITÀ.....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>CARATTERISTICHE PRINCIPALI CONDUTTURE.....</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>IPOSTESI DI CALCOLO .....</b>	<b>5</b>
4.1	Sistema cartesiano di riferimento .....	5
4.2	Condizioni climatiche .....	5
4.3	Pressione dinamica del vento .....	6
4.4	Forze del vento sui conduttori.....	6
4.5	Forze del vento sui pali .....	7
4.6	Carichi dovuti al ghiaccio sui conduttori .....	7
4.7	Carichi dovuti agli effetti aerodinamici associati al passaggio dei convogli ferroviari sui pali....	8
4.8	Carichi accidentali .....	9
4.9	Carichi di origine sismica .....	9
<b>5.</b>	<b>COMBINAZIONE DELLE AZIONI .....</b>	<b>10</b>
<b>6.</b>	<b>CASI E COMBINAZIONI DI CARICO.....</b>	<b>11</b>
<b>7.</b>	<b>MODALITÀ DI CALCOLO E SCELTA DEI SOSTEGNI.....</b>	<b>14</b>
7.1	Classificazione delle sezioni.....	14
7.2	Coefficienti di sicurezza .....	15
7.3	Verifiche di resistenza .....	15
7.4	Verifiche di stabilità .....	17

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 3 di 18

## 1. Generalità

Il presente documento ha lo scopo di illustrare il metodo di verifica dei pali LSU e il metodo di calcolo dei relativi carichi alla base.

Le strutture TE in oggetto sono impiegate per il sostegno delle catenarie tipo 440 mm<sup>2</sup> e 540mm<sup>2</sup> (e relative condutture per binari secondari) all'interno del primo lotto funzionale della linea Verona-Padova, che si estende tra l'uscita della stazione di Verona Porta Vescovo (pk 0+000) e l'innesto della AV sulla Linea Storica (pk 194+055 corrispondente alla pk AV/AC 44+250), in corrispondenza del bivio Vicenza.

Le azioni applicate alle strutture sono dipendenti dal tipo di attrezzaggio utilizzato (catenaria, corde di terra, eventuali linee di alimentazione), dal tracciato (rettifilo, curva interna/esterna, raggio), dalle condizioni climatiche adottate, dalla sismicità locale.

La verifica dei sostegni LSU e la determinazione dei relativi carichi alla base vengono effettuate in funzione del loro impiego più gravoso: gli stessi infatti verranno analizzati in condizioni tali da coprire tutte le casistiche presenti.

Le considerazioni adottate per la redazione della presente relazione seguono le indicazioni dettate dai criteri generali di verifica dei pali LSU riportate nell'elaborato E64864.

## 2. Normativa di riferimento

La valutazione delle azioni massime sui sostegni e la verifica di resistenza degli stessi è stata condotta secondo la seguente norma:

- CEI EN 50119: 2021-01 "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Impianti fissi – Linee aeree di contatto per trazione elettrica".
- D.M. 14 gennaio 2008 "Norme tecniche per le costruzioni" [NTC]
- UNI EN 1993-1-1 2005-08 "Eurocodice 3 – Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici" [EC3].
- CEI EN50125-2 2003-04 "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Condizioni ambientali per gli equipaggiamenti".
- Istruzione tecnica RFI DMAIMTE SP IFS 006 A "Procedimento di calcolo di verifica dei pali della linea di contatto in stazione e di piena linea".

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 4 di 18

### 3. Caratteristiche principali condutture

Le catenarie presenti all'interno del primo lotto funzionale sono del tipo 220/270/440/540mm<sup>2</sup>. Le relative caratteristiche sono descritte all'interno della tabella seguente (Tab.1):

TIPO CATENARIA	CORDE PORTANTI					FILII DI CONTATTO				
	Sezione Totale [mm <sup>2</sup> ]	n° corde	Sezione [mm <sup>2</sup> ]	Diametro [mm]	Regolaz.	Tiro [daN]	n° fili	Sezione [mm <sup>2</sup> ]	Diametro [mm]	Tiro [daN]
<b>220</b>		1	120	14	NO	750	1	100	11.8	819 (+15°C)
<b>270</b>		1	120	14	SI	1125	1	150	14.5	1125
<b>440</b>		2	120	14	SI	1125	2	100	11.8	1000
<b>540</b>		2	120	14	SI	1500	2	150	14.5	1875

*Tabella 1 – Caratteristiche catenarie impiegate*

Per quanto concerne invece i conduttori “generici” è possibile far riferimento alla tabella 2:

TIPO CONDUTTORE	CARATTERISTICHE			TIRO [daN]				
	Materiale	Sezione [mm <sup>2</sup> ]	Diametro [mm]	CASO				
				A	B	D	E	F
Corda di terra TACSR	Al-acc	170	15.82	911	540	881	350	350
Strallo di punto fisso	Kevlar	95	11	560	754	824	700	700
Cavo Fibra Ottica	Fibra di vetro	85	17	400	386	500	100	100

*Tabella 2 – Caratteristiche condutture generiche*

Le corde di terra tipo TACSR montate sul singolo sostegno sono sempre in numero pari a 2.

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 5 di 18

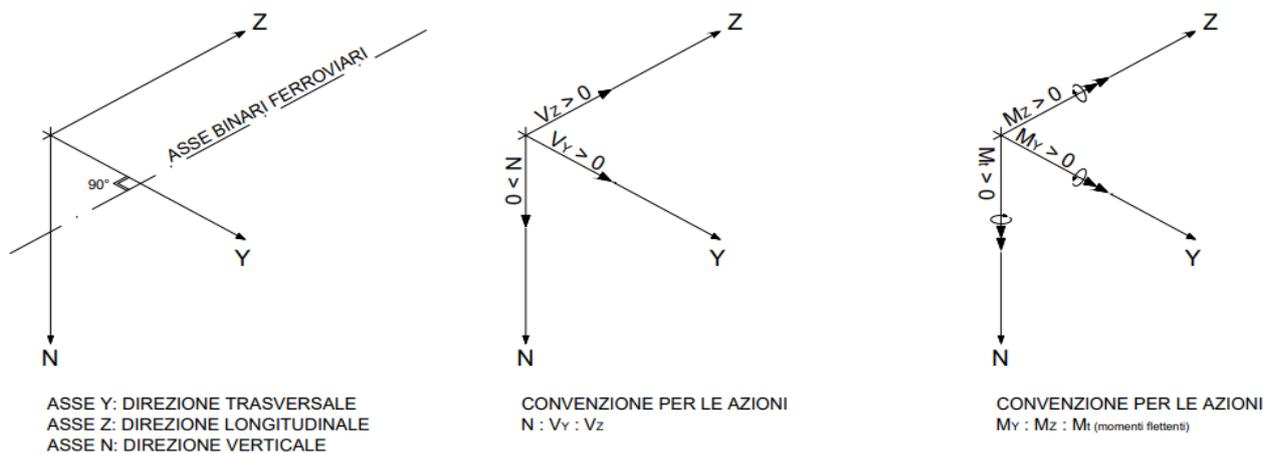
#### 4. Ipotesi di Calcolo

I calcoli sono stati eseguiti nel rispetto delle Norma CEI EN 50119:2021-01. In particolare, sono state prese in considerazione le ipotesi di seguito descritte.

##### 4.1 Sistema cartesiano di riferimento

Il sistema di riferimento delle coordinate globali della struttura, degli spostamenti e delle azioni determinate dai carichi è rappresentato dall'asse delle y orientato perpendicolarmente ai binari ferroviari, mentre l'asse z è longitudinale ad essi. L'asse verticale N è positivo diretto verso il basso.

Per quanto riguarda i valori delle azioni si intendono positive quando dirette nel verso positivo dei rispettivi assi.



*Figura 1 - Sistema di Riferimento*

##### 4.2 Condizioni climatiche

(Rif.to Allegato D CEI EN 50119 §D.6)

- Condizione di temperatura minima in assenza di altre condizioni climatiche:  $-21^{\circ}\text{C}$  (caso A tabella D.1).
- Condizione di carico limite del vento, senza manicotto di ghiaccio sui conduttori:  $+15^{\circ}\text{C}$  (caso B tabella D.1).
- Condizione di carichi combinati del vento e del ghiaccio:  $-5^{\circ}\text{C}$  (caso D tabella D.1).
- Condizione G:  $+15^{\circ}\text{C}$  (utilizzata per il calcolo della freccia dei pali - tabella D.1)
- Condizione F:  $+15^{\circ}\text{C}$  (caso F utilizzato in caso di rottura dei fili di contatto in corrispondenza dell'ormeggio punto fisso e del centro punto fisso - tabella D.1)
- Condizione Sismica:  $+15^{\circ}\text{C}$  (caso S utilizzato per la determinazione dell'azione sismica - tabella D.1)

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 6 di 18

### 4.3 Pressione dinamica del vento

(Rif.to §D.3 Allegato D della CEI EN 50119:2021-01)

La pressione associata alla velocità del vento di picco vale:

$$q_p(z) = q_r \times c_e \text{ [N/m}^2\text{]}$$

con:

$q_p(z)$  è la pressione della velocità di picco

$c_e$  è il coefficiente di esposizione che per tutti gli elementi del sistema linea di contatto che ha un valore pari a 2.05

$q_r$  è la pressione cinetica di riferimento calcolata con la seguente formula

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$v_r$  velocità di riferimento del vento pari a 25 m/s (Regione Veneto)

$\rho$  densità dell'aria pari a 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$$q_p = 80 \text{ daN/m}^2$$

### 4.4 Forze del vento sui conduttori

L'azione del vento sui conduttori nelle due campate adiacenti al sostegno è determinata con la seguente formula: (§ 6.2.4.3 della CEI EN 50119:2021-01)

$$Q_{WC} = q_p(z) \times G_C \times d \times C_C \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \varphi \text{ [N]}$$

con:

$q_p(z)$  è la pressione della velocità di picco [N/m<sup>2</sup>]

$G_C$  è il fattore di risposta strutturale con valore accettato pari a 0.75

$d$  è il diametro del conduttore [m]

$C_C$  è il coefficiente di resistenza del conduttore con valore raccomandato pari a 1

$L_1$  e  $L_2$  sono le lunghezze delle due campate adiacenti [m]

$\Phi$  è l'angolo d'incidenza della direzione critica del vento rispetto alla perpendicolare al conduttore. Si assume pari a zero.

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 7 di 18

#### 4.5 Forze del vento sui pali

La forza del vento su un palo viene calcolata mediante la formula: (§ 6.2.4.7 della CEI EN 50119:2021-01)

$$Q_{Wstr} = q_p(z) \times G_{str} \times C_{str} \times A_{str} \quad [N]$$

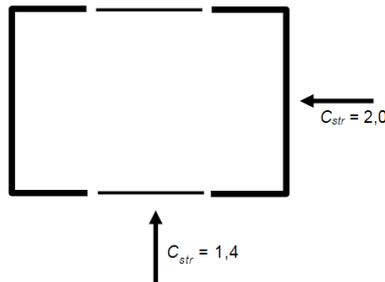
con:

$q_p(z)$  è la pressione della velocità di picco [ $N/m^2$ ]

$G_{str}$  è il fattore di risonanza strutturale di una struttura con valore accettato pari a 1

$C_{str}$  è il coefficiente di resistenza dipendente dalla forma e dalla rugosità della superficie della struttura. I valori nella Fig.2 sono applicati per pali a doppia C.

$A_{str}$  è l'area proiettata della struttura [ $m^2$ ] (B altezza profilato x H altezza palo)



***Figura 2 - Definizione dei coefficienti di resistenza per pali a doppia C***

#### 4.6 Carichi dovuti al ghiaccio sui conduttori

Nella condizione di carico D ( $-5^{\circ}C$ ) viene considerata anche la presenza del manicotto di ghiaccio sui conduttori e il sovraccarico dovuto al ghiaccio si considera pari a 7 N/m. (§ Allegato D §D.4 della CEI EN 50119:2021-01)

L'incremento del diametro dell'accumulo di ghiaccio viene calcolato mediante la formula:

$$D_1 = \sqrt{d^2 + \frac{4 \times g_{IK}}{\pi \times \rho_I}} \quad [m]$$

con :

$D_1$  è il diametro totale del conduttore [m]

$d$  è il diametro del conduttore senza ghiaccio [m]

$g_{IK}$  è il carico caratteristico del ghiaccio [N/m]

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 8 di 18

$\rho_i$  è la densità del ghiaccio [ $N/m^3$ ]

Nella tabella 1 sono stati riassunti i sovraccarichi del ghiaccio sui vari conduttori costituenti la linea di contatto.

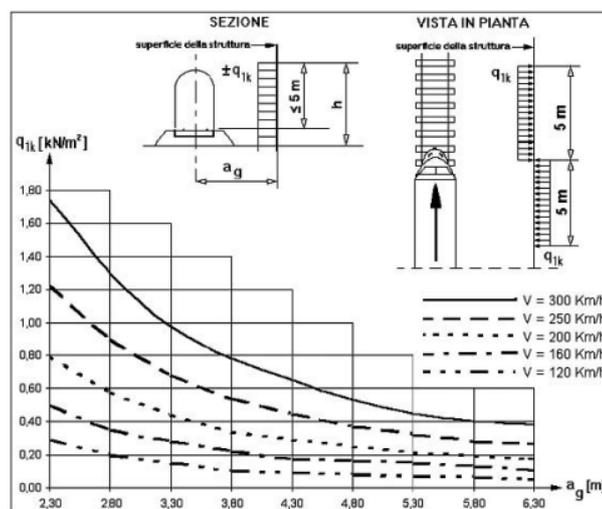
	Tipo conduttore	Sovraccarico ghiaccio	Densità ghiaccio	Sezione	Diametro senza ghiaccio	Diametro con ghiaccio
		[kg/m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]
	Corda di terra TACSR	0.7	900	170	15.82	35.2
	Strallo KEVLAR			65.81	11	33.3
	Fibra ottica			227	17	35.7
<b>440 F.R.</b>	Corda portante			120	14	34.4
	Filo di contatto			100	11.8	33.6
<b>540 F.R.</b>	Corda portante			120	14	34.4
	Filo di contatto			150	14.5	33.3

*Tabella 3 Diametro Conduttura senza ghiaccio e con ghiaccio*

#### 4.7 Carichi dovuti agli effetti aerodinamici associati al passaggio dei convogli ferroviari sui pali

Il passaggio dei convogli ferroviari induce sulle superfici situate in prossimità della linea ferroviaria onde di pressione e depressione. (§ Allegato D.9.2.1 della CEI EN 50119:2021-01)

I valori caratteristici dell'azione  $\pm q_{1k}$  relativi a superfici verticali parallele al binario sono forniti in Fig.3 in funzione della distanza  $a_g$  dall'asse del binario più vicino e della velocità del convoglio.



*Figura 3 Valori caratteristici delle azioni  $q_{1k}$  per superfici verticali parallele al binario*

I valori sono relativi a treni con forme aerodinamiche sfavorevoli. Per i casi di forme aerodinamiche favorevoli, questi valori sono corretti per mezzo del fattore:

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 9 di 18

$k_1=0.85$  per convogli formati da carrozze con sagoma arrotondata

$k_2=0.60$  per treni aerodinamici

Di seguito vengono mostrati i valori di pressione aerodinamica per due diverse tipologie di treno:

Tipologia treno	Velocità	$a_g$	$k_i$	$q_{ik}$
	[km/h]	[m]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Treno Alta Velocità	250	3.12	0.6	0.48
Treno Merci	120	3.12	1	0.18

Ai fini del calcolo delle azioni agenti sui sostegni verrà pertanto utilizzato un valore pari a 0.48 kN/m<sup>2</sup> arrotondato a 0.5 kN/m<sup>2</sup> in quanto valore più critico.

#### 4.8 Carichi accidentali

I carichi accidentali sono specificati per tenere in considerazione il contenimento dei guasti e le situazioni di emergenza.

Nel palo di centro punto fisso e di ormeggio punto fisso viene considerata la seguente combinazione:  
(§ 6.3.2.7 della CEI EN 50119:2021-01)

$$n_{cat} \times T_{cat} \times k \times \gamma_A$$

con :

$n_{cat}$  è il numero di fili rotti

$T_{cat}$  è la tensione caratteristica del filo di contatto [daN]

$k$  valore raccomandato pari a 1.5

$\gamma_A$  è il coefficiente parziale per carichi accidentali, valore accettato pari a 1

#### 4.9 Carichi di origine sismica

In relazione alle azioni sismiche, i sostegni vengono dimensionati tenendo come riferimento i valori dei parametri di pericolosità sismica locale.

A titolo riepilogativo riportiamo le ipotesi di base: (§ Allegato D.9.1 della CEI EN 50119:2021-01)

- Vita nominale dell'opera  $\geq 50$  anni
- Classe d'uso Classe II
- Periodo di riferimento per l'azione sismica  $V_R = 50$  anni
- Categoria di sottosuolo C
- Categoria topografica T1
- Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi=5\%$

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 10 di 18

- Fattore di struttura  $q_0=1$

Considerando una probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$  pari al 10% (SLV) si ricava un periodo di ritorno  $T_R$  pari a 475 anni. Di seguito vengono esplicitati i parametri per alcune località di riferimento:

Comune	Zona sismica	$a_g$	$F_0$	$T_c^*$
Vicenza	3	0.151	2.410	0.287
Altavilla Vicentina		0.149	2.417	0.284
Montebello Vicentino		0.143	2.429	0.282
San Bonifacio		0.138	2.436	0.281
Caldiero		0.149	2.429	0.278
Verona		0.157	2.431	0.276

***Tabella 4 Parametri di pericolosità sismica locale***

con :

$a_g$  Accelerazione orizzontale massima attesa [g]

$F_0$  Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.

$T_c^*$  Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale [s]

Ai fini del calcolo delle azioni agenti sui sostegni verranno utilizzati i parametri relativi a Verona in quanto valori più critici.

## 5. Combinazione delle azioni

Le strutture di sostegno vengono verificate per gli stati limite ultimi che possono presentarsi, moltiplicando le azioni associate ad ogni caso di carico per gli opportuni coefficienti di combinazione.

Si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni :

### Combinazione fondamentale SLU

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

**Combinazione quasi permanente (SLE)**, generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

**Combinazione sismica**, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Di seguito riportiamo in forma tabellare i coefficienti parziali e di combinazione utilizzati nella determinazione delle combinazioni di carico agli SLU. (*Combinazione (A1+M1+R3) prevista dall'Approccio 2*).

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 11 di 18

		Coefficiente $\gamma$	A1
Carichi permanenti G1	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	1.0
	Sfavorevoli		1.3
Carichi variabili Q	Favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0
	Sfavorevoli		1.5

***Tabella 5 Coefficienti parziali per le azioni nelle verifiche SLU***

Azione	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{1j}$	$\Psi_{2j}$
Vento	0.6	0.2	0
Ghiaccio	0.5	0.2	0
Pressione aerodinamica	0.8	0.5	0

***Tabella 6 - Valori dei coefficienti di combinazione***

È stato utilizzato il seguente approccio progettuale:

- Combinazione (A1+M1+R3) prevista dall'Approccio 2.

In questo approccio progettuale si considerano i coefficienti parziali di tipo A1 per la determinazione delle azioni di progetto e quelli di sicurezza agenti sulle proprietà geotecniche dei materiali di tipo M1 ed R3 per la determinazione della resistenza di progetto.

## **6. Casi e combinazioni di carico**

### **CASO DI CARICO A**

#### **Combinazioni SLU**

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica
	$\Psi_{0j}$			
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{0j}$
Combinazione 1	-	-	-	1
Combinazione 2	-	-	-	-1

### **CASO DI CARICO B**

#### **Combinazioni SLU**

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica
	$\Psi_{0j}$			
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{0j}$
Combinazione 3	1	0	-	0.8
Combinazione 4	-1	0	-	0.8
Combinazione 5	0	1	-	0.8
Combinazione 6	0	-1	-	0.8
Combinazione 7	wt	0	-	0.8
Combinazione 8	- wt	0	-	0.8
Combinazione 9	0	wl	-	0.8
Combinazione 10	0	- wl	-	0.8
Combinazione 11	0.6	0	-	1
Combinazione 12	-0.6	0	-	1
Combinazione 13	0	0.6	-	1
Combinazione 14	0	-0.6	-	1

GENERAL CONTRACTOR


 CONSORZIO  
**SATURNO**  
 High Speed Railway Technologies

ALTA SORVEGLIANZA



RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU

Progetto  
IN17Lotto  
10Codifica Documento  
EI2CLLC0000K04Rev.  
AFoglio  
12 di 18

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica
	$\Psi_{0i}$			
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{0j}$
Combinazione 15	0.6wt	0	-	1
Combinazione 16	- 0.6wt	0	-	1
Combinazione 17	0	0.6wl	-	1
Combinazione 18	0	- 0.6wl	-	1
Combinazione 19	1	0	-	-0.8
Combinazione 20	-1	0	-	-0.8
Combinazione 21	0	1	-	-0.8
Combinazione 22	0	-1	-	-0.8
Combinazione 23	wt	0	-	-0.8
Combinazione 24	- wt	0	-	-0.8
Combinazione 25	0	wl	-	-0.8
Combinazione 26	0	- wl	-	-0.8
Combinazione 27	0.6	0	-	-1
Combinazione 28	-0.6	0	-	-1
Combinazione 29	0	0.6	-	-1
Combinazione 30	0	-0.6	-	-1
Combinazione 31	0.6wt	0	-	-1
Combinazione 32	- 0.6wt	0	-	-1
Combinazione 33	0	0.6wl	-	-1
Combinazione 34	0	- 0.6wl	-	-1

**CASO DI CARICO D****Combinazioni SLU**

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica
	$\Psi_{0i}$			
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{0j}$
Combinazione 35	1	0	0.5	0.8
Combinazione 36	-1	0	0.5	0.8
Combinazione 37	0	1	0.5	0.8
Combinazione 38	0	-1	0.5	0.8
Combinazione 39	wt	0	0.5	0.8
Combinazione 40	- wt	0	0.5	0.8
Combinazione 41	0	wl	0.5	0.8
Combinazione 42	0	- wl	0.5	0.8
Combinazione 43	0.6	0	1	0.8
Combinazione 44	-0.6	0	1	0.8
Combinazione 45	0	0.6	1	0.8
Combinazione 46	0	-0.6	1	0.8
Combinazione 47	0.6wt	0	1	0.8
Combinazione 48	- 0.6wt	0	1	0.8
Combinazione 49	0	0.6wl	1	0.8
Combinazione 50	0	- 0.6wl	1	0.8
Combinazione 51	0.6	0	0.5	1
Combinazione 52	-0.6	0	0.5	1
Combinazione 53	0	0.6	0.5	1
Combinazione 54	0	-0.6	0.5	1
Combinazione 55	0.6wt	0	0.5	1
Combinazione 56	- 0.6wt	0	0.5	1
Combinazione 57	0	0.6wl	0.5	1
Combinazione 58	0	- 0.6wl	0.5	1
Combinazione 59	1	0	0.5	-0.8
Combinazione 60	-1	0	0.5	-0.8
Combinazione 61	0	1	0.5	-0.8
Combinazione 62	0	-1	0.5	-0.8
Combinazione 63	wt	0	0.5	-0.8

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 13 di 18

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica
	$\Psi_{0j}$			
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{0j}$
Combinazione 64	- wt	0	0.5	-0.8
Combinazione 65	0	wl	0.5	-0.8
Combinazione 66	0	- wl	0.5	-0.8
Combinazione 67	0.6	0	1	-0.8
Combinazione 68	-0.6	0	1	-0.8
Combinazione 69	0	0.6	1	-0.8
Combinazione 70	0	-0.6	1	-0.8
Combinazione 71	0.6wt	0	1	-0.8
Combinazione 72	- 0.6wt	0	1	-0.8
Combinazione 73	0	0.6wl	1	-0.8
Combinazione 74	0	- 0.6wl	1	-0.8
Combinazione 75	0.6	0	0.5	-1
Combinazione 76	-0.6	0	0.5	-1
Combinazione 77	0	0.6	0.5	-1
Combinazione 78	0	-0.6	0.5	-1
Combinazione 79	0.6wt	0	0.5	-1
Combinazione 80	- 0.6wt	0	0.5	-1
Combinazione 81	0	0.6wl	0.5	-1
Combinazione 82	0	- 0.6wl	0.5	-1

### CASO DI CARICO F

#### Combinazione eccezionale

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica	Rottura conduttori
	$\Psi_{2j}$				
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{2j}$	$\Psi_{2j}$	$\gamma_F$
Combinazione 83	0	0	0	0	1

### CASO DI CARICO G

#### Combinazione quasi permanente

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica
	$\Psi_{2j}$			
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{2j}$	$\Psi_{2j}$
Combinazione 84	0	0	0	0

### CASO DI CARICO S

#### Combinazioni sismica

Combinazione	Pressione vento		Peso ghiaccio	Pressione aerodinamica	Sisma	
	$\Psi_{2j}$				Trasversale	Longitudinale
	Trasversale	Longitudinale	$\Psi_{2j}$	$\Psi_{2j}$		
Combinazione 85	0	0	0	0	1	0.3
Combinazione 86	0	0	0	0	-1	0.3
Combinazione 87	0	0	0	0	1	-0.3
Combinazione 88	0	0	0	0	-1	-0.3
Combinazione 89	0	0	0	0	0.3	1
Combinazione 90	0	0	0	0	-0.3	1
Combinazione 91	0	0	0	0	0.3	-1
Combinazione 92	0	0	0	0	-0.3	-1

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 14 di 18

## 7. Modalità di calcolo e scelta dei sostegni

Le verifiche strutturali dei sostegni sono state eseguite allo Stato Limite Ultimo corrispondente allo snervamento dell'acciaio costituente il palo.

Per ciascuna configurazione di palo sono state eseguite due tipologie di verifiche agli Stati Limite Ultimi:

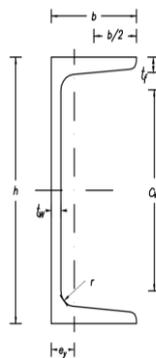
- Verifiche di resistenza;
- Verifiche di stabilità.

Le verifiche di resistenza sono state effettuate in corrispondenza della sezione più sollecitata, ossia alla base del palo.

Si sono altresì determinati i massimi carichi di lavoro alla base dei sostegni necessari per il dimensionamento delle fondazioni.

### 7.1 Classificazione delle sezioni

La classificazione delle sezioni trasversali degli elementi strutturali dei pali tipo LSU si effettua in funzione della loro capacità di deformarsi in campo plastico.



***Figure 4 Sezione trasversale di un Palo LSU***

Ciò lo si è condotto, viste le azioni gravanti sul sostegno, determinando l'effettivo stato tensionale presente caso per caso nella sezione trasversale.

Nonostante questo, ed in via semplificata ma molto conservativa e a favore di sicurezza, è possibile anche considerare la sezione come se fosse interamente compressa. In questo caso si procede valutando i rapporti larghezza-spessore degli elementi compressi interni, quali ane e ali sporgenti della sezione trasversale: la classe meno favorevole delle sue parti costituenti determina la classe dell'intera sezione.

Essendo i pali costruiti in acciaio S 355 risulta che :

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 15 di 18

$$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \text{tensione caratteristica di snervamento}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}} = 0.81$$

I rapporti limite larghezza-spessore per elementi soggetti a compressione uniforme per appartenere alla classe 1 sono:

- **Parte soggetta a compressione**

$$c/t \leq 33\varepsilon = 26.73$$

- **Piattabande esterne soggette a compressione**

$$c/t \leq 9\varepsilon = 7.29$$

Nella tabella 8 sono stati riportati il rapporto c/t di anima ed ali per ogni tipo di sezione e la relativa classificazione in ipotesi di sezione uniformemente compressa.

TIPO PALO	RAPPORTO c/t ANIMA	RAPPORTO c/t ALA	CLASSE SEZIONE
LSU 14	20	6	1
LSU 16	21.33	6.19	1
LSU 18	22.5	6.36	1
LSU 20	23.53	6.52	1
LSU 22	24.44	6.4	1
LSU 24	25.26	6.53	1

*Tabella 7 Classificazione sezioni pali*

## 7.2 Coefficienti di sicurezza

I coefficienti di sicurezza impiegati per l'esecuzione delle verifiche sono quelli prescritti nella tabella:

Resistenza delle Sezioni di classe 1-2-3-4	$\gamma_{M0} = 1.05$
Resistenza all'instabilità delle membrature	$\gamma_{M0} = 1.05$

*Tabella 8 Coefficienti di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità*

## 7.3 Verifiche di resistenza

Ciascun palo LSU in ogni casistica di impiego risulta essere soggetto a pressoflessione biassiale e a taglio.

Se la sollecitazione del taglio  $V_{Ed}$  è inferiore a metà della resistenza di progetto a taglio  $V_{c,Rd}$

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 16 di 18

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{c,Rd}$$

allora la resistenza a flessione non viene influenzata dal taglio e, pertanto, si può procedere all'esecuzione della sola verifica a pressoflessione.

Il valore dell'azione sollecitante  $V_{Ed}$  deve rispettare la seguente condizione:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

dove:

$$V_{cy,Rd} = \frac{A_{vy} \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}, \text{ lungo l'asse } y$$

$$V_{cz,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}, \text{ lungo l'asse } z$$

$A_{vy}$  e  $A_{vz}$  sono le aree resistenti a taglio lungo gli assi Y (parallela alle ali) e Z (parallela all'anima)  
 $V_{c,Rd}$  è la resistenza di progetto a taglio  
 $f_{yk}$  tensione caratteristica di snervamento  
 $\gamma_{M0}$  è il coefficiente di sicurezza per verifiche di resistenza

Per tutte le casistiche di impiego dei pali LSU, i tagli sollecitanti sono tali per cui è risultata sempre verificata la disequaglianza sopra citata; si è eseguita dunque solo la verifica a pressoflessione biassiale.

La verifica a pressoflessione biassiale è stata eseguita verificando il soddisfacimento :

$$\frac{M_{yEd}}{M_{NyRd}} + \frac{M_{zEd}}{M_{NzRd}} \leq 1$$

dove:

$M_{yEd}$  e  $M_{zEd}$  sono i momenti flettenti attorno all'asse y e all'asse z rispettivamente;  
 $M_{NyRd}$  e  $M_{NzRd}$  sono i momenti resistenti ridotti per effetto dello sforzo normale attorno all'asse y e all'asse z rispettivamente.

Per la valutazione di  $M_{yRd}$  e  $M_{zRd}$  si utilizzano le formule sotto indicate.

$$M_{NyRd} = M_{plyRd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_w}$$

$$M_{NzRd} = M_{plzRd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_f}$$

dove:

$M_{plyRd}$  e  $M_{plzRd}$  momenti resistenti a flessione retta attorno all'asse y e all'asse z rispettivamente

GENERAL CONTRACTOR  <b>IRICAV2</b>	CONSORZIO <b>SATURNO</b> High Speed Railway Technologies	ALTA SORVEGLIANZA  <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE			
RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU	Progetto IN17	Lotto 10	Codifica Documento EI2CLLC0000K04	Rev. A	Foglio 17 di 18

$n = \frac{N_{Ed} + P_{palo}}{N_{plRd}}$  rapporto tra l'azione assiale sollecitante la sezione e la resistenza plastica della sezione stessa  
 $a_w$  rapporto tra l'area dei lati lunghi degli UPN e l'area totale della sezione;  
 $a_f$  rapporto tra l'area dei lati corti degli UPN e l'area totale della sezione.

## 7.4 Verifiche di stabilità

Come evidenziato in precedenza, i pali LSU sono sottoposti a pressoflessione biassiale; per una verifica di stabilità in tali condizioni di sollecitazione, i pali sono verificati se sono soddisfatte contemporaneamente le seguenti disequazioni:

$$\frac{N_{Ed} - PPalo}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + \frac{PPalo}{\chi_{yp} \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{yEd}}{M_{yRk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{zEd}}{M_{zRk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed} - PPalo}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + \frac{PPalo}{\chi_{zp} \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{yEd}}{M_{yRk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{zEd}}{M_{zRk}} \leq 1$$

dove:

$N_{Ed}$  azione assiale sollecitante la sezione  
 $P_{palo}$  peso del palo  
 $M_{yEd}$  e  $M_{zEd}$  momenti flettenti attorno all'asse y e all'asse z rispettivamente  
 $\chi_y, \chi_z, \chi_{yp}, \chi_{zp}$  coefficienti di riduzione dovuti all'instabilità flessionale  
 $k_{ij}$  coefficienti di interazione

$$N_{Rk} = A \cdot f_y;$$

$M_{yRk} = W_{ypl} \cdot f_y, M_{zRk} = W_{zpl} \cdot f_y$ , essendo  $W_{ypl}$  e  $W_{zpl}$  i momenti plastici attorno all'asse y e z rispettivamente.

Si osserva che,  $\Delta M_{yEd} = 0$  e  $\Delta M_{zEd} = 0$ , essendo la sezione di classe 1,  $e\chi_{LT} = 1$ , non essendoci instabilità flesso-torsionale.

Per il calcolo dei coefficienti  $\chi_y, \chi_z, \chi_{yp}, \chi_{zp}$  si fa riferimento al paragrafo 6.3.1.2 dell'EC3, considerando che per la sezione del palo LSU vale la curva di instabilità "c" (ricavata dal prospetto 6.2 dell'EC3); la luce di libera inflessione per il calcolo di  $\chi_y$  e  $\chi_z$  è quella associata ai carichi verticali portati dal palo, mentre per il calcolo di  $\chi_{yp}$  e  $\chi_{zp}$  è quella associata al peso proprio del palo.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p><b>IRICAV2</b></p>	<p>CONSORZIO <b>SATURNO</b> <i>High Speed Railway Technologies</i></p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>				
<p>RELAZIONE DI CALCOLO PALI LSU</p>	<p>Progetto IN17</p>	<p>Lotto 10</p>	<p>Codifica Documento EI2CLLC0000K04</p>	<p>Rev. A</p>	<p>Foglio 18 di 18</p>	

I coefficienti  $k_{ij}$  sono stati determinati secondo le indicazioni dei prospetti B.1 e B.3 dell'EC3; si noti, in particolare, che i coefficienti di momento costante equivalente sono stati posti pari a 1, per avere una verifica di tipo cautelativa.