

PAOLO VARAGNOLO INGEGNERIA

via Nazareth, 49 - 35128 PADOVA tel./fax 049-8073882 tel. 335-6452133

PaliAntenne

MANUALE D'USO

PaliAntenne V. 3.20

ULTIMA REVISIONE: novembre 2021

== PVI 20-21==

Il programma distribuito è stato realizzato utilizzando compilatori Microsoft.

Microsoft e Windows sono marchi registrati della Microsoft Corporation.

ESCLUSIONE DI RESPONSABILITÀ PER DANNI INDIRETTI - IN NESSUN CASO PAOLO VARAGNOLO INGEGNERIA SARÀ RESPONSABILE PER I DANNI DI QUALSIASI TIPO DERIVANTI DALL'USO DEL PRODOTTO PaliAntenne.

Sommario

Installazione del programma6
Requisiti del sistema 6
MANUALE D'USO7
1. Manuale d'uso
1.1 Menu principale - File 10
1.2 Menu principale - Dati generali 11
1.3 Menu principale - Geometria 12
1.4 Menu principale – Pesi applicati 13
1.5 Menu principale – Azione del vento 15
1.6 Menu principale – Azione sismica 19
1.7 Menu principale – Combinazioni di carico 21
1.8 Menu principale – Calcolo e verifica
1.9 Menu principale – Inserisci 24
1.9.1 Inserisci Flangia25
1.9.2 Inserisci Plinto
2.0 Menu principale – Processore F.E.M
2.0.1 Uso del mouse nella finestra grafica
2.0.2 Menu e bottoni di comando 34
2.0.3 Finestre delle proprietà
2.0.4 Toolbox inferiore
2.1 Menu principale – Impostazioni
2.2 Menu principale – ?
MANUALE TEORICO
1. Il solutore F.E.M
1.1 Generalità
1.2 Definizione del problema statico nel sistema di riferimento locale
1.2.1 Carichi nodali equivalenti 42
1.3 Trasformazioni fra coordinate locali e globali43
1.4 Memorizzazione della matrice di rigidezza globale della struttura
1.5 Memorizzazione delle matrici di rigidezza degli elementi 45
2. Dettagli dell'analisi F.E.M
2.1 Numerazione dei gradi di libertà 46
2.2 Calcolo degli indirizzi degli elementi della diagonale principale
2.3 Assemblaggio delle matrici di rigidezza 49
2.4 Assemblaggio dei carichi 50
2.5 Soluzione del sistema di equazioni51

2.5.1 L'eliminazione di Gauss	. 51
2.5.2 Formalizzazione matematica del metodo di Gauss	. 52
2.5.3 II metodo skyline	. 53
2.6 Calcolo dei parametri di sollecitazione	. 56
2.7 Calcolo delle reazioni vincolari	. 56
3. Analisi modale	. 57
3.1 Calcolo delle matrici di massa nel sistema di riferimento locale	. 57
3.1.1 Matrice di massa distribuita (consistent)	. 58
3.1.2 Matrice di massa concentrata (lumped)	. 58
3.2 Memorizzazione della matrice di massa globale della struttura	. 59
3.3 Memorizzazione delle matrici di massa degli elementi	. 60
3.4 Assemblaggio delle matrici di massa	. 61
3.5 Calcolo delle frequenze e dei periodi propri	. 61
4. Valutazione delle azioni e degli effetti del vento	. 62
4.1 Azioni trasversali	. 62
4.2 Masse strutturali e masse dei pesi applicati	. 63
5. Verifiche del palo	. 67
6. Verifiche del plinto	. 69
6.1 Combinazioni di carico	. 69
6.2 Coefficienti e parametri per le verifiche agli stati limite	. 70
6.3 Determinazione delle tensioni sul terreno	. 71
6.4 Dimensionamento e verifica delle armature	. 72
6.4.1 Plinti bassi	. 72
6.4.2 Plinti alti	. 75
6.5 Verifica a punzonamento	. 77
7. Verifiche delle flange	. 79
7.1 Verifica degli spessori della flangia e dei fazzoletti di irrigidimento	. 81
MANUALE DI VERIFICA	. 83
1. Premessa	. 84
2. Specifica dei requisiti del software	. 84
3. Manuale di verifica	. 84
3.1 Analisi statica	. 86
3.2 Analisi dinamica	103
3.2.1 Risoluzione del problema agli autovalori – test 1	103
3.2.2 Risoluzione del problema agli autovalori – test 2	104
3.2.3 Determinazione del tagliante di base con metodo C.Q.C.	105
3.2.4 Determinazione dei modi di vibrare e delle forze sismiche	106

3.3 Parametri dinamici del vento	111
4. Conclusioni	119
Allegato 1	120
Bibliografia	121

Installazione del programma

Il programma (ed il presente manuale) vengono forniti tramite e-mail. Si deve eseguire il file autoinstallante fornito, seguendo le semplici istruzioni proposte a video, con l'accortezza di non installare il programma in una cartella il cui nome contenga caratteri speciali.

ATTENZIONE! - Indicazioni indispensabili per una corretta installazione.

- Si consiglia di disabilitare temporaneamente i programmi antivirus, poiché in alcuni casi possono impedire l'installazione del programma;
- È necessario eseguire l'installazione e la prima esecuzione del programma con le credenziali dell'amministratore del sistema.
- Nota: per il corretto funzionamento del programma è indispensabile impostare il punto (.) come separatore decimale. Questo può essere fatto tramite le "Opzioni Internazionali" (o qualcosa di analogo, in funzione della versione del sistema operativo) del Pannello di Controllo.

Requisiti del sistema

Per eseguire il programma sono necessari:

- Un personal computer (PC) con processore Pentium o superiore.
- Un disco rigido con memoria disponibile non inferiore a 100 MB.
- Una scheda grafica VGA o superiore.
- Sistema operativo Windows 7[®], 8[®], 8.1[®], 10[®].
- Memoria RAM non inferiore a 4 MB.
- Per la gestione dei disegni esecutivi esterna al programma, è necessario un programma in grado di importare files in formato DXF.



PAOLO VARAGNOLO INGEGNERIA via Nazareth, 49 - 35128 PADOVA tel./fax 049-8073882 tel. 335-6452133

PaliAntenne

MANUALE D'USO

1. Manuale d'uso

Il programma PaliAntenne, per ambiente Windows[®], esegue il calcolo delle sollecitazioni e le verifiche strutturali di pali per antenne realizzati in acciaio.

Le sezioni poligonali vengono verificate come se fossero circolari, seguendo le indicazioni indicate nei pareri della Regione Toscana [8], che a loro volta si riferiscono al codice americano AISI S100-2007 : "North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members" e il relativo COMMENTARY of "North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members".

I giunti flangiati vengono verificati secondo la teoria di Quattordio [7].

Vengono di seguito presentati e commentati il menu principale, le finestre per l'inserimento dei dati ed i comandi per la gestione dei risultati.

La schermata principale del programma, presentata nella seguente immagine, propone la rappresentazione grafica del palo, le varie voci di menu con i comandi disponibili, e la sintesi dei principali risultati di calcolo.

Lo **zoom** della struttura può essere modificato utilizzando la rotellina del mouse.

Il disegno può essere spostato sullo schermo (comando **pan** di un CAD) spostando il mouse tenendo contemporaneamente premuto il bottone sinistro.



Risultati delle verifiche								
Effetto del distacco dei vo	Effetto del distacco dei vortici							
Numero di Scruton (1°	modo)	1.25						
Spostamento trasversa	ale di picco (m)	7.878E-01						
Numero di cicli di caric del distacco dei vortici	o per effetto	1.671E+06						
Ovalizzazione - (velocità e	spresse in m/s)							
Velocità critica di ovaliz	zazione minima	9999						
verifica da demandare a mascheramento	al produttore del	37.187						
Vita a fatica per turbolenza	a longitudinale (ar	nni)						
Vita a fatica della piastr	a di base	3.545E+02						
Verifica sezione di base de	el palo							
Guota (m) la	asso di avoro (%)	Stato di verifica						
0	62.0	ОК						
Verifica sezione più gravos	sa							
Quota (m) la	asso di avoro (%)	Stato di verifica						
24	75.5	OK						

Particolare della parte destra della schermata principale

, Pa	li per antenne	Es 4	12 prove.ant									
File	Dati genera	ali	Geometria	Pesi applicati	Azione del vente	Azione sismica	Combinazioni di carico	Calcolo e verifica	Inserisci	Processore F.E.M.	Impostazioni	?
		Ì		2	A		🚣 🏚 💽 🏙	🚿 🎹 🔳 🖽	7	٢		
Tito	lo del lavoro:	Titol	o del lavoro	o-unita':kN,m	1, S	Metodo di calcolo	: D.M. 17.01.2018	n° suddivisioni F.E.M.	= 6			

Particolare della parte alta della schermata principale

Con riferimento al dettaglio rappresentato nell'immagine precedente, si distinguono i seguenti elementi:

- l'icona del programma con la scritta "Pali per antenne" seguita dal nome del file del lavoro corrente;
- la riga dei menu, descritti in dettaglio nel seguito;
- la riga dei bottoni di comando, anch'essi descritti nel seguito;
- il titolo del lavoro corrente, dove in questo caso sono anche ricordate le unità di misura utilizzate dal programma. Le unità di misura sono sempre comunque citate sia nelle finestre di input dei dati, sia nei tabulati che descrivono i risultati dei calcoli;
- il metodo di calcolo utilizzato per i coefficienti di combinazione e di sicurezza parziale dei materiali;
- il numero di suddivisioni F.E.M. considerate nella discretizzazione di ciascuno dei tronchi che compongono il palo.

Nel seguito verranno descritti i vari comandi delle voci di menu, in molti casi disponibili anche tramite bottoni di comando.

1.1 Menu principale - File

File	
	Nuovo
	Apri
	Salva
	Salva con nome
	Relazioni
	Esci

Una sessione di lavoro comincia sempre accedendo alla voce **File** del menu principale, che consente di iniziare un nuovo lavoro, di aprirne uno già elaborato, di salvare il file attualmente caricato, di salvare il file corrente con un nuovo nome, di vedere e stampare le relazioni di calcolo ed infine di uscire dall'applicazione.

Alcune delle voci di menu possono essere raggiunte direttamente tramite bottoni di comando, come di seguito mostrato.

File: Apri	۲ <u>۶</u>
File: Salva	
File: Relazioni	2
File: Esci	-3]

1.2 Menu principale - Dati generali

La voce **Dati generali** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, tramite la quale vengono definiti i dati relativi a:

- materiale del palo e tensioni caratteristiche;
- dati generali per la modellazione agli elementi finiti;
- dati relativi al ghiaccio.

Ove necessario sono indicate le unità di misura da utilizzare per i dati.

Dati generali	– 🗆 X
Materiale e tensioni caratteristiche (MPa) Servamento 235 Rottura 360 Resistenza a fatica 71 Modulo elastico acciaio 210000 Peso specifico acciaio (kN/m³) 78.5	Dati generali per modellazione F.E.M. n° di suddivisioni F.E.M. dei tronchi 4 n° di lati della sezione poligonale 16 n° di modi richiesti 6 matrice di massa: lumped consistent
Dati relativi al ghiaccio Spessore di calcolo del ghiaccio 10 Peso specifico ghiaccio (kN/m ³)	⊒ ¶ <u>⊙κ</u>

La voce di menu "Dati generali" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di comando

1.3 Menu principale - Geometria

La voce **Geometria** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, tramite la quale vengono definiti i dati relativi a:

- quota inferiore del tronco i-esimo;
- diametro inferiore del tronco;
- quota superiore del tronco i-esimo;
- diametro superiore del tronco;
- spessore del tronco;
- diametro esposto al vento. Il calcolo delle azioni del vento viene eseguito utilizzando come larghezza il valore maggiore fra il diametro strutturale (definito nelle colonne precedenti) e il diametro esposto al vento. Con questo diametro si possono per esempio considerare gli effetti del vento su cilindri in vetroresina utilizzati a volte per mascherare le antenne.

🗋 Definizione dei tronchi del palo — 🗆 🗆							×
tronco	quota inferiore (m)	diametro inferiore (mm)	quota superiore (m)	diametro superiore (mm)	spessore (mm)	diametro espos vento (mm)	to al
1	0.00	1100.0	12.80	801.0	5.00	0.0	
2	11.20	849.0	24.00	550.0	5.00	0.0	
3	24.00	193.7	30.00	193.7	7.01	1500.0	
Nuovo tronco Cancella tronco							
						-	<u>0K</u>

La voce di menu "Geometria" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di comando

1.4 Menu principale – Pesi applicati

La voce **Pesi applicati** del menu principale consente di accedere alle finestre rappresentate nelle seguenti immagini, tramite le quali vengono definiti i dati relativi a:

- altezza di applicazione dei carichi concentrati, ovvero altezze di applicazione iniziali e finali dei carichi distribuiti linearmente;
- valore dei carichi: in kN per i carichi concentrati, in kN/m per i carichi distribuiti;
- superficie di esposizione al vento: in m² per i carichi concentrati, in m²/m per i carichi distribuiti;
- coefficiente di pressione c_p (nelle NTC 2008 era chiamato coefficiente di forma). Se vengono definite le superfici e i coefficienti aerodinamici, in corrispondenza dei carichi concentrati o distribuiti vengono applicate anche le forze dovute al vento nella misura del prodotto fra la pressione del vento p (§ 3.3.4 NTC 2018), la superficie del carico e il coefficiente aerodinamico.
- Nota 1: le azioni del vento sui carichi concentrati e distribuiti viene applicata solo relativamente al vento nella direzione longitudinale e non nella direzione trasversale.

i concentrati	pesi distribuiti						
peso	altezza (m)	valore (kN)	superficie (m2)	Ср (/)	^		
1	2.500	0.200	0.000	0.000			
2	4.000	0.630	0.000	0.000			
3	6.000	0.200	0.000	0.000			
4	8.000	0.200	0.000	0.000			
5	10.000	0.200	0.000	0.000			
6	11.200	0.200	0.000	0.000			
7	12.800	0.200	0.000	0.000			
8	14.000	0.200	0.000	0.000			
9	16.000	0.200	0.000	0.000			
10	18.000	0.200	0.000	0.000	~		
inizione dei carichi concentrati e distribuiti — D							
i concentrati	j pesi distribuiti						
peso	altezza iniziale (m)	altezza finale (m)	valore (kN/m)	superficie (m2/m)	Cp) (/)	
	10	13	0.5	0			0
Nuovo peso Cancella peso 🗾 🗸							

Nota 2: come indicato anche nella precedente immagine, i carichi lineari vengono applicati, a favore della sicurezza, agli interi elementi sui quali insistono. Si veda la figura seguente come esempio, dove il carico lineare è definito fra le altezze di 10.5 e 11.5 m. L'approssimazione per eccesso diminuisce all'aumentare del numero di suddivisioni F.E.M., cioè al diminuire delle lunghezze degli elementi.



La voce di menu "Pesi applicati" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di

comando 🔎

Note sui pesi concentrati e distribuiti linearmente.

I pesi concentrati o lineari vengono considerati nella condizione C2: pesi permanenti portati, e le loro masse influenzano la determinazione dei modi propri di vibrare della struttura.

I pesi concentrati vengono considerati di forma circolare, di area pari a quella dichiarata. Vengono caricati con il SOLO vento longitudinale (non quello trasversale), comprensivo dell'aliquota dovuta al ghiaccio.

I pesi distribuiti linearmente vengono considerati di forma rettangolare, di area pari a quella dichiarata, con rapporto fra base ed altezza di 1:5. Vengono caricati con il SOLO vento longitudinale (non quello trasversale), comprensivo dell'aliquota dovuta al ghiaccio.

Se la superficie o il Cp di questi carichi sono nulli, la pressione del vento non ha effetto su di essi.

1.5 Menu principale – Azione del vento

La voce **Azione del vento** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, tramite la quale vengono definiti i dati relativi a:

- altitudine sul livello del mare a_s (m);
- periodo di ritorno T_R (anni);
- coefficiente di topografia ct (/);
- classe di rugosità;
- categoria di esposizione.



Sulla base di questi dati il programma calcola la pressione del vento $p = q_r c_e$ (§ 3.3.4 NTC 2018), a meno dei coefficienti di pressione c_p e dinamico c_d . Questa pressione viene chiamata **pressione cinetica di picco** nelle CNR-DT 207.

Il bottone 📰 consente di abbandonare la finestra senza salvare eventuali modifiche fatte.

Il bottone esegue il salvataggio dei dati ed esce dalla finestra.

Il diagramma in basso a destra della finestra mostra l'andamento della pressione lungo il

fusto del palo, che può essere esportato in formato dxf tramite il bottone

Il bottone e segue il calcolo del coefficiente di pressione e delle azioni dinamiche del vento, con riferimento a quanto indicato nelle CNR-DT 207. Viene cioè calcolato l'andamento della forza Fx(z) lungo il fusto del palo come:

Fx(z)	= $q(z) \cdot l \cdot c_{f}$	$\mathbf{x_0} \cdot \mathbf{\psi}_{\lambda} \cdot \mathbf{c_d}$ - equazioni 3.14a + 3.19 + G.19 (rel.1)				
dove:	- Fx(z)	è la forza per unità di lunghezza in direzione x (longitudinale), espressa in N/m				
		(in direzione y la forza viene chiamata Fy)				
	- q(z)	è la pressione cinetica di picco - eq. (3.9)				
	- 1	è la dimensione di riferimento, pari alla larghezza b della struttura				
	- c _{fX0}	è il coefficiente di forza nella direzione X (c _{fYO} nella direzione Y)				
	- ψ_{λ}	è il coefficiente di snellezza (§ G.10.8)				
	- c _d	è il coefficiente dinamico - eq. (3.17)				

Il bottone di calcolo enduce alla finestra rappresentata nella figura seguente.



Per completare le informazioni necessarie devono ancora essere forniti la scabrezza k (m) e il rapporto di smorzamento strutturale ξ_s . I valori consigliati in letteratura, tratti da [3], sono riportati nelle due figure seguenti. Queste figure sono proposte anche dal programma tramite i bottoni ? a fianco dei rispettivi dati.

 \times

ОК

** Valori della Scabrezza

Tabella G.XVIII – Scabrezza k della superficie					
Superficie	k [m]				
Vetro	$0.0015\cdot 10^{-3} = 1.5\cdot 10^{-6}$				
Metalli lucidati	$0.002 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-6}$				
Pittura liscia	$0.006 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-6}$				
Pittura a spruzzo	$0.02 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-5}$				
Acciaio lucido	$0.05 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-5}$				
Ghisa					
Acciaio galvanizzato	$0.2 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-4}$				
Calcestruzzo lisciato					
Legno levigato	$0.5 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-4}$				
Calcestruzzo ruvido	$1 \cdot 10^{-3}$				
Superfici arrugginite	$2 \cdot 10^{-3}$				
Murature	$3 \cdot 10^{-3}$				

* Smorzamento strutturale

Tabella I.IV - Valori del rapporto di smorzamento strutturale per ciminiere.

Tipo strutturale				
Ciminiere e torri in cemento armato				
Ciminiere in acciaio saldate prive di fodera senza isolam	ento termico esterno	0,002		
Ciminiere in acciaio saldate prive di fodera con isolamer	nto termico esterno	0,003		
Cimining in a side of the same and information	h/b < 18	0,003		
Ciminiere in acciaio ad una canna con isolamento ter-	$20 \le h/b < 24$	0,006		
nnco esterno (*)	h/b > 26	0,002		
Cimining in acciding with some and instants too	h/b < 18	0,003		
Commerce in acciato a più canne con isolamento ter-	$20 \le h/b < 24$	0,006		
mico esterno (*)	h/b > 26	0,004		
Ciminiera in acciaio con canna interna in refrattario				
Ciminiera in acciaio con gunite interna		0,005		
Ciminiere accoppiate senza canna		0,002		
Ciminiere strallate in acciaio senza canna		0,006		

(*) Per valori intermedi del rapporto h/b si può adottare una interpolazione lineare

OK

 \times

I bottoni 🌌, 💴 funzionano come spiegato per la finestra precedente.

? a fianco del numero di Scruton attiva la seguente finestra, con alcuni Il bottone commenti sui valori ottenuti nei calcoli.

Spiegazioni relative al numero di Scruton	_		\times
se il numero di Scruton è maggiore di 30, il rischio di sincronizzazione è r fenomeno del distacco dei vortici non rappresenta, in generale, una cor partico-larmente gravosa; tuttavia, si suggerisce di effettuare ugualmente relative;	nolto rido ndizione e le verif	otto e il di carico iche	
se il numero di Scruton è compreso tra 5 e 30, il fenomeno del distacco sensibile a svariati parametri, primo fra tutti l'intensità di turbolenza. Eleva dell'intensità di turbolenza riducono il rischio di violente vibrazioni; piccol di turbolenza, soprattutto possibili per limitati valori delle velocità critiche, fenomeno del distacco critico dei vortici. In ogni caso esso deve essere assicurandosi in particolare che le vibrazioni non inducano tensioni ecce elevate nella struttura, e che i limiti per fatica non siano superati (paragra	dei vortio ati valori d possoni analizza essivame afo Q.8)	ci è molto ell'intensità o esaltare il ito ente	
se il numero di Scruton è minore di 5, le vibrazioni indotte dal distacco de essere di grande intensità e notevolmente pericolose; si raccomanda pe problema con massima attenzione e cautela.	ei vortici rtanto di	possono trattare il	
		ОК]

La voce di menu "Azione del vento" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di

comando

1.6 Menu principale – Azione sismica

La voce **Azione sismica** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, tramite la quale vengono definiti i dati relativi a:

- longitudine e latitudine del sito in esame (coordinate geodetiche in °);
- categoria di sottosuolo;
- categoria topografica.



Cliccando sui bottoni della Categoria di sottosuolo e della Categoria topografica si accede alle seguenti finestre, contenenti le spiegazioni contenute nelle NTC 2018.

 \times

П

Tab. 3.2.II - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

Categoria Descrizione Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteri-Α stiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m. Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consi-В stenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s. Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento del-С le proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento del-D le proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s. Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le catego-Ε rie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

ОК

ОК

 \times

Tab. 3.2.III - Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°
T2	Pendii con inclinazione media i > 15°
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \le i \le 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°

Non sono necessari altri dati in quanto il programma considera solo la combinazione sismica allo stato limite di salvaguardia della vita SLV, con i valori (fissi) forniti dalla normativa.

Si può osservare a margine che generalmente per questo tipo di strutture le combinazioni sismiche non sono dimensionanti.

La voce di menu "Azione sismica" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di

comando 🔊

1.7 Menu principale – Combinazioni di carico

La voce **Combinazioni di carico** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, tramite la quale vengono definiti i dati relativi ai coefficienti di combinazione per le diverse combinazioni. Il programma imposta come default le combinazioni indicate nella figura seguente, con i coefficienti parziali indicati nelle NTC 2018. Questi coefficienti possono essere osservati nella finestra della figura successiva, proposta dal programma se si preme il bottone con il punto di domanda.

G1 perm. strutt.	G2 perm. non strutt.	Q var. 1 (vento)	Q var. 2 (ghiaccio)	Sisma	Vento 100 km/h	Titolo della combinazione
1.30	1.50	1.50	0.75	0.00	0.00	SLU 1
1.30	1.50	0.90	1.50	0.00	0.00	SLU 2
1.00	1.00	1.00	0.50	0.00	0.00	SLE rara 1
1.00	1.00	0.60	1.00	0.00	0.00	SLE rara 2
1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	SLE Vento 100 km/h
1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	SLV
	Nuova Co	ombinazione	Cancella (Combinazione	Def	ault
			Categoria della La prima azion La seconda az	a 2° azione varia le variabile, fissa, zione variabile è l	bile - Tab. 2.5.1 , è il vento. la neve, che nella fa	ttispecie è ghiaccio.
			Neve: h s.l.m	. <= 1000 m		

Il programma considera come prima azione variabile la condizione del vento, che risulta sempre la più gravosa. Come seconda azione variabile viene considerato il ghiaccio.

La definizione delle combinazioni può essere inserita dall'utente, ma si consiglia di utilizzare quelle proposte di default dal programma, affinché i calcoli e le verifiche vengano condotti in modo corretto.

La voce di menu "Combinazioni di carico" può essere raggiunta direttamente tramite il

bottone di comando

Nel caso venga definito un plinto di fondazione, alle combinazioni definite in questa finestra ne vengono automaticamente aggiunte quattro relative alle verifiche al ribaltamento. Queste combinazioni sono descritte nel manuale teorico, nel capitolo relativo alle verifiche dei plinti. I coefficienti parziali sono comunque illustrati anche nella seguente immagine.

			Metodo di calcolo: D.M. 17.01.2018	3							
efficienti p	arziali										
STR	G1: perm. strutt.	1.3	G2: perm. non strutt. 1.5	Q: variat	oili 📃	1.5		A1	Tab. 2	2.6	
QU 1	G1: perm. strutt.	0.9	G2: perm. non strutt. 0.8	Q: variat	oili	1.5		EQ	U Tab	. 6	
QU 2	CQU 2 G1: perm. strutt. 1 G2: perm. non strutt. 0.8 G2: perm. non strutt.				variabili 1.3				(A2 Tab. 6.2		
efficienti N	ψ in funzione delle	e categorie del	lle azioni variabili (tabella 2.5.1)			1		1			
		Az	tione		Ψo		Ψı		Ψ_2	2	
								_			
A: Ambier	nti ad uso residenzia	ale			0.7		0.5		0.3		
A: Ambier B: Uffici	nti ad uso residenzia	ale			0.7 0.7		0.5 0.5		0.3 0.3		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo	ale Illamento			0.7 0.7 0.7		0.5 0.5 0.7		0.3 0.3 0.6		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc	ale Illamento iale			0.7 0.7 0.7 0.7		0.5 0.5 0.7 0.7		0.3 0.3 0.6 0.6		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen	ale vilamento iale ito e uso comr	merciale ed uso industriale		0.7 0.7 0.7 0.7 1.0		0.5 0.5 0.7 0.7 0.9		0.3 0.3 0.6 0.6 0.8		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p F: rimesse	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: auto	ale illamento iale ito e uso comr veicoli leggeri	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN		0.7 0.7 0.7 0.7 1.0 0.7		0.5 0.5 0.7 0.7 0.9 0.7		0.3 0.3 0.6 0.6 0.8 0.6		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree po F: rimesse G: rimesse	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: auto e e parcheggi: auto	ale ilamento iale to e uso comr veicoli leggeri veicoli medi c	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN on 30 kN < peso a pieno carico <= 16(DkN	0.7 0.7 0.7 1.0 0.7 0.7 0.7		0.5 0.7 0.7 0.9 0.7 0.5		0.3 0.3 0.6 0.6 0.8 0.6 0.8 0.6 0.3		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p F: rimesse G: rimesse H: Copert	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: auto e e parcheggi: auto ure accessibili per s	ale iale ito e uso comr veicoli leggeri veicoli medi c sola manutenz	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN on 30 kN < peso a pieno carico <= 16(rione e riparazione	0 kN	0.7 0.7 0.7 1.0 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7		0.5 0.7 0.7 0.9 0.7 0.5 0.0		0.3 0.3 0.6 0.6 0.8 0.6 0.3 0.0		
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p F: rimesse G: rimesse H: Copertu K: Copertu	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: autor e e parcheggi: autor ure accessibili per s ire praticabili di amb ure per ui e per di e	ale iale ito e uso comr veicoli leggeri veicoli medi c sola manutenz ienti di catego	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN on 30 kN < peso a pieno carico <= 16(iione e riparazione oria d'uso compresa fra A e D	DkN	0.7 0.7 0.7 1.0 0.7 0.7 0.7 0.0 0.7 0.7	* *	0.5 0.7 0.7 0.9 0.7 0.5 0.0 0.5 0.5	* *	0.3 0.3 0.6 0.6 0.8 0.6 0.3 0.0 0.3 0.3	*	
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p F: rimesse G: rimesse H: Copert I: Copertu K: Copertu	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: auto e e parcheggi: auto ure accessibili per s ire praticabili di amb ure per usi speciali	ale vilamento iale to e uso comr veicoli leggeri veicoli medi c sola manutenz vienti di catego	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN on 30 kN < peso a pieno carico <= 16(rione e riparazione oria d'uso compresa fra A e D	0 kN	0.7 0.7 0.7 1.0 0.7 0.7 0.7 0.0 0.7 0.7 0.7	* *	0.5 0.7 0.7 0.9 0.7 0.5 0.0 0.5 0.5 0.2	* *	0.3 0.3 0.6 0.6 0.8 0.6 0.3 0.0 0.3 0.3 0.3	*	
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p F: rimesse G: rimesse H: Copertu K: Copertu K: Copertu Vento Neve: h s	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: auto e e parcheggi: auto ure accessibili per s ire praticabili di amb ure per usi speciali i m <= 1000 m	ale vilamento iale to e uso comr veicoli leggeri veicoli medi c sola manutenz vienti di catego	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN on 30 kN < peso a pieno carico <= 16(tione e riparazione oria d'uso compresa fra A e D	DkN	0.7 0.7 0.7 1.0 0.7 0.7 0.7 0.0 0.7 0.7 0.7 0.6 0.5	* *	0.5 0.5 0.7 0.7 0.9 0.7 0.5 0.0 0.5 0.5 0.2 0.2	* *	0.3 0.6 0.6 0.8 0.6 0.3 0.0 0.3 0.3 0.3 0.0 0.0	*	
A: Ambier B: Uffici C: Ambier D: Ambier E: Aree p F: rimesse G: rimesse H: Copertu K: Copertu K: Copertu Vento Neve: h s Neve: h s	nti ad uso residenzia nti suscettibili di affo nti ad uso commerc er immagazzinamen e e parcheggi: auto e e parcheggi: auto ure accessibili per s ire praticabili di amb ure per usi speciali s.l.m. <= 1000 m	ale ollamento iale to e uso comr veicoli leggeri veicoli medi c sola manutenz sienti di catego	merciale ed uso industriale di peso a pieno carico <= 30 kN on 30 kN < peso a pieno carico <= 160 ione e riparazione oria d'uso compresa fra A e D	DkN	0.7 0.7 0.7 1.0 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.6 0.5 0.7	* *	0.5 0.7 0.7 0.9 0.7 0.5 0.0 0.5 0.5 0.2 0.2 0.5	* *	0.3 0.6 0.6 0.8 0.6 0.3 0.0 0.3 0.3 0.3 0.0 0.0 0.0 0.2	*	

1.8 Menu principale – Calcolo e verifica

La voce **Calcolo e verifica** del menu principale consente di eseguire il calcolo della struttura, comprendente:

- creazione del modello agli elementi finiti;
- determinazione preliminare dei modi di vibrare, per consentire il calcolo delle azioni del vento;
- determinazione delle azioni del vento;
- determinazione delle azioni del sisma;
- soluzione del problema statico;
- verifica delle sezioni del palo;
- verifica dei giunti flangiati, se definiti;
- verifica del plinto di fondazione, se definito.

La voce di menu "Calcolo e verifica" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di

comando 🛄

Nel caso ci siano problemi di risonanza trasversale dovuta al vento, il programma propone la seguente finestra nella quale è necessario operare una scelta su come devono essere affrontati i calcoli. Le scelte sono commentate nella finestra stessa.

Se la struttura è caratterizzata dal problema della risonanza trasversale, questa finestra appare anche all'apertura del lavoro e anche quando questa viene salvata, in quanto il programma deve aggiornare i calcoli e le verifiche.

Le forze trasversali dovute al distacco dei vortici risultano elevate, indicando problemi di risonanza trasversale dovuta al vento. Scelte possibili Interrompere le verifiche e modificare i parametri (*) (scelta consigliata) Proseguire con le verifiche utilizzando le forze calcolate (Proseguire con le verifiche trascurando le forze trasversali dovute al distacco dei vortici (SCONSIGLIATO) (*) in linea di massima si dovrebbe aumentare il rapporto di smorzamento strutturale ξ₁₈

Problemi di risonanza trasversale dovuta al vento

1.9 Menu principale – Inserisci

Inserisci	
Flan	gia
Plint	o

Il menu Inserisci contiene le voci "Flangia" e "Plinto" tramite le quali è possibile inserire delle flange alle estremità dei tronchi di palo, ovvero un plinto alla base.

Queste voci di menu possono essere raggiunte direttamente tramite bottoni di comando, come di seguito mostrato.

Inserisci Flangia

л	1	п.
۵L	1	10
÷	-	-

Inserisci Plinto

Per **inserire o modificare** una flangia o un plinto, si seleziona dapprima la voce corrispondente del menu.

Se questi elementi non sono già stati inseriti, quando il puntatore del mouse passa in prossimità di un punto dove è possibile l'inserimento, compaiono le scritte che si vedono nella figura seguente; a questo punto cliccando con il bottone sinistro del mouse avviene l'inserimento dell'elemento, con il passaggio alle finestre di verifica mostrate di seguito.

Se invece gli elementi sono stati inseriti, al passaggio del mouse questi vengono evidenziati, e un click conduce alle finestre di verifica.

Per **cancellare** una flangia o un plinto ci sono due modi: 1) selezionare l'elemento con un click del mouse quando questo risulta evidenziato, poi premere il tasto Canc; 2) selezionare il comando "Inserisci Flangia" o "Inserisci Plinto" e premere il tasto destro del mouse quando l'elemento risulta evidenziato.



1.9.1 Inserisci Flangia

Selezionando la voce "Inserisci Flangia" si accede alla seguente finestra, che viene di seguito riproposta in due parti per una migliore lettura.

Nella parte alta della finestra principale è presente il menu "File", che contiene le voci "Salva", "Relazione", "Esci"; queste voci possono essere invocate direttamente anche

tram	nite i bottoni: 🛄, 🛛	å, ⊐ ¶.		
File	Salva			
	Relazione			
	Esci			

Nella riga dei bottoni di comando è presente anche il bottone , che consente di ottenere il massimo zoom della flangia nella finestra grafica.

Verifiche di una flangia a presso-tensoflessione deviata	a: Esempio 412 v311.fla		– 🗆 X
File			
A	Relaz. italiano O Relaz. inglese	Titolo del lavoro	
Verfica n' Commento Fv.ed Ft.ed N 1 SLU 1 6.1920E+04 -5.6598E+04 1. 2 SLU 2 3.7758E+04 -6.1247E+04 7. 3 SLE rara 1 4.1208E+04 -4.1414E+04 7.	Image: Relaz. Italiano Relaz. Inglese Mox.ed Myy.ed Sigma min Pb min Fa max - Nad 1.1976E+09 5.6715E+08 -61.1 0.0000E+00 1.2641E+05 7.1854E+08 3.6715E+08 -37.3 0.0000E+00 7.653E+04 9837E+08 3.7810E+08 -40.7 0.0000E+00 8.4081E+04 Nuova Verfica Cancelia verf. n.1 1	Dati geometrici (mm) Diametro esterno della flangia 1260 Diametro interno della flangia 1100 Disametro interno della flangia 1100 Distanza e ₂ dei bulloni dal bordo 40 Diametro dei fon 21 Numero dei fon = 1° bulloni 24	Diametro dei bulloni
	ns(=4)	Spessore t ₂ della flangia 30 Spessore s ₄ del tronco afferente 5 Plangia intgidita con fazzoletti saldati 2 154.02 P1 e2 30 30 154.02 2 30 30 30 5 7 8 9 30 30 30 5 7 8 9 4 30 5 7 8 9 1 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Larghezza b _n dei fazzoletti 55 Atezza h _n dei fazzoletti 100 Spessore t _n dei fazzoletti 25 Materiale e tensioni caratteristiche (MPa) Tipo di accialo del piato
Iminuire/aumentare n° di valori Idiminuire/aumentare n° di valori Mostra i valori delle tensioni Bulloni reagenti a compressione Verifica bulloni a resistenza Fv.rd	Verifica spessori flangia e nervature Spessore minimo flangia 29.5 Tasso di lavoro 0.98 Tasso di lavoro 0.98 agia a rifollamento Verifica flangia a punzonamento Brd	Esposizione ambientale esposizione a fenomeni corrosivi o ambientali Assenza di fenomeni corrosivi Note	Classe del bullone

Licenza d'uso: Paolo Varagnolo Ingegneria - via Nazareth, 49 - 35128 Padova

lunedì 18 ottobre 2021 14:32

diminuire/aumentare n° di valori 🚔

Mostra i valori delle tensioni

Nella parte sinistra della finestra, rappresentata nella figura seguente, ci sono i seguenti dati:

- i parametri di sollecitazione derivanti dall'analisi agli elementi finiti. Questi valori non possono essere modificati in questo contesto, in quanto risultano dai dati forniti al programma. I bottoni per aggiungere o eliminare delle verifiche sono disabilitati: questo modulo di verifica deriva infatti da un'applicazione indipendente e più generale per il calcolo delle flange, che si è voluto mantenere il più possibile inalterata;
- a sinistra viene rappresentata la flangia con i valori di tensione e con la posizione dell'asse neutro della verifica corrente, cioè della verifica selezionata con il mouse. Anche in questa finestra grafica valgono le solite regole per modificare la visualizzazione: rotellina per lo zoom e spostamento con bottone sinistro premuto. Sotto la figura è possibile aumentare o diminuire il numero delle etichette che indicano i valori delle tensioni, oppure di può scegliere se visualizzare o meno questi valori. Si può inoltre scegliere se fare lavorare i bulloni anche a trazione (sconsigliato, ma incide pochissimo sui risultati);
- nella parte destra è rappresentata una flangia con l'indicazione delle grandezze che devono essere definite;
- nella parte bassa sono riportati i risultati delle verifiche sulla flangia, sulle nervature e sui bulloni. I tassi di lavoro sono indicati in nero se le verifiche sono soddisfatte, in rosso se non lo sono, in verde se lo sfruttamento dei materiali è molto basso.

1	verific	che di una fiangia a	presso-tenso	nessione devi	iata: Esempio	412 V511.fla				
	File									
		.	1	æ	8	Relaz. ita	aliano 🔿 Re	laz. inglese		
	Verifica n°	Commento	Fv,ed	Ft,ed	Mxx,ed	Myy,ed	Sigma min	Fb min	Fa max = Nsd	^
	1	SLU 1	6.1920E+04	-5.6698E+04	1.1976E+09	5.6715E+08	-61.1	0.0000E+00	1.2641E+05	
	2	SLU 2	3.7758E+04	-6.1247E+04	7.1854E+08	3.6715E+08	-37.3	0.0000E+00	7.5633E+04	
	3	SLE rara 1	4.1280E+04	-4.1414E+04	7.9837E+08	3.7810E+08	-40.7	0.0000E+00	8.4081E+04	
l		015 0	0.54705.04		1 70005 00	0.41705.00	01.0	0 00005 00	E 0000E 04	Ŷ
		G G		*	Verifica	spessori flan	n _s (=4)) * d Ss t t t t d		*

🕻 Verifiche di una flangia a presso-tensoflessione deviata: Esempio 412 v311.fla

Spessore

Bulloni reagenti

 \sim

minimo flangia

Tasso di lavoro

Spessore minimo

Tasso di lavoro

nervature

29.5

0.98

23.3

0.93

Nella parte destra della finestra, rappresentata nella figura seguente, vengono inseriti i seguenti dati:

- diametro esterno della flangia (quello interno è pari al minore dei diametri dei tronchi che afferiscono al nodo;
- distanza e₂ dei bulloni dal bordo esterno della flangia;
- numero dei bulloni e numero dei settori definiti dai fazzoletti di irrigidimento. Il
 programma non controlla se il numero di settori è compatibile con il numero di
 bulloni, cioè se i fazzoletti possono capitare troppo vicini ai fori dei bulloni. Questo
 controllo deve essere eseguito indipendentemente. Va sempre bene prevedere un
 numero di settori pari al numero di bulloni, o pari al numero di bulloni diviso per un
 multiplo di 2;
- spessore della flangia;
- nel caso vengano previsti dei fazzoletti di irrigidimento (tramite l'apposita opzione da spuntare), spessore e altezza dei fazzoletti;
- materiale della flangia (uguale a quello dei fazzoletti), materiale dei bulloni;
- tipo di esposizione ambientale.

Diametro esterno della flangia	260	Diametro dei bulloni	20
Diametro interno della flancia 1	100	Area, di calcolo del bullone	245
Distanza e dei bulloni dal bordo 4	0	Numero di superfici a taglio	1
Diametro dei fori	1	Sezione filettata 💿 Sezio	one lorda
Numero dei fori = n° bulloni 2	24	n° settori definiti dai fazzoletti	12
Spessore t _s della flangia 3	0	Larghezza b _n dei fazzoletti	55
Spessore s _s del tronco afferente 5	i	Altezza h _n dei fazzoletti	100
Flangia imigidita con fazzoletti saldati	\checkmark	Spessore t _n dei fazzoletti	25
<u> </u>		Classe del hullone	8.8
sposizione ambientale		Tensione caratterística di spervamento	6.0 V
esposizione a tenomeni corrosivi o am Assenza di fenomeni corrosivi		Tensione caratterística di mtura	800
ala	Ŭ		
ole			~

In alcuni casi il programma può scrivere delle note nell'apposita finestra nella parte bassa.

All'uscita da questa finestra di verifica, la flangia viene rappresentata in **verde** se risulta verificata, in **rosso** se le verifiche non sono tutte soddisfatte.

1.9.2 Inserisci Plinto

Selezionando la voce "**Inserisci Plinto**" si accede alle finestre rappresentate nelle figure seguenti, accessibili utilizzando i quattro tab disponibili.

Nella parte alta della finestra principale sono presenti i menu "File", "Unità" e "?".

File	
	Salva
	Relazione
	Esporta Dxf
	Esci

Il menu File contiene le voci "Salva", "Relazione", "Esporta Dxf", "Esci", che possono essere

8

DXF

	 a La	-
invocate direttamente anche tramite i bottoni:	L	F

Nella riga dei bottoni di comando è presente anche il bottone , che consente di ottenere il massimo zoom delle immagini in tutte le finestre grafiche.

Il menu "Unità" è disabilitato in quanto il programma PaliAntenne impone come unità di misura i N per le forze e i mm per le lunghezze.

Il menu "?" attiva la seguente finestra contenente alcune informazioni sul modulo di verifica dei plinti.



Tab 1: "Verifiche terreno"

Questa finestra corrisponde al tab "Verifiche terreno" e comprende i seguenti dati:

- i parametri di sollecitazione derivanti dall'analisi agli elementi finiti. Questi valori non possono essere modificati in questo contesto, in quanto risultano dai dati forniti al programma;
- in alto a destra sono mostrati i risultati della verifica corrente, cioè della verifica selezionata con il mouse;
- nella parte mediana, a sinistra ci sono dei bottoni per aggiungere o eliminare delle verifiche, ma sono disabilitati. Questo modulo di verifica deriva infatti da un'applicazione indipendente e più generale per il calcolo dei plinti, che si è voluto mantenere il più possibile inalterata;
- nella parte mediana al centro della finestra sono presenti alcune eventuali note;
- le tre finestre grafiche nella parte bassa rappresentano rispettivamente le tensioni sul terreno, la geometria del plinto e l'eventuale dado. All'interno di queste finestre grafiche è possibile modificare lo zoom con la rotellina del mouse, ovvero spostare le immagini spostando il mouse tenendo contemporaneamente premuto il bottone sinistro.

Plinu; ES	empio 412 v31.pli								>
le	Unità	?							
	A	æ		۲	Relaz. italiano	🔘 Relaz. ing	lese DXF		lunghezze in: mm
rifiche terre	eno Geometria Imp	oostazioni e dati	Verifiche armat	ture					
íT	tolo del lavoro								Verifica n. 1
Verifica n°	Commento	Fz	Tx	Ту	Мхх	Муу	Sigma terreno	^	verifica lungo x (indipendente da y) σ t min -0.075 σ t max -0.013
1	SLU 1	-5.6698E+04	3.1561E+04	5.3273E+04	-1.1976E+09	5.6715E+08	-0.16		σ verifica -0.059
2	SLU 2	-6.1247E+04	2.0099E+04	3.1964E+04	-7.1854E+08	3.6715E+08	-0.1		coeff. sic. ribaltam. 4.234
3	SLE rara 1	-4.1414E+04	2.1040E+04	3.5515E+04	-7.9837E+08	3.7810E+08	-0.11		
4	SLE rara 2	-4.4446E+04	1.3399E+04	2.1309E+04	-4.7902E+08	2.4476E+08	-0.08		or t min -0.114
		0.00005-04	0 40005 00	0.00005-00	0.00005.00	4 47705 00	0.05	~	O t max 0
verif. n° (99 values	Verifica	Verifica n. 3: la Verifica n. 7: la	sezione è par sezione è par	zializzata, valuta zializzata, valuta	are la situazione are la situazione	ə. ə.	¥	coeff. sic. ribaltam. 2.056
Tensioni si	ul terreno y		Plinto				Dado		
-0.074	G	-0.16	2 X	S	+ 8496 974.8496	* 2000 *			* 2000 ¢
						¥1500			* 1000 *

Tab 2: "Geometria"

Questa finestra corrisponde al tab "Geometria" e consente di inserire o di modificare i dati geometri del plinto.

I dati eventualmente modificati vengono salvati e conservati solo se si preme il bottone con il segno di spunta verde in basso a destra.

Nel modulo di verifica dei plinti arrivano i parametri di sollecitazione in N e Nmm. Poiché le unità di misura devono essere congruenti, è necessario inserire i dati utilizzando i mm per le lunghezze.



Tab 3: "Impostazioni e dati"

Questa finestra corrisponde al tab "Impostazioni e dati" e comprende i seguenti dati:

- metodo di calcolo, obbligatoriamente impostato sugli stati limite;
- caratteristiche del calcestruzzo;
- caratteristiche dell'acciaio;
- caratteristiche del terreno;
- dati relativi alle proposte di armatura automatica.

Nel modulo di verifica dei plinti arrivano i parametri di sollecitazione in N e Nmm. Poiché le unità di misura devono essere congruenti, è necessario inserire i dati con le seguenti unità di misura:

- resistenze e modulo elastico in N/mm² (cioè MPa);
- peso di volume in N/mm³;
- diametri in mm.

📶 Plinti: Esempio 412 v31.pli	_		×
File Unità ?			
Relaz. italiano O Relaz. inglese	lunghezze ir	n: mm	
Verifiche terreno Geometria Impostazioni e dati Verifiche armature			
Metodo di calcolo SLU - D.M. 14.01.2018 (i) Tensioni ammissibili			
Calcestruzzo			
Resistenza caratteristica 25 Resistenza caratteristica 450 Peso di volume 2.5E-05 Coefficiente di omogeneizzazione 15]		
Terreno Terreno Resistenza di calcolo Rd 0.15]		
Dati relativi alla proposta di armatura del plinto			
Diametro 1 ϕ 1(>= 12) 12 Diametro barre superiori 12 max armature inf. suola 400 Diametro 2 ϕ 2(> ϕ 1) 16 Diametro barre sul contomo 8 max armature sup. suola 400			
Diametro 3 $\phi_3(>\phi_2)$ 20 max altre amature 300			
Le unità di misura delle forze e delle lunghezze devono essere congruenti. In questo modulo arrivano i dati con le seguenti unità: - lunghezze in N - forze in N*mm			
Nota: i dati vengono aggiomati solo se viene premuto il tasto con la spunta verde	•		

Tab 4: "Verifiche armature"

Questa finestra corrisponde al tab "Verifiche armature" e consente di modificare le armature della suola e dell'eventuale dado.

La finestra grafica a sinistra mostra le armature impostate, ed è possibile agire su alcune opzioni per migliorarne la leggibilità:

- sopra la finestra, a sinistra, si può scegliere cosa visualizzare: cls, armature della suola e armature dell'eventuale dado (nell'immagine è visualizzato tutto);
- a destra della figura, in basso, è possibile scegliere se visualizzare o meno anche le armature secondarie costituite dai ferri superiori e dai ferri perimetrali (non visualizzati nell'immagine).

Anche in questa finestra grafica valgono le solite regole per modificare la visualizzazione: rotellina per lo zoom e spostamento con bottone sinistro premuto.

I tassi di lavoro delle armature sono indicati in nero se le verifiche sono soddisfatte, in rosso se non lo sono.

Nella parte destra della finestra sono riportate le verifiche al punzonamento.

Le armature devono seguire le seguenti regole, automaticamente imposte dal programma:

- il n° totale di ferri deve essere dispari, in modo che al centro del plinto ci sia sempre una barra;
- per plinti snelli (vedere il manuale teorico per le relative spiegazioni) il programma provvede ad infittire le barre di armatura in una zona al disotto del palo: in questo caso nella zona infittita i ferri sono sempre pari, mentre i ferri radi sono sempre dispari.



All'uscita da queste finestre di verifica, il plinto viene rappresentato in **verde** se risulta verificato, in **rosso** se le verifiche non sono tutte soddisfatte.

2.0 Menu principale – Processore F.E.M.

La voce **Processore F.E.M.** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, nella quale è possibile visualizzare i risultati del calcolo F.E.M. interrogando il modello come viene spiegato nel seguito.

La voce di menu "Processore F.E.M." può essere raggiunta direttamente tramite il bottone

di comando

L'immagine seguente mostra l'intera finestra del processore grafico, mentre nelle successive figure sono rappresentate e commentate le varie componenti.



2.0.1 Uso del mouse nella finestra grafica

Il mouse consente di selezionare i nodi e gli elementi del modello, cliccando sopra gli stessi, ovvero definendo delle finestre attorno agli stessi. Se è selezionata la spunta sulla checkbox "Multiple Selection" nella toolbar inferiore possono essere selezionati contemporaneamente più nodi e più elementi; se "Multiple Selection" non è spuntata, possono essere selezionati solo 1 nodo e 1 elemento. Nelle finestre delle proprietà a destra (se visualizzate) si potranno vedere le proprietà che accomunano i nodi e gli elementi selezionati.

Il tasto Esc annulla le selezioni effettuate.

Le selezioni effettuate possono essere annullate anche ripetendo le selezioni tenendo contemporaneamente premuto il tasto "Maiusc".

Tenendo premuto il tasto "Maiusc" e trascinando il mouse tenendo premuta la rotellina viene cambiato il punto di vista dell'immagine: In alto a sinistra è rappresentato il sistema di riferimento globale che consente di tenere sotto controllo il punto di vista attuale.

La rotellina del mouse consente di modificare il livello di zoom dell'immagine.

2.0.2 Menu e bottoni di comando

🏙 MdFem: F:\Google Drive 2019\Programmi\VERIFICA\PaliAntenne\Esempio 412 v31\Esempio 412 v31.ant



La barra del titolo in alto contiene il nome completo del lavoro corrente, seguito appena sotto da un'unica voce di menu "Custom Settings", che apre la seguente finestra.

In questa finestra è possibile definire i colori e le dimensioni dei caratteri delle grandezze che possono essere rappresentate nella finestra del processore.

Custom Colors			x
	C	olor	Font Height
Graphic Backcolor			
Mesh			
Element Numbers			10.0
Nodes Numbers			11.0
Loads			
Deformed Mesh			
All Values			10.0
Shear Forces			
Bending Moments			
Car	ncel	Done	

Al disotto della voce di menu ci sono il nome del lavoro senza il percorso completo, e poi le liste dove vengono scelte le condizioni di carico, le combinazioni di carico o i modi di vibrare.

Se viene scelta una condizione o una combinazione di carico possono essere visualizzati i carichi concentrati, i carichi lineari, la deformata, lo sforzo normale N, il taglio Txx, il momento flettente Myy, il taglio Tyy e il momento flettente Mxx.

Se viene scelto un modo di vibrare può essere visualizzata solo la deformata.

Di seguito vengono elencati tutti i bottoni con le corrispondenti funzioni.



Preprocessor

mostra i materiali degli elementi

▲ ↓

- mostra i vincoli del modello
- mostra i carichi concentrati della condizione/combinazione corrente
- mostra i carichi lineari della condizione/combinazione corrente

Postprocessor



mostra la deformata della condizione/combinazione/modo di vibrare corrente mostra lo sforzo normale N della condizione/combinazione corrente mostra lo sforzo di taglio Txx della condizione/combinazione corrente mostra il momento flettente Myy della condizione/combinazione corrente mostra lo sforzo di taglio Tyy della condizione/combinazione corrente mostra il momento flettente Mxx della condizione/combinazione corrente

2.0.3 Finestre delle proprietà

Le finestre delle proprietà mostrano tutte le grandezze che caratterizzano i nodi e gli elementi selezionati.

Nel caso di selezione unica vengono mostrate tutte le proprietà, mentre nel caso di selezioni multiple vengono mostrate solo le proprietà che risultano comuni ai nodi o agli elementi selezionati.

Le proprietà non possono essere modificate, questo ambiente grafico è solo un postprocessore del programma agli elementi finiti.

No	odal Properties	5 ×	Be		
~	Nodal Coordinates				
	X coord.	0.00000E+00			
	Y coord.	0.00000E+00			
	Z coord.	1.95200E+01			
\mathbf{v}	Nodal Loads	5			
	Gravity loads	-z			
	X load	0.00000E+00	~		
	Yload	0.00000E+00			
	Zload	-3.32177E-01			
~	Nodal Restr	aints			
	Туре	free			
~	Results: No	dal Displacements			
	X displ.	2.09190E-01	~		
	Y displ.	4.66700E-01			
	Z displ.	-2.46570E-04			
	XX rot.	0.00000E+00			
	YY rot.	2.07350E-02			
\mathbf{v}	Results: Soi	I Pressure			
	Soil pressure	-			
			~		

Be	am element p	roperties	
~	Calculated F	Forces at Node i	
	Axial force N	-2.35270E+01	
	Shear Tx	-1.79480E+01	
	Moment Myy	1.38930E+02	
	Shear Ty	4.30390E+01	
	Moment Mxx	3.21540E+02	
~	Calculated F	Forces at Node j	
	Axial force N	-2.08310E+01	
	Shear Tx	-1.62700E+01	
	Moment Myy	1.00630E+02	
	Shear Ty	3.85430E+01	
	Moment Mxx	2.29960E+02	
~	Distributed I	Loads	
	node i: qx	7.66646E-01	
	node i: qy	1.76366E+00	
	node i: qz	-1.47786E-01	
	node j: qx	7.31734E-01	
	node j: qy	2.25054E+00	
	node j: qz	-1.47786E-01	
~	Material		
	Material no.	11	
~	Node Number	ers	
	Node i	10	
	Node j	11	
2.0.4 Toolbox inferiore

La toolbox inferiore presenta una serie di checkbox che possono essere spuntate o meno.

Show local axes		Show properties 🖂	Show values 🔽	Node numbers 🗹	Element numbers	Multiple	e Selection 🔽
-----------------	--	-------------------	---------------	----------------	-----------------	----------	---------------

Show local axes

visualizza gli assi locali degli elementi, definiti automaticamente dal programma come spiegato nel § 1.2 del manuale teorico. Nell'immagine seguente sono visualizzati gli assi locali. L'asse locale 1 è concorde con l'asse globale z, l'asse 2 è concorde con l'asse globale y, l'asse 3 risulta dal prodotto vettoriale fra i versori degli assi 1, 2 (e risulta di verso opposto all'asse globale x);



- Show properties mostra le finestre delle proprietà dei nodi e degli elementi;
- Show values mostra i valori delle grandezze rappresentate (N, Tx, Myy, Ty, Mxx, spostamenti);
- Node numbers mostra i numeri dei nodi del modello;
- Element numbers mostra I numeri degli elementi del modello;
- Multiple Selection consente di selezionare contemporaneamente più nodi o elementi.

2.1 Menu principale – Impostazioni

La voce **Impostazioni** del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, già presentata durante la descrizione del processore F.E.M.. Il motivo per cui questa voce è presente nella finestra principale del programma, è che lo sfondo in questa finestra e in quella del processore F.E.M. ha lo stesso colore.

Si possono comunque impostare anche in questa sede i colori e le dimensioni dei caratteri delle grandezze che possono essere rappresentate nella finestra del processore.

Custom Colors		x
	Color	Font Height
Graphic Backcolor		
Mesh		
Element Numbers		10.0
Nodes Numbers		11.0
Loads		
Deformed Mesh		
All Values		10.0
Shear Forces		
Bending Moments		
Cancel	Done]

La voce di menu "Impostazioni" può essere raggiunta direttamente tramite il bottone di comando

2.2 Menu principale – ?

La voce ? del menu principale consente di accedere alla finestra rappresentata nella seguente immagine, nella quale sono riepilogate le informazioni relative alla release del programma.







PAOLO VARAGNOLO INGEGNERIA via Nazareth, 49 - 35128 PADOVA tel./fax 049-8073882 tel. 335-6452133

PaliAntenne

MANUALE TEORICO

1. Il solutore F.E.M.

1.1 Generalità

Il solutore agli elementi finiti utilizzato dal programma PaliAntenne è MdFem, nato nel 1988 e registrato a nome di Paolo Varagnolo Ingegneria nel 1994. Gli elementi utilizzati sono del tipo Beam, rettilinei a 2 nodi, con 3 gradi di libertà traslazionali e 3 rotazionali ad ogni nodo, atti a trasmettere forze assiali, taglianti, momenti flettenti e torcenti.

Si tratta di un programma ampiamente collaudato in decenni di utilizzo, per il quale verranno comunque prodotti alcuni esempi di validazione nell'apposita sezione.

L'impostazione generale del programma MdFem è la stessa che si trova in [1]. Di seguito viene descritta sinteticamente l'impostazione del programma.

Il problema statico può essere descritto con la seguente espressione:

$$[K_G] [u_G] = [f_G] \tag{1.1}$$

Dove $[K_G]$ è la matrice di rigidezza, $[u_G]$ il vettore degli spostamenti generalizzati (cioè spostamenti e rotazioni), $[f_G]$ il vettore delle forze generalizzate (cioè forze e momenti). **Questo sistema di equazioni è riferito al sistema di riferimento globale (x, y, z)**: gli spostamenti generalizzati e le forze generalizzate ad un nodo generico i sono indicati nella figura seguente, e in notazione matriciale sono indicati come:



1.2 Definizione del problema statico nel sistema di riferimento locale

Risulta comodo impostare il problema nel riferimento locale, in quanto è semplice distinguere le caratteristiche geometrico-statiche della sezione dell'elemento nelle direzioni principali, e altrettanto semplice risulta definire i carichi generalizzati.

Nella figura seguente è rappresentato un elemento che va dal nodo i al nodo j, con evidenziati gli spostamenti e i carichi riferiti al sistema di riferimento locale (1, 2, 3).

Il sistema di riferimento locale viene così definito:

- l'asse locale 1 va dal nodo i al nodo j;
- l'asse locale 2 viene scelto dal programma nel modo seguente: se l'elemento non è parallelo all'asse z globale l'asse 2 è ortogonale all'asse 1 e sta nel piano (1, z); se l'elemento è verticale l'asse 2 è parallelo all'asse y globale;
- l'asse locale 3 risulta dal prodotto vettoriale dei versori paralleli agli assi (1, 2).

Gli spostamenti generalizzati e le forze generalizzate dell'elemento sono indicati nella figura seguente, e in notazione matriciale sono indicati come:



La matrice di rigidezza nel sistema locale è la seguente:

Gli spostamenti generalizzati ai nodi i, j sono legati agli elementi della matrice di rigidezza locale come evidenziato di seguito.

[u _{1,i}	$u_{2,i}$	$u_{3,i}$	$\theta_{1,i}$	$\theta_{2,i}$	$\theta_{3,i}$	$u_{1,j}$	$u_{2,j}$	$u_{3,j}$	$\theta_{1,j}$	$\theta_{2,j}$	$ heta_{3,j}$]	г [.]
$\left[\frac{EA}{L} \right]$	0	0	0	0	0	$-\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0	<i>u</i> _{1,<i>i</i>}
0	$\frac{12EJ_3}{L^3}$	0	0	0	$\frac{6EJ_3}{L^2}$	0	$-\frac{12EJ_3}{L^3}$	0	0	0	$\frac{6EJ_3}{L^2}$	<i>u</i> _{2,<i>i</i>}
0	0	$\frac{12EJ_2}{L^3}$	0	$-\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	0	0	$-\frac{12EJ_2}{L^3}$	0	$-\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	<i>u</i> _{3,<i>i</i>}
0	0	0	$\frac{GJ_1}{L}$	0	0	0	0	0	$-\frac{GJ_1}{L}$	0	0	$\theta_{1,i}$
0	0	$-\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	$\frac{4EJ_2}{L}$	0	0	0	$\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	$\frac{2EJ_2}{L}$	0	$\theta_{2,i}$
0	$\frac{6EJ_3}{L^2}$	0	0	0	$\frac{4EJ_3}{L}$	0	$-\frac{6EJ_3}{L^2}$	0	0	0	$\frac{2EJ_3}{L}$	$\theta_{3,i}$
$-\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0	$\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0	<i>u</i> _{1,<i>j</i>}
0	$-\frac{12EJ_3}{L^3}$	0	0	0	$-\frac{6EJ_3}{L^2}$	0	$\frac{12EJ_3}{L^3}$	0	0	0	$-\frac{6EJ_3}{L^2}$	u _{2,j}
0	0	$-\frac{12EJ_2}{L^3}$	0	$\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	0	0	$\frac{12EJ_2}{L^3}$	0	$\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	<i>u</i> _{3,j}
0	0	0	$-\frac{GJ_1}{L}$	0	0	0	0	0	$\frac{GJ_1}{L}$	0	0	$\theta_{1,j}$
0	0	$-\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	$\frac{2EJ_2}{L}$	0	0	0	$\frac{6EJ_2}{L^2}$	0	$\frac{4EJ_2}{L}$	0	$\theta_{2,j}$
0	$\frac{6EJ_3}{L^2}$	0	0	0	$\frac{2EJ_3}{L}$	0	$-\frac{6EJ_3}{L^2}$	0	0	0	$\frac{4EJ_3}{L}$	$\theta_{3,j}$

1.2.1 Carichi nodali equivalenti

Vengono considerati dei carichi uniformemente distribuiti q_2 , q_3 , rispettivamente lungo gli assi locali 2, 3. Nella seguente figura sono indicati i carichi equivalenti, e di seguito il vettore delle forze locali.



Se è presente anche un carico uniformemente distribuito lungo la direzione locale 1, non rappresentato nella figura precedente, il vettore delle forze locali diventa:

$$[f_L]^T = \begin{bmatrix} \frac{q_1l}{2} & \frac{q_2l}{2} & \frac{q_3l}{2} & 0 & -\frac{q_3l^2}{2} & \frac{q_2l^2}{2} & \frac{q_1l}{2} & \frac{q_2l}{2} & \frac{q_3l}{2} & 0 & \frac{q_3l^2}{2} & -\frac{q_2l^2}{2} \end{bmatrix}$$

Eventuali carichi distribuiti in modo non uniforme possono essere trattati seguendo la stessa logica, e cioè trasportandoli ai nodi in modo equivalente.

1.3 Trasformazioni fra coordinate locali e globali

Le matrici di rigidezza e il vettore dei carichi equivalenti devono essere espressi in coordinate globali per essere assemblati nel sistema espresso dalla relazione (1.1). Le trasformazioni dal sistema locale a quello globale vengono fatte utilizzando i coseni degli angoli compresi fra gli assi locali e gli assi globali, attraverso una matrice di trasformazione [T].

$$[T] = \begin{bmatrix} [t] & & \\ & [t] & \\ & & [t] & \\ & & & [t] \end{bmatrix}$$

dove

$$[t] = \begin{bmatrix} \alpha_{1,x} & \alpha_{1,y} & \alpha_{1,z} \\ \alpha_{2,x} & \alpha_{2,y} & \alpha_{2,z} \\ \alpha_{3,x} & \alpha_{3,y} & \alpha_{3,z} \end{bmatrix}$$

in cui $\alpha_{i,j}$ è il coseno dell'angolo formato dall'asse locale i con l'asse globale j. Gli elementi di [*T*] non indicati sono nulli.

1.4 Memorizzazione della matrice di rigidezza globale della struttura

La matrice di rigidezza globale della struttura viene memorizzata in forma compatta secondo l'algoritmo delle colonne attive descritto in [1]. Vengono cioè memorizzati in un array monodimensionale [*A*] i soli elementi al disopra della diagonale principale e al disotto della skyline (questi elementi formano quelle che sono definite colonne attive). Per conoscere la posizione degli elementi della matrice così memorizzata, è necessario un vettore ausiliario, denominato **MAXAD**(), che contiene le posizioni degli elementi della diagonale principale. Nella figura seguente è schematizzato il meccanismo di memorizzazione della matrice di rigidezza globale.



Nel programma il vettore [A] viene chiamato **GLOBK**(Ind), con Ind che va da 1 a NDOFT.

L'individuazione degli elementi di questa matrice in funzione degli indici di riga e colonna è complicata e viene presentata nel §2.3 all'interno della subroutine ADDBAN.

1.5 Memorizzazione delle matrici di rigidezza degli elementi

Le matrici di rigidezza di ciascun elemento, sia nel sistema di riferimento locale, sia nel sistema di riferimento globale, vengono memorizzate in forma compatta in un array monodimensionale [*S*] secondo l'algoritmo del programma STAP in [1]: nell'array vengono conservati i soli elementi al disopra della diagonale principale, come indicato nello schema seguente. La matrice di 12 x 12 elementi diventa un vettore di 78 elementi.



Nel programma il vettore [S] viene chiamato **Stiff**(Ind), con Ind che va da 1 a 78.

L'individuazione degli elementi di questa matrice in funzione degli indici di riga i e colonna j avviene così: dati (i, j), con j>i, l'indice m del vettore [*S*] vale:

$$m = [(j - i) + 1] + \sum_{k=0}^{i-2} (12 - k)$$

2. Dettagli dell'analisi F.E.M.

2.1 Numerazione dei gradi di libertà

Le informazioni sui gradi di libertà della struttura, di seguito abbreviati in dof (degrees of freedom), vengono memorizzate in una matrice **IDDOF**(Idofn, Ipoin), dove Idofn è l'indice dei gradi di libertà presenti in un nodo e Ipoin è l'indice del nodo della struttura.

Idofn = $1 \div Ndofn$ dove $Ndofn = 6 \grave{e}$ il n° di gradi di libertà presenti in un nodoIpoin = $1 \div Npoin$ dove $Npoin \grave{e}$ il n° totale di nodi della struttura

Inizialmente la matrice contiene il numero 1 in corrispondenza dei dof vincolati. In queste posizioni viene successivamente sostituito il numero zero, ad indicare che non è necessaria la soluzione del corrispondente dof in quanto lo spostamento corrispondente è noto e pari a 0. Nelle posizioni inizialmente nulle vengono invece numerati in ordine crescente i dof per i quali deve essere risolto lo spostamento incognito.

Esempio 1: nella figura a lato è rappresentata una struttura costituita da 2 elementi e da



Il numero totale di gradi di libertà della struttura, che in questo esempio è pari a 12, viene denominato **Ndoft**.

Nel caso siano definiti degli svincoli alle estremità degli elementi, devono essere inseriti ulteriori gradi di libertà.

2.2 Calcolo degli indirizzi degli elementi della diagonale principale

Quando vengono definite le incidenze degli elementi, e cioè i nodi iniziali i e finali j degli elementi, i dof alle estremità vengono conservati in una matrice **LMDOF**(Idofn, Ielem), dove Idofn è l'indice dei gradi di libertà ai nodi dell'elemento e Ielem è l'indice dell'elemento.

lelem = 1 ÷ Nelem dove **Nelem** è il n° totale di elementi della struttura

Si faccia riferimento all'esempio del paragrafo precedente: l'elemento 1 va dal nodo 1 al nodo 2, l'elemento 2 va dal nodo 2 al nodo 3. I dof associati all'elemento sono pertanto i seguenti:



Nel programma le informazioni sulle incidenze degli elementi sono conservate nella matrice **IJINC**(lelem, Inode), dove lelem è l'indice dell'elemento e Inode indica il primo o il secondo nodo dell'elemento. Nel caso in esame questa matrice assume i seguenti valori:

$$IJINC = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}$$

A partire dalle informazioni organizzate come appena esposto, è possibile calcolare le altezze delle colonne attive definite nel § 1.4: le altezze vengono memorizzate nel vettore **MCOLH**(Idofn), con Idofn che indica il dof globale. La massima altezza delle colonne (**M**aximum **COL**umn **H**eight) viene calcolata come segue: per ogni elemento viene dapprima determinato il n° del minore dei dof dei nodi di estremità (chiamato **Ldofn**); successivamente, per ognuno dei dof alle estremità dell'elemento, si calcola la massima altezza della colonna, pari alla differenza fra il dof corrente Idofn e Ldofn.

Con queste informazioni è infine possibile calcolare gli indirizzi degli elementi della diagonale principale dei coefficienti della matrice che definisce il sistema da risolvere. Tali indirizzi sono memorizzati nel vettore MAXAD(Idofn), come già detto nel § 1.4: Idofn varia da 1 a Ndoft.

I primi 2 valori di MAXAD() sono sempre uguali a 1 e 2: MAXAD(1) = 1; MAXAD(2) = 2. Per tutti i successivi dof vale la seguente espressione:

Nell'esempio corrente i valori di MAXAD sono riportati nell'immagine seguente, dove sono evidenziati due valori di MCOLH() calcolati di seguito a titolo di esempio.

calcolo dell'altezza della colonna attiva per il dof nº 10 dell'elemento 1

Ldofn=1 LMDOF(1, 10) = 4 (il 10° dof dell'elemento è il 4° dof della struttura) MCOLH(4) = 4 – 1 = 3 <u>calcolo dell'altezza della colonna attiva per il dof n° 12 dell'elemento 2</u> Ldofn=1

LMDOF(2, 12) = 12 (il 12° dof dell'elemento è il **12° dof della struttura**) MCOLH(12) = 12 - 1 = 11



2.3 Assemblaggio delle matrici di rigidezza

Poiché le matrici di rigidezza vengono create nel sistema di riferimento locale, mentre le incognite del sistema da risolvere sono riferite al sistema di riferimento globale, è innanzitutto necessario procedere alle seguenti trasformazioni per le matrici di ciascun elemento.

matrice di rigidezza da locale a globale	$[K_G] = [T]^T [K_L] [T]$	(2.1)
Con riferimento alla matrice LMDOF() de	ll'esempio 1 presentato nel § 2	.1, si ottiene



Infatti l'elemento 1 ha i dof 1÷6, che corrispondono a $[u_{x,2} \quad u_{y,2} \quad u_{z,2} \quad \theta_{x,2} \quad \theta_{y,2} \quad \theta_{z,2}]$, nel nodo j che corrisponde al nodo 2; l'elemento 2 ha invece i dof 1÷12, che corrispondono a $[u_{x,2} \quad u_{y,2} \quad u_{z,2} \quad \theta_{x,2} \quad \theta_{y,2} \quad \theta_{z,2} \quad u_{x,3} \quad u_{y,3} \quad u_{z,3} \quad \theta_{x,3} \quad \theta_{y,3} \quad \theta_{z,3}]$, nei nodi i, j che corrispondono ai nodi 2, 3.

Il fatto che la matrice di rigidezza globale della struttura sia di ordine pari a quella dei singoli elementi è un caso particolare legato alle caratteristiche dell'esempio. La matrice di rigidezza degli elementi è sempre 12x12, mentre quella della struttura ha ordine pari al numero di gradi di libertà della struttura.

2.4 Assemblaggio dei carichi

Nel §1.2.1 è stato definito il vettore dei carichi equivalenti $[f_L]$, a partire dai carichi distribuiti

$$[q_L]^T = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

riferiti al sistema di riferimento locale. Se i carichi sono riferiti al sistema di riferimento globale, è necessario trasformarli prima nel sistema di riferimento locale. Nel sistema globale i carichi uniformemente distribuiti sono del tipo:

$$[q_G]^T = [q_{x,i} \quad q_{y,i} \quad q_{z,i} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad q_{x,j} \quad q_{y,j} \quad q_{z,j} \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

Nelle precedenti espressioni dei vettori dei carichi distribuiti, gli zeri corrispondono ai momenti (legati ai gradi di libertà rotazionali): eventuali momenti distribuiti lungo l'asse dell'elemento possono essere inseriti in modo analogo a quanto fatto per i carichi.

Il passaggio al vettore dei carichi in coordinate locali avviene con la seguente trasformazione:

forze equivalenti da globale a locale	$[q_L]^T = [T] [q_G]$	(2.2)
---------------------------------------	-----------------------	-------

Calcolate le forze equivalenti $[f_L]$ come indicato nel §1.2.1, prima dell'assemblaggio è necessario trasformarle nel sistema globale tramite la seguente espressione.

forze equivalenti da locale a globale	$[f_G]^T = [T]^T [f_L]$	(2.3)
Iorze equivaleriti da locale a globale	$[U_G] = [I] [U_L]$	(2.3)

Una volta trasformato in coordinate globali, il vettore delle forze generalizzate dell'elemento diventa del tipo:

$$[f_G]^T = \begin{bmatrix} q_{x,i} & q_{y,i} & q_{z,i} & m_{x,i} & m_{y,i} & m_{z,i} & q_{x,j} & q_{y,j} & q_{z,j} & m_{x,j} & m_{y,j} & m_{z,j} \end{bmatrix}$$

l carichi concentrati applicati direttamente ai nodi, se riferiti al sistema di riferimento globale, non hanno bisogno di alcuna trasformazione e vengono inseriti direttamente nel vettore $[f_G]$. Infatti le forze generalizzate che compaiono nella precedente espressione di $[f_G]$ sono le stesse presentate nella figura del §1.1.

L'assemblaggio dei vettori delle forze generalizzate dei singoli elementi $[f_G]_i$ nel vettore $[f_G]$ del sistema risolvente, avviene utilizzando la matrice LMDOF() come esemplificato nell'immagine seguente.



Anche in questo caso naturalmente il fatto che il vettore globale della struttura $[f_G]$ sia di ordine pari a quelli dei singoli elementi è un caso particolare legato alle caratteristiche dell'esempio. Il vettore $[f_G]_i$ degli elementi è sempre di ordine 12, mentre quello della struttura ha ordine pari al numero di gradi di libertà della struttura.

2.5 Soluzione del sistema di equazioni

Il sistema di equazioni viene risolto con il metodo delle colonne attive o dello skyline, introdotto da K. J. Bathe in [1]. Si tratta di un metodo derivato dall'eliminazione di Gauss, come viene di seguito spiegato facendo ampio riferimento al testo originale. Per un approfondimento sui dettagli del metodo si può fare riferimento a [10]. In questa sede si sorvola su molti aspetti teorici, per i quali si rimanda al testo originale.

2.5.1 L'eliminazione di Gauss

Dato un sistema di equazioni lineari [K][U] = [R], il metodo di Gauss prevede di combinare linearmente i coefficienti di [K] e [R] in modo da trasformare la matrice [K] in una matrice triangolare superiore, cioè con elementi nulli al disotto della diagonale principale. In questo modo, procedendo dall'ultima equazione verso la prima, è possibile ottenere i valori di tutte le incognite.

In generale per eliminare l'elemento j della riga i si deve sottrarre alla riga i la riga i-1 moltiplicata per il rapporto

$$\frac{k_{i,j}}{k_{i-1,j}}$$

Con riferimento alle prime due righe della matrice [K] riportata di seguito, per azzerare l'elemento k_{21} si deve sottrarre alla seconda riga la prima riga moltiplicata per k_{21}/k_{11} .

$[k_{11}]$	k_{12}	k_{13}	•		k_{1n}
k ₂₁	k ₂₂	k ₂₃	•	•	k_{2n}
·	•	•	•	·	·
[•	•	•	•	·	•]

Risulterà infatti:

$$k_{21} = k_{21} - k_{11} \frac{k_{21}}{k_{11}} = 0$$

Gli altri coefficienti della riga 2, compreso il termine noto, assumeranno dei valori diversi da quelli originali.

2.5.2 Formalizzazione matematica del metodo di Gauss

La riduzione della matrice [K] in una matrice triangolare superiore può essere scritta come:

$$[L]_{n-1}^{-1}\cdots \ [L]_2^{-1}[L]_1^{-1}[K] = [S]$$
(2.5)

Dove il prodotto del primo termine deve essere condotto partendo da destra, cioè prima si esegue la $[L]_1^{-1}[K]$, poi si moltiplica $[L]_2^{-1}$ per il risultato della prima moltiplicazione e via di seguito.

Nel presentare le matrici si adotta la convenzione per cui gli elementi non indicati sono nulli. La matrice $[L]_1^{-1}$ è quella che consente l'eliminazione dei coefficienti della colonna 1 a partire dalla riga 2 e vale:

La matrice $[L]_2^{-1}$ si calcola sui coefficienti k_{ij}^1 che risultano dalla prima moltiplicazione $[L]_1^{-1}[K]$, e vale:

$$[L]_{2}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & -k_{32}^{1}/k_{22}^{1} & 1 & & \\ & -k_{42}^{1}/k_{22}^{1} & 1 & & \\ & \ddots & & \ddots & \\ & & -k_{n2}^{1}/k_{22}^{1} & & & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & -l_{32} & 1 & & \\ & -l_{42} & 1 & & \\ & \ddots & & \ddots & \\ & & -l_{n2} & & & 1 \end{bmatrix}$$

La (2.5) può essere scritta in forma compatta come:

$$[L]^{-1}[K] = [S] (2.6)$$

Poiché per matrici di questo tipo l'inversa si ottiene semplicemente invertendo i segni dei termini fuori dalla diagonale, la (2.6) si può scrivere come:

 $[K] = [L]_1 [L]_2 \cdots [L]_{n-1} [S]$

e cioè:

$$[K] = [L] [S]$$
(2.7)

dove:

$$[L] = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ l_{21} & 1 & & & \\ l_{31} & l_{32} & 1 & & \\ & \ddots & & \ddots & \\ & \ddots & & \ddots & \\ l_{n1} & l_{n2} & \ddots & \ddots & l_{n,n-1} & 1 \end{bmatrix}$$

Chiamando [D] la matrice diagonale che contiene gli elementi diagonali di [S], valgono le seguenti relazioni:

$$[K] = [L] [D] [L]^T$$
(2.8)

Questa decomposizione di [K] viene sfruttata per risolvere il sistema con le seguenti espressioni:

$$[L] [V] = [R] (2.9)$$

$$[D] [L]^T [U] = [V]$$
(2.10)

dove nella (2.9) il vettore [R] dei carichi è ridotto per ottenere [V] come:

$$[V] = [L]_{n-1}^{-1} \cdots [L]_2^{-1} [L]_1^{-1} [R]$$
(2.11)

E nella (2.10) la soluzione è ottenuta con una sostituzione all'indietro:

$$[L]^{T}[U] = [D]^{-1}[V]$$
(2.12)

Combinando le (2.7) e (2.8) si ricava anche:

$$[L] [S] = [L] [D] [L]^{T}$$
$$[S] = [D] [L]^{T}$$
(2.13)

Gli elementi di $[L]^T$ sono quelli di $[L]_i^{-1}$ calcolati nei vari passaggi, cambiati di segno.

2.5.3 II metodo skyline

Con questo metodo la decomposizione $[L] [D] [L]^T$ viene condotta per colonne anziché per righe, utilizzando il vettore [A] presentato nel §1.4 e riportato anche nella figura seguente.

Nel §2.2 sono già stati definiti i vettori MAXAD() e MCOLH(), che contengono rispettivamente gli indirizzi degli elementi della diagonale principale di [*K*] e le altezze delle colonne con elementi diversi da zero. Per utilizzare le formule della soluzione del sistema con il metodo skyline, è necessario introdurre una nuova grandezza m_j, definita come il numero di riga del primo elemento diverso da zero nella colonna j della matrice [*K*]. Nella figura seguente sono riportati i valori di m_j per le colonne j=2, 4, 6, 8. I valori di m_j, con j=1÷n, definiscono la skyline.



Lavorando per colonne, invece di calcolare gli elementi di [L] come nel paragrafo precedente, vengono calcolati gli elementi di $[L]^T$. Vengono di seguito riportate le formule per calcolare gli elementi di $[L]^T$ e di [D]. Si devono prima calcolare dei coefficienti intermedi g_{ij} con le seguenti espressioni:

$$g_{mj,j} = k_{mj,j}$$

$$g_{ij} = k_{ij} - \sum_{r=m_m}^{i-1} l_{ri} g_{rj} \quad i = m_j + 1, \dots, j-1$$
(2.14)

dove: $m_m = max(m_i, m_j)$

Con i valori di g_{ij} è possibile calcolare l_{ij} e d_{ij} con:

$$l_{ij} = \frac{g_{ij}}{d_{ii}}$$
 $i = m_j, \dots, j-1$ (2.15)

$$d_{jj} = k_{jj} - \sum_{r=m_j}^{j-1} l_{rj} g_{rj}$$
(2.16)

Nelle (2.14), (2.15), (2.16) **j** = $2 \div \mathbf{n}$, dove n è l'ordine della matrice. Il valore di d_{11} è sempre uguale a k_{11} : $d_{11} = k_{11}$.

Gli elementi

I valori l_{ij} e d_{ij} così calcolati possono andare a sostituire direttamente i valori k_{ij} della matrice [K] (e nella pratica del vettore [A]), in quanto ad ogni passo i valori coinvolti nelle operazioni sono il risultato delle operazioni precedenti. Nel paragrafo precedente si è visto infatti che $[L]_2^{-1}$ opera sul risultato di $[L]_1^{-1}[K]$, cioè si esegue il prodotto: $[L]_2^{-1}([L]_1^{-1}[K])$. $[L]_3^{-1}$ opera sul risultato di $[L]_2^{-1}([L]_1^{-1}[K])$ e così via. Anche i termini intermedi g_{ij} vanno direttamente ad occupare le posizioni k_{ij} .

Per ottenere la riduzione (2.11) del vettore dei carichi [*R*], **partendo dal primo valore fisso** $V_1 = R_1$, si usa la seguente espressione:

$$V_i = R_i - \sum_{r=m_i}^{i-1} l_{ri} V_r$$
 $i = 2 \div n$ (2.17)

Gli elementi del vettore [V] vanno direttamente a sostituire quelli del vettore [R], senza bisogno di riservare apposite allocazioni di memoria.

Prima di eseguire la sostituzione all'indietro (back-substitution) si calcolano i termini $\overline{[V]} = [D]^{-1}[V]$ della (2.12) con la:

$$\overline{V_k} = \frac{V_k}{d_{kk}} \qquad k = 1 \div n \tag{2.18}$$

Infine si esegue la back-substitution con l'espressione (2.19), assegnando inizialmente al vettore degli spostamenti generalizzati i valori di $[\overline{V}]$: si pone cioè $[U] = [\overline{V}]$. L'ultima incognita è già stata determinata nel passo precedente, cioè $U_n = \overline{V}_n$. La (2.19) deve essere calcolata per **i** = **n**+2, **con passo -1**.

$$U_r = U_r - l_{ri}U_i$$
 $r = m_i \div i - 1$ (2.19)

Per ognuno dei valori dell'indice i, le (2.19) modificano i valori di U_j per j<i. Anche in questo processo i valori che vengono via via calcolati vanno a sostituire quelli corrispondenti nel vettore [*R*]. Alla fine del processo i carichi generalizzati del vettore [*R*] risultano sostituiti dagli spostamenti generalizzati [*U*], che sono le incognite del problema.

La riduzione del vettore [*R*] può essere eseguita contemporaneamente alla decomposizione della matrice [*K*], ovvero può anche essere eseguita dopo avere decomposto [*K*]. Infatti le (2.17), (2.18), (2.19) utilizzano i termini l_{ij} e d_{ii} che alla fine della decomposizione sono contenuti nella matrice [*K*].

Con questo metodo vengono calcolati direttamente i coefficienti l_{ij} di $[L]^T$ e quindi non si devono cambiare i segni dei coefficienti calcolati (nel paragrafo precedente venivano calcolati i coefficienti di $[L]_i^{-1}$ e quindi si doveva cambiare il segno per invertire la matrice).

2.6 Calcolo dei parametri di sollecitazione

Una volta trovati gli spostamenti incogniti $[u_G]$ nel sistema globale, si devono dapprima trasformare gli spostamenti nel sistema locale ricavando $[u_L]$, per poi calcolare le forze generalizzate $[f_L]$ nel sistema locale. Si devono quindi eseguire le seguenti trasformazioni:

spostamenti da globale a locale	$[u_L] = [T] [u_G]$	(2.x)
Calcolo delle forze nel sistema locale	$[f_L]^* = [K_L] [u_L]$	(2.x)

Per ottenere i parametri di sollecitazione

 $[p] = [R_{1,i} \quad R_{2,i} \quad R_{3,i} \quad M_{1,i} \quad M_{2,i} \quad M_{3,i} \quad R_{1,j} \quad R_{2,j} \quad R_{3,j} \quad M_{1,j} \quad M_{2,j} \quad M_{3,j}]$

è necessario un ulteriore passaggio, che consiste nella sottrazione dei carichi equivalenti:

$$[p] = [f_L]^* - [f_L]^*$$

dove:

- R1, R2, R3 sono gli sforzi di taglio nelle direzioni degli assi locali 1, 2, 3;

- M₁ è il momento torcente;

- M₂, M₃ sono i momenti flettenti attorno agli assi locali 2, 3.

2.7 Calcolo delle reazioni vincolari

Le reazioni vengono calcolate con un procedimento analogo a quello descritto nel paragrafo precedente, utilizzando però le matrici di rigidezza riferite al sistema globale. Per ogni elemento i:

$$[f_G]_i^* = [K_G]_i [u_G]$$

dove di $[u_G]$ vengono utilizzati gli spostamenti generalizzati che competono ai nodi di estremità dell'elemento. Anche in questo caso devono essere sottratti i carichi equivalenti:

$$[f_G]_i = [f_G]_i^* - [f_L]$$

Anche di $[f_L]$ vengono utilizzate le forze generalizzate che competono ai nodi di estremità dell'elemento.

Le reazioni ad ogni nodo vengono infine ottenute sommando i contributi che derivano da tutti gli elementi che vi afferiscono.

La parte dinamica necessaria per la determinazione i modi di vibrare dei pali per antenne è stata appositamente implementata nel 2020. Il metodo adottato è quello dell'iterazione nel sottospazio, come pubblicato in [1]. Il listato originale in FORTRAN è stato tradotto in vb.net, linguaggio utilizzato per il programma PaliAntenne. Nel manuale di verifica vengono riportati alcuni dettagli delle procedure.

L'analisi modale richiede la soluzione del problema agli autovalori K $\Phi = \lambda M \Phi$, che conduce alla determinazione del vettore λ contenente gli autovalori e della matrice Φ contenente gli autovettori.

3.1 Calcolo delle matrici di massa nel sistema di riferimento locale

Come per le matrici di rigidezza, anche per le matrici di massa è comodo impostare il problema nel sistema di riferimento locale, in quanto è semplice distinguere le caratteristiche geometrico-statiche della sezione dell'elemento nelle direzioni principali.

Il sistema di riferimento locale è determinato come spiegato nel §1.2. Nella figura seguente vengono mostrati gli spostamenti generalizzati nel caso di un elemento verticale.



Le masse considerate nella soluzione dell'autoproblema sono quelle strutturali definite dalla densità di massa e all'area della sezione trasversale degli elementi.

Le masse di eventuali carichi concentrati ai nodi, o di eventuali carichi distribuiti linearmente lungo gli elementi, vengono aggiunte alla matrice di massa globale considerando i pesi divisi per l'accelerazione di gravità.

3.1.1 Matrice di massa distribuita (consistent)

La matrice di massa distribuita di un elemento è la seguente:

$$[M_L] = \begin{bmatrix} [M_{jj}] & [M_{jk}] \\ [M_{kj}] & [M_{kk}] \end{bmatrix}$$
(3.1)

Detti ρ la densità di massa dell'elemento, *A* l'area della sezione trasversale, *L* la lunghezza, J_t il momento di inerzia torsionale, le sottomatrici sono le seguenti:

$$[M_{jj}] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & & & & & \\ & 156 & & & & 22L \\ & & 156 & & -22L & & \\ & & & 140\frac{J_t}{A} & & & \\ & & & -22L & & 4L^2 & \\ & & & & & 22L & & & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$[M_{kk}] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & & & -22L \\ & 156 & & 22L & \\ & & 140\frac{J_t}{A} & & \\ & & 22L & & 4L^2 \\ & & -22L & & & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_{kj} \end{bmatrix} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 70 & & & & & & 13L \\ & 54 & & -13L & & \\ & & 70\frac{J_t}{A} & & & \\ & & 13L & & -3L^2 & \\ & -13L & & & & -3L^2 \end{bmatrix}$$

$$\left[M_{jk}\right] = \left[M_{kj}\right]^T$$

Gli elementi non indicati nelle matrici sono nulli.

3.1.2 Matrice di massa concentrata (lumped)

Con riferimento all'espressione (3.1) le sottomatrici della matrice di massa concentrata (scelta di default del programma) sono le seguenti:

$$\left[M_{jk}\right] = \left[M_{kj}\right] = 0$$

3.2 Memorizzazione della matrice di massa globale della struttura

La matrice di massa globale viene memorizzata come quella di rigidezza globale, cioè in forma compatta secondo il metodo delle colonne attive descritto nel §1.4. Nella figura seguente è schematizzato il meccanismo di memorizzazione della matrice di massa globale.



Nel programma il vettore [*B*] viene chiamato **GLOBM**(Ind), con Ind che va da 1 a NDOFT. L'individuazione degli elementi di questa matrice in funzione degli indici di riga e colonna è lo stesso descritto per la matrice di rigidezza globale.

3.3 Memorizzazione delle matrici di massa degli elementi

Le matrici di massa di ciascun elemento, trasformate nel sistema di riferimento globale, vengono memorizzate in forma compatta in un array monodimensionale [C] seguendo lo stesso algoritmo presentato per le matrici di rigidezza. La matrice di 12 x 12 elementi diventa un vettore di 78 elementi.



Nel programma il vettore [*C*] viene chiamato **MassC**(Ind), con Ind che va da 1 a 78.

L'individuazione degli elementi di questa matrice in funzione degli indici di riga i e colonna j avviene così: dati (i, j), con j>i, l'indice m del vettore [*C*] vale:

$$m = [(j - i) + 1] + \sum_{k=0}^{i-2} (12 - k)$$

3.4 Assemblaggio delle matrici di massa

La numerazione dei gradi di libertà, e il calcolo degli indirizzi degli elementi della diagonale principale sono esattamente gli stessi già descritti nei §2.1 e §2.2.

La trasformazione delle matrici di massa di ciascun elemento dal sistema di riferimento locale a quello globale avviene con la seguente espressione.

matrice di massa da locale a globale	$[M_G] = [T]^T [M_L] [T]$	(3.2)
--------------------------------------	---------------------------	-------

Per i dettagli dell'assemblaggio, del tutto analogo a quello delle matrici di rigidezza, si rimanda al §2.3.

3.5 Calcolo delle frequenze e dei periodi propri

Per i problemi di tipo strutturale è necessario ricavare le frequenze **f** ed i periodi **T**, legati agli autovalori dalle seguenti relazioni:

Frequenza circolare	Frequenza	Periodo
fc (rad/s)	f (cicli/s)	T (s)
$\mathbf{f}\mathbf{c}^{\mathbf{T}} = \left[\sqrt{\lambda_1} \sqrt{\lambda_2} \ldots \sqrt{\lambda_n}\right]$	$\mathbf{f} = \left[\frac{fc_1}{2\pi} \ \frac{fc_2}{2\pi} \ \dots \ \frac{fc_n}{2\pi}\right]$	$\mathbf{T} = \left[\frac{1}{fc_1} \ \frac{1}{fc_2} \ \dots \ \frac{1}{fc_n}\right]$

Anche della sezione dinamica verranno prodotti alcuni esempi di validazione dell'apposita sezione.

Poiché la normativa vigente [4] al § 7.3.3.1 richiede che il numero di modi da considerare sia tale da avere una massa partecipante superiore allo 85%, viene di seguito spiegata la procedura utilizzata.

Per ogni modo j vengono dapprima calcolati i fattori di partecipazione modale γ_i :

$$\gamma_j = \frac{\phi_j^T M}{\phi_i^T M \phi_j}$$

Con i fattori di partecipazione modale si calcola la massa partecipante M_i per il modo j:

$$M_j = \frac{\gamma_j^2 \ (\phi_j^T \ M \ \phi_j)}{m_x}$$

dove: ϕ_i è l'autovettore del modo j (contiene gli spostamenti del modo);

M è il vettore delle masse nodali;

 m_x è la massa totale.

Se la somma delle masse partecipanti per ciascuno dei modi calcolati risulta > 85% della massa totale, il procedimento può continuare e vengono calcolate le forze di piano da applicare ai nodi. La forza sismica F_{ji} da applicare al nodo i, relativa al modo j, vale:

$$F_{ji} = M_i a_j = M_i [\phi_{ij} \gamma_j S_d(T_j)]$$

dove: M_i è la massa al nodo i;

 a_i è l'accelerazione ottenuta dallo spettro di risposta di progetto S_d per il periodo T_i ;

 ϕ_{ij} è lo spostamento del nodo i, relativo al modo j

I taglianti di piano V_{ji} , per ogni modo di vibrare j, si ottengono sommando le forze sismiche così calcolate, dal piano i considerato alla sommità della struttura (nodo n):

$$V_{ji} = \sum_{i=i}^{n} F_{ji}$$

Nel già citato § 7.3.3.1 della normativa vigente [2] viene richiesto che per ogni singolo modo j, i taglianti al piano k vengano calcolati utilizzando una combinazione quadratica completa (C.Q.C.). Nel caso vengano considerati m modi di vibrare, il tagliante V_k al piano k vale:

$$V_k = \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \rho_{ij} V_{ik} V_{jk}\right)^{0}$$

dove: ρ_{ij} è il coefficiente di correlazione tra il modo i e il modo j, calcolato come:

$$\rho_{ij} = \frac{8\,\xi^2\,\,\beta_{ij}^{3/2}}{\left(1 + \beta_{ij}\right)\,\left[\left(1 - \beta_{ij}\right)^2 + 4\,\xi^2\,\beta_{ij}\right]}$$

 ξ è lo smorzamento viscoso dei modi i, j

 β_{ij} è il rapporto tra l'inverso dei periodi di ciascuna coppia i-j di modi ($\beta_{ij} = \frac{T_j}{T_i}$)

4. Valutazione delle azioni e degli effetti del vento

Le azioni del vento vengono calcolate seguendo strettamente quanto indicato nelle CNR-DT 207 R1/2018: "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni". ROMA – CNR 06 febbraio 2019.

Nel manuale di verifica viene presentato e commentato il calcolo dell'esempio 4.12 delle norme citate.

Si riportano di seguito delle considerazioni relative ad alcune interpretazioni della norma.

4.1 Azioni trasversali

Le CNR-DT 207 definiscono le azioni dinamiche trasversali dovute alla turbolenza del vento nell'Appendice O, mentre definiscono le azioni trasversali dovute al distacco dei vortici in risonanza con uno o più modi di vibrazione nell'Appendice Q.

Nel caso in cui le azioni trasversali dovute al distacco dei vortici in risonanza risultino elevate, cioè nel caso in cui il momento flettente alla base del palo per effetto di queste azioni sia maggiore di quello calcolato per effetto delle azioni dinamiche trasversali dovute alla turbolenza del vento, il programma avverte l'utente con la seguente finestra.

Problemi di risonanza trasversale dovuta al vento

Interrompere le verifiche e modificare i parametri (*) O (scelta cons	
	sigliata)
Proseguire con le verifiche utilizzando le forze calcolate 🛛 🔘	
Proseguire con le verifiche trascurando le forze trasversali O (SCONSIGL dovute al distacco dei vortici	.IATO)

Questa situazione deve mettere in allarme il progettista, secondo quanto indicato nelle norme CNR-DT 207.

Se l'utente decide di proseguire comunque, nella condizione di carico del vento (la numero 3 nel programma) viene considerata l'azione trasversale (in direzione y) più gravosa. L'azione trasversale più gravosa solitamente è quella dovuta alla risonanza trasversale legata al primo modo di vibrare, in quanto il secondo (distinto) modo di vibrare ha una forma con inversione di segno. Nella relazione di calcolo del vento viene indicata l'azione trasversale utilizzata nelle verifiche.

Nella direzione x viene sempre considerata l'azione dinamica longitudinale del vento, calcolata come indicato nell'Appendice L.

4.2 Masse strutturali e masse dei pesi applicati

Questo paragrafo è utile per evitare di incorrere in errori trattando le forze con unità di misura diverse da quella naturale che è il Newton.

Si riporta di seguito un estratto del "Manuale di Ingegneria Civile" edito nel 1982 da Edizioni Scientifiche Cremonese – Roma, dove le forze sono espresse in kg_f.

5.1.4. UNITÀ DI MISURA. GRANDEZZE FONDAMENTALI. — Il presente capitolo (come i precedenti) è scritto con riferimento al sistema tecnico kilogrammo-forza (kgf, o semplicemente kg), metro (m), secondo (sec). Da notare in particolare l'eguaglianza:

(5.3) massa $m = \frac{\text{forza peso } P \text{ (espressa in kgf)}}{\text{accelerazione di gravità } g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-2}}$

P. es. la massa specifica (massa per unità di volume o densità) μ , che comparirà in molte formule in seguito, è uguale a:

(5.4) $\mu = \frac{\text{peso specifico (in kgf \cdot m^{-3})}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-2}}$



Nell'immagine precedente, tratta dal "Manuale di Ingegneria Civile", sono state aggiunte in blu le unità di misura da utilizzare nella formula per il calcolo delle frequenze, e in rosso l'accelerazione di gravità g. Le forze, espresse in kg_f, sono state evidenziate con il pedice "f". Il fatto di chiamare con lo stesso nome forze e masse può portare ad equivoci ed errori che non si presenterebbero utilizzando per le forze i Newton.

La formula sopra riportata per la pulsazione può essere scritta in termini di frequenza come:

$$n_1 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{3.5156}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E J}{\mu A}} = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E J}{\mu A}}$$

chiamando $m = \mu A$ la massa per unità di lunghezza, la formula diventa:

$$n_1 = \frac{1.875^2}{2\pi \ l^2} \sqrt{\frac{E \ J}{m}}$$

Questa espressione è uguale alla (I.2) delle norme CNR-DT 207, riportata nell'estratto seguente.

CNR-DT 207 R1/2018

I.2.2 Frequenze di oscillazione flessionale per strutture snelle

La frequenza naturale dell'*i*-esimo modo di oscillazione flessionale per strutture snelle (schematizzabili secondo travi con luce libera prevalente rispetto alle dimensioni della sezione trasversale) dotate di massa e inerzia uniforme, è data dalla espressione:

$$n_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_f}{m}}$$
(I.2)

dove:

l E è la lunghezza della struttura;

è il modulo di elasticità del materiale;

Jf è il momento di inerzia flessionale della sezione trasversale della struttura, calcolato rispetto all'asse perpendicolare al piano di inflessione;

è la massa per unità di lunghezza;

λ_i è un coefficiente che dipende dalle condizioni di vincolo (Tabella I.I).

Vincolo	λ1	λ2	λ3	λ4	$\lambda_i \ (i \ge 4)$
Cerniera - cerniera	π	2π	3π	4π	iπ
Incastro – incastro	4,730	7,853	10,996	14,137	$(2i+1)\pi/2$
Incastro – cerniera	3,927	7,069	10,210	13,352	$(4i+1)\pi/4$
Incastro – sezione libera	1,875	4,694	7,855	10,996	$(2i-1)\pi/2$

Tabella I.I. Coefficienti λ_i .

Esprimendo le dimensioni strutturali in m, il modulo elastico in N/m², la massa per unità di lunghezza in kg/m, la frequenza n_i è ottenuta in Hz.

Le due espressioni, pur essendo identiche, richiedono in realtà l'inserimento dei dati con diverse unità di misura.

Nell'espressione del Manuale di Ingegneria Civile si devono inserire il modulo elastico in kg_f/m^2 e la massa in $kg_f/(g m)$.

Nell'espressione delle CNR-UNI viene esplicitamente indicato di inserire il modulo elastico in N/m^2 e la massa in kg_m/m.

Anche qui si evidenzia con il pedice m la massa, solo per evitare equivoci con l'espressione del Manuale di Ingegneria Civile dove le forze sono espresse in kgf.

Con il seguente esempio si calcolano i valori della parte che coinvolge le grandezze E, μ nella radice delle espressioni fornite dal Manuale di Ingegneria Civile e dalle norme CNR-UNI. Si considera per comodità che l'accelerazione di gravità valga 10 m/s², e che l'area valga 1 m².

Unità kg _f , m	$E = 2.1E10 \text{ kg}_{\text{f}}/\text{m}^2$
	$\gamma = 7850 \text{ kg}_{\text{f}}/\text{m}^3$
	μ A = γ / g * 1= 785 kg _f /(g m ³) = kg _m / m ³
	$\sqrt{\frac{E}{\mu A}} = \sqrt{\frac{2.1E10}{785}} = 5172.1942$

Unità N, m E

 $E = 2.1E10 g = 2.1E11 N/m^2$

 $\gamma = 7850 \text{ g} = 78500 \text{ N/m}^3$ $\mu \text{A} = \gamma / \text{g} * 1 = 7850 \text{ kg}_{\text{m}} / \text{m}^3$ $\sqrt{\frac{E}{\mu A}} = \sqrt{\frac{2.1E11}{7850}} = 5172.1942$

Si vede quindi che le due espressioni dimensionali, nonostante utilizzino unità di misura diverse, portano (naturalmente) agli stessi risultati.

Se si esegue il calcolo delle frequenze con il metodo degli elementi finiti le unità di misura possono essere scelte liberamente, l'importante è che siano coerenti fra loro. Le caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione sommitale della ciminiera dell'esempio 4.11 delle CNR-DT 207 potrebbero per esempio essere le seguenti:

				$\mu = \gamma / g$	
E = 2.1E10 (kg _f /m²)	A = 0.0953 (m ²)	J = 0.1713 (m ⁴)	γ = 7850 (kg _f /m ³)	$\mu = 800.477 \\ \left(\frac{kg_m}{9.80665 \ m^3}\right)$	$m = \mu A = 76.28$ $\left(\frac{kg_m}{9.80665 \ m}\right)$
E = 2.06E8 (kN/m ²)	uguale	uguale	γ = 76.98 (kN/m³)	$\mu = 7.85$ $\left(\frac{10^3 kg_m}{m^3}\right)$	$m = \mu A = 0.7481$ $\left(\frac{10^3 kg_m}{m}\right)$
E = 2.06E11 (N/m ²)	uguale	uguale	γ = 76980 (N/m³)	$\mu = 7850$ $\left(\frac{kg_m}{m^3}\right)$	$m = \mu A = 748.1$ $\left(\frac{kg_m}{m}\right)$

Tabella I - accelerazione di gravità $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$.

				$\mu = \gamma / g$	
E = 2.1E10 (kg _f /m²)	A = 0.0953 (m²)	J = 0.1713 (m ⁴)	$\gamma = 7850$ (kg _f /m ³)	$\mu = 785$ $\left(\frac{10^{-1} kg_m}{m^3}\right)$	$m = \mu A = 74.81$ $\left(\frac{10^{-1} kg_m}{m}\right)$
E = 2.1E8 (kN/m ²)	uguale	uguale	γ = 78.50 (kN/m³)	$\mu = 7.85$ $\left(\frac{10^3 kg_m}{m^3}\right)$	$m = \mu A = 0.7481$ $\left(\frac{10^3 kg_m}{m}\right)$
E = 2.1E11 (N/m ²)	uguale	uguale	γ = 78500 (N/m³)	$\mu = 7850$ $\left(\frac{kg_m}{m^3}\right)$	$m = \mu A = 748.1$ $\left(\frac{kg_m}{m}\right)$

Tabella II - accelerazione di gravità $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Le grandezze E, γ , μ , m assumono valori diversi in funzione delle diverse unità di misura. Resta invariato, a causa della definizione delle forze in N o kg_f, il fatto che la massa specifica (o densità di massa) μ ha lo stesso valore del peso per unità di volume espresso in kg_f.

5. Verifiche del palo

Le verifiche delle sezioni del palo vengono condotte con riferimento a quanto indicato in [8], cioè considerando uno spessore efficace opportunamente ridotto al fine di considerare i fenomeni id instabilità locale caratteristici delle sezioni cave in parete sottile. Il metodo è quello proposto dal codice americano AISI S100-2007: "North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members" e dal relativo COMMENTARY.

La seguente figura mostra il comportamento di questo tipo di strutture: sono definite le tre zone 1, 2, 3.



Nelle tre zone valgono le seguenti relazioni:

1.	$\frac{D}{t} > 0.441 \frac{E}{F_y}$	$\frac{F_{ult}}{F_y} = 0.33 \left(\frac{E}{F_y}\right) \left(\frac{t}{D}\right)$
2.	$0.112 \ \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} \le 0.441 \frac{E}{F_y}$	$\frac{F_{ult}}{F_y} = 0.037 \left(\frac{E}{F_y}\right) \left(\frac{t}{D}\right) + 0.667$
3.	$\frac{D}{t} \le 0.112 \frac{E}{F_y}$	$\frac{F_{ult}}{F_y} = 1$

Il metodo prevede di considerare per tutte le verifiche (a compressione e a flessione) una sezione equivalente avente lo stesso diametro medio D_m di quella effettiva, con uno spessore ridotto t_{eff} pari al rapporto $\frac{F_{ult}}{F_v}$.

Nel programma le caratteristiche degli elementi del modello F.E.M. sono calcolate a metà degli stessi, mentre le verifiche sono fatte sui nodi con le corrispondenti caratteristiche equivalenti.

Con riferimento al § 4.2.4.1.2.9 delle NTC 2018, di cui si riporta di seguito uno stralcio, poiché le sezioni dei pali in acciaio sono di classe 4, le verifiche vengono condotte con riferimento alla resistenza elastica (verifica tensionale) e utilizzando le proprietà geometriche efficaci calcolate come sopra esposto.

4.2.4.1.2.9 Flessione, taglio e sforzo assiale

- .
- :
- ÷

Per le sezioni di classe 3 e classe 4 le verifiche devono essere condotte con riferimento alla resistenza elastica (verifica tensionale); per le sezioni di classe 4 si possono utilizzare le proprietà geometriche efficaci della sezione trasversale.

6. Verifiche del plinto

Il modulo di verifica dei plinti è in grado di calcolare le tensioni trasmesse al terreno da plinti di forma rettangolare, con la possibile presenza di un dado. Di seguito viene riproposta l'immagine con le possibili tipologie di plinto previste dal programma.



I plinti possono essere di tipo "alto" o "basso", in funzione del rapporto fra le dimensioni trasversali e l'altezza. In particolare, con riferimento alla seguente figura, si ha:

- b / h \leq 1: plinto alto o tozzo ($\alpha \geq 45^{\circ}$)
- b / h > 1: plinto basso o snello (α < 45°)



I due tipi di suola vengono armati e verificati in modo diverso, come verrà spiegato nel seguito.

6.1 Combinazioni di carico

Le verifiche del plinto vengono condotte con riferimento all'approccio 2 definito nel §2.6.1 delle NTC 2018, e quindi con le combinazioni di carico definite nel § 1.7 del Manuale d'uso, con i coefficienti parziali per le azioni riportati di seguito.

Visualizzazione dei coefficienti di combinazione				- [⊐ ×	
		Metodo di calcolo: D.M. 17.01.201	8			
Coefficienti p	parziali					
STR	G1: perm. strutt. 1.3	G2: perm. non strutt. 1.5	Q: variabili 1.5	(A1 Tab	. 2.6.1)	
EQU 1	G1: perm. strutt. 0.9	G2: perm. non strutt. 0.8	Q: variabili 1.5	(EQU Ta	ab. 6.2.I)	
EQU 2	G1: perm. strutt.	G2: perm. non strutt. 0.8	Q: variabili 1.3	(A2 Tab	. 6.2.I)	

Nella precedente figura compaiono anche i coefficienti parziali da utilizzare per le verifiche al ribaltamento del plinto, denominate EQU 1 e EQU 2.

La combinazione EQU 1 usa i coefficienti EQU tratti dalla Tab. 2.6.I delle NTC 2018, in ottemperanza a quanto indicato nel § 2.6.1: "*Per le verifiche nei confronti dello stato limite*

ultimo di equilibrio come corpo rigido (EQU) si utilizzano i coefficienti γ_F riportati nella colonna EQU della Tabella 2.6.I." Gli stessi valori sono indicati anche nella Tab. 6.2.I e sono prescritti per lo stato limite di perdita dell'equilibrio nel § 6.2.4.1 relativo alla progettazione geotecnica.

La combinazione EQU 2 usa i coefficienti A2 tratti dalla Tab. 6.2.I delle NTC 2018, in ottemperanza a quanto indicato nel § 6.4.2.1 relativo alle fondazioni superficiali: "*La verifica di stabilità globale deve essere effettuata, analogamente a quanto previsto nel § 6.8, secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tab. 6.8.I per le resistenze globali.*

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate applicando la combinazione (A1+M1+R3) di coefficienti parziali prevista dall'Approccio 2, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I."

Dei coefficienti parziali per i parametri del terreno riportati nella citata Tab. 2.6.II, interessa nel caso in esame solo γ_{γ} = 1.0.

Il coefficiente γ_R della tabella 6.8.1 vale 1.1.

Le **verifiche geotecniche** del terreno sono quelle che nella precedente citazione sono chiamate "*Le rimanenti verifiche* …", e vengono condotte con i coefficienti (A1+M1+R3) dell'approccio 2. I coefficienti A1 sono quelli riportati nella riga STR della figura precedente, i coefficienti M1 sono pari a 1, mentre il coefficiente R3 per il calcolo della resistenza R_d del terreno è pari a 2.3. Il programma PaliAntenne non esegue il calcolo geotecnico della resistenza R_d del terreno, e questo valore deve essere fornito al programma come dato di input.

6.2 Coefficienti e parametri per le verifiche agli stati limite

Con riferimento al § 4.1.2 delle NTC 2018, gli altri coefficienti parziali e le altre grandezze utilizzati per le verifiche strutturali sono i seguenti:

$\gamma_{\rm S} = 1.15$	per il calcolo di f_{yd} = f_{yk} / γ_S
$\alpha_{cc} = 0.85; \gamma_{C} = 1.5$	per il calcolo di f_{cd} = $\alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_{C}$

Con riferimento al §11.2.10.2 delle NTC 2018, la resistenza a trazione del calcestruzzo viene calcolata come:

$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3}$	se f _{ck} ≤ 60 MPa
$f_{ctm} = 2.12 \ln[1 + f_{cm}/10]$	se f _{ck} > 60 MPa
$f_{ctk} = 0.7 \cdot 1.2 \cdot f_{ctm}$	(0.7 passa al valore caratteristico corrispondente al frattile del 5%, 1.2 passa alla resistenza a trazione per flessione)

Nelle combinazioni SLU e SLE vengono controllate le tensioni normali e tangenziali considerando quanto indicato nel § 4.1.11.1 delle NTC 2008 per i **getti massicci**, con i seguenti valori limite di riferimento:

 $\sigma_{\text{Cmax},1} = 0.3 \cdot f_{\text{ck}}$

 $\tau_{\text{Cmax},1} = 0.25 \cdot f_{\text{ctk}}$

Nella combinazione SLE rara 1 (combinazione caratteristica) vengono controllate le tensioni normali nel calcestruzzo e nell'acciaio considerando quanto indicato nel § 4.1.2.2.5 delle NTC 2018, con i seguenti valori limite di riferimento:

 $\sigma_{\text{Cmax,2}} = 0.6 \cdot f_{\text{ck}}$

 $\sigma_{\text{Smax,2}} = 0.8 \cdot f_{\text{yk}}$

Infine il valore della deformazione dell'acciaio al limite elastico vale:

 $\varepsilon_{sYd} = f_{yd} / E_s$

dove Es è il moduilo di elasticità dell'acciaio.

6.3 Determinazione delle tensioni sul terreno

Il calcolo delle tensioni sul terreno viene svolto schematizzando il terreno con un letto di molle indipendenti, e considerando inoltre il plinto infinitamente rigido.

Nella figura seguente, tratta da una videata del programma, sono indicate la geometria del plinto e i parametri di sollecitazione, che agiscono in corrispondenza della sommità del plinto (comprendendo l'eventuale bicchiere o dado).

Le forze taglianti comportano un incremento dei momenti in corrispondenza della base del plinto.

Lo sforzo normale viene automaticamente corretto aggiungendo il peso proprio del plinto.

Se vengono definite delle eccentricità del carico, inserendo valori non nulli per e_x o e_y , il programma corregge automaticamente i momenti alla base del plinto.



Una volta determinati i parametri di sollecitazione totali riferiti alla base del plinto, nel caso generale in cui si abbia una parzializzazione della sezione reagente, è necessario risolvere le equazioni di equilibrio:

$$N = \int_{S} \sigma_{t} dS$$
$$M_{xx} = \int_{S} \sigma_{t} y dS$$
$$M_{yy} = \int_{S} \sigma_{t} x dS$$

Il programma risolve il sistema con un procedimento iterativo, considerando che il terreno non possa reagire a trazione.

Nell'immagine seguente è rappresentata una possibile distribuzione delle tensioni al disotto del plinto.



6.4 Dimensionamento e verifica delle armature

6.4.1 Plinti bassi

Il plinto viene suddiviso in quattro mensole, come indicato nella figura seguente. In accordo con quanto indicato in [1], le misure L_1 , L_2 valgono:

$$L_1 = (A - a) / 2 + 0.15 a$$

 $L_2 = (B - b) / 2 + 0.15 b$


Nella figura seguente sono schematizzate le grandezze coinvolte nel calcolo di una delle quattro mensole di lunghezza L. Le tensioni in gioco sono:

 σ_1 = tensione all'estremità della mensola;

 σ_2 = tensione all'attacco della mensola;

p = tensione dovuta al peso proprio del plinto.

La sezione del plinto è sollecitata dal momento flettente M e dal taglio T:



Detta h l'altezza utile della sezione e f_{yd} la resistenza di calcolo dell'acciaio, le armature individuate dal progetto automatico sono calcolate con la seguente espressione approssimata:

$$A_a = \frac{M}{0.9 \ h \ f_{vd}}$$

La verifica viene invece condotta rigorosamente considerando il rapporto fra il momento agente e il momento resistente.

Oltre alle verifiche agli stati limite vengono sempre calcolate anche le tensioni sul calcestruzzo e sull'acciaio. Queste vengono confrontate con i seguenti valori:

• per tutte le combinazioni:

limiti tensioni per getti massicci secondo il §4.1.11.1 NTC 2008:

$$\begin{split} \sigma_{\text{c,max}} &\leq 0.30 \text{ f}_{\text{ck}} \\ \tau_{\text{c,max}} &\leq 0.25 \text{ f}_{\text{ctk}} \end{split}$$

• per la combinazione caratteristica (SLE rara 1):

limiti tensioni secondo il §4.1.2.2.5 NTC 2018: $\sigma_{c,max} \leq 0.60 f_{ck}$ $\sigma_{s,max} \leq 0.80 f_{yk}$

Disposizione delle armature per plinti bassi

Nel caso di plinti bassi il programma prevede di infittire le armature nella zona centrale di ampiezza pari alla larghezza del pilastro più due volte l'altezza del plinto, come indicato nella figura seguente.

Nelle zone rade i ferri sono posti ad interasse non maggiore di quello indicato come massimo dall'utente (v. tab 2 – interassi delle barre); nelle zone infittite l'interasse viene dimezzato.



6.4.2 Plinti alti

Per i plinti alti o tozzi si fa riferimento a meccanismi puntone-tirante (strut and tie): il puntone compresso viene fornito dal calcestruzzo, mentre l'armatura costituisce il tirante.

Nella figura seguente sono riportati 2 schemi con cui è possibile calcolare gli sforzi sulle armature: il primo schema a sinistra è tratto da [1] ed è meno cautelativo, il secondo schema si può trovare in letteratura con alcune varianti per il valore dell'altezza del cateto verticale.



Con le ipotesi rappresentate nello schema di sinistra, imponendo l'equilibrio alla rotazione attorno al punto M si ottiene:

 $T h = \frac{N}{4} \left(\frac{A}{3} - \frac{a}{3}\right)$

da cui:

$$T = \frac{N(A-a)}{12h}$$
 (2.2.1)

Con le ipotesi rappresentate nello schema di destra risulta invece:

$$T \ 0.85 \ h = \frac{N}{2} \left(\frac{A}{4} - \frac{a}{4}\right)$$

da cui:

$$T = \frac{N (A - a)}{6.8 h}$$
(2.2.2)

Le due ipotesi portano a differenze di sforzo attorno al 60%. Nel programma viene utilizzata l'ipotesi più cautelativa, che nel caso più generale di carico eccentrico, è rappresentata nella figura seguente.



Si considera l'emitrapezio di sinistra, di dimensioni maggiori. La posizione x_g del baricentro e la risultante R_1 hanno i seguenti valori:

$$x_g = \frac{A}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$$
$$R_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \frac{A}{2} \cdot B$$

Imponendo l'equilibrio alla rotazione attorno al punto M si ottiene:

$$T \ 0.85 \ h = R_1 (x_g - 0.25 \ a)$$

da cui:

$$T = \frac{R_1 \left(x_g - 0.25 \, a \right)}{0.85 \, h}$$

L'area di acciaio risulta pari a:

$$A_a = \frac{T}{f_{yd}}$$

Il programma calcola sempre anche l'armatura come se il plinto fosse snello, e poi utilizza la maggiore delle due armature ottenute.

6.5 Verifica a punzonamento

Le verifiche a punzonamento vengono condotte secondo quanto indicato in [4] e [9]. Vengono preliminarmente calcolate le seguenti grandezze:

d	media delle altezze utili nelle direzioni x, y
$v_{\text{Rd,max}} = 0.4 \cdot 0.5 \text{ f}_{\text{cd}}$	resistenza unitaria massima sul perimetro del pilastro (espressione valida per calcestruzzi di classe non superiore alla C70/85)
$k = \sqrt{\frac{200}{h}} \le 2$	fattore di scala, da calcolare inserendo l'altezza utile in mm
$V_{\rm min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$	Limite inferiore della resistenza al punzonamento
p _{medio}	Percentuale di armatura presente entro la distanza $c = 2d$ dal bordo del pilastro. Da notare che se il plinto è snello questa è proprio la distanza alla quale il programma fa arrivare l'infittimento delle armature.
e _x , e _y	eccentricità del carico verticale nelle direzioni x, y, riferite ad una combinazione di carico (il calcolo viene ripetuto per tutte le combinazioni)

Calcolate queste grandezze, il programma considera diversi perimetri di verifica, del tipo rappresentato nella figura seguente. Il primo perimetro coincide con quello del pilastro, l'ultimo è posto a distanza c = 2d dal bordo del pilastro.

Per un generico perimetro di verifica valgono le seguenti relazioni:

misura del perimetro:

u = 2 (a + b) + 2 π c

area racchiusa:

 $A_p = a b + \pi c^2 + 2 c (a + b)$



In corrispondenza del perimetro di verifica viene calcolato, nelle due direzioni, il valore minimo $\sigma_{t,min}$ (a favore della sicurezza) della tensione trasmessa al terreno.

Si calcolano poi:

$$\beta = 1 + 1.8 \sqrt{\left(\frac{e_x}{d_y}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{d_x}\right)^2}$$

 $p_p = \gamma_{v,cls} A_p H_p$

(peso proprio del plinto)

dove $\gamma_{v,cls}$ è il peso di volume del calcestruzzo e H_p è l'altezza del plinto.

$$V_{\text{Rd,c}} = \frac{0.18}{\gamma_c} k (100 \ \rho_{medio} \ f_{ck})^{1/3} \frac{2a}{c} \ge V_{\text{min}} \quad . \frac{2d}{c}$$

dove γ_c è il coefficiente parziale di sicurezza per il calcestruzzo, pari a 1.5, e f_{ck} è la resistenza caratteristica cilindrica a compressione.

$$v_{Ed} = \frac{\beta (V_{Ed} + p_p - \sigma_{t,min} A_p)}{u \, d}$$

 v_{Ed} è la tensione di punzonamento, denominata $v_{Ed,0}$ lungo il perimetro u_0 del pilastro, e $v_{Ed,1}$ lungo il generico perimetro critico u_1 .

In assenza di armature a taglio-punzonamento devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

 $\nu_{\text{Ed},0} \leq \nu_{\text{Rd},\text{max}}$

 $\nu_{\text{Ed},1} \leq \nu_{\text{Rd},c}$

Il valore $v_{Ed,1}$ è il massimo che si trova per tentativi al variare della distanza c dal bordo del pilastro da 0 (zero) a 2d.

7. Verifiche delle flange

Per la verifica dei collegamenti flangiati viene fatto riferimento alle NTC 2018 [4] per le verifiche dei bulloni e per le verifiche a rifollamento e a punzonamento della flangia; gli spessori delle piastre e dei fazzoletti di irrigidimento vengono invece verificati secondo la teoria di Quattordio [7].

I parametri di sollecitazione sono calcolati con l'analisi F.E.M. e non possono essere modificati.

La flangia viene schematizzata con una poligonale esterna ed una interna, ciascuna con 50 vertici. L'approssimazione così ottenuta è stata ritenuta accettabile. Nella figura seguente si vede un esempio di flangia con diametro esterno pari a 1213 mm: questa misura viene rispettata in una direzione, mentre nell'altra direzione risulta un'approssimazione dovuta alla discretizzazione con una poligonale.

Le sollecitazioni sui bulloni e sull'acciaio della flangia vengono determinate con un calcolo iterativo che trova la posizione dell'asse neutro tale da garantire l'equilibrio della sezione soggetta a pressoflessione, con l'ipotesi del mantenimento della sezione piana.



Nel caso si scelga di irrigidire la flangia con delle nervature, devono essere rispettati alcuni vincoli:

- detto n_s il numero di settori definiti dai fazzoletti di irrigidimento e n_b il numero dei bulloni, il rapporto n_s / n_b deve essere un numero intero;
- non possono esserci più di 2 bulloni in ogni settore delimitato dai fazzoletti di irrigidimento: se ci sono più di 2 bulloni per settore le verifiche vengono svolte come se gli irrigidimenti non ci fossero.

Prima di procedere alle verifiche a resistenza dei bulloni, viene effettuato il controllo delle distanze dai bordi e degli interassi dei fori per i bulloni secondo la Tab. 4.2 XIV delle NTC 2018.

verifica a trazione e taglio dei bulloni

Vengono utilizzate le seguenti espressioni tratte dalle NTC 2018:

Resistenza di progetto a taglio dei bulloni:

$F_{v,Rd} = 0.6 \; f_{tbk} \; A_{res} \; / \; \gamma_{M2}$	per bulloni di classe 4.6, 5.6 e 8.8	[4.2.63]
$F_{v,Rd} = 0.5 \; f_{tbk} \; A_{res} \; / \; \gamma_{M2}$	per bulloni di classe 6.8 e 10.9	[4.2.64]

Resistenza di progetto a trazione dei bulloni:

$$F_{t,Rd} = 0.9 f_{tbk} A_{res} / \gamma_{M2}$$
 [4.2.68]

Verifica combinata a trazione e taglio:

$$\frac{F_{\nu,Ed}}{F_{\nu,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} \le 1$$
[4.2.71]

Con la limitazione $\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \le 1$ dove con $F_{v,Ed}$ e $F_{t,Ed}$ si sono indicate rispettivamente le

sollecitazioni di taglio e di trazione agenti nell'unione.

I valori delle resistenze di progetto vengono determinati utilizzando il seguente coefficiente di sicurezza parziale:

 γ_{M2} = 1.25 (Tab. 4.2 XIV)

verifica a rifollamento della flangia

Viene controllato che il taglio massimo su ciascun bullone $F_{v,Ed}$ sia inferiore alla resistenza di progetto a rifollamento, calcolata con la seguente espressione tratta dalle NTC 2018:

$$F_{b,Rd} = k \alpha f_{tk} d t / \gamma_{M2}$$

dove:

d è il diametro nominale del gambo del bullone;

t è lo spessore della flangia;

f_{tk} è la resistenza caratteristica a rottura del materiale della flangia;

 $\alpha = \min \{e_1/(3d_0); f_{tbk}/f_{tk}; 1\}$

e₁ = min {e₂; p₁} vedere figura seguente: il motivo è che il taglio può agire sia in direzione tangente alla circonferenza, sia ortogonalmente alla stessa;



 $k = min \{2.8 e_2/d_0 - 1.7; 2.5\}$

- $e_2 = min \{e_2; p_1\}$ come per e_1 nel calcolo di α , il taglio può agire sia in direzione tangente alla circonferenza, sia ortogonalmente alla stessa;
- dove: e₁, e₂, p₁ sono definiti nella figure: precedente tratta dal programma PaliAntenne; seguente, tratta dalle NTC 2018.

d₀ è il diametro nominale del foro di alloggiamento del bullone.

[4.2.67]



verifica a punzonamento della flangia

Viene controllato che la massima trazione su ciascun bullone $F_{t,Ed}$ sia inferiore alla resistenza di progetto a punzonamento, calcolata con la seguente espressione tratta dalle NTC 2018:

$$B_{p,Rd} = 0.6 \ \pi \ d_m \ t_p \ f_{tk} \ / \ \gamma_{M2}$$
[4.2.70]

dove:

- d_m è il minimo fra il diametro del dado e il diametro medio della testa del bullone;
- t_p è lo spessore della flangia;
- f_{tk} è la tensione di rottura dell'acciaio della flangia.

7.1 Verifica degli spessori della flangia e dei fazzoletti di irrigidimento

Vengono utilizzate le formule proposte da Quattordio [7], con riferimento alla figura seguente.



Flangia non irrigidita

La verifica dello spessore della flangia viene eseguita confrontando il valore t_s fornito con il valore minimo definito come:

$$t_{s,min} = 1.1 K_f \sqrt{\frac{\sigma_f \gamma_{M0}}{f_{yk}} (d_s - s_s) s_s}$$

dove:

$$K_f = 0.45 + 0.12 \rho_f$$
$$\rho_f = min\left(2; \frac{d_v}{d_s}\right)$$
$$\sigma_f = \frac{M_{Ed}}{W_t}$$

 M_{Ed} = momento flettente di calcolo

$$W_t = \frac{d_s^3 - (d_s - 2s_s)^3}{6}$$

Flangia irrigidita

La verifica dello spessore della flangia viene eseguita confrontando il valore t_s fornito con il valore minimo definito come:

$$t_{s,min} = 1.1 \sqrt{\frac{\alpha \sigma_f \gamma_{M0}}{f_{yk}} \frac{(d_e - d_s)}{d_v} A_t}$$

dove:

 σ_f viene calcolato come per la flangia non irrigidita

$$\alpha = \begin{cases} 0.0709 - 0.2491 \,\delta + 0.3652 \,\delta^2 - 0.1372 \,\delta^3 + 0.0156 \,\delta^4 & se \,\delta \le 2.45 \\ 0.197 + 0.0815(\delta - 2.45) & se \,\delta \le 2.45 \end{cases}$$

$$\delta = \frac{d_v}{d_e - d_s} \beta$$

$$\beta = \frac{2\pi}{n_s}$$

La verifica dello spessore dei fazzoletti di rinforzo viene eseguita confrontando il valore t_n fornito con il valore minimo definito come:

$$t_{n,min} = \frac{\sqrt{3}}{n_s} \frac{A_t}{h_n} \frac{\sigma_f}{f_{yk}}$$

dove:

 A_t è l'area della corona circolare che definisce la sezione del tubo collegato alla flangia, evidenziata nella figura seguente.



PAOLO VARAGNOLO INGEGNERIA via Nazareth, 49 - 35128 PADOVA tel./fax 049-8073882 tel. 335-6452133

PaliAntenne

83

MANUALE DI VERIFICA

Ultima revisione delle verifiche: 26 ottobre 2021

1. Premessa

Nel presente documento vengono presentate le specifiche dei requisiti del programma PaliAntenne e successivamente vengono descritti i test relativi alla verifica della correttezza e della coerenza dei risultati rispetto ai dati forniti in ingresso e alle norme da rispettare (Manuale di verifica).

84

Si sottolinea che le verifiche riportate nel presente manuale sono state ricontrollate e rivalidate con rifermento alla revisione 3.01 del programma.

Questo documento è redatto considerando come riferimento la norma ISO 9000-3:1991.

2. Specifica dei requisiti del software

Vengono di seguito elencati i requisiti del programma PaliAntenne:

Il programma PaliAntenne deve eseguire il calcolo e la verifica dei pali in acciaio a sostegno di antenne o corpi illuminanti, con sezione poligonale. Deve inoltre eseguire il calcolo e la verifica del plinto di fondazione e dei giunti di collegamento dei vari tronchi.

Le norme di riferimento sono le seguenti:

- D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento delle <<Norme tecniche per le costruzioni>>" [4];
- Circolare Ministeriale 21 gennaio 2019, n° 7: *"Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018"*;
- Norme CNR-DT 207 R1/2018: "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni" [3];
- Regione Toscana Comitato tecnico scientifico per il rischio sismico Pareri 2009-2016 - APPENDICE 1: "Verifiche di stabilità di pali metallici poligonali e circolari in classe 4 utilizzati per il sostegno di pale eoliche e antenne" [8];
- Norme CNR-UNI 10011 1997: "Costruzioni in acciaio. Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione";

Per la realizzazione del programma è stato adottato il linguaggio vb.net[®]. Le variabili hanno nomi tali da rendere immediata l'associazione con le entità che queste rappresentano. Il codice sorgente è scritto in modo che risultino evidenti gli annidamenti relativi ai cicli e alle strutture condizionali (caratteristica assicurata in modo intrinseco dal linguaggio stesso). Ovunque necessario il codice sorgente è stato arricchito con commenti che spieghino lo scopo delle istruzioni che lo seguono.

3. Manuale di verifica

Per la verifica del programma PaliAntenne, sono stati individuati e condotti dei test che dimostrino la correttezza e la coerenza dei risultati rispetto ai dati forniti in ingresso e alle norme da rispettare, specificate nel paragrafo 2.

La verifica dei risultati viene condotta confrontando i valori proposti dal programma con quelli ottenuti mediante calcoli di tipo manuale oppure con altri programmi di calcolo indipendenti, oppure ancora con dati pubblicati in rete o in letteratura.

Dove nel seguito viene indicato che i risultati sono stati ottenuti con il programma MdFem, si deve intendere che siano ottenuti anche con il programma PaliAntenne, in quanto MdFem è il solutore agli elementi finiti inserito all'interno del programma PaliAntenne (vedere il § 1.1 del Manuale teorico).

I programmi di calcolo indipendenti da PaliAntenne utilizzati per le verifiche sono i seguenti:

85

- SismiCAD della Concrete S.r.l.: è un programma F.E.M. dedicato alla progettazione di strutture tridimensionali in c.a., acciaio, legno, muratura, ampiamente diffuso in Italia;
- SAP IV: sviluppato da K.J. Bathe, E.L. Wilson e F. E. Peterson presso il "Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1973". Distribuito da: "The Earthquake Engineering Online Archive", un Progetto di "NISEE-PEER Library" dell'Università della California, Berkley.

Nel confronto dei risultati ottenuti con diversi metodi o programmi di calcolo si ammettono delle tolleranze che verranno di volta in volta discusse.

Si è cercato di individuare e poi di svolgere una serie di prove in grado di coprire praticamente tutta la casistica delle situazioni che il programma è in grado di affrontare.

argomento	prova	file dati			
solutore FEM: analisi statica	Spirale caricata con carico concentrato in sommità, o carichi distribuiti lungo x, y, z sull'elemento più alto	Spiral (SismiCAD) Spiral (MdFem) SpiralkNm (MdFem) Spiral (SAP IV)			
solutore FEM: analisi dinamica	Soluzione del problema agli autovalori – test 1 Soluzione del problema agli autovalori – test 2 Determinazione del tagliante di base con metodo C.Q.C. Determinazione dei modi di vibrare e delle forze sismiche	Bathe 12_1 (MdFem) Bathe 12_3 (MdFem) Serafini (MdFem) Studio Masse Partecipanti v31 (PaliAntenne) Studio Masse Partecipanti No Ritz (SismiCAD) PartMass (SAP IV)			
azione del del vento	calcolo delle azioni statiche e dinamiche del vento secondo l'esempio 4.12 delle CNR-DT 207 2018	Esempio 412 v31 (PaliAntenne)			

Per il controllo del corretto funzionamento del solutore FEM nell'analisi statica si è ritenuto sufficiente utilizzare un solo modello, sufficientemente complesso dal punto di vista geometrico e dei carichi applicati. In effetti in questo esempio vengono testate tutte le caratteristiche salienti, che riguardano sostanzialmente le trasformazioni fra coordinate locali e globali degli elementi e dei carichi.

86

Si tratta di 12 travi disposte a spirale lungo una circonferenza di diametro pari a 5 m. Considerando una vista in pianta, 6 travi completano un giro lungo la circonferenza circoscritta, salendo in modo uniforme di 3 m. L'altezza totale della spirale è di 6 m.

Nell'immagine seguente si vedono due viste del modello implementato in SismiCAD: i colori degli elementi vanno associati ai carichi indicati nelle tabelle.



Gli elementi trave hanno sezione tubolare quadrata 300x300x8 con le proprietà riportate di seguito. Le unità di misura sono: lunghezze in m e forze in kN.

* * *	ΜΑΤΕΚΙΑ	L PROP	ERTIES	5 * * *		
Set	Young modulus	Poisson ratio	weight density	mass density		
1	2.1000E+08	3.0000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00		
	AREA 9.2890E-03	Jxx 1.3168E-04	Jyy 1.3168E-04	Jt 2.0049E-04	K Winkler 0.0000E+00	width 0.0000E+00

I valori riportati nella tabella precedente sono presi dall'output del programma PaliAntenne e alcuni sono arrotondati. I valori corretti di Jxx, Jyy, Jt sono:

Jx = Jy = 0.0001316772; Jt = 0.0002004883

Confronto risultati con carico concentrato in sommità

L'immagine seguente mostra gli spostamenti nelle direzioni globali x, y, z, ottenuti con i programmi SAP IV e PaliAntenne. L'errore massimo risulta pari a 9E-5 (0.009%).



Seguono una serie di immagini che confrontano tutti i risultati in termini di spostamenti e di parametri di sollecitazione, ottenuti con i programmi SimiCAD e PaliAntenne.



Carico concentrato in sommità: Spostamenti nodo sommitale





Carico concentrato in sommità: Momento torcente M1



Carico concentrato in sommità: Momento flettente M2



Carico concentrato in sommità: Momento flettente M3

91

	SismiCAD	PaliAntenne		
spostamento x (m)	0.111209	0.111210		
spostamento y (m)	-0.029634	-0.029633		
spostamento z (m)	-0.185593	-0.185590		
rotazione xx (rad)	0	-2.2977E-14		
rotazione yy (rad)	0.03707	0.037069		
rotazione zz (rad)	-0.00326	-0.0032597		
Forza assiale F1 (kN)	1.961	1.961		
Forza assiale F2 (kN)	-9.806	-9.806		
Forza assiale F3 (kN)	0	0		
Momento torcente M1 (kNm)	0	5.456E-09		
Momento flettente M2 (kNm)	0	2.001E-08		
Momento flettente M3 (kNm)	0	6.406E-08		

Confronto risultati con carico distribuito nella direzione x



Carico distribuito lungo x: Spostamenti nodo sommitale



Carico distribuito lungo x: Taglio F2



Carico distribuito lungo x: Momento torcente M1



Carico distribuito lungo x: Momento flettente M3

Vengono di seguito confrontati i valori ottenuti dai due programmi: sul nodo sommitale per gli spostamenti; sul nodo di base per i parametri di sollecitazione. I valori sono praticamente gli stessi, essendo le differenze imputabili esclusivamente ai diversi arrotondamenti dei due programmi.

95

	SismiCAD	PaliAntenne		
spostamento x (m)	0504222	0504200		
spostamento y (m)	0.09719	0.097184		
spostamento z (m)	-0.250968	-0.250960		
rotazione xx (rad)	-0.00693	-0.0069254		
rotazione yy (rad)	0.10416	0.104150		
rotazione zz (rad)	0.03052	0.0305160		
Forza assiale F1 (kN)	12.5	12.5		
Forza assiale F2 (kN)	2.5	2.5		
Forza assiale F3 (kN)	22.079	22.08		
Momento torcente M1 (kNm)	129.904	129.9		
Momento flettente M2 (kNm)	2.165	2.164		
Momento flettente M3 (kNm)	73.298	73.3		

Confronto risultati con carico distribuito nella direzione y



Carico distribuito lungo y: Spostamenti nodo sommitale



Carico distribuito lungo y: Forza assiale F1



Carico distribuito lungo y: Taglio F2



Carico distribuito lungo y: Momento torcente M1



Carico distribuito lungo y: Momento flettente M3

99

	SismiCAD	PaliAntenne
spostamento x (m)	0.014618	0.014618
spostamento y (m)	0.641728	0.641710
spostamento z (m)	0.0070249	0.00702460
rotazione xx (rad)	-0.10416	-0.104150
rotazione yy (rad)	-0.00139	-0.0013851
rotazione zz (rad)	0.05674	0.056736
Forza assiale F1 (kN)	21.651	21.65
Forza assiale F2 (kN)	-4.33	-4.33
Forza assiale F3 (kN)	12.748	12.75
Momento torcente M1 (kNm)	68.75	68.75
Momento flettente M2 (kNm)	-30	-30
Momento flettente M3 (kNm)	-1.27	-1.27

Confronto risultati con carico distribuito nella direzione z



Carico distribuito lungo z: Spostamenti nodo sommitale



Carico distribuito lungo z: Taglio F2



Carico distribuito lungo z: Momento torcente M1



Carico distribuito lungo z: Momento flettente M2





Carico distribuito lungo z: Momento flettente M3

Vengono di seguito confrontati i valori ottenuti dai due programmi: sul nodo sommitale per gli spostamenti; sul nodo di base per i parametri di sollecitazione. I valori sono praticamente gli stessi, essendo le differenze imputabili esclusivamente ai diversi arrotondamenti dei due programmi.

	SismiCAD	PaliAntenne
spostamento x (m)	-0.205213	-0.2052
spostamento y (m)	0.19735	0.19734
spostamento z (m)	0.414714	0.414690
rotazione xx (rad)	-0.04008	-0.040073
rotazione yy (rad)	-0.07137	-0.071369
rotazione zz (rad)	0.00831	0.0083105
Forza assiale F1 (kN)	5	5
Forza assiale F2 (kN)	25	25
Forza assiale F3 (kN)	0	0
Momento torcente M1 (kNm)	27	27.06
Momento flettente M2 (kNm)	-5.413	-5.413
Momento flettente M3 (kNm)	-15.934	-15.93

3.2 Analisi dinamica

I test riportati nei § 3.2.1 e 3.2.2 riguardano i fondamenti dell'analisi dinamica e vengono riportati anche allo scopo di presentare le procedure implementate.

3.2.1 Risoluzione del problema agli autovalori – test 1

Il metodo implementato nel programma PaliAntenne è quello dell'iterazione nel sottospazio, come pubblicato in [1]. Il listato originale in FORTRAN è stato tradotto in vb.net.

In questo test viene riprodotto l'esempio 12.1 di [1], nel quale K. J. Bathe calcola i primi due autovalori ed i corrispondenti autovettori, usando l'iterazione vettoriale simultanea con l'ortogonalizzazione di Gram-Schmidt. Nella seguente immagine, tratta dal libro citato, sono riportati i dati del problema ed i risultati, ottenuti dopo nove iterazioni.

EXAMPLE 12.1: Consider the eigenproblem $\mathbf{K}\phi = \lambda \mathbf{M}\phi$, where $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 1 \\ & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$ The two lowest eigenvalues and corresponding eigenvectors are $\phi_1 \doteq \begin{bmatrix} 0.7057 \\ 0.7071 \\ 0.7085 \end{bmatrix}; \quad \lambda_1 \doteq 2.000$ $\phi_2 \doteq \begin{bmatrix} 1.001 \\ 0.0010 \\ -0.9990 \end{bmatrix}; \quad \lambda_2 \doteq 4.000$

Nello stesso libro, in un altro capitolo, K. J. Bathe calcola anche i valori esatti di questo autoproblema: con il metodo iterativo gli autovalori ottenuti nell'esempio 12.1 sono esatti, mentre gli autovettori risultano approssimati in quanto il valore corretto sarebbe:

103

<u>104</u>

$$\begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & -1\\ 1/\sqrt{2} & 0\\ 1/\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.707106 & -1\\ 0.707106 & 0\\ 0.707106 & 1 \end{bmatrix}$$

Nella successiva immagine viene riportato uno stralcio della relazione creata dal programma PaliAntenne. I risultati approssimano ottimamente la soluzione esatta. Vengono riportati in aggiunta anche i valori delle frequenze circolari, delle frequenze e dei periodi, ricavati con le relazioni presentate nel manuale teorico.

_____ M D F E M - DYNAMIC RESPONSE MODULE _____ • . Degrees of freedom excited by unit starting iteration vectors 2 1 Convergence reached for tolerance = 1.00000E-06The calculated eigenvalues are: 2.0000E+00 4.0000E+00 6.0000E+00 The calculated eigenvectors are: 7.0711E-01 7.0711E-01 7.0711E-01 1.0000E+00 3.7748E-15 -1.0000E+00 -7.0711E-01 7.0711E-01 -7.0711E-01 We found the lowest: 3 eigenvalues PRINT OF FREQUENCIES CIRCULAR NUMBER FREQUENCY FREQUENCY PERIOD (RAD/SEC) (CYCLES/SEC) (SEC) _____ 1 1.4142E+00 2.2508E-01 4.4429E+00 2.0000E+00 3.1831E-01 3.1416E+00 2.4495E+00 3.8985E-01 2.5651E+00 2 3

3.2.2 Risoluzione del problema agli autovalori – test 2

In questo test viene riprodotto l'esempio 12.3 di [1], nel quale K. J. Bathe calcola i primi due autovalori ed i corrispondenti autovettori, usando l'iterazione nel sottospazio. Nella seguente immagine, tratta dal libro citato, sono riportati i dati del problema ed i risultati, ottenuti dopo 1 sola iterazione.

105



Nella successiva immagine viene riportato uno stralcio della relazione creata dal programma PaliAntenne. I risultati sono praticamente identici a quelli del testo preso a riferimento. Anche in questo caso vengono riportati in aggiunta anche i valori delle frequenze circolari, delle frequenze e dei periodi, ricavati con le relazioni presentate nel manuale teorico.

```
M D F E M - DYNAMIC RESPONSE MODULE
_____
Degrees of freedom excited by unit starting iteration vectors
    2
Convergence reached for tolerance = 1.00000E-06
The calculated eigenvalues are:
 1.4645E-01 8.5355E-01
The calculated eigenvectors are:
  2.5000E-01 5.0000E-01 6.0355E-01 7.0711E-01
2.5000E-01 5.0000E-01 -1.0355E-01 -7.0711E-01
We found the lowest:
                        2 eigenvalues
PRINT OF FREQUENCIES
          CIRCULAR
MODE
NUMBER
            FREQUENCY FREQUENCY
                                       PERIOD
           (RAD/SEC) (CYCLES/SEC)
                                       (SEC)
           3.8268E-01 6.0906E-02 1.6419E+01
9.2388E-01 1.4704E-01 6.8009E+00
    1
    2
```

3.2.3 Determinazione del tagliante di base con metodo C.Q.C.

Con riferimento a quanto riportato al § 1. del manuale teorico, si è confrontato il risultato fornito dal programma PaliAntenne, con quello riportato nell'articolo dell'ing. Paolo Serafini all'indirizzo <u>https://digilander.libero.it/limorta/ANALISI%20DINAMICA1.pdf</u>

La struttura di questo esempio le matrici di massa e di rigidezza vengono fornite direttamente e pertanto non possono essere calcolate con riferimento ad una struttura

reale. Per riprodurre l'esempio si sono forniti direttamente al programma la matrice delle masse, le frequenze dei primi 3 modi di vibrare, le forme modali, i coefficienti di partecipazione modale e le accelerazioni corrispondenti ai periodi.

106

In effetti il confronto è stato fatto con il solo scopo di validare e controllare il calcolo del tagliante ai vari livelli con il metodo C.Q.C.. Nell'allegato 1 è riportato il listato della subroutine utilizzata, che può anche essere utile per vedere come la teoria sia stata implementata nel programma.

Di seguito si riporta la parte del tabulato di calcolo dove compaiono i valori di interesse. Nell'esempio di riferimento, nel quale i calcoli sono stati svolti manualmente, il tagliante di base risulta pari a 81768 kg e pertanto la differenza è pari a (81768 - 81772) / 81768 = 0.005%, praticamente nulla.

```
Modal participating mass ratio (p.m.r.)
           p.m.r.
 Mode
_____
    1
         0.646129
    2
       0.227729
    3
       0.034049
   _____
   Sum 0.907907
Participating masses >= 85%, as prescribed in NTC 2018 §7.3.3.1.
    Mode
              Period Spectral acceleration
                               m/s2
    no.
             (s)

        1
        6.8000E-01
        8.4400E-01

        2
        2.7000E-01
        1.1500E+00

        3
        1.5400E-01
        1.1500E+00

Seismic forces and Base shears (first modes)
_____
                                                  Mode
  Node | 1 | 2 | 3 | 4
                                                                             _____
_____

        1
        0.0000E+00
        0.0000E+00
        0.0000E+00

        2
        2.2788E+03
        2.2770E+04
        1.2808E+04

        3
        2.6434E+04
        1.0247E+04
        -1.2938E+04

        4
        5.0640E+04
        -1.5939E+04
        7.9063E+03

_____
base shears 7.9353E+04
                             1.7078E+04
                                               7.7769E+03
combinations of seismic forces
                                 _____
   Node | C.Q.C. Force |
                            -----
       1 0.0000E+00
          4.3838E+03
       2
       3
             2.3906E+04
            5.3482E+04
       4
base shear 8.1772E+04
```

3.2.4 Determinazione dei modi di vibrare e delle forze sismiche

In questo test vengono confrontati i calcoli sismici prodotti da PaliAntenne con il programma commerciale SismiCad. Vengono utilizzate matrici di massa lumped, cioè con masse concentrate.

Si considera un palo di sezione circolare di diametro 600 mm e spessore 5 mm (nel programma PaliAntenne schematizzato con una poligonale a 30 lati), alto 30 m. Nella figura seguente sono rappresentati il palo, la mesh generata dal programma, e la sezione. La

mesh non è regolare perché il programma genera un nodo in corrispondenza della quota z_{min} al disotto della quale la pressione del vento rimane costante.

107



Il palo è ubicato a Padova, in corrispondenza delle coordinate indicate nell'immagine seguente, prodotta da PaliAntenne. Si è considerato un sottosuolo ti tipo D, uno smorzamento viscoso pari al 5%, una categoria topografica T1 e un fattore di comportamento q = 1.5. Gli spettri rappresentati di seguito corrispondono ad un periodo di ritorno di 475 anni, da utilizzare per le combinazioni SLV.

Gli spettri sono uguali, a conferma della correttezza dell'implementazione.



<u>108</u>

Accelerazioni spettrali

Ind.vertice: Indice del valore.

T: Periodo di vibrazione. [s] a/g: Accelerazione spettrale normalizzata ottenuta dividendo l'accelerazione spettrale per l'accelerazione di gravità. Il valore è adimensionale.

Sisma X SLV



Ind.vertice	т	a/g									
1	0	0.146	2	0.242	0.257	3	0.727	0.257	4	0.738	0.253
5	0.75	0.249	6	0.762	0.245	7	0.774	0.241	8	0.786	0.238
9	0.798	0.234	10	0.81	0.231	11	0.821	0.227	12	0.833	0.224
13	0.845	0.221	14	0.857	0.218	15	0.869	0.215	16	0.881	0.212
17	0.893	0.209	18	0.904	0.207	19	0.916	0.204	20	0.928	0.201
21	0.94	0.199	22	0.952	0.196	23	0.964	0.194	24	0.976	0.191
25	0.987	0.189	26	0.999	0.187	27	1.011	0.185	28	1.023	0.183
29	1.035	0.181	30	1.047	0.178	31	1.059	0.176	32	1.07	0.175
Le successive due immagini riportano le frequenze calcolate per i primi 3 modi di vibrare, le accelerazioni spettrali, e le corrispondenti masse partecipanti. I risultati sono confrontati nella seguente tabella, dove i risultati ottenuti con PaliAntenne sono indicati con PA, mentre quelli di SismiCad sono indicati con SC.

109

	modo 1		moo	do 2	modo 3		
	PA	SC	PA SC		PA	SC	
Periodo T (s)	1.53946	1.53448	0.2587	0.2587	0.09641	0.09711	
accelerazione spettrale (m/s ²)	1.1912	1.1943	2.5225	2.5222	1.8658	1.8686	
massa partecipante	0.6464	0.6467	0.2045	0.2051	0.0895	0.0897	

Massa partecipante totale PaliAntenne = 94.04%

Massa partecipante totale SismiCAD = 94.15%

PaliAntenne								
FREQUENZ	E CALCOLATE							
MODO	FREQUENZA							
NUMERO	CIRCOLARE	FREQUENZA	PERIODO					
	(RAD/SEC)	(CICLI/SEC)	(SEC)					
1	4.08140612E+000	6.49575949E-001	1.53946579E+000					
2	2.42890282E+001	3.86571884E+000	2.58684099E-001					
3	6.51657181E+001	1.03714466E+001	9.64185670E-002					
Massa pa Modo	m.p.m.	m.p.m.) 						
1	0.646430							
2	0.204530							
3	0.089496							
Somma	Somma 0.940456							
La massa	partecipante è >=	85%, come prescri	tto dalle NTC al	\$7.3.3.1.				

SismiCAD

Risposta modale Modo: identificativo del modo di vibrare. Periodo: periodo. [s] Massa X: massa partecipante in direzione globale X. Il valore è adimensionale. Massa Y: massa partecipante in direzione globale Y. Il valore è adimensionale. Massa Z: massa partecipante in direzione globale Z. Il valore è adimensionale Massa rot X massa rotazionale partecipante attomo la direzione globale X. Il valore è adimensionale. Massa rot Y massa rotazionale partecipante attomo la direzione globale Y. Il valore è adimensionale. Massa rot. Z: massa rotazionale partecipante attorno la direzione globale Z. Il valore è adimensionale Massa sX: massa partecipante in direzione Sisma X. Il valore è adimensionale Massa sY: massa partecipante in direzione Sisma Y. Il valore è adimensionale Totale masse partecipanti: Traslazione X: 0.941579 Traslazione Y: 0 Traslazione Z: 0 Rotazione X: 0 Rotazione Y: 0.998484 Rotazione Z: 0 Massa X 0.646712049 Mac Massa rot. Y 0.968466052 Massa rot. Z Massa sX 0.646712049 Massa s Periodo . 534488732 .205120737

110

	Taglianti di pi		
livello	PaliAntenne	SismiCad	differenza
4	72.8	73	0.27%
3	118.9	120	0.92%
2	161.6	163	0.86%
1	182.2	184	0.98%
fondazione	192.6	195	1.23%

Le differenze rilevate sono minime e si possono ritenere trascurabili in relazione alla complessità dei calcoli svolti, che sono comunque approssimati in quanto la ricerca degli autovalori richiede l'applicazione di metodi numerici iterativi.

Viene riportata ancora un'immagine che mostra le forme modali calcolate con PaliAntenne, con SismiCad e con SAP 4. Le forme modali calcolate con i vari programmi e metodi coincidono, dal punto di vista numerico, per tutti i modi considerati.



3.3 Parametri dinamici del vento

Per le strutture snelle come i pali per antenne, il calcolo dei parametri dinamici del vento riveste un'importanza fondamentale, in quanto le azioni del vento risultano quelle dimensionanti.

Vengono confrontati i valori ottenuti dal programma PaliAntenne con quelli pubblicati nell'esempio 4.12 di [3]. Di seguito si riporta la relazione prodotta dal programma PaliAntenne, con l'inserimento di alcuni commenti sul confronto dei risultati, evidenziati con uno sfondo grigio.

Calcolo della pressione del vento

```
file: Esempio 412
DATA:
      04 ottobre 2021
Normativa di riferimento: D.M. 17/01/2018 - Circolare 21/01/2019 - CNR-DT 207/2018
Zona: 3) - Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata,
Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)
Periodo di ritorno = 50 anni
v_{b,0} = 27 \text{ m/s}
                     (velocità base di rif. a livello del mare, Tab. 3.3.1)
      = 500 \text{ m}
                      (Tab. 3.3.I)
an
      =
         0.37
                     (Tab. 3.3.I)
k<sub>s</sub>
         0 m
                      (altitudine sul livello del mare)
      =
as
          27.00 m/s (velocità di riferimento con periodo di ritorno indicato § 3.3.2)
vr
      =
      = 455.63 m/s (pressione cinetica di riferimento § 3.3.6)
qr
Rugosità: C) Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,....);
             aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
Categoria di esposizione: III
          30.0 m
h
      =
                      (altezza dell'edificio)
           0.7 m
                      (larghezza dell'edificio)
b
           0.7 m
                      (profondità dell'edificio)
d
      _
k<sub>r</sub>
      =
           0.20
                      (Tab. 3.3.II)
                     (Tab. 3.3.II)
         0.10 m
z ()
           5
                      (Tab. 3.3.II)
<sup>z</sup>min
           1
                      (coefficiente di topografia - § 3.3.7)
c<sub>t.</sub>
      =
      - il coefficiente dinamico viene definito nel seguito
сd
c_e(h) =
                    (coefficiente di esposizione - § 3.3.7)
           2.90
Pressioni minime e massime, a meno del coefficiente di forma
_____
      = 777.99 N/m^2 (pressione a z = z_{min}
                                               - § 3.3.4)
p<sub>min</sub>
      = 1320.58 \text{ N/m}^2 (pressione a z = h
                                               - § 3.3.4)
p_{max}
```

Il valore della pressione massima riportata nelle CNR-DT 207, alla quota z = 30 m, risulta pari a 1320 N/m², identico a meno dei decimali che molto probabilmente sono stati trascurati.

Strutture snelle: valutazione delle forze per unità di lunghezza

nel seguito si fa riferimento alle norme CNR-DT 207

 $\mathbf{Fx}(\mathbf{z}) = \mathbf{q}(\mathbf{z}) \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{c}_{\mathbf{fX0}} \cdot \mathbf{\psi}_{\lambda} \cdot \mathbf{c}_{\mathbf{d}}$ - equazioni 3.14a + 3.19 + G.19 (rel.1)

```
dove: - Fx(z) è la forza per unità di lunghezza in direzione x, espressa in N/m

(in direzione y la forza è Fy)

- q(z) è la pressione cinetica di picco - eq. (3.9)

- l è la dimensione di riferimento

(indicativamente la larghezza b della struttura)

- c_{fX0} è il coefficiente di forza in direzione X (c_{fY0} in direzione Y)

- \psi_{\lambda} è il coefficiente di snellezza (§ G.10.8)
```

 $-c_d$ è il coefficiente dinamico - eq. (3.17)

Struttura a sezione circolare - § G.10.6

```
dimensione di riferimento ..... l = b = 0.690 \text{ m}
scabrezza k .... = 2.000\text{E}-05 \text{ m}
velocità di riferim. di progetto Vr(h) = 2.700\text{E}+01 \text{ m/s} (§ 3.2.2)
coeff. di profilo medio del vento Cm(h) = 1.141\text{E}+00 (eqg. 3.6)
velocità media del vento ..... Vm(h) = 3.080\text{E}+01 \text{ m/s} (eq. 3.5)
numero di Reynolds alla quota h .... = 3.080\text{E}+06 (eq. 3.18)
```

Coefficienti di forza

Le forze Fx, Fy nelle direzioni longitudinali e trasversali, sono calcolate con l'equazione (rel.1) applicando i coefficienti dinamici c_{dD} , c_{dL} calcolati nel seguito.

Le CNR-DT 207 utilizzano una dimensione di riferimento b=0.55 m, corrispondente alla larghezza della sommità della parte rastremata del tronco superiore: questa larghezza viene scelta arbitrariamente nell'esempio delle CNR-DT, giustificando la scelta come a favore della sicurezza. Il programma deve utilizzare un procedimento standardizzato e considera la larghezza alla quota z=0.6H come indicato nella figura L.2 delle CNR-DT: tale larghezza risulta pari a 0.69 m. Nell'esempio vengono poi calcolati due valori $c_{fX} = c_{fX0} \cdot \psi_{\lambda}$, scegliendo il maggiore che risulta pari a 0.52. Il valore calcolato dal programma, pari a 0.523, è praticamente uguale.

Parametri dinamici longitudinali e trasversali - Appendici I, L, O



Le prime due coppie di frequenze calcolate nell'esempio delle CNR-DT 207 risultano pari a 0.92 Hz e 2.86 Kz e sono molto simili a quelle calcolate da PaliAntenne. Le piccole differenze possono dipendere dalla discretizzazione della struttura o anche da leggere differenze nella distribuzione delle masse. In ogni caso la precisione è da ritenere accettabile. Per quanto riguarda la precisione del programma PaliAntenne nel calcolo dei modi di vibrare si rimanda alle apposite verifiche nel § 3.2 del presente manuale di verifica.

Rapporto di smorzamento relativo al critico - § I.6

rapporto di smorzamento strutturale $\xi_s = 0.002$ (*) rapporto di smorzamento aerodinamico $\xi_a = 0.008$ (I.33) rapporto di smorzamento aerodinamico totale $\xi = 0.01$

(*) vanno considerati in questo valore eventuali elementi dissipativi

Determinazione del coefficiente dinamico longitudinale - § 3.4.1 + Appendice L

equazione/rif.	parametro
figura L.2	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$
(3.5)	$v_{m}(z_{e}) = 28.04 \text{ m/s}$
(3.7)	$I_v(z_e) = 0.193$
(3.8)	$L_v(z_e) = 79.791 \text{ m}$
analisi f.e.m.	n _D = 0.903 Hz
(I.28)	$\xi = \xi_{\rm S} + \xi_{\rm a} = 0.01$
(L.4)	$B^2 = 0.670$
(L.6)	S _D = 0.071
(L.9)	$\eta_h = 3.866$

	η _b =	0.089
(L.7)	R _h =	0.225
(L.8)	R _b =	0.943
(L.5)	$R_D^2 =$	1.198
(L.11)	$v_D =$	0.723
(L.10)	g _D =	3.651
(L.3)	G _D =	2.922
(L.2)	c _{dD} =	1.244

Il coefficiente dinamico ${\rm c}_{\rm dD}$ sopra calcolato è stato utilizzato nell'equazione (rel.1) per il calcolo della forza Fx

Il rapporto di smorzamento aerodinamico totale ξ risulta pari a 0.01 ed il coefficiente dinamico longitudinale c_{dD} risulta 1.244, contro i valori di 0.0073 e 1.253 dell'esempio delle CNR-DT 207. Si tratta di valori in ottimo accordo fra loro, considerando le approssimazioni necessarie a rendere automatico il procedimento all'interno di un codice di calcolo.

Determinazione del coefficiente dinamico trasversale - § 3.4.1 + Appendice O

equazione/rif.	parametro
figure 0.1 e 0.2	$\phi = 0.0 h = 0.0 l = 30.0 m z_e = 18.0 m$
Figura 0.3	k _L = 0.273
(3.5)	$v_{m}(z_{e}) = 28.04 \text{ m/s}$
(3.7)	$I_v(z_e) = 0.193$
(3.8)	$L_v(z_e) = 79.791 \text{ m}$
Tabella O.VIII	$c_{D} = 0.523$ $c_{L} = 0.000$ $(c_{D} + c_{L}') = 0.523$
analisi f.e.m.	n _L = 0.903 Hz
Tabella O.VIII	ξ _S = 0.002
(0.10) Tab. 0.III	$B_{L2}^2 = 0.097$
(0.12) Tab. 0.III	$S^{2}_{L2} = 0.018$
(0.15)	$\eta_{L2} = 1.717$
(0.14)	$R_{L2} = 0.418$

----- $\mu_{\rm L} = 0.000$ (0.6) Tab. 0.II ----- $B_{T_1}^2 = 0.0968$ (0.7) Tab. 0.II _____ $R_{\rm L}^2 = 2.966$ (0.8) Tab. 0.II ---- $v_{\rm L} = 0.889 ~{\rm Hz}$ (0.5) -----(0.4) $g_L =$ 3.889 ----- $G_{L} = 2.621$ (0.3) _____ c_{dL} = 1.116 (0.2)

Il coefficiente dinamico ${\rm c}_{\rm dL}$ sopra calcolato è stato utilizzato nell'equazione (rel.1) per il calcolo della forza Fy

Il coefficiente dinamico trasversale c_{dL} risulta 1.116, contro il valore di 1.120 dell'esempio delle CNR-DT 207. Si tratta di valori in ottimo accordo fra loro, considerando le approssimazioni necessarie a rendere automatico il procedimento all'interno di un codice di calcolo.

Parametri dinamici trasversali per distacco dei vortici - Appendice Q

Velocità critiche, numeri di Strouhal e di Scrouton - § 0.1, 0.2, 0.3

modo di vibrare	altezza z (m)	v_{cr,i} (m/s) eq. 0.2	n° di Strouhal (/) - § 0.2	n° di Scrouton (/) - eq. 0.4	v_{m,l} (m/s) § 3.2.5
1	30.0	6.09	0.22	1.27	37.19
2	30.0	19.14	0.22	1.31	37.19

Risulta necessario valutare gli effetti del distacco dei vortici per i primi 2 (distinti) modi di vibrare in quanto $v_{cr,3} > v_{m,1}$ (eq. 0.3)

Modo n° 1

Spostamento trasversale di picco - metodo spettrale - § 0.5

a ^r	=	1.417	(eq.	0.8)
$\sigma_{\rm L}$	=	0.542 m	(eq.	0.11)
YpI, 1	=	0.787 m	(eq.	0.7)

Spostamento trasversale di picco - metodo armonico - § 0.6

Kw	=	0.600	(tab. 0.V)
YpL,1	=	0.376 m	(eq. 0.14)

Forza statica equivalente trasversale - § 0.4

La forza statica equivalente trasversale per il modo corrente viene calcolata considerando lo spostamento $y_{pL,1} = 0.787$ m

La scelta è cautelativa.

 $C_{\text{TR,i}} = 1.00$ (eq. 0.6)

$F_{L,i}(s) = 2.5342E+01 \cdot m(z) \cdot \Phi_{L,i}(s)$ (N/m) (eq. 0.5)

dove m(z) è la massa alla quota z, e $\Phi_{{
m L},\,i}({
m s})$ è la forma modale del modo i

Modo n° 2

il metodo spettrale si può applicare solo al 1° modo - § 0.5

Spostamento trasversale di picco - metodo armonico - § 0.6

 $K_W = 0.600$ (tab. 0.V) $y_{pL,2} = 0.370$ m (eq. 0.14)

Forza statica equivalente trasversale - § 0.4

La forza statica equivalente trasversale per il modo corrente viene calcolata considerando lo spostamento $y_{pL,2} = 0.370$ m

La scelta è cautelativa.

 $C_{\text{TR,i}} = 1.00$ (eq. 0.6)

 $F_{L,i}(s) = 1.1498E+02 \cdot m(z) \cdot \Phi_{L,i}(s)$ (N/m) (eq. 0.5)

dove m(z) è la massa alla quota z, e $\Phi_{{
m L},\,i}\,({
m s})\,$ è la forma modale del modo i

Lo spostamento di picco per il primo modo risulta pari a 0.787 m, contro il valore di 0.79 dell'esempio delle CNR-DT 207. Si tratta di valori in ottimo accordo fra loro, probabilmente diversi solo per il diverso arrotondamento.

Nell'esempio delle CNR-DT 207 non viene calcolato lo spostamento di picco per il secondo (distinto) modo di vibrare, mentre il programma calcola il valore 0.370 m.

Numero di cicli di carico - § 0.8

La valutazione del numero dei cicli di carico causati dal distacco risonante dei vortici nel corso della vita nominale della struttura, $V_{\rm N}$ = 50 anni, è svolta applicando le equazioni (0.17) e (0.18), considerando una vita nominale della struttura pari a 50 anni.

Facendo riferimento al 1° modo di vibrare, il numero di cicli risulta: $N_1 = 1.671E+06$

Ovalizzazione dinamica (1° modo) - § 0.10

In sommità del palo è presente un mascheramento, la verifica dei fenomeni di ovalizzazione dinamica viene demandata al produttore del mascheramento stesso.

Fatica alla base della struttura per azione della turbolenza - Appendice P (metodo dettagliato)

tensione caratteristica d	di rottura	f _{t,k}	=	510 MPa		
resistenza a fatica per 1	N = 2E6 cic	li $\Delta\sigma_{ m C}$	=	36 MPa		
coefficiente di sicurezza	a per fatica	a $\gamma_{\rm F}$	=	1.35	(Tabella	P.I)
modulo di resistenza alla tensione per carichi per	a base manenti	w= ^s p	4.45 =	2E+06 mm3 2.35 MPa		
equazione/rif.	parame	etro				
(F.4)	ν _v =	0.060	Hz			
(P.7)	s _D =	27.408	Мра			

(P.8)	σ _{sD}	=	19.475	MPa			
(P.9)	λ_{RD}	=	0.641				
(P.17)	v _{m,fat} (z _e)	=	14.021	m/s			
(L.5)	^{R²D}	=	0.395				
(P.15)	α_{σ}	=	2.405				
(P.16)	α _λ	=	0.790				
(TAB. P.IV)	k	=	1.200				
(P.10)	A ₀	=	0.005				
(P.11)	A _{BM}	=	0.555				
(P.12)	A _M	=	1.110				
(P.13)	a _{sn}	=	2.110				
(P.14)	B _{SN}	=	0.998				
(P.3)	D ₀	=	8.99E-C	3			
(P.4)	C _{BM}	=	0.4394				
(P.5)	с _М	=	1.0747				
(P.6)	C _{SN}	=	0.6812				
(P.2)	D(1)	=	2.89E-C	3			
(P.1)	T _F	=	3.46E+0	2 anni	L = vi	ita a	fatica

La vita a fatica dell'incastro alla base, costituito da un'unione flangiata saldata, risulta pari a 346 anni contro i 330 anni dell'esempio delle CNR-DT 207. Si tratta di valori in ottimo accordo fra loro, considerando le approssimazioni necessarie a rendere automatico il procedimento all'interno di un codice di calcolo.

Valori calcolati delle forze del vento (kN/m)

Fx = forze per vento longitudinale (direzione x) Fy = forze per vento trasversale (y) dovute alla turbolenza Fy modo 1 = forze per vento trasversale (y) dovute al distacco dei vortici legati al primo modo Fy modo 2 = forze per vento trasversale (y) dovuto al distacco dei vortici legati al secondo modo (i modi 1 e 2 sono da intendere come modi distinti: in realtà sono i modi (1,2) e (3,4) dell'analisi 3D)

N 7 1		Fx	Fγ	Fy modo 1	Fy modo 2
Nodo	Altezza				
1	0.00	5.4354E-01	4.8766E-01	0.0000E+00	0.0000E+00
2	2.24	5.1705E-01	4.6390E-01	2.0508E-02	-4.5695E-01
3	4.48	5.0073E-01	4.4926E-01	9.2027E-02	-1.8116E+00
4	5.00	4.8749E-01	4.3738E-01	9.0262E-02	-1.7234E+00
5	6.72	5.1268E-01	4.5997E-01	1.6250E-01	-2.7893E+00
6	8.96	5.2973E-01	4.7527E-01	2.7535E-01	-4.0532E+00

	7 11 20	5 3741E - 01	4 8216E-01	4 2692E-01	-5 2732E+00	
	8 12.80	5.3558E-01	4.8052E-01	9.9877E-01	-1.0693E+01	
	9 15.04	5.2355E-01	4.6972E-01	6.7328E-01	-5.7011E+00	
1	0 17.28	5.0542E-01	4.5346E-01	8.3486E-01	-5.2637E+00	
1	1 19.52	4.8240E-01	4.3281E-01	9.9656E-01	-4.2037E+00	
1	2 21.76	4.5534E-01	4.0853E-01	1.3968E+00	-3.0830E+00	
1	3 24.00	1.2166E+00	1.0915E+00	4.9527E+00	-1.3482E+00	
1	4 25.00	1.2297E+00	1.1032E+00	5.6439E-01	3.2008E-01	
1	5 26.00	1.2423E+00	1.1146E+00	6.1044E-01	8.4934E-01	
1	6 27.00	1.2545E+00	1.1255E+00	2.9188E+00	6.4227E+00	
1	7 28.00	1.2663E+00	1.1361E+00	7.0797E-01	2.1200E+00	
1	8 29.00	1.2777E+00	1.1463E+00	7.2790E+00	2.7466E+01	
1	9 30.00	1.2888E+00	1.1563E+00	3.6035E+00	1.6349E+01	
Mom	enti					-
alla base (kNm)		3.6655E+02	3.2887E+02	7.9190E+02	1.6349E-01	
N.B I momenti sopra riportati sono senza i coefficienti di combinazione SLU						

Nell'esempio delle CNR-DT 207 non vengono calcolati i momenti alla base dovuti alle varie forze del vento. I valori sopra riportati, calcolati dal programma PaliAntenne, mettono in evidenza che le forze trasversali più gravose sono quelle generate dal distacco di vortici legati al primo modo di vibrare. Questi sono i valori utilizzati dal programma per le verifiche.

L'andamento discontinuo delle forze trasversali dovute al distacco dei vortici è dovuto alla discontinuità delle masse applicate: infatti mentre le masse strutturali sono continue, le masse permanenti applicate al palo sono concentrate a varie altezze.



4. Conclusioni

Tutte le verifiche riportate nel presente manuale hanno dato esito positivo, con errori numerici rispetto ai valori teorici spesso nulli o trascurabili e comunque al disotto delle pur piccole tolleranze stabilite.

La notevole mole di prove condotte consente di affermare che il programma PaliAntenne è estremamente affidabile e che i risultati da esso prodotti sono corretti e coerenti rispetto ai dati forniti in ingresso e alle norme da rispettare.

Allegato 1

```
Sub SeismicForcesCalculationPaoloSerafini()
     'riproduco l'esempio dell'ing. Paolo Serafini
    Dim Roij, Betaij, Csi As Single
     NROOT = 3
     Npoin = 4
     Dim TagliantiDiPiano (NROOT, Npoin), TagliantiCQC (Npoin) As Single
     ReDim AccModale(NROOT), ForzaSismica(NROOT, Npoin), ForzaSismicaSRSS(Npoin), TaglioBase(NROOT)
     ReDim ForzaSismicaCQC(Npoin)
     \begin{aligned} & \text{MassaNodale(1)} = 0 : \text{MassaNodale(2)} = 45000 : \text{MassaNodale(3)} = 45000 : \text{MassaNodale(4)} = 50000 'kg \text{ massa} \\ & \text{FormaModale(1, 1)} = 0 : \text{FormaModale(1, 2)} = 0.05 : \text{FormaModale(1, 3)} = 0.58 : \text{FormaModale(1, 4)} = 1 \\ & \text{FormaModale(2, 1)} = 0 : \text{FormaModale(2, 2)} = 1.0 : \text{FormaModale(2, 3)} = 0.45 : \text{FormaModale(2, 4)} = -0.63 \end{aligned}
     FormaModale(3, 1) = 0 : FormaModale(3, 2) = 0.99 : FormaModale(3, 3) = -1.0 : FormaModale(3, 4) = 0.55
     Gamma(1) = 1.2 : Gamma(2) = 0.44 : Gamma(3) = 0.25
     AccModale(1) = 0.844 : AccModale(2) = 1.15 : AccModale(3) = 1.15
     Period(1) = 0.68 : Period(2) = 0.27 : Period(3) = 0.154
     For Imode = 1 To NROOT
          'AccModale(Imode) = CalcolaAccelerazioneModale(Imode)
          For Ipoin = 1 To Npoin
              ForzaSismica(Imode, Ipoin) = MassaNodale(Ipoin) * FormaModale(Imode, Ipoin) * Gamma(Imode) * AccModale(Imode)
TaglioBase(Imode) += ForzaSismica(Imode, Ipoin)
          Next Ipoin
    Next Imode
     'trasformo le Forze sismiche nei taglianti di piano
     For Imode = 1 To NROOT
          TagliantiDiPiano(Imode, Npoin) = ForzaSismica(Imode, Npoin)
          For Ipoin = Npoin - 1 To 1 Step -1
              TagliantiDiPiano(Imode, Ipoin) = TagliantiDiPiano(Imode, Ipoin + 1) + ForzaSismica(Imode, Ipoin)
          Next Ipoin
     Next Imode
     'combinazioni quadratiche complete C.Q.C. dei taglianti di piano (ai sensi del D.M. 17.01.2018)
     Csi = SmorzCsi / 100
     TaglioBaseCQC = 0
     For Jmode = 1 To NROOT
          For Imode = 1 To NROOT
Betaij = Period(Jmode) / Period(Imode)
Roij = 8 * Csi ^ 2 * Betaij ^ 1.5
              Roij - 8 * Csi ^ 2 * Betaij ^ 1.5
Roij /= (1 + Betaij) * ((1 - Betaij) ^ 2 + 4 * Csi ^ 2 * Betaij)
               TaglioBaseCQC += Roij * TaglioBase(Imode) * TaglioBase(Jmode)
               For Ipoin = 1 To Npoin
                    TagliantiCQC(Ipoin) += Roij * TagliantiDiPiano(Imode, Ipoin) * TagliantiDiPiano(Jmode, Ipoin)
               Next Ipoin
          Next Imode
    Next Jmode
     TaglioBaseCQC = Math.Sqrt(TaglioBaseCQC)
     For Ipoin = 1 To Npoin
          TagliantiCQC(Ipoin) = Math.Sqrt(TagliantiCQC(Ipoin))
     Next Ipoin
     'e adesso finalmente calcolo le forze di piano come differenze dei taglianti di piano
     ForzaSismicaCQC(Npoin) = TagliantiCQC(Npoin)
For Ipoin = Npoin - 1 To 1 Step -1
          ForzaSismicaCQC(Ipoin) = TagliantiCQC(Ipoin) - TagliantiCQC(Ipoin + 1)
    Next Ipoin
```

```
End Sub
```

Bibliografia

- [1] Bathe, K. J.: "Finite Element Procedures in Engineering Analysis". Prentice Hall, 1982.
- [2] Bertolino, F.: "Metodi agli Elementi Finiti (AA 2019/20)". Università degli Studi di Cagliari Facoltà di Ingegneria e Architettura, 2019.
- [3] CNR-DT 207 R1/2018: "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni". ROMA CNR 06 febbraio 2019.
- [4] D.M. 17.01.2018: "Aggiornamento delle <<Norme tecniche per le costruzioni>>". Supplemento ordinario n° 8 alla GAZZETTA UFFICIALE – Serie generale n° 42.
- [5] Gugliotta, A.: "*Elementi Finiti Parte I*". Otto editore, 2002.
- [6] Hinton, E. Owen, D. R. J.: "Finite Element Programming". Academic Press, 1977.
- [7] Quattordio G.: "Sostegni tubolari in acciaio. Ingegneria applicativa. Elementi di progettazione e verifica". Pitagora, 1997.
- [8] Regione Toscana Comitato tecnico scientifico per il rischio sismico Pareri 2009-2016
 APPENDICE 1: "Verifiche di stabilità di pali metallici poligonali e circolari in classe 4 utilizzati per il sostegno di pale eoliche e antenne";
- [9] UNI EN 1992-1-1: "Eurocodice 2 Progettazione delle strutture di calcestruzzo Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici"
- [10] Varagnolo, P.: "3-D Beam Finite Element Programming -A Practical Guide: Part 1". Researchgate, 2021. DOI:10.13140/RG.2.2.15295.02723
- [11] Vitaliani, R. Martini, L.: "Lezioni di calcolo automatico delle strutture 1^a parte". CUSL NUOVA VITA, 1987.
- [12] Zienkiewicz, O. C.: "The Finite Element Method". Third Edition. Mc Graw Hill, 1977.