

Contratto di Consulenza
Comune di Portogruaro – Università di Trento

STUDIO DELLA SICUREZZA DELLA
TORRE CIVICA DI PORTOGRUARO (VE)

MODELLAZIONE NUMERICA



3

ver. 0 - diff. limitata
File: Portogruaro 3-(0).doc

Gruppo di Ricerca:
Dr. Daniele Zonta
Ing. Marco Molinari
All. Ing. Stefano Toffaletti

0	27/02/2003	Emissione	ST	MM	DZ
n	DATA	REVISIONE	red.	ver.	app.

1 SOMMARIO

1	SOMMARIO	1
2	GENERALITÀ	2
2.1	OGGETTO	2
2.2	OBIETTIVI DELLO STUDIO	2
2.3	FINALITÀ DELLA RICERCA	3
2.4	FASI DELLA RICERCA	3
2.5	SIGNIFICATO DEI SIMBOLI	4
2.6	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
3	MODELLO FEM.....	6
3.1	INFORMAZIONI ACQUISITE.....	6
	<i>Geometria delle strutture</i>	<i>6</i>
	<i>Caratteristiche dei materiali</i>	<i>6</i>
3.2	MODELLAZIONE GEOMETRICA	6
3.3	FONDAZIONI.....	7
	<i>Modellazione del comportamento del terreno</i>	<i>7</i>
	<i>Modellazione fondazione in muratura.....</i>	<i>7</i>
3.4	STRUTTURA.....	8
	<i>Geometria.....</i>	<i>8</i>
	<i>Modellazione canna</i>	<i>9</i>
	<i>Modellazione cella campanaria.....</i>	<i>10</i>
	<i>Modellazione copertura</i>	<i>10</i>
4	IDENTIFICAZIONE.....	11
4.1	PASSO A	12
4.2	PASSO B	13
4.3	PASSO C	14
4.4	PASSO D	15
4.5	RISULTATI DELL'IDENTIFICAZIONE	15
5	ALLEGATI	17

2 GENERALITÀ

2.1 Oggetto

Nell'ambito del contratto di consulenza fra il Comune di Portogruaro e l'Università degli Studi di Trento, avente per oggetto la studio di sicurezza della Torre Civica di Portogruaro, il Laboratorio Prove materiali e Strutture dell'Università di Trento ha condotto una campagna di indagine sperimentale con l'obiettivo di caratterizzare la risposta dinamica della Torre.

Le prove dinamiche si sono svolte nei giorni 31 luglio, 1 agosto e 2 agosto 2002. Erano presenti: l'Ing. Guido Andrea Anese del Comune di Portogruaro; l'Ing. Arturo Busetto e l'Ing. Livio Romanin dello studio di ingegneria Busetto di Pordenone; il Dr. Daniele Zonta, l'Ing. Loris Filippi, l'Ing. Marco Molinari e il Sig. Ivan Brandolise dell'Università di Trento.

Il resoconto tecnico della prova è contenuto nel rapporto numero 1: "Caratterizzazione dinamica sperimentale: Resoconto di prova".

Il resoconto dei metodi di analisi utilizzati nell'elaborazione è contenuto nel rapporto numero 2: "Caratterizzazione dinamica sperimentale: Estrazione modale".

La presente relazione descrive lo sviluppo e l'identificazione di un modello agli Elementi Finiti della Torre, calibrato sulla base dei risultati della sperimentazione eseguita .

2.2 Obiettivi dello studio

- Sviluppo di un modello FEM della struttura.
- Identificazione del modello sulla base dei risultati delle prove di caratterizzazione dinamica.

2.3 Finalità della ricerca

La ricerca di cui è oggetto il contratto di consulenza mira alla definizione dello stato di sicurezza della Torre Civica.

2.4 Fasi della ricerca

Il programma di ricerca si sviluppa nelle seguenti fasi:

i) Caratterizzazione dinamica sperimentale del campanile, con specifica attenzione allo studio del meccanismo di interazione terreno – struttura e agli effetti indotti dal moto delle campane; questa fase prevede in particolare:

- i.a) Svolgimento di una campagna di indagini dinamiche
- i.b) Estrazione modale

ii) Sviluppo e identificazione di un modello di calcolo agli Elementi Finiti calibrato sulla base dei risultati della sperimentazione di cui al punto (i), nonché sulla base dei risultati di ulteriori sondaggi ed indagini che il COMMITTENTE fornirà;

iii) Valutazione dello stato di sicurezza della struttura in relazione alle azioni attese e agli stati limite calcolati sulla base delle risultanze sperimentali, delle elaborazioni numeriche e dalla documentazione acquisita.

La presente relazione si riferisce alla fase (ii) del programma.

2.5 Significato dei simboli

A	ampiezza	m
A_s	costante modale	kg^{-1}
[C]	matrice di smorzamento	$\text{N m}^{-1} \text{s}$
F	forza, vettore forza	N
[M]	matrice di massa	kg
[K]	matrice di rigidità	N m^{-1}
H	funzione di risposta in frequenza	$m_{\text{RMS}} \text{N}^{-1}$
	inerzia	$mg_{\text{RMS}} \text{N}^{-1}$
U	matrice modale	$\text{m kg}^{-1/2}$
C	smorzamento	$\text{N m}^{-1} \text{s}$
F	forza	N
	frequenza	Hz
M	massa	kg
I_j	indici	
K	rigidità	N m^{-1}
N	numero del modo, numero di campioni	
Q	frequenza del sistema smorzato	Hz
T	tempo, coordinata temporale	s
u_{ij}	componente modale	m
X	spostamento	m
\dot{x}	velocità	m s^{-1}
\ddot{x}	accelerazione	$\text{mg}, \text{m s}^{-2}$
β, γ	coefficienti di Rayleigh	
ξ	rapporto di smorzamento	
ϕ	fase	rad
a_{ij}	costante modale	kg^{-1}
η	coordinata normale	
τ	durata dell'impulso	s
ω	frequenza angolare	rad s^{-1}
E_{fond}	modulo di elasticità delle fondazioni	Pa
E_{mur}	modulo di elasticità della muratura della cella campanaria, del tamburo e del tetto	Pa
E_{soil}	modulo di elasticità del terreno	Pa
E_{can}	modulo di elasticità della muratura della canna	Pa
ν	coefficiente di Poisson della canna	
G	modulo di taglio	Pa
Ψ_i	i-esima frequenza modale	
Φ_X	spostamenti normalizzati rispetto alla matrice di massa in direzione X	$\text{Kg}^{-1/2}$
Φ_Y	spostamenti normalizzati rispetto alla matrice di massa in direzione Y	$\text{Kg}^{-1/2}$
ϑ_Z	rotazioni normalizzate rispetto alla matrice di massa intorno all'asse Z	$\text{Kg}^{-1/2} \text{m}^{-1}$

2.6 Normativa di riferimento

Sperimentazione, elaborazione dei dati e restituzione dei risultati sono conformi alle seguenti normative:

UNI 9513
Vibrazioni e urti - Vocabolario
Dicembre 1989

UNI 9916
Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici
Novembre 1991

DIN 4150
Erschütterungen im Bauwesen-Einwirkungen auf bauliche Anlagen
Maggio 1986

UNI ISO 5348
Vibrazioni meccaniche ed urti - Montaggio meccanico degli accelerometri
Marzo 1992

3 MODELLO FEM

Il *modello spaziale* (o *fisico*) della struttura oggetto di indagine è stato creato con il metodo degli elementi finiti.

Il modello FEM della Torre è stato sviluppato facendo uso del codice di calcolo Sap2000 Non-linear, versione 6.11.

Le ipotesi assunte per la modellazione sono:

- comportamento elastico-lineare dei materiali
- ammettenza (deformabilità dinamica) del terreno non trascurabile nel campo delle frequenze di interesse, ai fini della valutazione della stabilità globale delle strutture.
- vincoli rigidi.

3.1 Informazioni acquisite

Geometria delle strutture

Sono state acquisite informazioni sulla geometria delle strutture sulla base di:

- rilievi architettonici forniti dall'Ing. Busetto
- rilievi fotografici

Caratteristiche dei materiali

Informazioni sulle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e del terreno sono state fornite da

- prove con martinetti piatti
- carotaggi

I risultati delle prove sono disponibili nella relativa relazione.

3.2 Modellazione geometrica

In base ai risultati dei rilievi effettuati, la geometria della struttura è stata modellata come segue:

Nodi	6'237
Frames	52
Shells	476
Solid	3'395

3.3 Fondazioni

Modellazione del comportamento del terreno

L'effetto della presenza del terreno è stato simulato disponendo sotto l'impianto delle fondazioni una fila di elementi solid isoparametrici ad 8 nodi a "modi incompatibili", che minimizzano l'errore numerico.

Tutti i nodi del piano di base (-3.89m) degli elementi terreno di altezza 1m sono vincolati in tutte le direzioni dello spazio ($u_x=u_y=u_z=0$); alla quota di imposta della fondazione (-2.89m) solo nelle direzioni trasversali ($u_x=u_y=0$ u_z libera).

In tal modo i nodi di base della fondazione possono subire esclusivamente spostamenti verticali e di conseguenza la struttura può solo ruotare alla base.

Gli elementi solid che compongono il terreno sono stati definiti come un materiale elastico lineare con le seguenti caratteristiche fisiche:

Massa per unità di volume	1'700 kg/m ³
Peso per unità di volume	16'677 N/m ³
Modulo di elasticità E	2.83·10 ⁸ N/m ²
Modulo di Poisson ν	0.01

Va sottolineato che questi valori non si riferiscono alle proprietà meccaniche effettive del terreno presente in situ, ma sono relativi al comportamento di elementi equivalenti che producono, nei riguardi degli effetti sulla struttura, una risposta con buona approssimazione assimilabile a quella del terreno reale.

Al modulo di Poisson è stato assegnato valore 0.01: gli elementi solidi con cui è stato modellato il terreno consentono uno spostamento verticale con un rigonfiamento laterale del tutto trascurabile.

Il vincolo ai nodi alla base delle fondazioni risulta quindi del tutto simile a quello offerto da una molla reagente a trazione (terreno alla Winkler).

La geometria del terreno sottostante la fondazione è stata modellata come segue:

Nodi	242
Frames	-
Shells	-
Solid	100

Modellazione fondazione in muratura

La fondazione, di spessore 2.27m, è stata modellata con 6 strati di elementi solid isoparametrici ad 8 nodi (in totale 600, 100 per strato), ciascuno dello spessore di 0.378m.

Il materiale della fondazione è elastico lineare, con le seguenti caratteristiche meccaniche:

Massa per unità di volume	1'800 kg/m ³
Peso per unità di volume	17'658 N/m ³
Modulo di elasticità E	6.43·10 ⁹ N/m ²
Modulo di Poisson ν	0.2

La geometria della fondazione in muratura è stata modellata come segue:

Nodi	726
Frames	-
Shells	-
Solid	600

3.4 Struttura

Geometria

Le dimensioni geometriche sono state desunte dal rilievo architettonico, che è stato riprodotto in modo fedele nel modello FEM. In particolare è stata definita in modo preciso la posizione dei nodi in 10 sezioni orizzontali, interpolando linearmente per le quote intermedie. Quindi tanto le dimensioni, che gli spessori della muratura variano con continuità tra i valori definiti nelle diverse sezioni.

La quota 0.0 assunta nel modello FEM coincide con la quota -0.26m del rilievo architettonico (piano di posa della soletta interna, approssimativamente coincidente con il livello esterno medio del terreno).

Sono state definite le sezioni alle quote:

- -2.89m (piano di posa delle fondazioni)
- -0.62m (estradosso delle fondazioni)
- 0.0m
- +15.97m
- +22.97m
- +31.69m (avvolto inferiore)
- +31.89m (piano di calpestio della cella campanaria)
- +36.98m (piano di calpestio del terrazzino)
- +42.92m (livello di imposta della copertura)
- +56.71m (sommità della copertura).

Modellazione canna

La canna è stata modellata con 66 strati di elementi solid isoparametrici ad 8 nodi, di spessore variabile come di seguito elencato:

- 40 strati di spessore 0.399m, fino al livello 15.97m
- 7 strati di spessore 1m, fino al livello 22.97m
- 9 strati di spessore 0.969m, fino al livello 31.69m
- 11 strati di spessore 0.529m, fino al livello 36.98m.

Per modellare la geometria della canna sono stati utilizzati:

Nodi	4'872
Frames	48
Shells	69
Solid	2'695

Per modellare le colonnine delle trifore sono stati utilizzati degli elementi frame, mentre per i tre impalcati presenti a quota 26.20m, 31.43m e 36.62m sono stati utilizzati elementi shell (30 shells e 41 nodi, 26 shells e 37 nodi, 13 shells e 25 nodi rispettivamente). La modellazione degli avvolti posti a quota 26.20m e 31.43m è stata effettuata utilizzando per gli shell uno spessore costante, tale che la massa del modello corrisponda a quella reale dell'avvolto.

Non si è invece ritenuto opportuno modellare le strutture degli impalcati lignei e delle scale che li collegano.

Il materiale costituente la canna è elastico lineare, con le seguenti caratteristiche meccaniche:

Massa per unità di volume	1'800 kg/m ³
Peso per unità di volume	17'658 N/m ³
Modulo di elasticità E	2.83·10 ⁹ N/m ²
Modulo di Poisson ν	0.49

Il materiale costituente le colonnine in pietra delle trifore è anch'esso elastico lineare, con le seguenti caratteristiche meccaniche:

Massa per unità di volume	2'446 kg/m ³
Peso per unità di volume	24'000 N/m ³
Modulo di elasticità E	3.00·10 ¹⁰ N/m ²
Modulo di Poisson ν	0.2

Modellazione cella campanaria

La cella campanaria è stata modellata con elementi shell, di spessore 0.52m, costituiti di un materiale elastico lineare di caratteristiche meccaniche:

Massa per unità di volume	1'800 kg/m ³
Peso per unità di volume	17'658 N/m ³
Modulo di elasticità E	1.03·10 ¹⁰ N/m ²
Modulo di Poisson ν	0.2

Per modellare la geometria della cella campanaria sono stati utilizzati:

Nodi	146
Frames	4
Shells	157
Solid	-

Modellazione copertura

La copertura è stata modellata con elementi shell, di spessore 0.35m costante e valore medio in copertura quale rilevato dal disegno architettonico.

Il materiale della copertura è elastico lineare di caratteristiche meccaniche:

Massa per unità di volume	1'800 kg/m ³
Peso per unità di volume	17'658 N/m ³
Modulo di elasticità E	1.03·10 ¹⁰ N/m ²
Modulo di Poisson ν	0.2

Per modellare la geometria della copertura sono stati utilizzati:

Nodi	251
Frames	-
Shells	250
Solid	-

4 IDENTIFICAZIONE

Implementato il modello ad elementi finiti della struttura esistente, sono state individuate le grandezze elastiche (alcuni di questi parametri hanno un valore effettivamente incerto; altri, invece, sono noti in modo relativamente attendibile, ma vengono ugualmente variati, per simulare le indeterminazioni proprie nella formulazione del modello).

Sono stati variati i parametri che maggiormente influenzano la risposta della struttura, valutata in termini di frequenze modali:

- E_{fond} : modulo di elasticità delle fondazioni;
- E_{mur} : modulo di elasticità della muratura della cella campanaria, del tamburo e del tetto;
- E_{soil} : modulo di elasticità del terreno;
- E_{can} : modulo di elasticità della muratura della canna;
- ν : coefficiente di Poisson della canna.

Sono stati tenuti fissi la massa della muratura (1800 kg/m^3) ed il modulo elastico della muratura in fondazione, di valore incerto ed estensione limitata.

Obiettivo dell'identificazione è stata la minimizzazione dell'errore nella stima delle grandezze:

- Ψ_1 frequenza del I° modo proprio: modo flessionale primario;
- Ψ_2 frequenza del II° modo proprio: modo flessionale secondario;
- Ψ_3 frequenza del III° modo proprio: modo bi-flessionale primario;
- Ψ_4 frequenza del IV° modo proprio: modo bi-flessionale secondario;
- Ψ_5 frequenza del V° modo proprio: modo torsionale.

Una volta scelti i parametri, l'identificazione è consistita nella valutazione ottimale di questi ultimi attraverso una tecnica statistica.

4.1 Passo A

Nel passo A ai 5 parametri dell'analisi sono stati assegnati i seguenti valori:

E_{fond}	1,00E+10	Pa
E_{mur}	1,00E+10	Pa
E_{soil}	8,00E+07	Pa
E_{can}	1,00E+10	Pa
ν	0,2	

L'analisi modale ha fornito le frequenze riportate nella seconda colonna (a). Nella terza sono riportati i valori rilevati sperimentalmente (b). Nella quarta, lo scarto percentuale, definito come $\frac{(a-b)}{a}$

	Modello FEM (Hz)	Misura (Hz)	Scarto (%)
Ψ_1	0,848	0,85	0,24
Ψ_2	0,871	0,88	1,02
Ψ_3	5,46	3,62	-50,83
Ψ_4	5,57	3,70	-50,54
Ψ_5	9,02	4,34	-107,83
Somma dei quadrati degli scarti:			1,677

4.2 Passo B

I valori dei moduli di elasticità sono stati modificati in modo da ridurre lo scarto percentuale delle frequenze dei modi Ψ_3 , Ψ_4 , Ψ_5 , mantenendo invariato il valore del modulo di Poisson:

E_{fond}	5,00E+09	Pa
E_{mur}	8,00E+09	Pa
E_{soil}	2,20E+08	Pa
E_{can}	2,20E+09	Pa
ν	0,2	

che hanno fornito le seguenti frequenze (nella terza colonna sono stati riportati i valori provenienti dalle osservazioni e nella quarta lo scarto percentuale):

	Modello FEM (Hz)	Misura (Hz)	Scarto (%)
Ψ_1	0,752	0,85	11,53%
Ψ_2	0,774	0,88	12,05%
Ψ_3	3,2	3,62	11,60%
Ψ_4	3,281	3,70	11,32%
Ψ_5	4,32	4,34	0,46%
Somma dei quadrati degli scarti:			0,054

I valori delle frequenze modali di primo e secondo tipo sono caratterizzate da scarto confrontabile, manifestando una sottostima del modulo elastico reale.

Si discosta la frequenza caratteristica del modo torsionale, valore che dipende essenzialmente dal modulo di taglio G e quindi dal modulo di Poisson ν .

Secondo la relazione:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

è necessario operare una diminuzione del modulo di taglio G per ridurre la frequenza torsionale: pertanto è necessario aumentare il valore di ν .

4.3 Passo C

I valori dei moduli di elasticità sono stati incrementati proporzionalmente allo scarto percentuale, mentre pure il valore del modulo di Poisson è stato incrementato:

E_{fond}	6,15E+09	Pa
E_{mur}	9,84E+09	Pa
E_{soil}	2,71E+08	Pa
E_{can}	2,71E+09	Pa
ν	0,47	

L'analisi ha fornito le seguenti frequenze:

	Modello FEM (Hz)	Misura (Hz)	Scarto (%)
Ψ_1	0,835	0,85	1,76%
Ψ_2	0,859	0,88	2,39%
Ψ_3	3,528	3,62	2,54%
Ψ_4	3,61	3,70	2,43%
Ψ_5	4,37	4,34	-0,69%
Somma dei quadrati degli scarti:			0,002

4.4 Passo D

Nel passo D tanto i valori dei moduli di elasticità quanto il valore del modulo di Poisson sono stati incrementati proporzionalmente allo scarto percentuale dai valori misurati:

E_{fond}	6,43E+09	Pa
E_{mur}	1,03E+10	Pa
E_{soil}	2,83E+08	Pa
E_{can}	2,83E+09	Pa
ν	0,49	

Sono stati ottenuti i valori delle frequenze modali:

	Modello FEM (Hz)	Misura (Hz)	Scarto (%)
Ψ_1	0,854	0,85	-0,47%
Ψ_2	0,879	0,88	0,11%
Ψ_3	3,61	3,62	0,28%
Ψ_4	3,69	3,70	0,27%
Ψ_5	4,44	4,34	-2,30%
Somma dei quadrati degli scarti:			0,001

Dati i bassi valori della somma dei quadrati degli scarti e degli scarti stessi, i valori utilizzati nell'ipotesi D sono quelli da utilizzare come parametri per il modello FEM.

4.5 Risultati dell'identificazione

Di seguito viene riportato il confronto tra i valori degli spostamenti in direzione X e in direzione Y (Φ_X , Φ_Y) e le rotazioni lungo l'asse Z (ϑ_Z) (normalizzati rispetto alla matrice di massa), ottenuti dal modello FEM e quelli ricavati dall'analisi dei dati sperimentali.

La rappresentazione delle prime sette forme modali è riportata in appendice 3.A.

Studio della sicurezza della Torre Civica di Portogruaro
 Caratterizzazione dinamica sperimentale: Modellazione numerica

Modo	1		2		3		4		5	
	<i>Modello</i>		<i>Modello</i>		<i>Modello</i>		<i>Modello</i>		<i>Modello</i>	
Freq. [Hz]	0.85	0.85	0.88	0.88	3.62	3.61	3.7	3.69	4.34	4.44

		Quota									
Φ_X [kg ^{-1/2}]	0.00	0	1.37E-05	0	1.55E-05	0	-5.06E-05	0	4.92E-05	0	-2.32E-06
	8.00	1.10E-04	9.96E-05	9.40E-05	1.12E-04	-1.70E-04	-3.45E-04	1.30E-04	3.33E-04	3.00E-05	-1.48E-05
	16.00	3.40E-04	2.49E-04	2.50E-04	2.80E-04	-3.20E-04	-5.86E-04	2.40E-04	5.63E-04	1.10E-04	-3.23E-05
	24.00	6.10E-04	4.43E-04	5.70E-04	5.00E-04	-3.90E-04	-5.55E-04	2.10E-04	5.34E-04	5.20E-06	-1.37E-05
	31.37	9.30E-04	6.58E-04	7.60E-04	7.43E-04	-1.70E-04	-1.69E-04	9.20E-05	1.63E-04	1.80E-04	1.82E-05
	39.90	1.30E-03	8.19E-04	7.90E-04	9.25E-04	6.50E-04	3.65E-04	-2.70E-04	-3.51E-04	-3.80E-04	1.00E-05
Φ_Y [kg ^{-1/2}]	0.00	0	1.54E-05	0	-1.38E-05	0	-4.83E-05	0	-5.07E-05	0	3.42E-06
	8.00	2.00E-05	1.13E-04	-2.30E-04	-9.98E-05	-1.70E-04	-3.31E-04	-1.70E-04	-3.44E-04	3.60E-05	2.09E-05
	16.00	1.30E-04	2.81E-04	-3.30E-04	-2.49E-04	-2.70E-04	-5.63E-04	-2.90E-04	-5.84E-04	3.80E-05	3.58E-05
	24.00	1.90E-04	5.01E-04	-4.60E-04	-4.44E-04	-3.10E-04	-5.34E-04	-3.60E-04	-5.54E-04	3.10E-04	4.59E-04
	31.37	2.90E-04	7.43E-04	-7.20E-04	-6.59E-04	-1.80E-05	-1.63E-04	-1.50E-05	-1.70E-04	3.60E-04	-2.78E-05
	39.90	3.70E-04	9.24E-04	-1.40E-03	-8.19E-04	2.70E-04	3.51E-04	5.40E-04	3.64E-04	2.80E-04	-2.25E-05
ϑ_Z [kg ^{-1/2} m ⁻¹]	0.00	0	3.91E-09	0	-5.65E-08	0	5.01E-08	0	-3.37E-07	0	-5.43E-06
	8.00	1.10E-05	-2.80E-09	2.50E-05	-7.15E-07	1.90E-05	6.12E-07	-9.60E-06	-3.30E-06	-8.00E-05	-9.75E-05
	16.00	7.60E-06	2.41E-08	6.50E-05	-1.21E-06	2.50E-05	6.17E-07	-2.80E-05	-4.32E-06	-1.70E-04	-1.88E-04
	24.00	1.10E-05	6.25E-08	2.20E-06	-1.44E-06	-4.40E-05	5.77E-07	-1.30E-05	-4.98E-06	-3.00E-04	-2.01E-04
	31.37	-2.20E-05	4.76E-08	-2.80E-05	-1.50E-06	-3.50E-06	2.11E-07	-7.80E-05	-5.26E-06	-2.90E-04	-3.17E-04
	39.90	-8.00E-06	5.73E-08	1.50E-05	-1.56E-06	5.60E-05	1.60E-07	-5.90E-05	-5.13E-06	-2.50E-04	-3.65E-04

5 ALLEGATI

3.A Rendering e forme modali.