

Ing. DAVIDE GRANDIS

MezzadrlIngegneria S.r.l.

Via Mulinetto n.35 - 44100 Ferrara

Tel.0532.765117 - Fax.0532.769513 - email: [grandis@mezzadrlingegneria.it](mailto:grandis@mezzadrlingegneria.it)

## REGIONE EMILIA ROMAGNA COMUNE DI FERRARA



viale della Fiera, 11 Ferrara



EVENTI SISMICI MAGGIO 2012

INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO CONTROLLATO AL 60%

### CORPO DI INGRESSO

### RELAZIONE DI CALCOLO E DEI MATERIALI

Secondo Art. 3 - comma 10 - Legge n. 122 01.08.2012

Secondo Art. 8.3 – D.M. 14.01.2008 - NTC

Ferrara, Marzo 2016

6931MV\_RelazioneCalcoloMateriali\_CorpoIngresso



IL TECNICO:

Ing. Davide Grandis

COLLABORATORE:

Ing. Matteo Vincenzi



## INDICE

PREMESSA.....	3
1. RISULTATI DELL'ANALISI DI VULNERABILITA' SISMICA .....	4
2. DESCRIZIONE GENERALE DEL COMPLESSO FIERISTICO .....	5
2.1 UBICAZIONE.....	5
2.2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL COMPLESSO .....	5
3. DESCRIZIONE DEL FABBRICATO IN OGGETTO .....	8
4. DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO .....	11
5. NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CARATTERISTICHE MATERIALI.....	12
5.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	12
5.2 MATERIALI ESISTENTI.....	12
5.2.1 Calcestruzzo (CIRCOLARE §C8.7.2 e NTC 2008 §11.2) .....	12
5.2.2 Acciaio per cemento armato (CIRCOLARE §C8.7.2 e NTC 2008 § 4.1.2.1.1.3) .....	13
5.3 MATERIALI DI PROGETTO .....	16
5.3.1 Materiali Compositi (CNR DT-200 R1/2013).....	16
6 AZIONI SULLE COSTRUZIONI.....	17
6.1 PESI PROPRI DEI MATERIALI STRUTTURALI (NTC 2008 § 3.1.2) .....	17
6.2 AZIONE DELLA NEVE (NTC 2008 § 3.4) .....	17
7 AZIONE SISMICA (NTC 2008 § 3.2) .....	19
7.1 REGOLARITA' (NTC 2008 § 7.2.2) .....	19
7.2 VITA NOMINALE (NTC 2008 § 2.4.1).....	21
7.3 CLASSE D'USO (NTC 2008 § 2.4.2).....	21
7.4 PERIODO DI RIFERIMENTO DELL'AZIONE SISMICA (NTC 2008 § 2.4.3) .....	21
7.5 CRITERI DI PROGETTAZIONE (NTC 2008 § 7.2.1) .....	22
7.6 TIPOLOGIA STRUTTURALE (NTC 2008 § 7.4.3.1 e § 7.4.3.2) .....	23
7.7 STATI LIMITE E PROBABILITA' DI SUPERAMENTO (NTC 2008 § 3.2.1) .....	24
7.8 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO (NTC 2008 § 3.2.2).....	25
7.9 DESCRIZIONE DEL MOTO SISMICO (NTC 2008 § 3.2.3.1).....	26
8 COMBINAZIONE DELLE AZIONI (NTC 2008 §2.5.3).....	31
8.1 STATO LIMITE ULTIMO (SLU) .....	31
8.2 COMBINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI.....	32

8.3	RISPOSTA ALLE DIVERSE COMPONENTI DELL'AZIONE SISMICA ED ALLA VARIABILITA' SPAZIALE DEL MOTO (NTC 2008 § 7.3.5) .....	33
9	MODELLAZIONE DEL FABBRICATO .....	34
10	ANALISI DINAMICA LINEARE (NTC 2008 §7.3.3.1) .....	36
10.1	DETERMINAZIONE DEI MODI PRINCIPALI DI VIBRARE .....	37
11	VERIFICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO .....	38
4.1	VERIFICA DELLE PARETI .....	39
4.1.1	Verifica a pressoflessione .....	39
11.1	VERIFICA DEL MARTELLAMENTO .....	42
12	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	45
13	RIASSUNTO CONCLUSIVO DELLE ANALISI SVOLTE .....	47

## PREMESSA

Quadro legislativo a seguito degli eventi sismici del 2012 in Emilia Romagna:

- **Ordinanza** Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile N. 0002 in data 2.06.20121
- **Decreto Legge 6 giugno 2012 N.74**
- **Circolare Regione Emilia Romagna** – C.R. 2012 0000002 del 12.06.2012
- **Legge di conversione 1.08.2012 N.122**

Secondo quanto indicato nella Legge 122 del 01.08.2012, *“Per quanto concerne le imprese di cui al comma 8 , nelle aree colpite dagli eventi sismici del maggio 2012 in cui l’accelerazione spettrale subita dalla costruzione in esame, così come risulta dalle Mappe di Scuotimento dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, abbia superato il 70 per cento dell’accelerazione spettrale elastica richiesta dalle norme vigenti per il progetto di una costruzione nuova e questa, intesa come insieme di struttura, elementi non strutturali e impianti, non sia uscita dall’ambito del comportamento lineare elastico, l’adempimento di cui al comma 9 si intende soddisfatto.*

*Qualora l’accelerazione spettrale come sopra individuata non abbia superato il 70 per cento dell’accelerazione spettrale elastica richiesta dalla norma vigente ad una costruzione nuova di analoghe caratteristiche, per il profilo di sottosuolo corrispondente, tale costruzione dovrà essere sottoposta a valutazione della sicurezza effettuata conformemente al capitolo 8.3 delle norme tecniche delle costruzioni di cui al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008.*

*Qualora il livello di sicurezza della costruzione risulti inferiore al 60 per cento della sicurezza richiesta ad un edificio nuovo, dovranno eseguirsi interventi di miglioramento sismico finalizzati al raggiungimento almeno del 60 per cento della sicurezza richiesta ad un edificio nuovo ...”*

Come analizzato nella *Relazione della Valutazione della Sicurezza Sismica*, a corredo della presente relazione di calcolo, *l’accelerazione spettrale che ha interessato il fabbricato in oggetto è risultata INFERIORE al 70% dell’accelerazione sismica richiesta dall’NTC 2008.* L’analisi dettagliata è riportata nella già citata relazione di vulnerabilità.

**La presente relazione tecnica è esplicativa degli interventi atti a raggiungere il livello di sicurezza sismica minimo del 60% definito dalla Legge 122 dell’Agosto 2012.**

## 1. RISULTATI DELL'ANALISI DI VULNERABILITA' SISMICA

L'analisi sismica effettuata sulla struttura e riportata in forma esplicita nella *Relazione della Valutazione della Sicurezza Sismica* mostra l'incapacità del fabbricato a rispondere all'azione sismica richiesta da normativa, in particolare **il livello di sicurezza riscontrato è pari al 53%** (resistenza a pressoflessione dei pilastri).

PRESSOFLESSIONE	TAGLIO
53%	75%

Tabella 1: Sintesi risultati RELAZIONE DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA

## 2. DESCRIZIONE GENERALE DEL COMPLESSO FIERISTICO

### 2.1 UBICAZIONE

Regione: Emilia Romagna

Provincia: Ferrara

Comune: Ferrara

Indirizzo: via della Fiera, 11

CAP: 44124

Coordinate geografiche: Longitudine: 11,173804 - Latitudine: 44,785037

### 2.2 CARATTERISTICHE GENERALI DEL COMPLESSO

Il complesso, edificato a fine degli anni '80, risulta essere composto da più fabbricati strutturalmente scollegati fra di loro.

Come si osserva dalla Figura 1 il complesso fieristico si compone di 6 padiglioni espositivi, e tre diverse tipologie di corpo di collegamento fra i suddetti padiglioni.

#### A) Padiglioni espositivi

Le strutture che formano i padiglioni possono suddividersi secondo due diverse tipologie con dimensioni in pianta leggermente diverse:

Padiglioni 1 e 2 – Dimensione in pianta pari a circa m. 45x50.

Padiglioni 3, 4, 5 e 6 – Dimensioni in pianta pari a circa m. 55x50.

Tutti i padiglioni risultano costruiti con pilastri e strutture verticali in conglomerato cementizio armato realizzato in opera disposte secondo una maglia estremamente regolare mentre gli elementi in elevazione (travi e tegoli di copertura) risultano realizzati con elementi in conglomerato cementizio prefabbricato precompresso.

#### B) Corpo principale di ingresso – Collegamento padiglioni 1-2

Tale corpo di fabbrica ha, in pianta, una forma a T, di dimensioni 48x58m circa ed un'altezza complessiva di 18m circa da pavimento finito. L'edificio è più alto delle strutture dei padiglioni espositivi adiacenti. Il fabbricato è composto da un piano terra, un piano primo e un piano secondo; un piano terzo è presente solo in una porzione limitata, adiacente al padiglione 3. I solai di piano sono di tipo prefabbricato predalles di altezze diverse.

**C) Corpo di collegamento in c.a. – Collegamento padiglioni 3-4 e 5-6**

Strutture organizzate su una pianta rettangolare dallo sviluppo particolarmente allungato con dimensione pari a circa m 7 x 68 (circa 480 mq per piano) che si elevano per tre piani fuori terra e presentano elementi portanti in conglomerato cementizio armato gettato in opera a comportamento prossimo a quello scatolare.

**D) Corpo di collegamento in muratura – Collegamento padiglioni 4-5**

Corpo intermedio che si eleva con un solo piano fuori terra si sviluppa su una pianta rettangolare di dimensioni complessive pari a circa m. 7 x 47 (circa 330 mq) presentando struttura portante verticale in muratura ordinaria.

L'intero complesso risulta impostato su una pianta di superficie coperta pari a circa 18.600 mq e con superficie comprensiva anche delle parti in elevazione pari a circa totali mq 23.054 mq escluse le coperture.



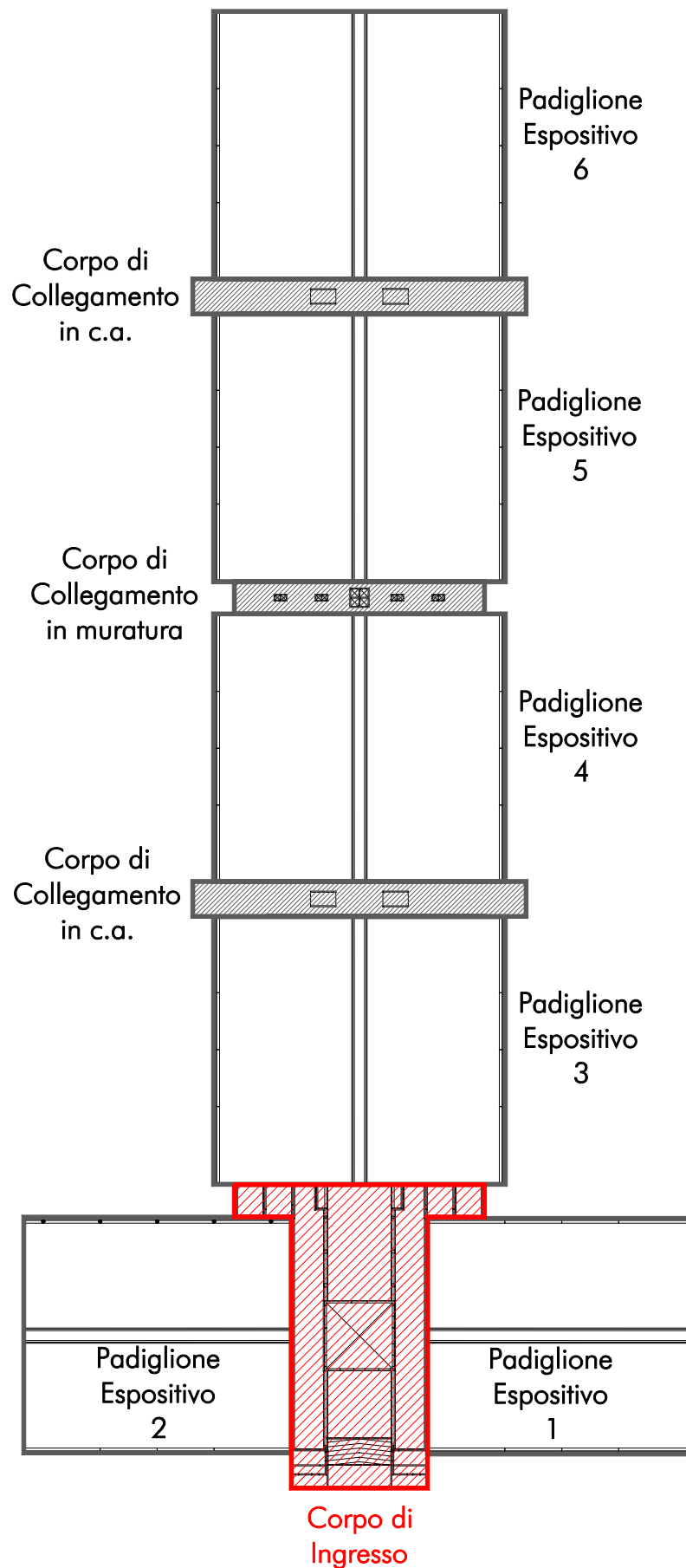


Figura 1: Planimetria generale del complesso.

### 3. DESCRIZIONE DEL FABBRICATO IN OGGETTO

Con riferimento al complesso fieristico descritto nel capitolo precedente, oggetto della presente Relazione di Vulnerabilità sismica è il **Corpo di ingresso** (Corpo di collegamento fra i padiglioni 1-2-3).

Il fabbricato ha forma a "T", circoscritto in un rettangolo di circa 47x58m, con riferimento al piano primo, dove la struttura si allarga di qualche metro nella fona frontale rispetto al piano terra.

**Pianta edificio:** irregolare a "T"

**Dimensione dei lati del rettangolo "circoscritto" alla costruzione:** (PT) 47x55m – (1P) 47x58m

**Numero di piani fuori terra:** 4 (PT-1P-2P-3P), precisando che il 3P si trova unicamente nella zona adiacente al padiglione espositivo 3. Il corpo principale del fabbricato si estende dunque su 3 piani fuori terra.

**Superficie coperta:** 480 mq

**Superficie interna:** 1248.8 mq

**Altezza interna:** 3.5m al PT, 4.05m al 1P, 3.47m al 2P

#### Presenza di edifici adiacenti – Giunti strutturali

Il fabbricato risulta essere intermedio fra i padiglioni espositivi numero 1, 2 e 3 del centro fieristico. Il corpo risulta essere più alto dei padiglioni espositivi, in quanto il secondo piano del fabbricato è adibito a locale impianti di servizio ai padiglioni adiacenti. Il giunto strutturale è minimo in corrispondenza delle travi di bordo e delle travi centrali dei padiglioni rispettivamente pari a 40mm e 80mm, mentre l'ala superiore dei tegoli di copertura risulta essere più distaccata. Tale giunto strutturale risulta essere insoddisfacente per i mutui spostamenti fra i fabbricati in campo sismico.

#### Caratteristiche costruttive

**Struttura Portante verticale:** Il fabbricato è strutturalmente realizzato mediante pareti in calcestruzzo gettato in opera dello spessore di 20cm e 25cm concentrate alle estremità del fabbricato, mentre la zona centrale risulta essere realizzata al piano terra da pilastri di dimensione 40x40cm che si collegano ad una trave di piano dalla quale partono dei setti in calcestruzzo sui quali sono presenti numerose bucatore per la realizzazione di adeguate aperture.

**Solai di piano:** Il solaio di piano e di copertura è di tipo predalles della dimensione di 4+24+4cm (32cm).

**Fondazioni:** Le fondazioni sono costituite da un reticolo di travi rovesce, avente larghezza della ciabatta variabile. Tale graticcio si innesta su una serie di pali in calcestruzzo del diametro di 60cm.

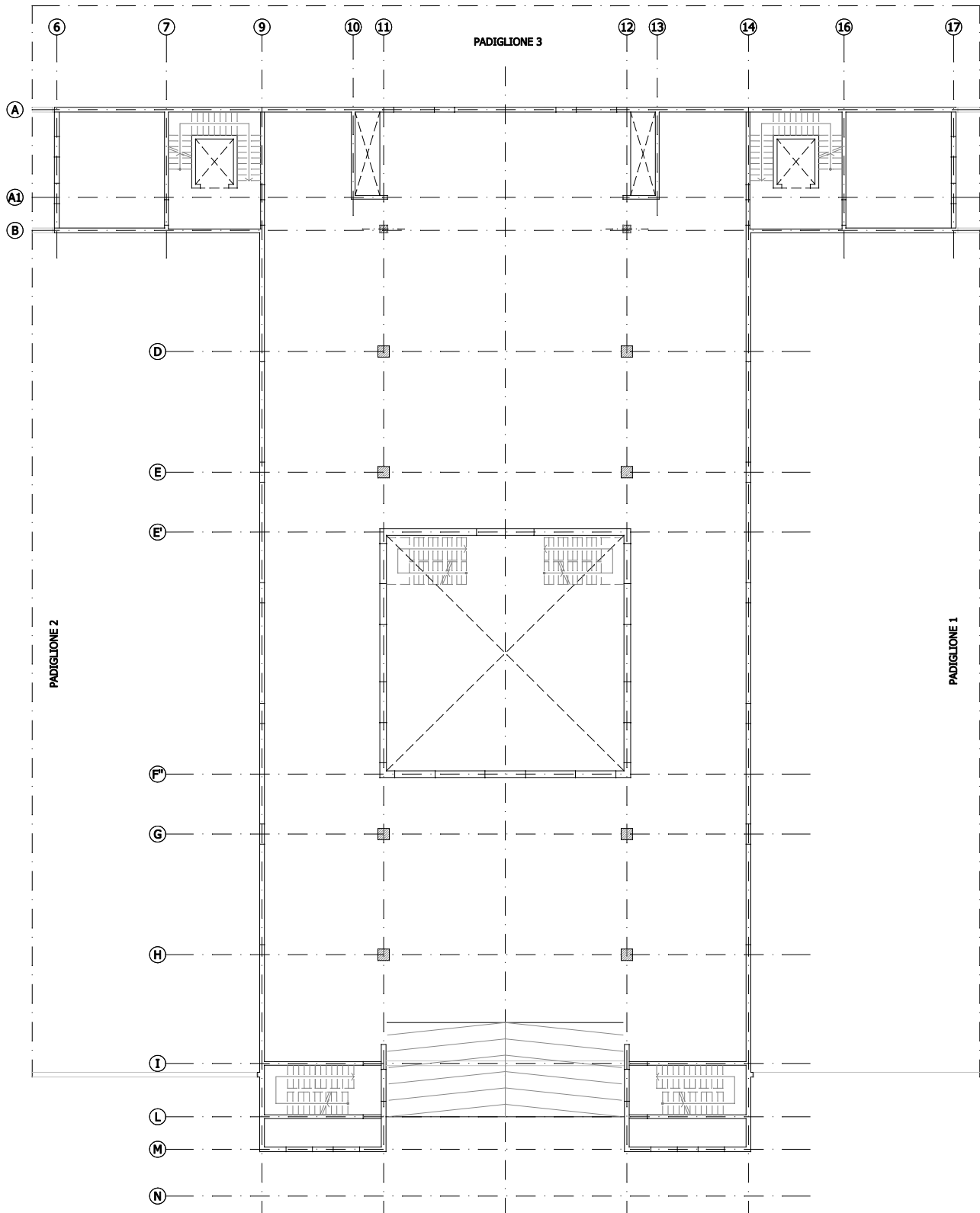
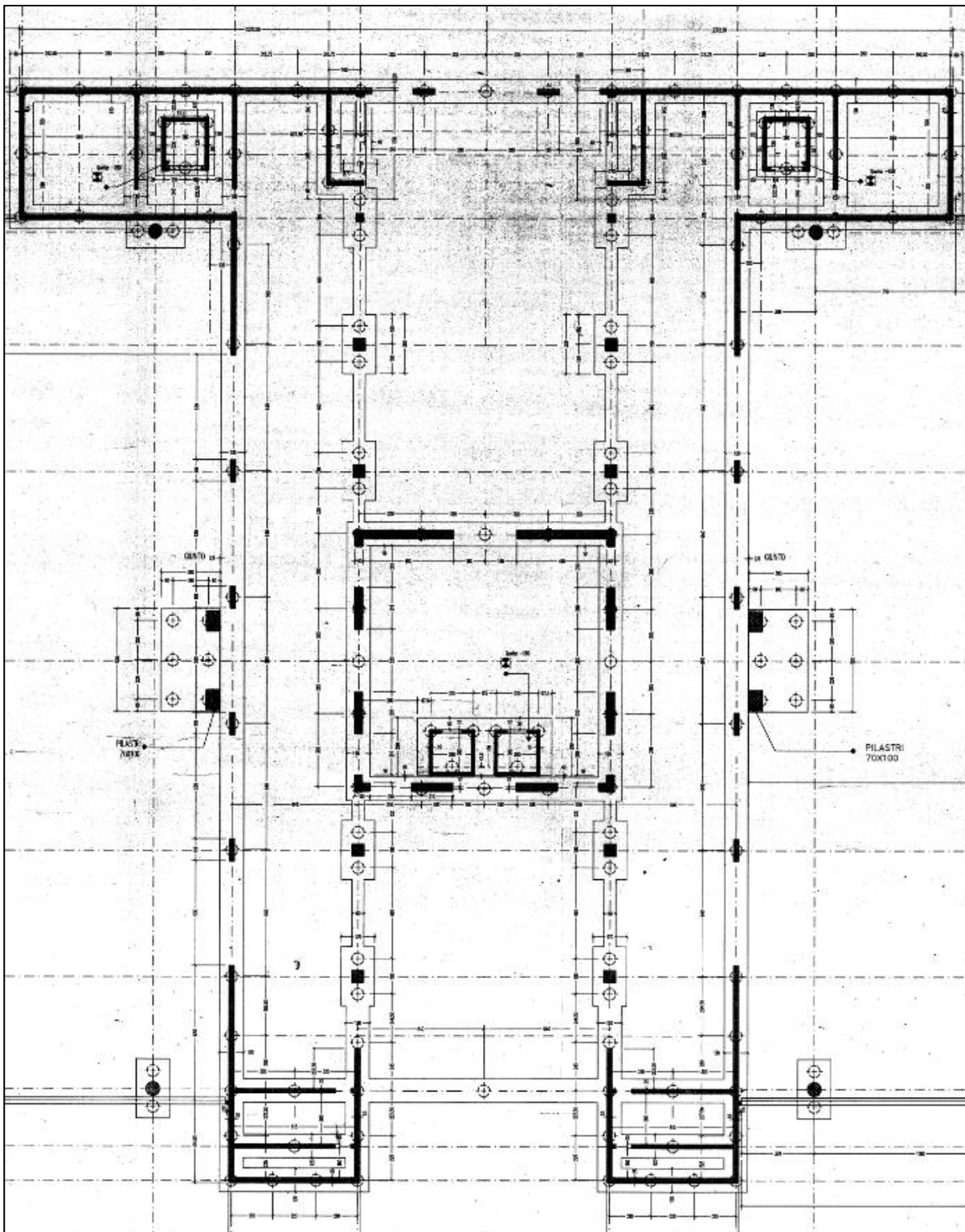
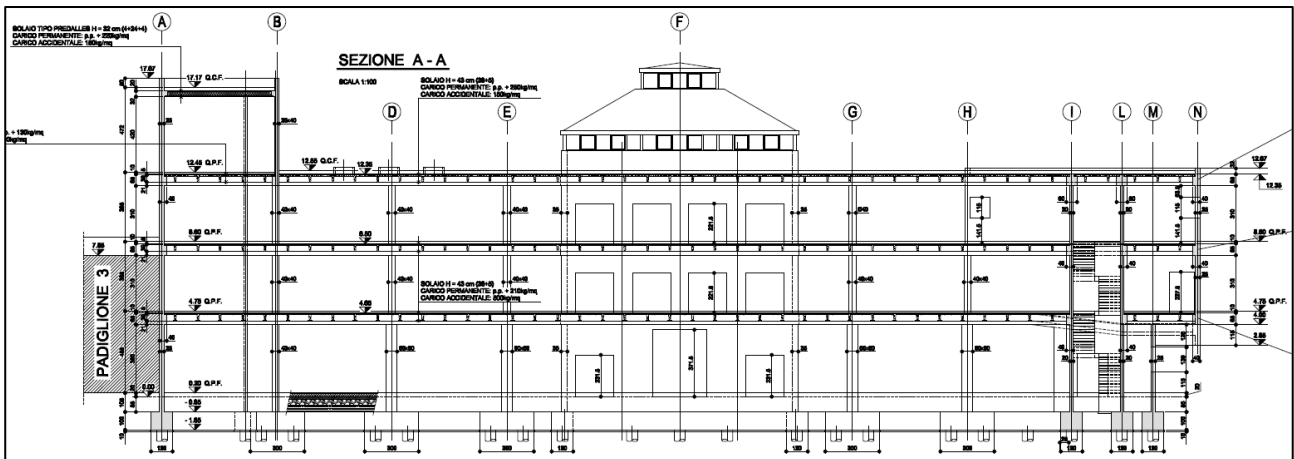


Figura 2: Pianta del fabbricato.





## 4. DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Il corpo di ingresso, realizzato totalmente in calcestruzzo armato gettato in opera con l'esclusione dei solai di piano realizzati in parte con solai predalles prefabbricati e tegoli pi greco, entrambi con soletta collaborante, presentano crisi localizzate nelle alla due estremità del corpo di fabbrica. Gli interventi gli miglioramento sismico sono:

- Rinforzo delle pareti in calcestruzzo mediante placcaggio di materiale composito con fibre di carbonio, localizzato nelle pareti che entrano in crisi a seguito dell'azione sismica di progetto.

## 5. NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CARATTERISTICHE MATERIALI

### 5.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La verifica dell'edificio oggetto di studio è stata svolta secondo le seguenti normative vigenti:

- D.M. 14/01/2008 "Norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2008)
- Circolare 02/02/2009 n° 617/C.S.LL.PP.
- Eurocodice 2. Progettazione delle strutture di calcestruzzo; - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici
- Legge 1° agosto 2012 n. 122

### 5.2 MATERIALI ESISTENTI

Le caratteristiche meccaniche dei materiali in sito sono state ricavate dalle relazioni specialistiche e dai disegni strutturali reperiti dell'epoca di realizzazione del fabbricato.

Si considera un livello di conoscenza LC2 a cui corrisponde un fattore di confidenza FC pari a 1.2.

#### 5.2.1 Calcestruzzo (CIRCOLARE §C8.7.2 e NTC 2008 §11.2)

Le indicazioni reperite sulla qualità del calcestruzzo gettato in opera utilizzato indicano un calcestruzzo di classe C25/30.

Si riportano nella tabella seguente le caratteristiche del tipo di calcestruzzo a cui si è fatto riferimento:

$R_{ck}$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$E_{cm}$ [MPa]	$\epsilon_{c2}$	$\epsilon_{cu2}$
30	25	31476	0,02	0,0035

Tabella 2: Caratteristiche del calcestruzzo utilizzate.

La relazione tensioni-deformazioni utilizzata per progettare le sezioni è caratterizzata da un diagramma parabola-rettangolo, utilizzato per lo studio delle sezioni inflesse e pressoinflesse.

Le funzioni che definiscono questo diagramma sono:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^2 \right] \quad \text{per } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{per} \quad \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

Il diagramma parabola-rettangolo è riportato in nella seguente figura:

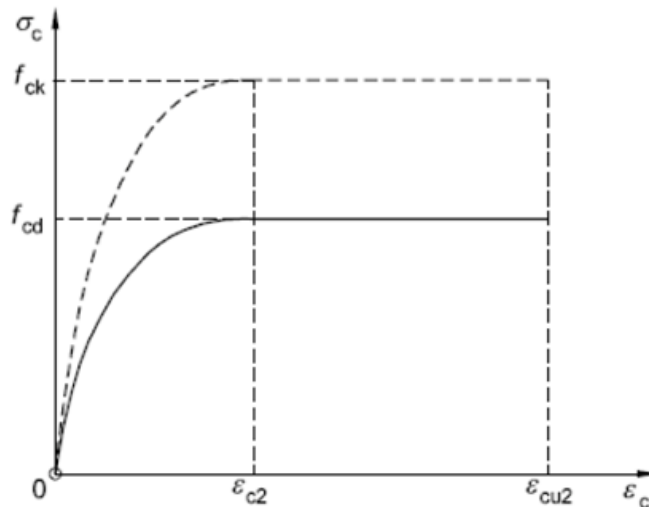


Figura 3: diagramma parabola-rettangolo

I valori di progetto sono stati ricavati partendo dai sopra citati valori fattorizzati per il **Fattore di Confidenza, assunto pari a 1.2**, corrispondente ad un **Livello di Conoscenza LC2**.

$$f_{cd} = \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{FC \cdot \gamma_c} = \frac{0.85 \cdot 25}{1.2 \cdot 1.5} = 11.81 \text{ MPa}$$

### 5.2.2 Acciaio per cemento armato (CIRCOLARE §C8.7.2 e NTC 2008 § 4.1.2.1.1.3)

L'acciaio utilizzato per le barre di armatura lenta è un acciaio di tipo FeB44K, riconducibile ad un acciaio B450C, caratterizzato dai seguenti valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento da utilizzare nei calcoli:

$$f_{y,nom}: 430 \text{ N/mm}^2$$

e deve rispettare i requisiti indicati nella seguente tabella:

Le resistenze di calcolo  $f_d$  si ottengono mediante l'espressione:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

dove:

$f_k$  sono le resistenze caratteristiche del materiale,

$\gamma_m$  sono i coefficienti parziali del materiale.

CARATTERISTICHE	REQUISITI	FRATTILE (%)
Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$	$\geq f_{y \text{ nom}}$	5.0
Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$	$\geq f_{t \text{ nom}}$	5.0
$(f_t/f_y)_k$	$\geq 1,15$	10.0
$(f_y/f_{y \text{ nom}})_k$	$< 1,35$	10.0
Allungamento $(A_{gt})_k$	$\leq 1,25$	10.0
$\geq 7,5 \%$		
Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90 ° e successivo raddrizzamento senza cricche:		
$\phi < 12 \text{ mm}$	4 $\phi$	
$12 \leq \phi \leq 16 \text{ mm}$	5 $\phi$	
per $16 < \phi \leq 25 \text{ mm}$	8 $\phi$	
per $25 < \phi \leq 40 \text{ mm}$	10 $\phi$	

Tabella 3

La resistenza di calcolo dell'acciaio  $f_{yd}$  è riferita alla tensione di snervamento ed il suo valore è dato da:

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

dove:

$f_{yk}$  (per armatura ordinaria) è la resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio.

$\gamma_s$  è il coefficiente parziale di sicurezza che, per tutti i tipi di acciaio vale 1,15

La tensione tangenziale di aderenza acciaio – cls.  $f_{bd}$  è data :

$$f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c$$

dove:

$\gamma_c$  è il coefficiente di sicurezza parziale pari a 1,5,

$f_{bk}$  è la resistenza tangenziale caratteristica di aderenza data da:

$$f_{bk} = 2,25 \eta f_{ctk}$$

in cui:

$\eta = 1,0$  per barre di diametro  $\phi \leq 32 \text{ mm}$ .

$\eta = (132 - \phi / 100)$  per barre di diametro superiore



Nel caso di armature molto addensate o ancoraggi in zona di calcestruzzo teso, la resistenza di aderenza va ridotta dividendola almeno per 1,5.

Per il diagramma tensione-deformazione dell'acciaio è possibile adottare modelli basati sul valore di deformazione ultima del materiale  $\varepsilon_{ud} = 0,9 \varepsilon_{uk}$  [ $\varepsilon_{uk} = (A_{gt})k$ ], sul valore di calcolo della resistenza  $f_{yd}$  e sul rapporto di sovrarresistenza  $k = (f_t / f_y)_k$ .

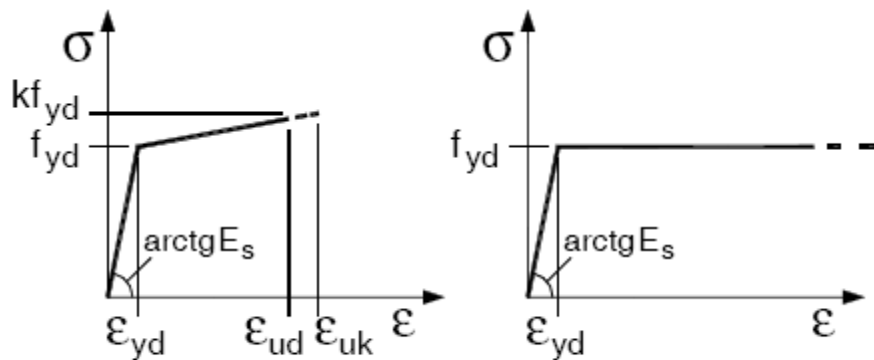


Figura 4: modelli  $\sigma$ - $\varepsilon$  per l'acciaio

In particolare i calcoli a seguire si basano sul diagramma rappresentativo del comportamento elastico perfettamente plastico.

I valori di progetto sono stati ricavati partendo dai sopra citati valori fattorizzati per il **Fattore di Confidenza, assunto pari a 1.2**, corrispondente ad un **Livello di Conoscenza LC2**.

$$f_{yd} = \frac{430}{\gamma_s \cdot FC} = \frac{430}{1.15 \cdot 1.2} = 311.60 \text{ MPa}$$

## 5.3 MATERIALI DI PROGETTO

### 5.3.1 Materiali Compositi (CNR DT-200 R1/2013)

Per quanto riguarda i materiali compositi si adottano **fibre di carbonio unidirezionali unitamente a matrice polimerica**. Secondo quanto indicato nella CNR 200/2013 si considera la tecnica del *wet lay-up system*. Le principali caratteristiche del tessuto e del composito (tessuto+resina) devono essere:

*Tessuto in fibra di carbonio unidirezionale a basso modulo:*

- Grammatura  $400 \pm 5 \text{ g/m}^2$
- Resistenza a trazione delle fibre  $f_{fib} = 4400 \text{ MPa}$
- Coefficiente riduttivo del modulo elastico  $\alpha_{fE} = 0.9$
- Coefficiente riduttivo della resistenza  $\alpha_{fE} = 0.7$
- Spessore di progetto del tessuto 0.22mm (sulla base del tenore totale in carbonio)

*Proprietà meccaniche del composito (fibra+matrice):*

- Spessore nominale di calcolo 0.167mm
- Modulo di elasticità a trazione del composito  $E_k = 390 \text{ GPa}$
- Resistenza a trazione del composito  $f_k = 3400 \text{ MPa}$
- Allungamento a rottura del composito 0.8%

## 6 AZIONI SULLE COSTRUZIONI

### 6.1 PESI PROPRI DEI MATERIALI STRUTTURALI (NTC 2008 § 3.1.2)

In Figura 5 si riporta l'analisi dei carichi adottati.

ANALISI DEI CARICHI DI PIANO			
Carichi strutturali	$G_{1K}$	400	Kg/m <sup>2</sup>
Carichi Portati	$G_{2K}$	210	Kg/m <sup>2</sup>
Carico di Esercizio (cat.C2)	$Q_K$	500	Kg/m <sup>2</sup>

ANALISI DEI CARICHI SOLAIO DI COPERTURA			
Carichi strutturali	$G_{1K}$	400	Kg/m <sup>2</sup>
Carichi Portati	$G_{2K}$	250	Kg/m <sup>2</sup>
Carico di Esercizio (cat.H1)	$Q_K$	150	Kg/m <sup>2</sup>

Figura 5: Analisi dei carichi.

### 6.2 AZIONE DELLA NEVE (NTC 2008 § 3.4)

Si considera in copertura il carico accidentale dovuto al peso della neve calcolato secondo NTC 2008 e valutato mediante la seguente espressione:

$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_t$$

dove:

$q_s$  è il carico della neve sulla copertura;

$\mu_i$  è il coefficiente di forma della copertura;

$q_{sk}$  è il valore caratteristico di riferimento del carico neve al suolo [kN/m<sup>2</sup>] per un periodo di ritorno di 50 anni;

$C_E$  è il coefficiente di esposizione;

$C_T$  è il coefficiente termico.

Il Comune di Ferrara appartiene alla Zona II, per la quale per un'altitudine  $a_s < 200$ m il valore di  $q_{sk}$  risulta essere 1.0 kN/m<sup>2</sup>.

Il coefficiente di esposizione  $C_E$  utilizzato per modificare il valore del carico neve di copertura in funzione delle caratteristiche specifiche dell'area in cui sorge l'opera, verrà assunto pari ad 1, poiché la zona in cui è costruito l'edificio si trova in una "classe di topografia normale", cioè in un'area in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi.

Topografia	Descrizione	$C_E$
Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti.	0,9
Normale	Aree in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi.	1,0
Riparata	Aree in cui la costruzione considerata è sensibilmente più bassa del circostante terreno o circondata da costruzioni o alberi più alti	1,1

Tabella 4: valori di  $C_E$  per diverse classi di topografia

Il coefficiente termico  $C_T$ , utilizzato per tener conto della riduzione del carico neve a causa dello scioglimento della stessa, causato dalla perdita di calore della costruzione è assunto pari ad 1. Tale coefficiente tiene conto delle proprietà di isolamento termico del materiale utilizzato in copertura.

Il coefficiente di forma  $\mu_i$  dipende dall'angolo di inclinazione della falda, esso può essere desunto dalla seguente tabella.

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_i$	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Tabella 5: valori del coefficiente di forma

Il carico della neve risulta quindi essere pari a:

$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_t = 0.80 \text{ kN/m}^2$$

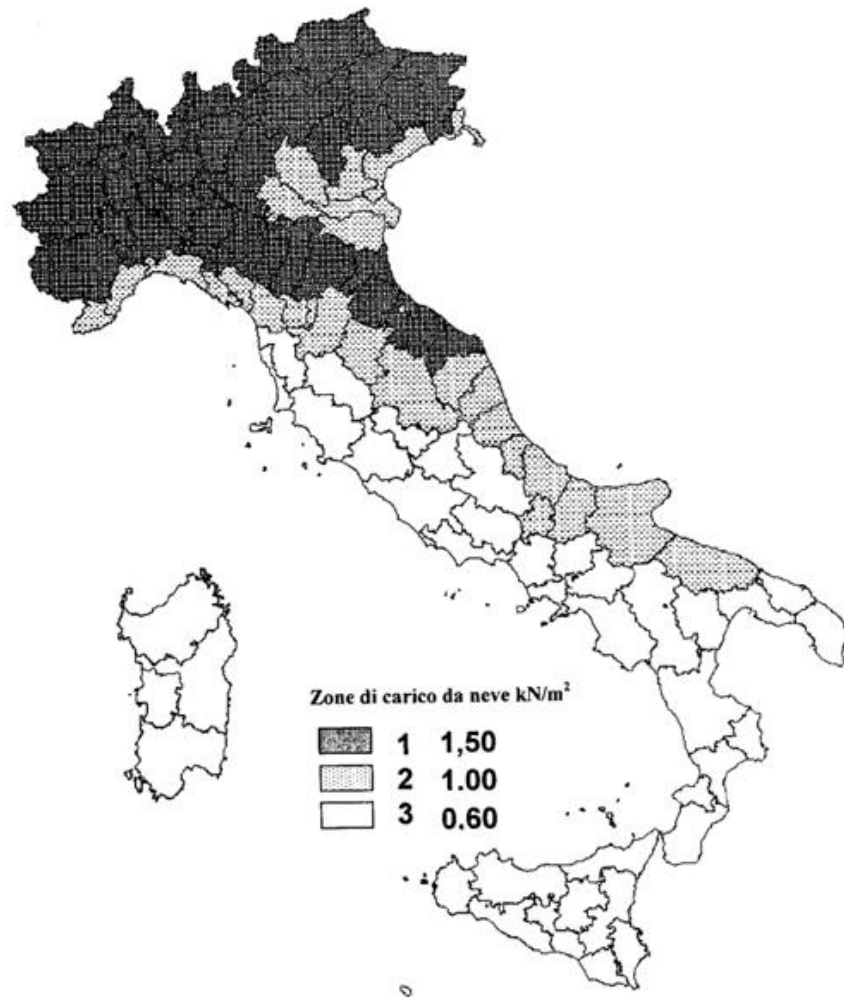


Figura 6: Zone di carico da neve

## 7 AZIONE SISMICA (NTC 2008 § 3.2)

Seguendo criteri propri della normativa sismica attualmente in vigore e non propri dell'epoca di costruzione, come richiesto dalle leggi cogenti, si riportano alcune considerazioni di carattere generale con verifiche ed analisi quantitative.

### 7.1 REGOLARITA' (NTC 2008 § 7.2.2)

Secondo quanto riportato nel D.M. 2008 le costruzioni devono avere, quanto più possibile, struttura iperstatica caratterizzata da regolarità in pianta ed in altezza; se necessario questo può essere conseguito suddividendo la struttura, mediante giunti, in unità tra loro dinamicamente indipendenti.

### REGOLARITÀ IN PIANTA

Per quanto riguarda gli edifici, una costruzione è regolare in pianta se sono rispettate tutte le seguenti condizioni:

- la configurazione in pianta è compatta e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione di masse e rigidezze;
- il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4;
- nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25 % della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione;
- gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti.

Nel caso in esame l'edificio non rispetta le condizioni appena riportate in quanto la lunghezza del fabbricato è più di 7 volte la sua larghezza.

Ne risulta che il fabbricato NON può essere considerato regolare in pianta.

### REGOLARITÀ IN ALTEZZA

Secondo quanto previsto dal Paragrafo 7.2.2 del D.M. 2008 una costruzione si può definire regolare in altezza se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- tutti i sistemi resistenti verticali (quali telai e pareti) si estendono per tutta l'altezza della costruzione;
- massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25 %, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base;
- nelle strutture intelaiate progettate in CD "B" il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza richiesta dal calcolo non è significativamente diverso per orizzontamenti diversi (il rapporto fra la resistenza effettiva e quella richiesta, calcolata ad un

generico orizzontamento, non deve differire più del 20% dall'analogo rapporto determinato per un altro orizzontamento); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;

- eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengono in modo graduale da un orizzontamento al successivo, rispettando i seguenti limiti: ad ogni orizzontamento il rientro non supera il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento, né il 20% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro piani per il quale non sono previste limitazioni di restringimento.

L'edificio oggetto di studio NON può essere considerato regolare in altezza in quanto il fabbricato presenta variazioni di rigidezza fra i vari livelli del fabbricato.

## 7.2 VITA NOMINALE (NTC 2008 § 2.4.1)

La vita nominale di un'opera strutturale  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata allo scopo al quale destinata.

Per il fabbricato è stata fatta l'ipotesi  $V_N = 50$  anni (*opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale*).

## 7.3 CLASSE D'USO (NTC 2008 § 2.4.2)

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso, per il fabbricato oggetto di verifica è stata ipotizzata una Classe d'uso III, ovvero costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi.

## 7.4 PERIODO DI RIFERIMENTO DELL'AZIONE SISMICA (NTC 2008 § 2.4.3)

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ :

$$V_R = V_N C_U$$

dove  $C_U$  è definito al variare della Classe d'uso come riportato nella tabella seguente.

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 6: valori del coefficiente d'uso  $C_U$ .

Si ottiene  $V_R = 75$  anni

## 7.5 CRITERI DI PROGETTAZIONE (NTC 2008 § 7.2.1)

Le costruzioni soggette all'azione sismica, non dotate di appositi sistemi dissipativi, devono essere progettate in accordo con i seguenti comportamenti strutturali:

- comportamento strutturale non dissipativo;
- comportamento strutturale dissipativo.

Nel comportamento strutturale non dissipativo, cui ci si riferisce quando si progetta per gli stati limite di esercizio, gli effetti combinati delle azioni sismiche e delle altre azioni sono calcolati, indipendentemente dalla tipologia strutturale adottata, senza tenere conto delle non linearità di comportamento (di materiale e geometriche) se non rilevanti.

Nel comportamento strutturale dissipativo, cui ci si riferisce quando si progetta per gli stati limite ultimi, gli effetti combinati delle azioni sismiche e delle altre azioni sono calcolati, in funzione della tipologia strutturale adottata, tenendo conto delle non linearità di comportamento (di materiale sempre, geometriche quando rilevanti e comunque sempre quando precisato).

Nel caso la struttura abbia comportamento strutturale dissipativo, si distinguono due livelli di capacità dissipativa e Classi di Duttilità (CD):

- Classe di duttilità alta (CD "A")
- Classe di duttilità bassa (CD "B")

La differenza tra le due classi risiede nella entità delle plasticizzazioni cui ci si riconduce in fase di progettazione; per ambedue le classi, onde assicurare alla struttura un comportamento dissipativo e duttile evitando rotture fragili e la formazione di meccanismi instabili imprevisi, si fa ricorso ai procedimenti tipici della gerarchia delle resistenze.

Data la totale assenza di dettagli costruttivi che conferiscano una certa duttilità alla struttura, e ad una progettazione che nel 1985 non teneva in considerazione l'azione sismica e i fenomeni dinamici che ne conseguono, si sceglie di verificare la struttura considerando una CD "B".



## 7.6 TIPOLOGIA STRUTTURALE (NTC 2008 § 7.4.3.1 E § 7.4.3.2)

Le strutture sismo-resistenti in cemento armato previste dall'NTC 2008 possono essere classificate nelle seguenti tipologie:

- *Strutture a telaio*, nelle quali la resistenza alle azioni sia verticali che orizzontali è affidata principalmente a telai spaziali, aventi resistenza a taglio alla base  $\geq 65\%$  della resistenza a taglio totale;
- *Strutture a pareti*, nelle quali la resistenza alle azioni sia verticali che orizzontali è affidata principalmente a pareti, singole o accoppiate, aventi resistenza a taglio alla base  $\geq 65\%$  della resistenza a taglio totale;
- *Strutture miste telaio – pareti*, nelle quali la resistenza alle azioni verticali è affidata prevalentemente ai telai, la resistenza alle azioni orizzontali è affidata in parte ai telai ed in parte alle pareti, singole o accoppiate; se più del 50% dell'azione orizzontale è assorbita dai telai si parla di strutture miste equivalenti a telai, altrimenti si parla di strutture miste equivalenti a pareti;
- *Strutture deformabili torsionalmente*;
- *Strutture a pendolo inverso*, nelle quali almeno il 50% della massa è nel terzo superiore dell'altezza della costruzione o nelle quali la dissipazione d'energia avviene alla base di un singolo elemento strutturale;
- *Strutture a pannelli*;
- *Strutture monolitiche a cella*;
- *Strutture a pilastri isostatici*

Il fabbricato in esame rientra nella tipologia di strutture a pareti accoppiate.

I massimi valori di  $q_0$  relativi alle diverse tipologie ed alle due classi di duttilità considerate (CD "A" e CD "B") sono contenuti nella tabella seguente.

Tipologia	$q_0$	
	CD "B"	CD "A"
Strutture a telaio, a pareti accoppiate, miste	<span style="border: 2px solid red;">3,0 <math>\alpha_u / \alpha_1</math></span>	4,5 $\alpha_u / \alpha_1$
Strutture a pareti non accoppiate	3,0	4,0 $\alpha_u / \alpha_1$
Strutture deformabili torsionalmente	2,0	3,0
Strutture a pendolo inverso	1,5	2,0

Tabella 7: valori di  $q_0$  per edifici di nuova costruzione.

Alla luce delle irregolarità del fabbricato sopra descritte e del fatto che il fabbricato non è di nuova realizzazione, è necessario considerare le limitazioni imposte dalla Circolare al capitolo C8.7.2, che impone, per edifici esistenti, di utilizzare un fattore di struttura che va da 1.5 a 3.  
Pertanto, è stato adottato un fattore di struttura  $q = 1,5$ .

## 7.7 STATI LIMITE E PROBABILITA' DI SUPERAMENTO (NTC 2008 § 3.2.1)

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli stati limite di esercizio sono:

- Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella successiva tabella.

Stati Limite		$P_{VR}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 8: probabilità di superamento PVR al variare dello stato limite considerato

La verifica della struttura viene effettuata nei confronti dello Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) ed in quello dello Stato Limite di Danno (SLD).

## 7.8 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO (NTC 2008 § 3.2.2)

La classificazione della categoria di sottosuolo è stata ricavata mediante una prova SCPTU spinta fino alla quota di 30m di profondità.

Come indicato nella Relazione Geotecnica a cura della Dott.ssa Geol. S. Paparella, in allegato, il terreno rientra nella Categoria D<sup>1</sup>.

Categoria	Descrizione
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>E</b>	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella 9: categorie di sottosuolo

L'edificio sorge a Ferrara, in zona pianeggiante, pertanto si sceglie la categoria topografica II.

<sup>1</sup> La  $V_{s,30}$  ricavata dalle indagini SCPTU eseguite risulta pari a 178m/s < 180m/s.

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

Tabella 10: categorie topografiche

## 7.9 DESCRIZIONE DEL MOTO SISMICO (NTC 2008 § 3.2.3.1)

L'azione sismica è caratterizzata da tre componenti traslazionali, due orizzontali contrassegnate da X ed Y ed una verticale contrassegnata da Z, da considerare tra di loro indipendenti.

La componente verticale, secondo quanto riportato dalle NTC 2008 al paragrafo 7.2.1, deve essere considerata solo in presenza di elementi pressoché orizzontali con luce superiore a 20 m, elementi precompressi, elementi a mensola di luce superiore a 4m, strutture di tipo spingente, pilastri in falso, edifici con piani sospesi, ponti, costruzioni con isolamento e purché il sito nel quale la costruzione sorge non ricada in zona 3 o 4.

Dal momento che il sito di costruzione appartiene alla Zona 3, e che le luci degli elementi strutturali non sono significative, secondo quanto riportato al suddetto paragrafo della norma, la componente verticale del sisma può essere trascurata.

### Spettro di risposta elastico in accelerazione (NTC 2008 § 3.2.3.2)

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione è espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore della accelerazione orizzontale massima  $a_g$  su sito di riferimento rigido orizzontale. Sia la forma spettrale che il valore di  $a_g$  variano al variare della probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ .

Gli spettri così definiti possono essere utilizzati per strutture con periodo fondamentale minore o uguale a 4,0 s. Per strutture con periodi fondamentali superiori lo spettro deve essere definito da apposite analisi ovvero l'azione sismica deve essere descritta mediante accelerogrammi.

### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali (NTC 2008 § 3.2.3.2.1)

Secondo quanto riportato al Paragrafo 3.2.3.2.1 del D.M. 2008 quale che sia la probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$  considerata, lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale è definito dalle espressioni seguenti:

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(t) = a_g S \eta F_0 \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_c \quad S_e(t) = a_g S \eta F_0$$

$$T_c \leq T < T_D \quad S_e(t) = a_g S \eta F_0 \left( \frac{T_c}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(t) = a_g S \eta F_0 \left( \frac{T_c T_D}{T^2} \right)$$

dove:

$S$  è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente:

$$S = S_S \cdot S_T$$

$\eta$  è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali  $\xi \neq 5\%$  mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}}$$

dove  $\xi$  (espresso in percentuale) è valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione;

$F_0$  è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2,2;

$T_c$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato da:

$$T_c = C_c T_c^*$$

dove  $T_c^*$  è definito al § 3.2 dell'NTC 2008 e  $C_c$  è un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo;

$T_B$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante:

$$T_B = \frac{T_c}{3}$$

$T_D$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione:

$$T_D = 4,0 \frac{a_g}{g} + 1,6$$

Una volta scelta la categoria di sottosuolo è possibile determinare dalla tabella seguente, il coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_s$  e il coefficiente  $C_c$ .

Categoria sottosuolo	$S_s$	$C_c$
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Tabella 11: valori di  $S_s$  e  $C_c$

#### Amplificazione topografica (NTC 2008 § 3.2.3.2.1)

Per tener conto delle condizioni topografiche, in assenza di specifiche analisi si ricava, entrando con la categoria topografica  $T_1$ , il coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  dalla seguente tabella:

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Tabella 12: Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$

Di seguito si riportano gli spettri elastici utilizzati per l'analisi del fabbricato.

## Spettri di risposta SLV

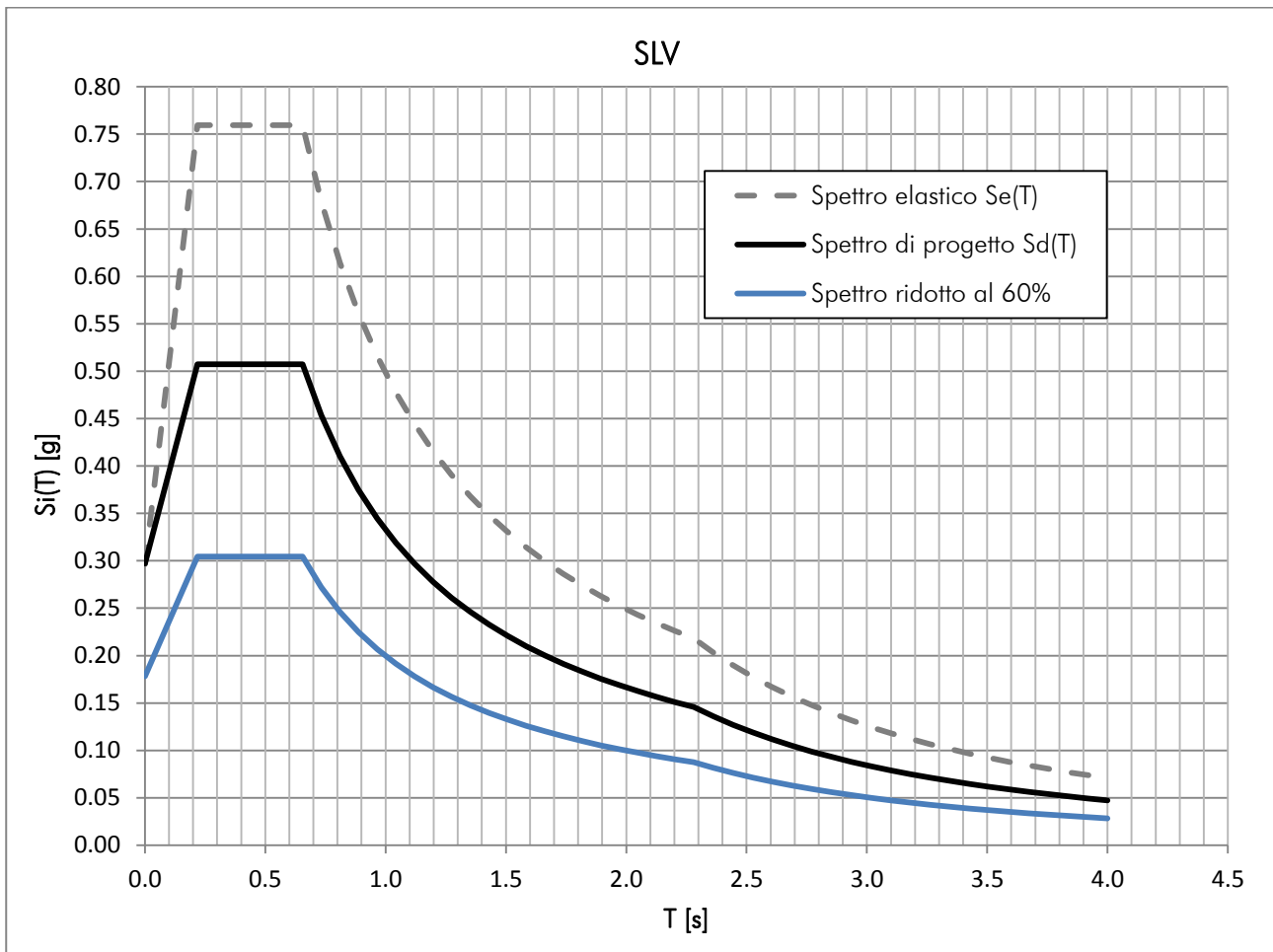


Figura 7: Spettro di risposta SLV

$a_g$	$F_0$	$T_c^*$
[g]	[-]	[s]
0.170	2.561	0.275
$S_s$	1.746	[-]
$S_T$	1.000	[-]
$S$	1.746	[-]
$C_C$	2.383	[-]
$T_B$	0.220	[s]
$T_C$	0.660	[s]
$T_D$	2.280	[s]
$q$	1.5	[-]

Tabella 13: Parametri spettro SLV.

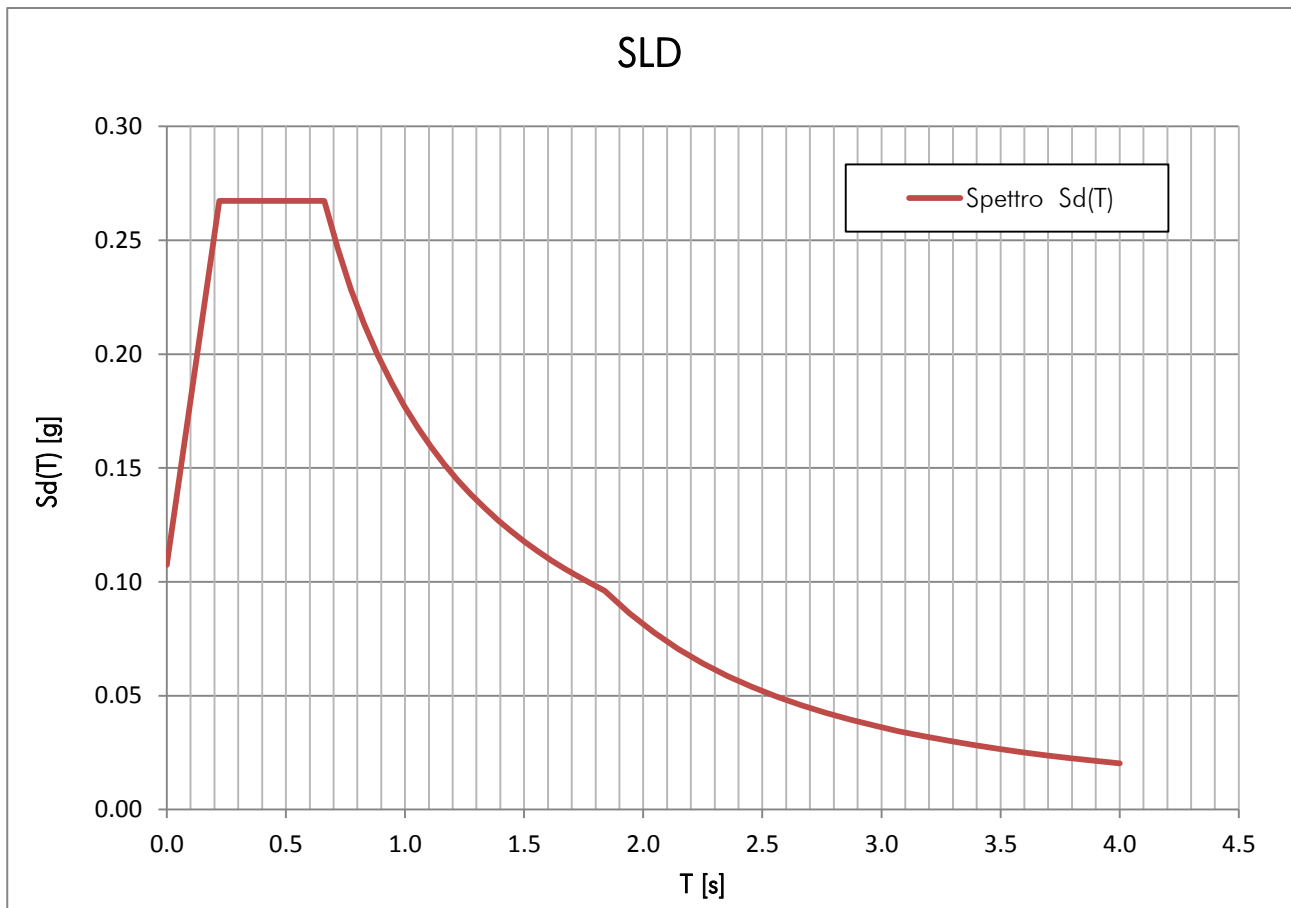


Figura 8: Spettro di risposta SLD.

$a_g$	$F_0$	$T_c^*$
[g]	-	[s]
0.060	2.489	0.280
$S_s$	1.800	[-]
$S_T$	1.000	[-]
$S$	1.800	[-]
$C_C$	2.364	[-]
$T_B$	0.220	[s]
$T_C$	0.660	[s]
$T_D$	1.840	[s]

Tabella 14: Parametri spettro SLD



## 8 COMBINAZIONE DELLE AZIONI (NTC 2008 §2.5.3)

### 8.1 STATO LIMITE ULTIMO (SLU)

Ai fini delle verifiche agli stati limite ultimi si definisce la combinazione fondamentale:

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

dove:

$G_1$  peso proprio di tutti gli elementi strutturali;

$G_2$  peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

$P$  pretensione e precompressione;

$Q_{ki}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) carichi variabili;

$\gamma_{Gi}$  e  $\gamma_{Qi}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) coefficienti parziali di sicurezza, assunti pari a:  $\gamma_{G1} = 1,3$ ;  $\gamma_{G2} = 1,5$ ;  $\gamma_{Qi} = 1,5$

$\psi_{0i}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) sono i coefficienti di combinazione, assunti pari a:

ambienti suscettibili di affollamento  $\rightarrow \psi_{0i} = 0,7$

per il solo carico variabile derivante da manutenzione  $\rightarrow \psi_{0i} = 0$

carico neve  $\rightarrow \psi_{0i} = 0,5$

Categoria/Azione variabile	$\psi_{0j}$	$\psi_{1j}$	$\psi_{2j}$
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso $\leq 30$ kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso $> 30$ kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota $\leq 1000$ m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota $> 1000$ m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Tabella 15: valori dei coefficienti di combinazione

		Coefficiente $\gamma_F$	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	$\gamma_{Q1}$	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

Tabella 16: coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

## 8.2 COMBINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI

L'analisi e verifica sismica del fabbricato, deve essere effettuata mediante la combinazione dell'azione sismica con le altre azioni, impiegata sia per gli Stati Limite Ultimi che per quelli di Esercizio:

$$\gamma_E \cdot E + \gamma_G \cdot G_k + \gamma_P \cdot P_k + \sum (\psi_{2i} \cdot \gamma_Q \cdot Q_{ki})$$

dove:

- E azione sismica per lo stato limite e per la classe di importanza in esame;
- $G_k$  valore caratteristico dei carichi permanenti;
- $P_k$  valore caratteristico dell'azione di precompressione o pretensione;
- $\gamma_E, \gamma_G, \gamma_P, \gamma_Q$  coefficienti parziali di sicurezza pari ad 1;
- $Q_{ki}$  valore caratteristico dell'azione variabile.

Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_k + \sum (\psi_{2i} \cdot Q_{ki})$$

I valori dei coefficienti  $\psi_{2i}$  per le varie destinazioni d'uso possono essere desunti dalla Tab. 2.5.I dell'NTC 2008, e riportati nella seguente tabella:

Coefficienti $\psi_{2i}$ per varie destinazioni d'uso	
Destinazione d'uso	$\psi_{2i}$
Categoria C	0.6
Categoria H	0.0
Neve (a quota $\leq 1000$ m s.l.m)	0.0

Tabella 17

### 8.3 RISPOSTA ALLE DIVERSE COMPONENTI DELL'AZIONE SISMICA ED ALLA VARIABILITA' SPAZIALE DEL MOTO (NTC 2008 § 7.3.5)

Se la risposta della struttura viene valutata mediante analisi statica o dinamica in campo lineare, essa può essere calcolata separatamente per ciascuna delle tre componenti. Gli effetti sulla struttura (sollecitazioni, deformazioni, spostamenti, ecc...) sono combinati successivamente, applicando la seguente espressione:

$$E = \pm E_x \pm 0,3E_y$$

$$E = \pm E_y \pm 0,3E_x$$


dove la componente verticale non è stata tenuta in considerazione.

## 9 MODELLAZIONE DEL FABBRICATO

Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza, con particolare attenzione alle situazioni nelle quali componenti orizzontali dell'azione sismica possono produrre forze d'inerzia verticali (travi di grande luce, sbalzi significativi, etc.).

Gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano, a condizione che siano realizzati in cemento armato, oppure in latero-cemento con soletta c.a. di almeno 40 mm di spessore, o in struttura mista con soletta in cemento armato di almeno 50 mm di spessore collegata da connettori a taglio opportunamente dimensionati agli elementi strutturali in acciaio o in legno e purchè le aperture presenti non ne riducano significativamente la rigidezza.

Al fine di verificare gli elementi resistenti della struttura, è stata eseguita la modellazione mediante il programma ad elementi finiti MidasGEN.

Informazioni sul codice di calcolo	
Titolo:	midas GEN – Modelling, Integrated Design & Analysis Software
Versione:	midas GEN 2013 v.2.1
Produttore:	<div><div>MIDAS Family Programs are the group of software packages for structural analysis and design developed by MIDAS IT Co., Ltd.</div><div><div><div>MIDASoft Inc. 38701 Seven Mile Road, Suite 260 Livonia, MI 48152, USA MIDASoft Modeling, Integrated Design &amp; Analysis Software Phone: 1-800-584-5541 E-mail: <a href="mailto:MIDASoft@MidasUser.com">MIDASoft@MidasUser.com</a> <a href="http://www.MidasUser.com">http://www.MidasUser.com</a></div></div></div></div>
Distributore	CSPFea s.c. ,Este (PD) via zuccherificio 5/D
Codice Licenza:	midas Gen / U001-05864

I pilastri e le travi della struttura sono stati realizzati attraverso elementi 2D di tipologia “beam”, in cemento armato. Gli elementi di tipo “beam” sono elementi finiti a due nodi nello spazio per i quali sono definiti al massimo tre gradi di libertà traslazionali e tre gradi di libertà rotazionali.

Le pareti in calcestruzzo sono state modellate con elementi plate&shell con una discretizzazione nell'ordine dei 20-25cm. Mentre le pareti della zona centrale che si trovano unicamente al piano primo e secondo sono modellati con classici elementi plate&shell.

I solai di piano sono stati modellati mediante elementi infinitamente rigidi, in quanto si tratta di solai predalles aventi soletta continua superiore di 4cm gettata in opera assieme alle travi di bordo ed alle pareti anch'esse gettate in opera.

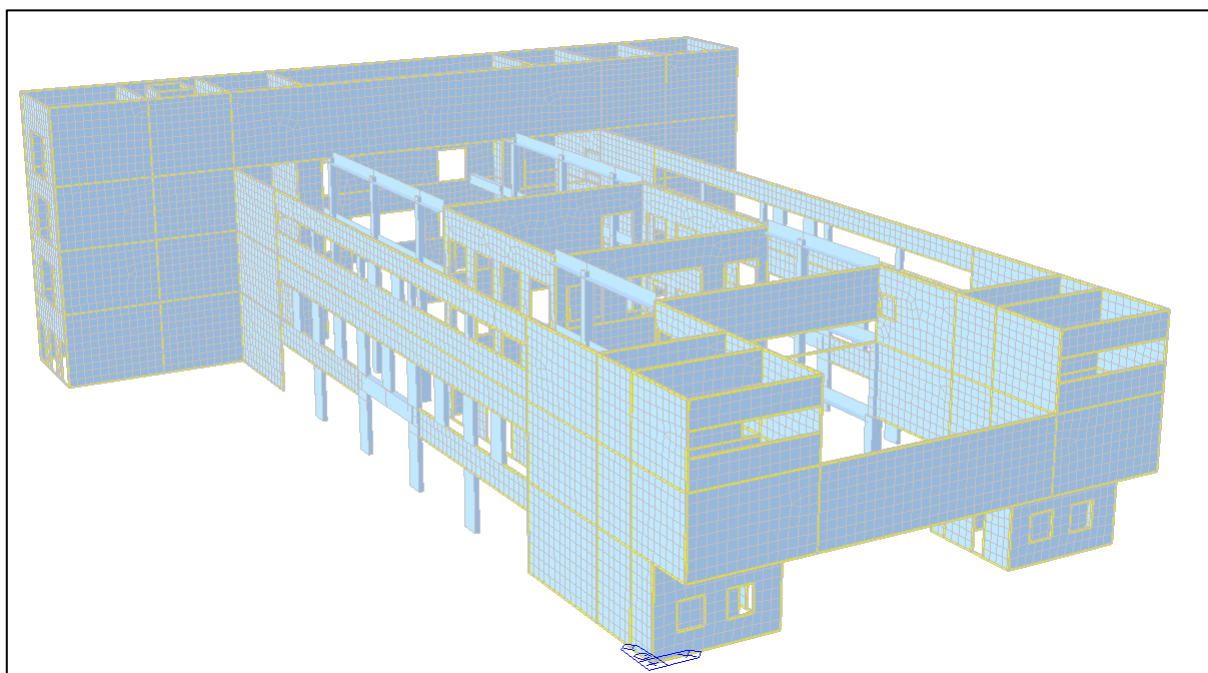


Figura 9: Vista 3D del modello globale del fabbricato. Vista prospettica.

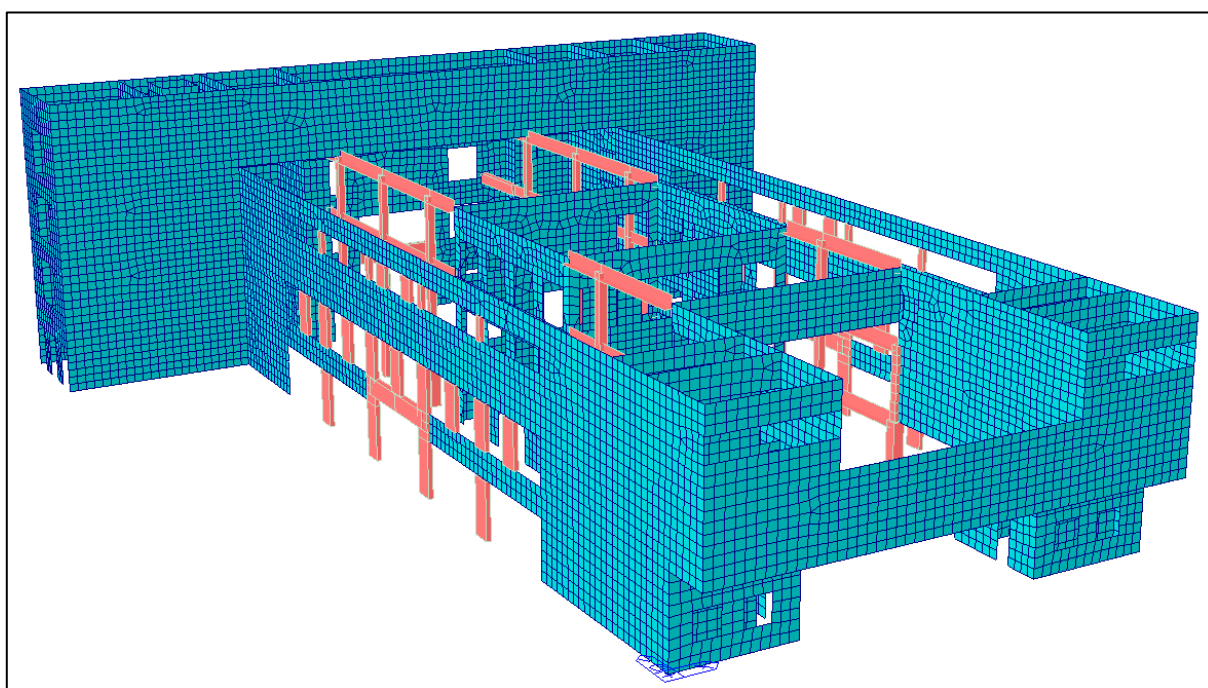


Figura 10: Vista 3D del modello globale del fabbricato. Distinzione fra elementi plate ed elementi.

## 10 ANALISI DINAMICA LINEARE (NTC 2008 §7.3.3.1)

Viene effettuata un'analisi lineare dinamica dell'edificio associata allo spettro di risposta di progetto al fine di definire le sollecitazioni negli elementi strutturali e poter effettuare la verifica di essi.

L'analisi dinamica lineare è condotta secondo tre passaggi fondamentali:

- determinazione dei modi di vibrare "naturali" della costruzione (analisi modale),
- calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati,
- combinazione degli effetti relativi a ciascun modo di vibrare.

Devono essere considerati tutti i modi di vibrare con massa partecipante significativa. È opportuno a tal riguardo considerare tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85%.

Per la combinazione degli effetti relativi ai singoli modi di vibrare deve essere utilizzata una combinazione quadratica completa degli effetti relativi a ciascun modo, quale quella indicata nell'espressione (7.3.3 delle NTC 2008):

$$E = \left( \sum_i \sum_j \rho_{ij} E_i E_j \right)^{1/2}$$

con:

$E_i$  valore dell'effetto relativo al modo  $i$

$\rho_{ij}$  coefficiente di correlazione tra il modo  $i$  ed il modo  $j$ , calcolato con formule di comprovata validità quale:

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

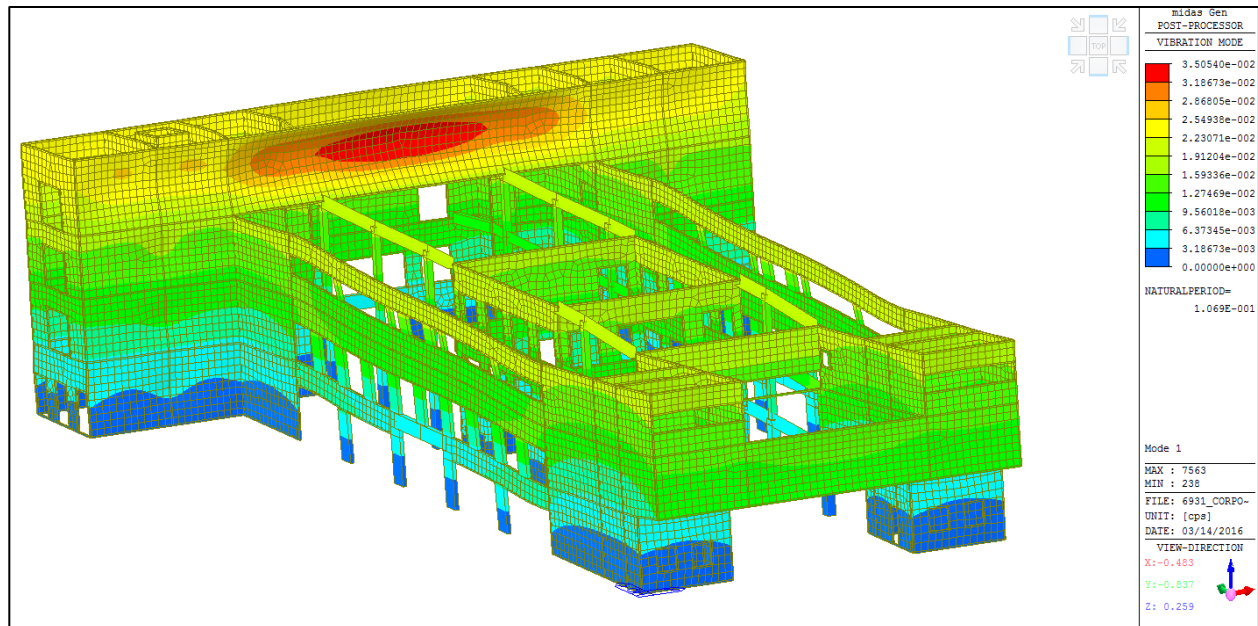
$\xi$  smorzamento viscoso dei modi  $i$  e  $j$ ;

$\beta_{ij}$  è il rapporto tra l'inverso dei periodi di ciascuna coppia  $i$ - $j$  di modi.

## 10.1 DETERMINAZIONE DEI MODI PRINCIPALI DI VIBRARE

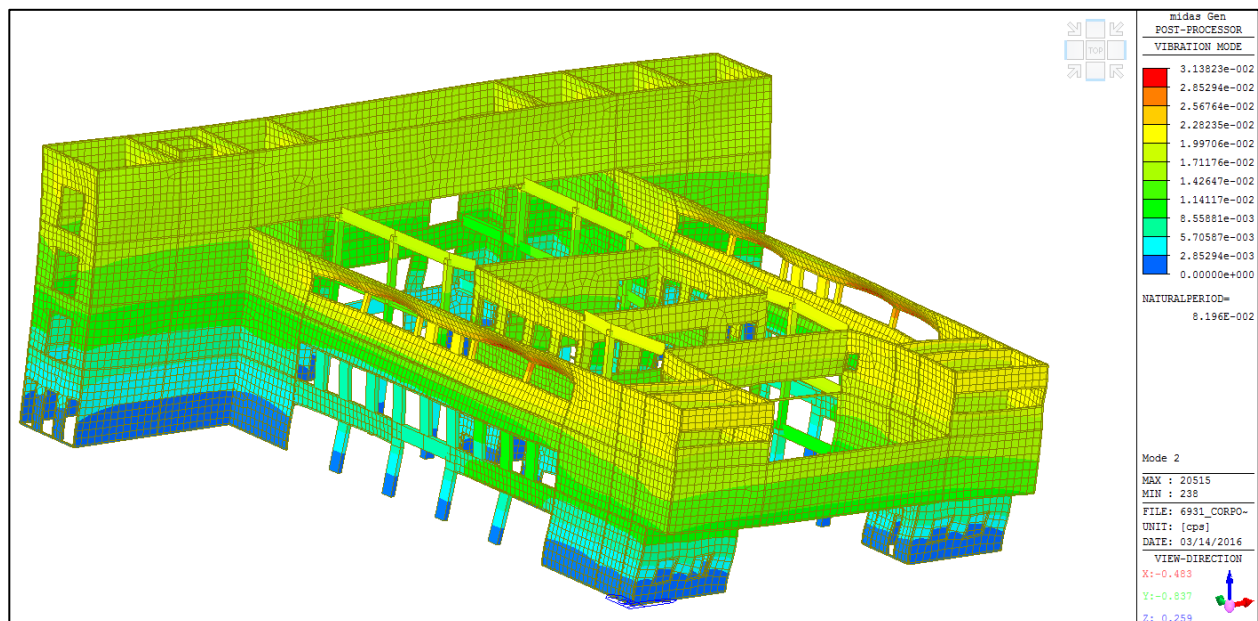
L'analisi modale ha investigato i primi 50 modi di vibrare della struttura, arrivando ad una percentuale di massa attivata di circa il 90%, superiore al limite dell' 85% di quella totale, posto dalle NTC del 2008.

Il periodo principale di vibrazione della struttura è di  $0.107s$ , corrispondente al primo modo di vibrare, modo globale in direzione Y (longitudinale rispetto allo sviluppo del fabbricato)



$$T = 0.107s \quad M_{dy}(\%) = 76.93$$

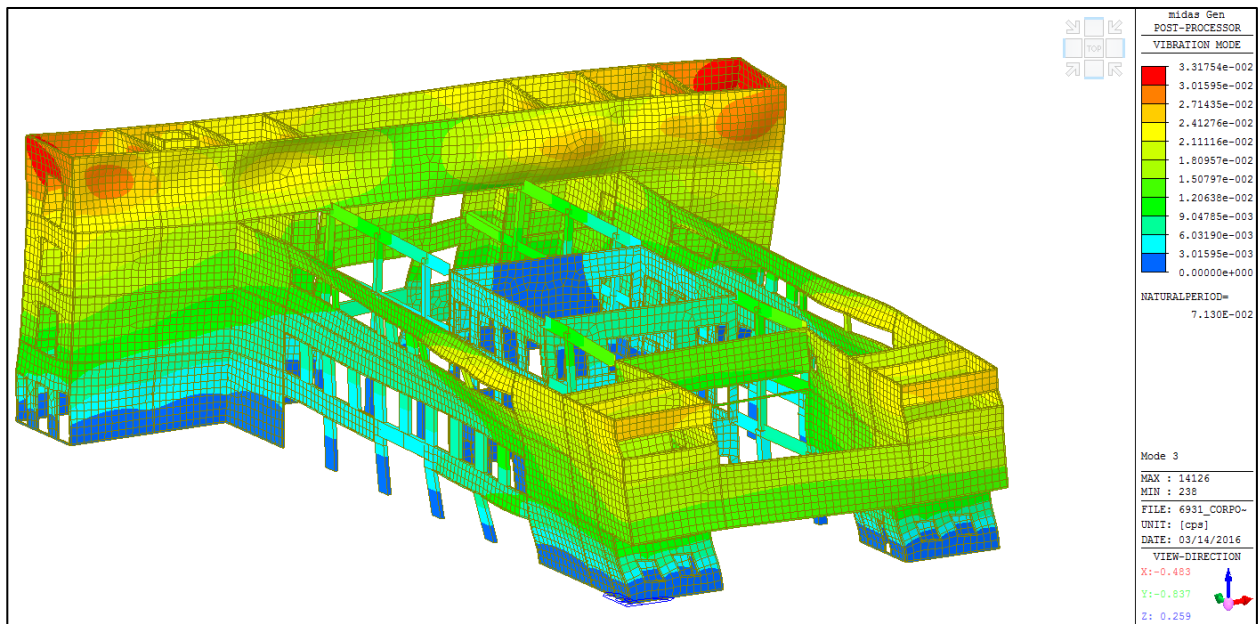
Figura 11: Deformata di modo 1 – Modo transazionale in direzione Y



$$T = 0.082s \quad M_{dx}(\%) = 84.29$$

Figura 12: Deformata di modo 2 – Modo transazionale in direzione X





$$T = 0.071s \quad M_{RZ}(\%) = 83.21$$

Figura 13: Deformata di modo 3 – Modo rotazionale

## 11 VERIFICHE ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Sotto l'effetto dell'azione sismica allo stato limite ultimo, le strutture degli edifici pur subendo danni strutturali, devono mantenere una residua resistenza e rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali e la capacità portante nei confronti dei carichi verticali.

Dall'analisi dinamica sono state valutate le azioni interne (sollecitazioni di calcolo  $E_d$ ) nei vari elementi strutturali.

Per ogni elemento strutturale verranno poi valutate le resistenze di calcolo  $R_d$ .

La verifica della sicurezza agli stati limite ultimi si ritiene soddisfatta controllando che, per ogni elemento strutturale e per ciascuna delle combinazioni delle azioni prese in esame, risulti:

$$E_d \leq R_d$$



## 4.1 VERIFICA DELLE PARETI

### 4.1.1 Verifica a pressoflessione

I setti soggetti ad azione sismica sono sollecitati a pressoflessione deviata. Il momento sollecitante fuori dal piano si trascura ed è possibile ricondurre la verifica ad una verifica a pressoflessione nel piano del setto.

La verifica è stata eseguita in modo rigoroso, determinando il dominio di rottura M-N e verificando  $E_d < R_d$ .

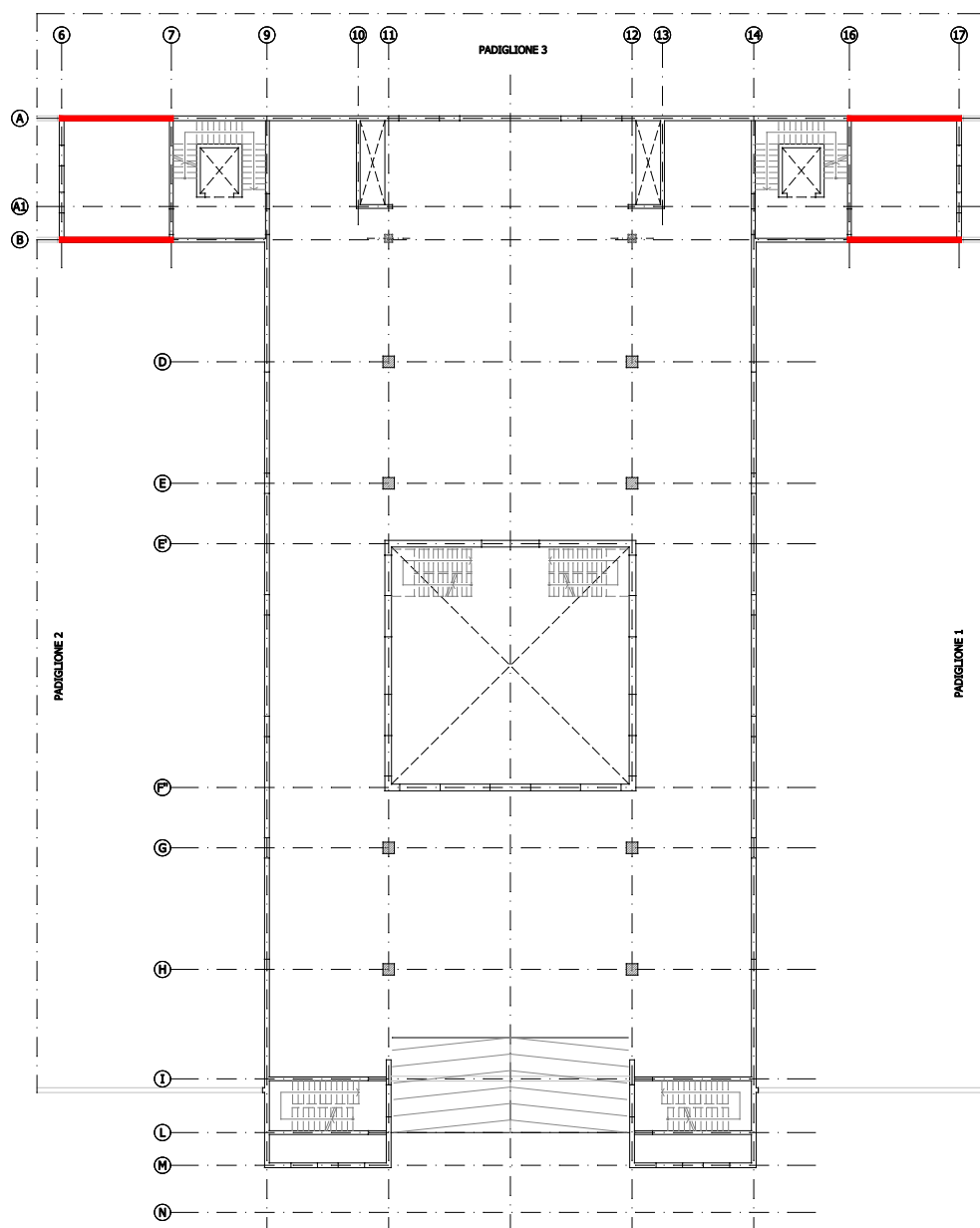
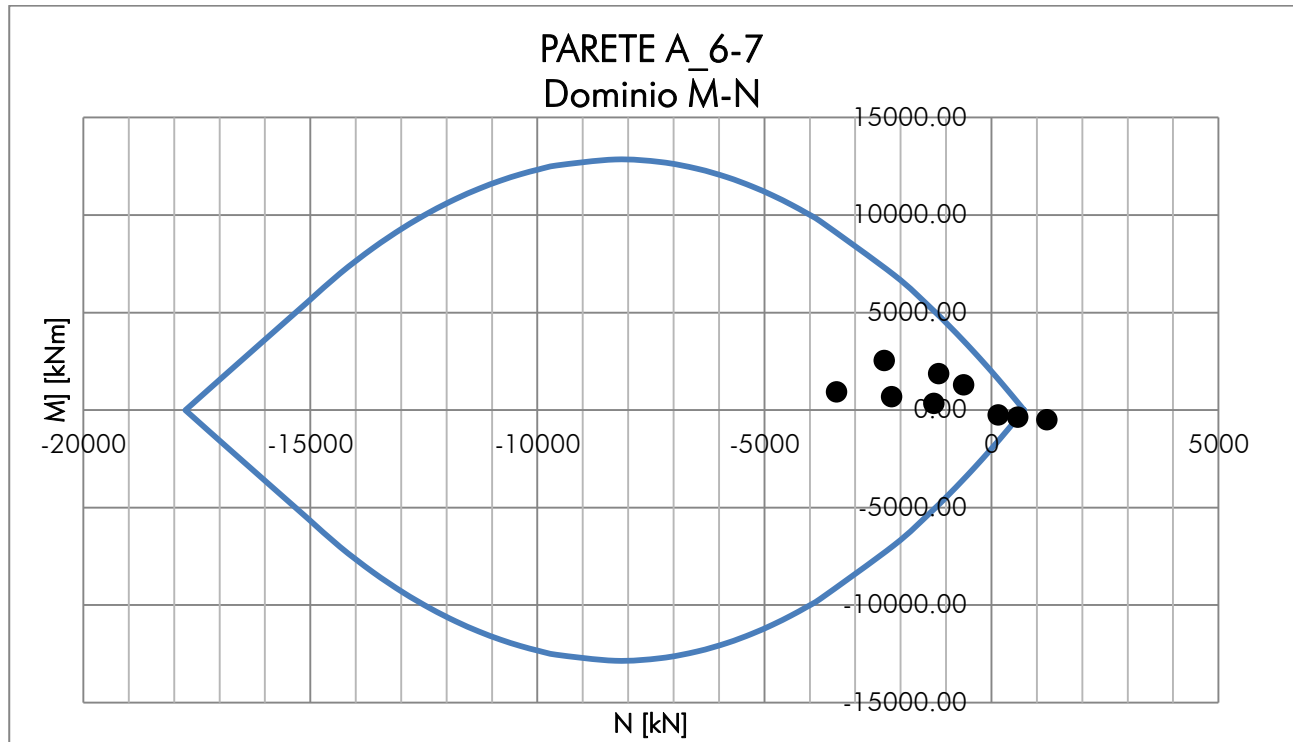


Figura 14: Pianta piano terra, pareti resistenti. Identificazione delle pareti oggetto di verifica.

## PARETE FILO A - 6/7

Tale parete, analoga per simmetria del fabbricato alla parete filo A – 16/17 e pareti filo B – 6/7 e 16/17 , risultano essere le pareti che durante l'azione sismica maggiormente mandano in crisi la struttura. L'armatura è costituita da barre verticali  $\phi 8$  passo 25cm e bare orizzontali  $\phi 5$  passo 15cm.



MOMENTO FLETTENTE massimo		level		Axial	Shear-y	Shear-z	Moment-y	MRd	FS
	Story	[m]	Load	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]
	GROUND	0	gLCB21	-2365.78	3.98	1138.86	2544.18	7898	3.10
	1F	4.45	gLCB21	-1168.78	-2.15	1070.79	-551.06	6865	3.67
	2F	8.3	gLCB21	-618.23	-4.99	481.19	-498.33	5565	4.33

TRAZIONE massima		level		Axial	Shear-y	Shear-z	Moment-y	MRd	FS
	Story	[m]	Load	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]
	GROUND	0	gLCB34	1305.62	38.9	-479.87	-494.27	-----	-----
	1F	4.45	gLCB34	571.79	13.64	-392.59	112.49	824	7.35-
	2F	8.3	gLCB34	146.68	18.52	-190.01	61.71	1989	13.56

COMPRESSIONE massima		level		Axial	Shear-y	Shear-z	Moment-y	MRd	FS
	Story	[m]	Load	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]
	GROUND	0	gLCB18	-3414.68	-49.58	564.09	936.15	9859	10.53
	1F	4.45	gLCB18	-2206.37	-25.08	423.15	-1502.7	7572	4.05
	2F	8.3	gLCB18	-1273.64	-28.73	222.91	-979.86	5540	4.31

La verifica della parete rinforzata con fibre di carbonio, considerando che la parete risulta essere in crisi per gli sforzi di trazione generate dall'azione sismica, la verifica si può eseguire come segue. I parametri di calcolo vengono ripresi dalla CNR DT-200 R1/2013.

$$f_{tk} = 3400 \text{ MPa}$$

$$f_{td} = \eta \frac{f_{tk}}{\gamma_m} = \eta_a \eta_1 \frac{f_{tk}}{\gamma_m} = 0.85 \cdot 0.50 \cdot \frac{3400}{1.10} = 1314 \text{ MPa}$$

Si precisa che è possibile utilizzare tale resistenza di progetto trascurando il distacco per delaminazione della fibra in quanto:

- Sono presenti dei connettori meccanici (fiocchi connettori) fra le strisce verticali e la fondazione esistente;
- Le sollecitazioni, al contrario di una trave) sono nel piano della parete e dunque le lamine sono sollecitate nel loro piano riducendo al minimo il rischio di un distacco per delaminazione della fibra.

I dati geometrici della superficie di rinforzo sono pari a:

$$L_s = 5770 \text{ mm}$$

$$t_f = 0.22$$

$$F_{\max, Rd} = (5770 \cdot 0.22) \cdot 1314 \cdot \frac{1}{1000} = 1668 \text{ kN} > N_{Ed}$$

**La verifica è soddisfatta**

## 11.1 VERIFICA DEL MARTELLAMENTO

Il fabbricato in oggetto risulta essere più alto dei padiglioni espositivi adiacenti, i quali sono in adiacenza al fabbricato stesso con le travi scatolari di bordo e la trave centrale.

Per questo, occorre porre particolare attenzione agli spostamenti di piano, verificando il martellamento fra il corpo di fabbrica e l'adiacente fabbricato. Come già anticipato il giunto fra i suddetti fabbricati non è stato studiato e progettato per permettere ai fabbricati di potersi correttamente muovere in ambito dinamico.

In particolare la verifica al martellamento verrà eseguita nei confronti dei padiglioni espositivi 1 e 2 e del padiglione espositivo 3.

Come indicato al capitolo 7.2.2 delle NTC 2008 la distanza fra due costruzioni contigue deve essere verificata in condizioni di *SLV* al fine di evitare fenomeni di martellamento.

Lo spostamento ricavato dalla modellazione lineare  $d_{Ee}$  deve essere amplificato come indicato al capitolo 7.3.3.3 relativo alla Valutazione degli spostamenti mediante analisi lineare dinamica.

Lo spostamento risulta essere pari a:

$$d_E = \pm \mu_d \cdot d_{Ee}$$

Dove:

$$\begin{aligned} \mu_d &= q & \dots T_1 \geq T_C \\ \mu_d &= 1 + (q-1) \frac{T_C}{T_1} & \dots T_1 < T_C \end{aligned}$$

In ogni caso  $\mu_d \leq 5q - 4$ .

Nel caso in esame,  $T_1$  (0.107s) è minore di  $T_C$  (0.660s). Dunque:

$$\mu_d = 1 + (1.5 - 1) \cdot \frac{0.660}{0.114} = 4.08 > 5q - 4 = 3.5$$

## VERIFICA EL GIUNTO NEI CONFRONTI DEI PADIGLIONI 1 E 2

Considerando i due punti principali di contatto fra i due corpi di fabbrica adiacenti, ovvero la trave scatolare di bordo (1) e la trave centrale (2), gli spostamenti da modello sono pari a:

$$d_{EeY,1} = 1.18mm$$

$$d_{EeY,2} = 1.14mm$$

Si ottengo i seguenti valori di progetto:

$$d_{EY,1} = \pm 3.5 \cdot 1.18 \cong 4mm$$

$$d_{EY,2} = \pm 3.5 \cdot 1.14 \cong 4mm$$

Lo spostamento dei padiglioni espositivi adiacenti, in corrispondenza dei due punti significativi risulta pari a:

$$d_{EY,1} = 10mm$$

$$d_{EY,2} = 6mm$$

Per una disamina più dettagliata si rimanda al calcolo dello spostamento del Padiglioni Espositivo all'interno della relativa Relazione di Calcolo.

La sommatoria fra lo spostamento del padiglione in oggetto e del corpo adiacente è dunque pari a 14mm in corrispondenza delle travi di bordo (1) e di 10mm in corrispondenza della trave centrale (2). Entrambi inferiori rispetto al giunto strutturale esistente fra i due fabbricati, pertanto la **verifica risulta essere soddisfatta**.

## VERIFICA EL GIUNTO NEI CONFRONTI DEL PADIGLIONE 3

Considerando i due punti principali di contatto fra i due corpi di fabbrica adiacenti, ovvero la trave scatolare di bordo (1) e la trave centrale (2), gli spostamenti da modello sono pari a:

$$d_{EeY,1} = 0.7mm$$

$$d_{EeY,2} = 0.6mm$$

Si ottengo i seguenti valori di progetto:

$$d_{EY,1} = \pm 3.5 \cdot 0.7 \cong 2.5mm$$

$$d_{EY,2} = \pm 3.5 \cdot 0.6 \cong 2.5mm$$

Lo spostamento dei padiglioni espositivi adiacenti, in corrispondenza dei due punti significativi risulta pari a:

$$d_{EY,1} = 7.38mm$$

$$d_{EY,2} = 5mm$$

Per una disamina più dettagliata si rimanda al calcolo dello spostamento del Padiglioni Espositivo all'interno della relativa Relazione di Calcolo.

La sommatoria fra lo spostamento del corpo in oggetto e del padiglione 3 adiacente è dunque pari a 10mm in corrispondenza delle travi di bordo (1) e di 7.5mm in corrispondenza della trave centrale (2). Entrambi inferiori rispetto al giunto strutturale esistente fra i due fabbricati, pertanto la **verifica risulta essere soddisfatta**.

## 12 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il fabbricato in oggetto, presenta un fattore di sicurezza nei confronti dell'azione sismica tutto sommato elevato per fabbricati esistenti. La giustificazione risiede in una serie di considerazione che è utile esporre per poter comprendere al meglio il comportamento strutturale.

- Fabbricato che presenta una certa regolarità e simmetria in pianta ed in altezza;
- Presenza di numerose pareti in calcestruzzo, in entrambe le direzioni principali del fabbricato;
- Presenza di solai rigidi, e collegati alle strutture verticali. I solai di piano, che sono realizzati mediante tegoli prefabbricati a pi greco e tipo predalles, presentano una soletta collaborante in calcestruzzo dello spessore di 5cm connessa all'armatura delle travi in c.a. gettate in opera ed armata con rete elettrosaldata.
- Tutti gli elementi portanti principali del fabbricato sono gettati in opera con un certo grado di dettaglio e questo garantisce una buona collaborazione fra gli elementi, con particolari costruttivi anche di una certa attenzione.

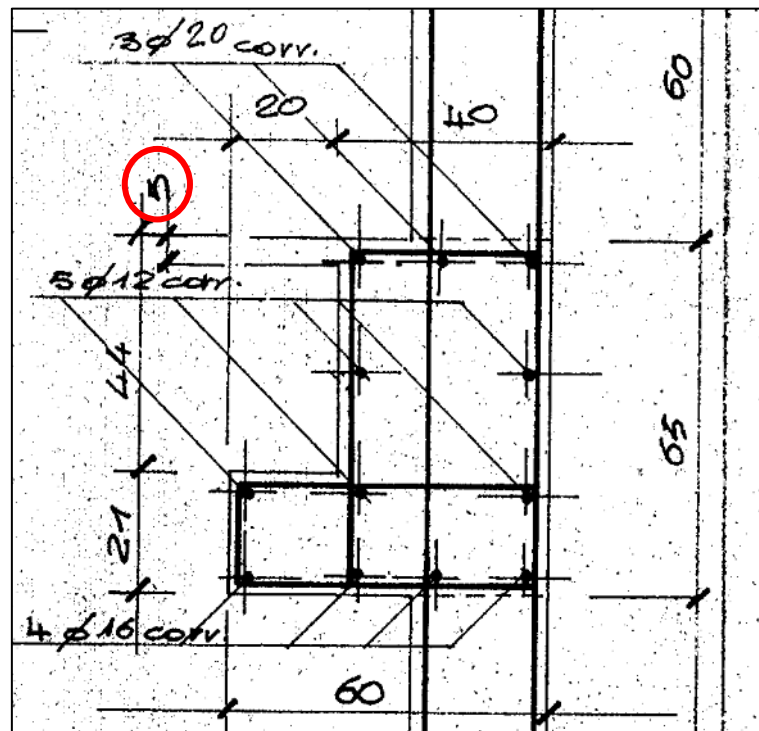


Figura 15: Particolare trave di bordo. In evidenza lo spessore di 5cm relativo alla soletta collaborante che è collegata alla trave.

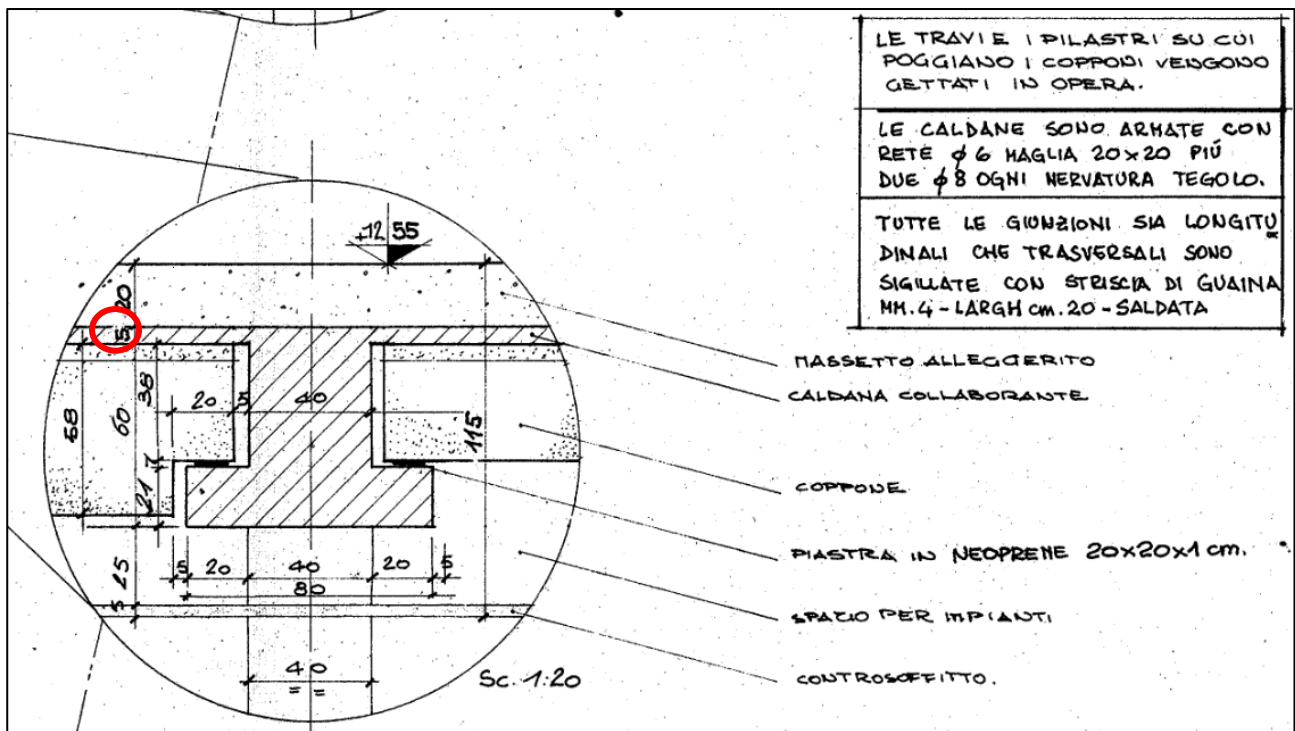


Figura 16: Particolare trave di centrale. In evidenza lo spessore di 5cm relativo alla soletta collaborante che è collegata alla trave.

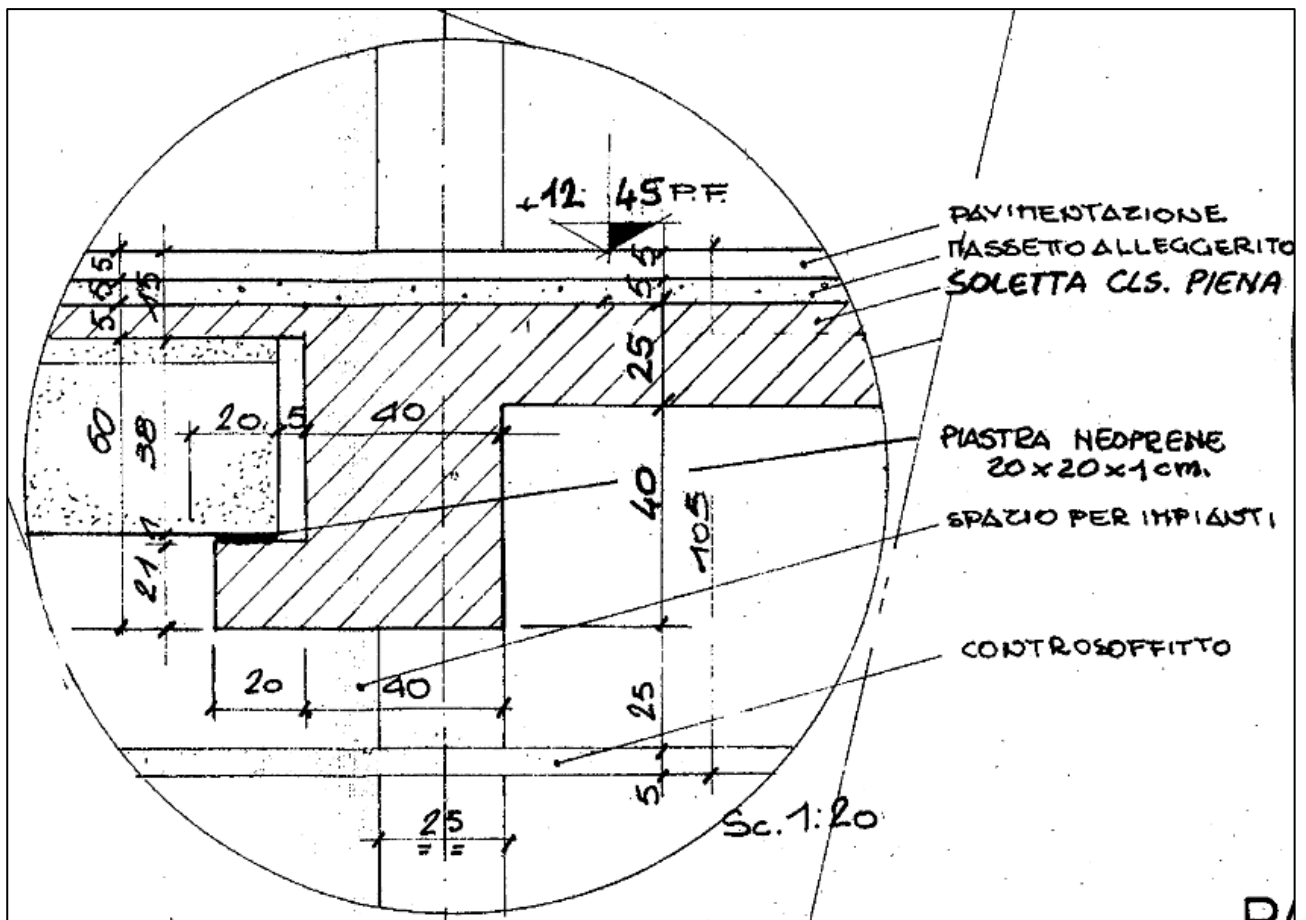


Figura 17: Particolare trave in corrispondenza del vano ascensore, dove si osserva la connessione con la soletta piena di calcestruzzo.



## 13 RIASSUNTO CONCLUSIVO DELLE ANALISI SVOLTE

Le analisi sismiche effettuate sulla struttura considerando gli interventi di progetto hanno mostrato la capacità del fabbricato di resistere al 60% dell'azione sismica di progetto.

PRESSOFLESSIONE	TAGLIO
>60%	>60%

Tabella 18: coefficienti di sicurezza



IL TECNICO:

Ing. Davide Grandis

COLLABORATORE:

Ing. Matteo Vincenzi