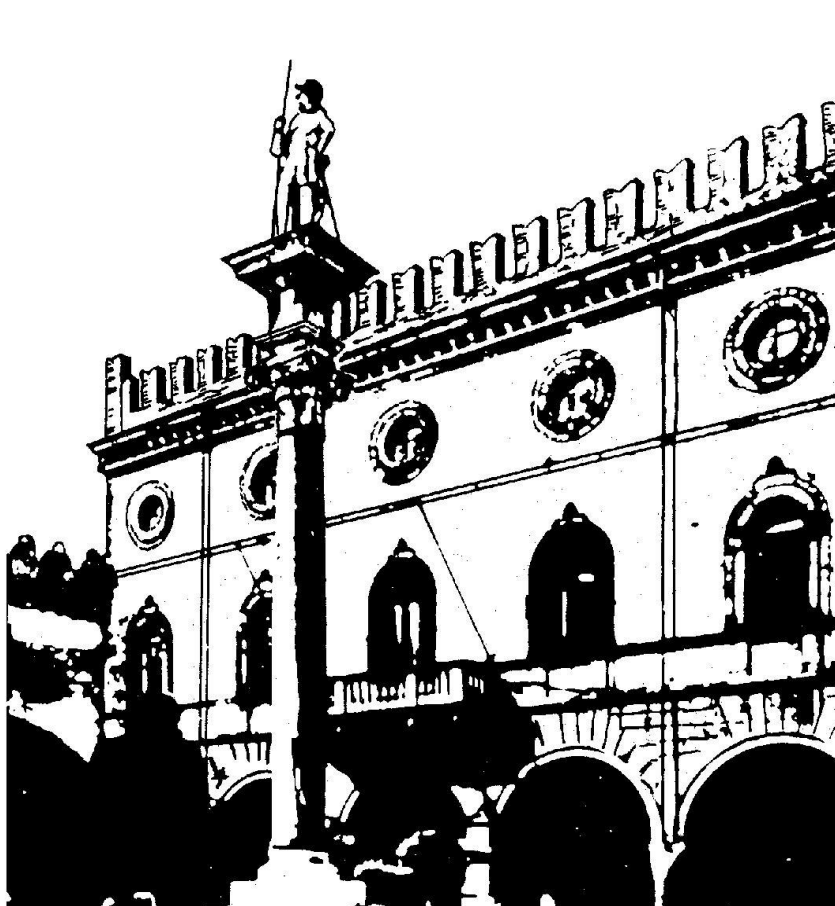


**Progettazione degli Interventi locali di  
miglioramento necessari alla mitigazione  
delle principali vulnerabilità della Residenza  
Municipale**

**PROGETTO DEFINITIVO  
ESECUTIVO**



**ASDEA**

**BIB**  
Bagagli Ingegneria

**PROF.ING.ANDREA BENEDETTI**

**Relazione sui  
materiali  
RS.02**



Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

## SOMMARIO

<b>SOMMARIO.....</b>	<b>1</b>
1.1 DESCRIZIONE DEL REPORT	3
1.2 NORMATIVE, LINEE GUIDA E DOCUMENTI CONSULTATI	3
<b>2. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI LE STRUTTURE ESISTENTI .....</b>	<b>5</b>
2.1 DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI CONOSCENZA	5
2.1.1 <i>Definizione del percorso di conoscenza e della campagna di indagini strutturali.....</i>	<i>5</i>
2.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE IN MURATURA	7
2.2.1 <i>Caratteristiche meccaniche di calcolo della muratura – Analisi Statica.....</i>	<i>15</i>
2.2.2 <i>Caratteristiche meccaniche di calcolo della muratura – Analisi Sismica .....</i>	<i>17</i>
2.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE LIGNEE	18
2.3.1 <i>Caratteristiche meccaniche degli elementi lignei degli orizzontamenti di piano.....</i>	<i>19</i>
2.3.2 <i>Caratteristiche meccaniche degli elementi lignei delle coperture .....</i>	<i>21</i>
2.4 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO	21
<b>3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI UTILIZZATI PER LE OPERE DI CONSOLIDAMENTO E LE OPERE EX-NOVO .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 <i>Calcestruzzo alleggerito per solette.....</i>	<i>24</i>
3.1.2 <i>Barre per inghisaggi nella muratura e per rete elettrosaldata .....</i>	<i>24</i>
3.1.3 <i>Strutture in acciaio.....</i>	<i>24</i>
3.1.4 <i>Strutture lignee.....</i>	<i>26</i>
3.1.5 <i>Tessuti in fibra di acciaio galvanizzato .....</i>	<i>27</i>
3.1.6 <i>Barre elicoidali in acciaio inox per ristilatura armata di muratura.....</i>	<i>28</i>
3.1.7 <i>Elementi in laterizio.....</i>	<i>28</i>
3.1.8 <i>Malte a base di calce idraulica naturale .....</i>	<i>28</i>
3.1.9 <i>Ancoraggi ad iniezione controllata.....</i>	<i>29</i>



Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

## **PREMESSA**

### **1.1 DESCRIZIONE DEL REPORT**

La presente relazione è stata redatta nell'ambito degli "Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale sita in Piazza del Popolo (RA)". Nella presente relazione tecnica verranno riportate:

- La descrizione della campagna di indagini strutturali eseguita e del livello di confidenza raggiunto;
- Le caratteristiche dei materiali delle strutture in situ;
- Le caratteristiche dei materiali utilizzati per le nuove opere previste nell'ambito degli interventi di riparazione dei danni e miglioramento sismico.

### **1.2 NORMATIVE, LINEE GUIDA E DOCUMENTI CONSULTATI**

Si riportano di seguito i riferimenti normativi e bibliografici cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione.

#### **a) Normative**

- D.M. 09/01/1996: "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche".
- D.M. 14.1.2008: "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.29 del 4 febbraio 2008.
- Circolare 2.2.2009, n.617: "Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14.1.2008".
- Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 – "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137";
- D.P.C.M. del 09.02.2011: "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008", Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n. 47 del 26 febbraio 2011;
- UNI 11119:2004: "Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera";
- UNI EN 338:2009: "Legno strutturale - Classi di resistenza".
- UNI 11035-2:2010: "Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale";

#### **b) Linee Guida**

- CNR DT 200/2004: "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".
- CNR DT 201/2005: "Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignei mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

#### **c) Documentazione**

- Tecno Futur Service S.r.l.: "Progetto di ristrutturazione della Residenza Municipale – Indagini diagnostiche sulle strutture".

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

- Dott. Ing. Ivano Balatoni: “Consulenza statica al progetto di ristrutturazione della Residenza Municipale di Ravenna; Parte Seconda: III Edizione: Verifiche (diagnosi) e progetto dei rimedi (terapia) per le strutture dei solai”.
- Labortec CSM S.r.l. – Rapporto di Prova n° R/093/0132.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

## 2. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI LE STRUTTURE ESISTENTI

### 2.1 DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI CONOSCENZA

#### 2.1.1 Definizione del percorso di conoscenza e della campagna di indagini strutturali

La conoscenza dell'edificio in muratura oggetto della verifica risulta di fondamentale importanza ai fini di un'adeguata analisi e può esser conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche e delle indagini sperimentali.

Tali operazioni sono state condotte secondo gli obiettivi posti ed hanno interessato compatibilmente con il pregio storico artistico degli elementi da analizzare la totalità del fabbricato ad eccezione delle parti non di proprietà del Comune per le quali si sono ipotizzate, per analogia, le caratteristiche meccaniche degli elementi strutturali.

Le tipologie di prova ed i controlli eseguiti in opera sulle murature sono stati:

- Rilievo morfologico delle murature mediante indagine visiva.
- Rilievo stratigrafico delle murature mediante indagine endoscopica;
- Determinazione dello stato tensionale delle murature mediante prova con martinetto piatto singolo;
- Determinazione delle caratteristiche meccaniche e di deformazione delle murature mediante prova con martinetti piatti doppi;

Al punto C8A.1.A.4 Costruzioni in muratura: livelli di conoscenza, le NTC2008 affermano che il livello di conoscenza LC2 si intende raggiunto quando siano stati effettuati il rilievo geometrico, verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi ed indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali.

Sulla base di quanto effettuato dal laboratorio che ha condotto le indagini nonché dai numerosi sopralluoghi volti a verificare la rispondenza tra lo stato di fatto e la documentazione individuata e fornita dall'Amministrazione Comunale possiamo a ragione affermare che **si è raggiunto il livello di conoscenza LC2**.

Infatti si è proceduto nel rispetto di quanto espresso in forma schematica nella tabella C8A.1.1 sottoriportata della Circolare di istruzioni allegata alle NTC2008.

Per i dettagli costruttivi come deducibile dalla presente relazione nonché dal rapporto di prova allegato sono state effettuate verifiche in situ ricorrendo ad un esame visivo previa rimozione dei rivestimenti e dell'intonacatura e ad endoscopie nella muratura che hanno consentito di esaminarne le caratteristiche sia in superficie sia nello spessore murario. I risultati dell'esame dei dettagli costruttivi sono stati estesi alle parti dell'edificio oggetto di incarico.

In merito alle proprietà dei materiali sono state condotte indagini in-situ estese che hanno visto non solo i sopracitati saggi superficiali ed interni per la tipologia di muratura presente ma anche prove con martinetto piatto singolo e doppio, prove di caratterizzazione della malta (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato...), e dei mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche), così facendo è stato possibile verificare la corrispondenza della muratura alle tipologie definite nella tabella C8A2.1 della Circolare di istruzioni allegata alle

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

NTC2008. A completamento delle prove distruttive sono state effettuate prove sclerometriche sui corsi di malta delle murature.

Livello di Conoscenza	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete. Individuazione tipologia fondazioni. Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1	Tutti	1.35
LC2		verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ estese Resistenza: valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1		1.20
LC3			Indagini in situ esaustive -caso a) (disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza) Resistenza: media dei risultati delle prove Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C8A.2.1 -caso b) (disponibili 2 valori sperimentali di resistenza) Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di Tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a). -caso c) (disponibile 1 valore sperimentale di resistenza) Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 – caso a).		1.00

Si è poi proceduto ad estendere i risultati alle parti strutturali non oggetto di incarico in maniera coerente con l'analisi storica effettuata al fine di consentire un'analisi globale attendibile..

I risultati delle prove sono stati esaminati e considerati secondo quanto previsto in normativa nell'ambito di un quadro di riferimento tipologico generale che tenga conto anche dei risultati delle prove sperimentali disponibili in letteratura sino ad ora per le tipologie murarie in oggetto, e che consenta di valutare, anche in termini statistici, l'effettiva rappresentatività dei valori trovati. Pertanto i risultati delle prove sono stati opportunamente confrontati con quanto riportato nella C8A2.1 della Circolare di Istruzioni allegata alle NTC2008, secondo quanto descritto al punto C8A.1.A.4.

Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive sotto riportate, è stato possibile definire il livello di conoscenza dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e materiali), e stabilire il correlato fattore di confidenza, da utilizzare come ulteriore coefficiente parziale di sicurezza volto a tener conto delle carenze nella conoscenza dei parametri dei modelli che verranno utilizzati per l'analisi di vulnerabilità.



Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

**Al livello di conoscenza LC2, conseguito per le strutture in muratura, corrisponde un fattore di confidenza pari a  $FC=1,2$  che potrà essere utilizzato nelle analisi. Per le strutture in acciaio si considererà invece un livello di conoscenza LC1 a cui corrisponde un fattore di confidenza  $FC=1,35$ .**

## 2.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE IN MURATURA

Nelle giornate tra il 05 ed il 07 Agosto 2009, sono state effettuate le prove diagnostiche per determinare le caratteristiche fisiche e meccaniche delle murature esistenti ad opera del laboratorio incaricato dal R.T (rapporto di prova Labortec CSM S.r.l. N° R/093/0132). La campagna di prove è stata condotta e pianificata cronologicamente in stretta collaborazione con l'Amministrazione Comunale e nel rispetto delle esigenze del personale impiegato nei locali oggetto d'indagine.

Si riporta una tabella riassuntiva indicante l'ubicazione delle prove, il codice, la tipologia di muratura e le caratteristiche fisiche e meccaniche delle murature come riportato nel Rapporto di Prova n° R/093/0132 redatto dal laboratorio Labortec CSM S.r.l. ed a cui si rimanda per maggiori informazioni.

PIANO	TIPOLOGIA MURATURA	UBICAZIONE	SIGLA DELLA PROVA	COMPRESSIONE [MPa]	TRAZIONE [MPa]	MODULO ELASTICO SECANTE [MPa]
TERRA	laterizio pieno con regolare presenza di laterizio spaccato, con corsi di malta di elevato spessore e di scarsa qualità, fessurata e con vuoti (endoscopia E1)	muratura perimetrale cortile interno dell'estensione del Palazzo Merlato su via Mentana	prova a compressione su carota C1A	24.46		
			martinetto piatto MP1	1.8		E= 2252 (tra 0 e 0,83 MPa di tensione)
						E= 668 (tra 0 e 1,51 MPa di tensione)
	laterizio pieno con regolare presenza di laterizio spaccato, con corsi di malta di elevato spessore e di scarsa qualità, fessurata e con vuoti (endoscopia E1)	muratura perimetrale cortile interno dell'estensione del Palazzo Merlato su via Mentana	prova a trazione su carota C1B		1.64	

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

PIANO	TIPOLOGIA MURATURA	UBICAZIONE	SIGLA DELLA PROVA	COMPRESSIONE [MPa]	TRAZIONE [MPa]	MODULO ELASTICO SECANTE [MPa]
PRIMO	laterizio pieno con corsi di malta irregolari, discontinui e fessurati	muratura di controvento tra Ufficio e Zona fotocopie dell'estensione del Palazzo Merlato su via Mentana	prova a compressione su carota C2		1.93	
	laterizio pieno a 2 teste, regolare, con corsi di malta regolari di qualità accettabile; presenza di un paramento di laterizi forati da tamponamento (endoscopia E5)	sommità muratura corridoio ala lato Piazza del Popolo del Palazzo Veneziano	prova a compressione su carota C5	22.18		
	laterizio pieno a 2 teste, regolare, con corsi di malta regolari di qualità accettabile; presenza di un paramento di laterizi forati da tamponamento (endoscopia E5)	sommità muratura corridoio ala lato Piazza del Popolo del Palazzo Veneziano	prova a compressione su carota C6	43.56		
	laterizio pieno a 2 teste, regolare, con corsi di malta regolari di qualità accettabile; presenza di un paramento di laterizi forati da tamponamento (endoscopia E5)	sommità muratura corridoio ala lato Piazza del Popolo del Palazzo Veneziano	prova a compressione su carota C7	14.58		

In base all'analisi dei risultati ottenuti dalle prove ed in base alle tipologie omogenee di murature individuate, sono stati identificati i seguenti parametri medi di resistenza degli elementi in laterizio :

	<b>PALAZZO MERLATO ED ESTENSIONE SU VIA MENTANA</b>	<b>PALAZZO VENEZIANO</b>
<b>PROVE DI RIFERIMENTO</b>	C1A, C3, C4 (compressione); C1B, C2 (trazione)	C5, C6, C7
<b>MEDIA DELLE RESISTENZE MATTONE</b>	19,7 MPa	26,7 MPa

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

La resistenza a compressione della malta può essere espressa in termini delle componenti normale e tangenziale che si esercitano sul corso di malta compreso nel campione cilindrico sottoposto a prova brasiliana con giunto inclinato. Con riferimento ad un'inclinazione di  $45^\circ$ , le componenti che si proiettano normalmente e parallelamente al giunto risultano essere:

$$\sigma = p \cdot \sin 45^\circ = 0,707 p, \quad \tau = p \cdot \cos 45^\circ = 0,707 p$$

I due punti  $\{\sigma, \tau\}$ ,  $\{0, -\tau\}$  definiscono un diametro del circolo di Mohr della tensione nel punto; è pertanto possibile ricavare il raggio del cerchio e porlo uguale alla tensione tangenziale che può essere sopportata dalla malta:

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} = \sqrt{\frac{5}{4}} \cdot \tau = \sqrt{\frac{5}{8}} \cdot p$$

Il valore della coesione  $c$  può essere allora determinato se si definisce l'angolo  $\varphi$  del criterio di rottura di Coulomb; in particolare detto angolo può essere assunto pari ad un valore dato (ad esempio la Normativa Italiana per il taglio nella muratura fissa  $\arctan [0,4]$ ), o può essere stabilito fissando una condizione di controllo.

Nel caso in esame, appare interessante fissare l'angolo d'attrito in funzione del valore del rapporto tra massima compressione e massima trazione, che con riferimento al criterio di resistenza di Tresca, viene fatto coincidere con il valore del coefficiente di Poisson:

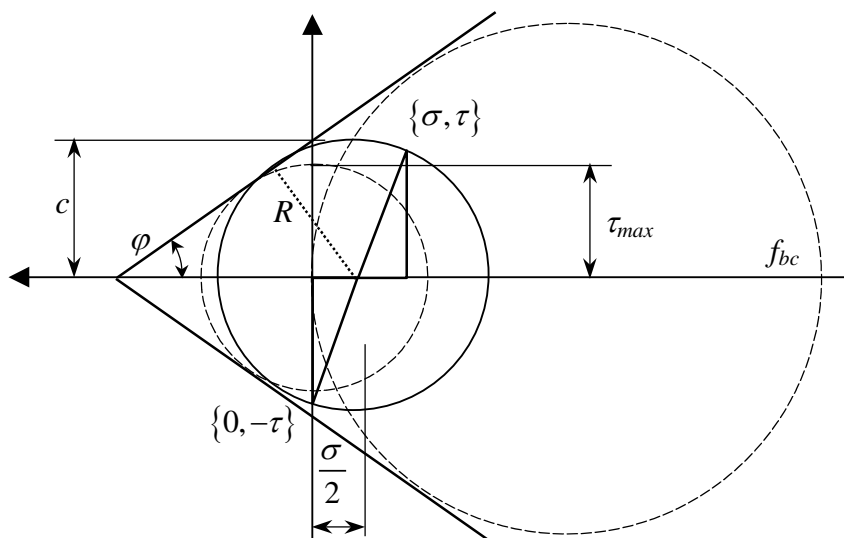
$$\varphi = \arcsin \left[ \frac{f_c - f_t}{f_c + f_t} \right] = \arcsin \left[ \frac{1 - \nu}{1 + \nu} \right]$$

dove  $\nu$  è il coefficiente di Poisson della malta stimato pari a 0,3.

Assunto infine che il comportamento a taglio puro sia caratterizzato dal circolo centrato sull'origine, si determina il valore della tensione tangenziale presente nel piano critico:

$$c = \frac{R}{\cos \varphi} - \frac{\sigma}{2} \tan \varphi = \left[ \frac{\sqrt{5} - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \right] \cdot \tau$$

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale



Dal valore della coesione è anche possibile stimare la resistenza a compressione della malta; assumendo che questa sia definita dal circolo di Mohr passante per l'origine ed esplicitando in funzione dei dati:

$$f_{mc} = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Anche la resistenza a trazione è data da una formula analoga:

$$f_{mt} = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

In generale il taglio determinato con prove di trazione indiretta su cilindri con giunto inclinato risulta essere circa pari al valore che si determinerebbe per il muro effettuando una prova di compressione diagonale; si può allora fissare il valore del taglio  $f_{vko}$  da inserire nelle verifiche di resistenza a taglio dei pannelli murari semplicemente dividendo per un coefficiente di sicurezza il valore ottenuto dalle prove brasiliane.

Nel corso della sperimentazione sono state effettuate tre prove brasiliane di carote con incluso giunto di malta. I risultati dei tre tests forniscono un valore della tensione media diametrale di 0,7 MPa con una deviazione standard di 0,29 sulle tre prove effettuate.

La resistenza a taglio della malta viene quindi considerata pari a 0,095 MPa per il Palazzo Merlato, mentre viene considerata pari a 0,05 MPa per il Palazzo Veneziano.

Facendo uso dei risultati delle prove sui componenti malta e mattone, sono possibili differenti relazioni per il calcolo delle quantità di riferimento della muratura; in particolare lo scopo è quello di ricavare la resistenza a compressione ed il modulo elastico, la resistenza a taglio ed il modulo di taglio.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

S'introducono allora le seguenti formule, che consentono di ricavare le proprietà medie della muratura, note quelle dei materiali componenti:

La proporzione della compressione orizzontale nella malta in funzione della compressione verticale viene fornita dal fattore  $\Phi$  calcolato come

$$\Phi = \frac{\nu_m - \frac{E_m}{E_b} \nu_b}{1 - \nu_m + (1 - \nu_b) \frac{E_m}{E_b} \frac{h_m}{h_b}}$$

a partire dal quale e dal rapporto tra gli spessori degli strati, può essere individuata la resistenza della muratura:

$$f_k = \frac{1}{\frac{1}{f_{bc}} + \frac{k\Phi h_m}{h_b f_{bt}}}$$

La resistenza a compressione della muratura può essere anche ottenuta utilizzando una semplice formula empirica dovuta all'Eurocodice 6, che richiede solo le resistenze a compressione di malta e mattone:

$$f_k = 0,4 f_{bc}^{0,75} f_{mc}^{0,25}$$

Mentre, per quel che attiene il modulo elastico della muratura, si ottiene una stima dalla seguente formula:

$$E_k = \frac{h_b + h_m}{\frac{h_b}{E_b} + \frac{h_m}{E_m}}$$

Una valutazione analitica della tensione tangenziale di collasso di un pannello murario, può essere ottenuta imponendo direttamente la condizione limite di Mohr-Coulomb alle tensioni principali di compressione e trazione che si manifestano nel centro del pannello; con riferimento a trattazioni usuali si ha:

$$\tau_u = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_0}{f_k}\right) \left(1 + \frac{\sigma_0}{f_{mt}}\right)}}{\frac{1}{f_k} + \frac{1}{f_{mt}}} \quad (12)$$

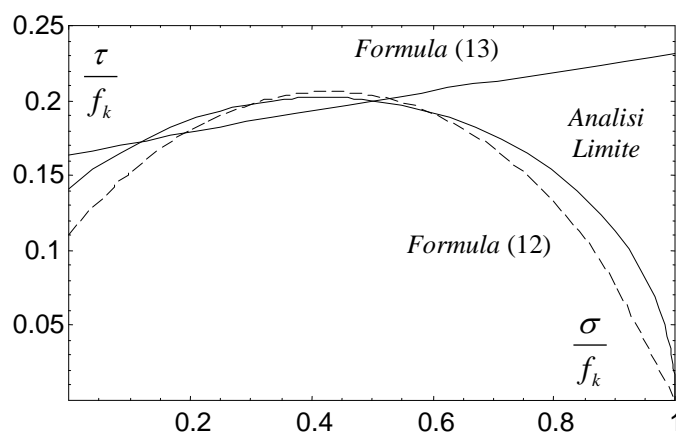
La formula sopra riportata introduce comunque un'ipotesi assai forte sulla distribuzione delle tensioni; una più accurata analisi della resistenza a taglio dei pannelli può essere condotta con le tecniche dell'analisi limite come ad esempio riportato in [A. Zingali, L. Masciotta, *Atti del 4° Convegno Nazionale ANIDIS*, Milano 1989]. In tal caso, il pannello viene suddiviso in parti di materiale a stato di tensione costante, forzando poi l'equilibrio nelle linee di interconnessione.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Con riferimento al lavoro citato, a cui si rimanda per una dettagliata descrizione del metodo, è stata determinato il dominio limite di resistenza {Forza Verticale, Forza Orizzontale} relativo ad un pannello murario composto con una malta di proprietà pari a quelle rilevate sperimentalmente; per confronto, sono stati ricavati i valori di tensione tangenziale limite che portano a collasso i pannelli. E' stata infine valutata la formula usualmente accettata dalla Normativa sismica vigente per la resistenza a taglio della muratura in presenza dello sforzo normale:

$$\tau = f_{vko} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{f_k}}$$

In tale formula, che descrive il comportamento di muretti soggetti a compressione diagonale, può essere inserito il valore determinato dalla prova di spacco su cilindri con un opportuno fattore di proporzionalità, ovvero applicando il procedimento a ritroso a partire dalla coppia  $\{\sigma, \tau\}$ , è possibile calcolare il valore di  $f_{vko}$  da confrontare con i risultati delle prove sulla malta.



La determinazione del modulo di taglio della muratura può essere in prima approssimazione condotta con riferimento al modulo elastico stimato; in particolare i valori consueti sono valutabili con la proporzione  $G_k = c E_k$ , ove  $c$  risulta compreso nel campo tra 0,25 e 0,4.

I dati relativi alle proprietà meccaniche sopra descritte sono riportate nella seguente tabella.

Sigla	fbc	fbc	t	ft	f	c (1)	fmc (2)	fc (3)	fv0 (MEDIA)
	Resistenza a compressione mattone	media resistenza a compressione mattone	Resistenza a taglio malta	Resistenza a trazione indiretta	Angolo	Coesione	Resistenza a compressione malta	Resistenza a compressione muratura	Resistenza a taglio muratura
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
MERLATO	24.46	19.72	0.095	0.075	32	0.112	0.084	3.181	0.075
	14.97								
VENEZIANO	22.18	26.77	0.05	0.07	32	0.06	0.04	3.679	0.07
	43.56								
	14.58								

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Si ribadisce che, stante la rilevanza culturale dell'edificio e la necessità di preservarne l'integrità, nonché la notevole estensione planimetrica, le prove effettuate sulla struttura per quanto attendibili non possono ritenersi in numero statisticamente significativo, e pertanto i valori delle resistenze meccaniche dei materiali, coerentemente con quanto previsto dalle NTC Tabella C8A.1.1, non vengono desunti direttamente da queste ma prendono in considerazione le classi discretizzate previste nella tabella C8.A.2.1 sottoriportata ed i valori medi della tipologia muraria riscontrata.

La normativa precisa che : "Nel caso delle murature storiche, i valori indicati nella Tabella C8A.2.1 (relativamente alle prime sei tipologie) sono da riferirsi a condizioni di muratura con malta di scadenti caratteristiche, giunti non particolarmente sottili ed in assenza di ricorsi o listature che, con passo costante, regolarizzino la tessitura ed in particolare l'orizzontalità dei corsi. Inoltre si assume che, per le murature storiche, queste siano a paramenti scollegati, ovvero manchino sistematici elementi di connessione trasversale (o di ammortamento per ingranamento tra i paramenti murari)."

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Tabella C8A.2.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte;  $f_m$  = resistenza media a compressione della muratura,  $\tau_0$  = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura

Tipologia di muratura	$f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/cm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	w (kN/m <sup>3</sup> )
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$ )	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Al §C8.A.2 la Circolare prevede che nel caso in cui la muratura presenti caratteristiche migliori rispetto agli elementi di valutazione, le caratteristiche meccaniche possano essere ottenute, a partire dai valori di Tabella C8A.2.1, applicando coefficienti migliorativi fino ai valori indicati nella Tabella C8A.2.2.

Si è ritenuto opportuno considerare la presenza di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti e pertanto si è applicato il coefficiente indicato nella tabella C8A.2.2 per muratura in mattoni pieni e malta di calce.



Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Tabella C8A.2.2 - Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati in Tabella C8A.2.1) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; giunti sottili; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; nucleo interno particolarmente scadente e/o ampio; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato.

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessioni trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadriati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

Come descritto in precedenza, le resistenze meccaniche e i parametri elastici medi delle murature sono stati determinati sulla base dei risultati delle indagini effettuate, confrontando i valori sperimentali con le indicazioni fornite dalla normativa.

Secondo quanto previsto dalla vigente normativa i coefficienti parziali di sicurezza differiscono a seconda che si tratti di una analisi statica od una analisi sismica. Per la Statica, il §4.5.6.1 propone valori variabili da 2.0 a 3.0 mentre per la Sismica, il §7.8.1.1 indica un unico valore da adottare, pari a 2.0.

Per le verifiche statiche si adotta quindi un coefficiente  $\gamma_m = 3$  mentre per le verifiche sismiche si utilizzerà un coefficiente pari a  $\gamma_m = 2$ .

## 2.2.1 Caratteristiche meccaniche di calcolo della muratura – Analisi Statica

### Palazzo Merlato e portico annesso

Come detto in precedenza la resistenza di calcolo a compressione viene valutata considerando sia i valori trovati sperimentalmente che i valori forniti dalla norma. In particolare un coefficiente di sicurezza del materiale pari a 3 ed un fattore di confidenza pari a 1,2 con coefficiente correttivo pari a 1.3 per considerare la buona tessitura della muratura e la presenza di diatoni.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{3,20 \cdot 1,3}{3 \cdot 1,2} = 1,15 MPa$$

Si deve notare che la resistenza meccanica adottata è compatibile con le risultanze sperimentali.

La resistenza a taglio è invece pari a:

$$\tau_0 = \frac{0,076 \cdot 1,3}{3 \cdot 1,2} = 0,0274 MPa$$

Si è fatta un'ulteriore distinzione considerando, per i pilastri sotto il portico, una tipologia muraria a blocchi di pietra squadrata per i quali si sono utilizzate le seguenti caratteristiche meccaniche in termini di resistenza a compressione e a taglio (stante il grado di fessurazione di alcuni elementi lapidei non si è utilizzato alcun coefficiente correttivo).

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{7}{3 \cdot 1,2} = 1,94 MPa$$

La resistenza a taglio è invece pari a:

$$\tau_0 = \frac{0,105}{3 \cdot 1,2} = 0,0290 MPa$$

### **Palazzo Veneziano e portico annesso**

La resistenza di calcolo a compressione per le murature del Palazzo Veneziano è pari a:

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{3,2 \cdot 1,3}{3 \cdot 1,2} = 1,15 MPa$$

Anche in questo caso si deve notare che la resistenza meccanica adottata è compatibile con le risultanze sperimentali.

La resistenza a taglio:

$$\tau_0 = \frac{0,07 \cdot 1,3}{3 \cdot 1,2} = 0,0250 MPa$$

Poiché le prove hanno mostrato la presenza di malta di caratteristiche meccaniche inferiori rispetto a quelle proprie della muratura di palazzo Merlato si è ritenuto opportuno penalizzarne la resistenza a taglio.

Va considerato che i pilastri sotto il portico sono ricavati da un unico blocco di pietra e pertanto nell'analisi sono state utilizzate per tali elementi le seguenti caratteristiche meccaniche in termini di resistenza media a compressione e a taglio.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Data la monoliticità dell'elemento e la conseguente assenza di ricorsi di malta la resistenza a taglio presenterebbe valori molto elevati ma favore di sicurezza si è considerato che i pilastri siano costituiti da un materiale lapideo dotato di resistenza a compressione caratteristica pari a  $f_k=15$  MPa e resistenza a taglio caratteristica pari a 1.5 MPa. Pertanto le resistenze di progetto saranno pari a :

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{15}{3 \cdot 1,2} = 4.16 MPa$$

La resistenza media a taglio è:

$$\tau_0 = \frac{1,50}{3 \cdot 1,2} = 0,4160 MPa$$

## 2.2.2 Caratteristiche meccaniche di calcolo della muratura – Analisi Sismica

### **Palazzo Merlato e portico annesso**

La resistenza di calcolo a compressione per le murature del Palazzo Merlato viene trovata considerando un coefficiente del materiale pari a 2 ed un fattore di confidenza pari a 1,2 con coefficiente correttivo pari a 1.3 per considerare la buona tessitura della muratura e la presenza di diatoni.

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{3,20 \cdot 1.3}{2 \cdot 1,2} = 1,725 MPa$$

La resistenza a taglio è:

$$\tau_0 = \frac{0,076 \cdot 1.3}{2 \cdot 1,2} = 0,041 MPa$$

Si è fatta un'ulteriore distinzione, considerando per i pilastri sotto il portico, una tipologia muraria a blocchi di pietra squadrata per i quali si sono utilizzate le seguenti caratteristiche meccaniche in termini di resistenza a compressione e a taglio (stante il grado di fessurazione di alcuni elementi lapidei non si è utilizzato alcun coefficiente correttivo).

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{7}{2 \cdot 1,2} = 2.91 MPa$$

La resistenza media a taglio è:

$$\tau_0 = \frac{0,105}{2 \cdot 1,2} = 0,0438 MPa$$

### **Palazzo Veneziano e portico annesso**

La resistenza di calcolo a compressione per le murature del Palazzo Veneziano è pari a:

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{3,2 \cdot 1,3}{2 \cdot 1,2} = 1,725 MPa$$

La resistenza media a taglio:

$$\tau_0 = \frac{0,07 \cdot 1,3}{2 \cdot 1,2} = 0,0375 MPa$$

Poiché le prove hanno mostrato la presenza di malta di caratteristiche meccaniche inferiori rispetto a quelle proprie della muratura di palazzo Merlato si è ritenuto opportuno penalizzarne la resistenza a taglio.

Va considerato che i pilastri sotto il portico sono ricavati da un unico blocco di pietra e pertanto nell'analisi sono state utilizzate per tali elementi le seguenti caratteristiche meccaniche in termini di resistenza media a compressione e a taglio.

Data la monoliticità dell'elemento e la conseguente assenza di ricorsi di malta la resistenza a taglio presenterebbe valori molto elevati ma a favore di sicurezza si è considerato che i pilastri siano costituiti da un materiale lapideo dotato di resistenza a compressione caratteristica pari a  $f_k=15$  MPa e resistenza a taglio caratteristica pari a 1.5 MPa. Pertanto le resistenze di progetto saranno:

$$f_d = \frac{f_k}{FC \cdot \gamma_m} = \frac{15}{2 \cdot 1,2} = 6.25 MPa$$

La resistenza a taglio è invece pari a:

$$\tau_0 = \frac{1,5}{2 \cdot 1,2} = 0,624 MPa$$

### 2.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE LIGNEE

Come già illustrato nella descrizione generale della struttura, nel complesso sono presenti diverse tipologie di strutture lignee: segnatamente alcuni dei campi dei solai di piano calpestio dell'edificio ed i solai inclinati di copertura dell'edificio.

Per quanto riguarda i solai di piano, nell'anno 1994 sono state effettuate indagini endoscopiche che hanno permesso di definire la stratigrafia degli stessi, e quindi i carichi in gioco.

Per quanto riguarda le strutture lignee di copertura, in corrispondenza della Sala Consigliare e della Sala Pre-Consigliare, la struttura portante è costituita da una serie di capriate lignee asimmetriche con monaco e saette su cui poggiano le orditure del solaio di copertura con manto in coppi tradizionali. Invece il resto della copertura è costituito da una struttura portante di travi lignee in appoggio sui timpani delle murature di controvento (copertura

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

non spingente). La struttura secondaria è simile a quella descritta in precedenza, con travicelli lignei, pannelle in laterizio pieno e manto di copertura in coppi tradizionali.

### 2.3.1 Caratteristiche meccaniche degli elementi lignei degli orizzontamenti di piano

Non disponendo di indagini specifiche, i parametri meccanici relativi agli elementi portanti lignei dei solai di piano sono stati ricavati a partire dalle informazioni contenute nelle relazioni del Dott. Ing. Ivanoe Balatroni, ed in particolare dalla relazione “Consulenza statica al progetto di ristrutturazione della Residenza Municipale di Ravenna; Parte Seconda: III Edizione: Verifiche (diagnosi) e progetto dei rimedi (terapia) per le strutture dei solai.”

2.3.1.1 In detta relazione il Dott. Ing. Ivanoe Balatroni definisce il legno delle travi portanti dei solai piani come un legno di conifera di classe III, indicandone una tensione ammissibile pari a 70 kg/cmq. Tali indicazioni permettono di classificare il legname descritto dal Dott. Ing. Ivanoe Balatroni entro quelli riportati nel prospetto 3 dell'Appendice A della norma UNI 11119 come di seguito evidenziato.

Specie	Categoria in opera	Tensioni massime (N/mm <sup>2</sup> )					
		compressione		flessione statica	trazione parallela alla fibratura <sup>1)</sup>	taglio (parallelo alla fibratura)	modulo di elasticità a flessione
		parallela alla fibratura	perpendicolare alla fibratura				
Abete bianco (Abies alba Mill.)	I	11	2,0	11,5	11	0,9	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,8	12 000
	III	7	2,0	7,5	6	0,7	11 000
Abete rosso (Picea abies Karst.)	I	10	2,0	11	11	1,0	12 500
	II	8	2,0	9	9	0,9	11 500
	III	6	2,0	7	6	0,8	10 500
Larice (Larix spp.)	I	12	2,5	13	12	1,1	15 500
	II	10	2,2	11	9,5	1,0	14 500
	III	7,5	2,0	8,5	7	0,9	13 500
Pini (Pinus spp.)	I	11	2,0	12	11	1,0	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,9	12 000
	III	7	2,0	8	6	0,8	11 000
Castagno (Castanea sativa Mill.)	I	11	2,0	12	11	0,8	10 000
	II	9	2,0	10	9	0,7	9 000
	III	7	2,0	8	6	0,6	8 000
Pioppo (Populus spp.)	I	10	1,5	10,5	9	0,6	9 000
	II	8	1,5	8,5	7	0,5	8 000
	III	6	1,5	6,5	4,5	0,4	7 000
Quercia (Quercus spp.)	I	12	3,0	13	12	1,2	13 500
	II	10	2,5	11	10	1,0	12 500
	III	7,5	2,2	8,5	7	0,9	11 500

1) La tensione massima a trazione perpendicolare alla fibratura si assume convenzionalmente uguale a zero.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Per determinare i valori di tutte le grandezze meccaniche da utilizzare per le verifiche di sicurezza secondo la normativa attuale, si è posta l'uguaglianza tra la tensione ammissibile indicata dal Dott. Ing. Ivanoe Balatroni ed il valore di calcolo definito secondo il § 4.4.6 delle NTC2008.

$$\sigma_{amm} = f_d = \frac{k_{mod} f_k}{\gamma_M} \Rightarrow f_k = 13.5 MPa$$

dove  $k_{mod}$  e  $\gamma_M$  sono definiti ai punti § 4.4.6 e § 4.4.7 delle NTC2008.

Il valore di resistenza a flessione caratteristico così calcolato è riconducibile ad un legno di classe C14, così come definito dalla norma UNI EN 338.

Nei calcoli successivi si fa quindi riferimento ai parametri meccanici caratteristici riportati in tabella con riferimento alla classe C14:

-Classi di resistenza secondo EN 338, per legno di conifere e di pioppo

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze [MPa]												
flessione $f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
trazione parallela alla fibratura $f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
trazione perpendicolare alla fibratura $f_{t90,k}$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
compressione parallela alla fibratura $f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
compressione perpendicolare alla fibratura $f_{c90,k}$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
taglio $f_{v,k}$	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.8	3.0	3.4	3.8	3.8	3.8
Modulo elastico [GPa]												
modulo elastico medio parallelo alle fibre $E_{0,mean}$	7	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	14	15	16
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre $E_{0,05}$	4.7	5.4	6.0	6.4	6.7	7.4	7.7	8.0	8.7	9.4	10.0	10.7
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre $E_{90,mean}$	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33	0.37	0.38	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53
modulo di taglio medio $G_{mean}$	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88	0.94	1.00
Massa volumica [kg/m³]												
massa volumica caratteristica $\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
massa volumica media $\rho_m$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

I valori sopra riportati, tratti dalla norma EN 338, sono di poco inferiori o coincidenti con quelli riportati nel prospetto 5 della norma UNI 11035-2 in riferimento ad una tipologia di legname ed ad una categoria in opera omologhe a quelle indicate dal Dott. Ing. Ivanoe Balatroni (Pino laricio/Italia, categoria S3).

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Proprietà	Abete/Italia			Pino laricio/Italia			Larice/Nord Italia			Douglasia/Italia		Altre conifere/Italia			Castagno/Italia	Querce caducifoglie/Italia	Picchio e Ontano/Italia	Altre latifoglie/Italia
Corrispondenza con le Classi di resistenza della UNI EN 338		C24	C18	C40	C22	C14		C22	C18	C35	C22				D24			
Categorie resistenti	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2/S3	S1	S2	S3	S	S	S	S
Flessione (5-percentile), N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,k}$	25	18	40	22	15		23	18	35	22	33	26	22	28	42	26	27
Trazione parallela alla fibratura (5-percentile), N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,0,k}$	15	11	24	13	9		14	11	21	13	20	16	13	17	25	16	16
Trazione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressione parallela alla fibratura (5-percentile), N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,0,k}$	21	18	26	20	17		20	18	25	20	24	22	20	22	27	22	22
Compressione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,k}$	2,6	2,6	3,2	3,0	3,0		3,6	3,6	3,2	2,9	3,7	3,7	3,7	7,3	11	6,3	7,7
Taglio (5-percentile), N/mm <sup>2</sup>	$f_{v,k}$	4,0	3,4	4,0	3,8	3,0		3,8	3,4	4,0	3,8	4,0	4,0	3,8	4,0	4,0	2,7	4,0
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (medio), kN/mm <sup>2</sup>	$E_{0,mean}$	11,8	10,5	15	12	11		12,5	11,5	15,8	13	12,3	11,4	10,5	12,5	12,0	8,0	11,5
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (5-percentile), kN/mm <sup>2</sup>	$E_{0,05}$	7,9	7,0	10	8,0	7,4		8,4	7,7	11	8,7	8,2	7,6	7,0	10,5	10,1	6,7	9,7
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura (medio), kN/mm <sup>2</sup>	$E_{90,mean}$	0,39	0,35	0,50	0,40	0,37		0,42	0,38	0,53	0,43	0,41	0,38	0,35	0,83	0,80	0,53	0,77
Modulo di taglio (medio), kN/mm <sup>2</sup>	$G_{mean}$	0,74	0,66	0,94	0,75	0,69		0,78	0,72	0,99	0,81	0,77	0,71	0,66	0,78	0,75	0,50	0,72
Massa volumica (5-percentile), kg/m <sup>3</sup>	$\rho_k$	375	375	455	425	430		510	520	450	415	530	530	530	485	760	420	515
Massa volumica (media), kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{mean}$	450	450	550	520	520		610	620	540	500	575	575	575	580	825	460	560

Infine poiché le NTC2008 non trattano espressamente le strutture in legno esistenti, la determinazione delle grandezze meccaniche di progetto viene effettuata seguendo le indicazioni di cui al punto § 4.4.6 delle NTC2008, valide per le nuove costruzioni.

### 2.3.2 Caratteristiche meccaniche degli elementi lignei delle coperture

Sulle coperture è stato effettuato un rilievo geometrico abbastanza dettagliato, ma non si dispone di alcuna prova sugli elementi strutturali. In mancanza di dati sulle caratteristiche meccaniche, per analogia con gli orizzontamenti lignei dei piani inferiori, si ipotizza la presenza dello stesso tipo di legno considerato per gli orizzontamenti piani.

## 2.4 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO

Come già illustrato nella descrizione generale della struttura, nel complesso sono presenti diverse tipologie di solai tra cui numerosi campi di solaio in putrelle e tavelloni.

Su tali solai nell'anno 1994 sono state effettuate indagini endoscopiche che hanno permesso di definire la stratigrafia degli stessi, e quindi i carichi in gioco.

Non disponendo di indagini specifiche, i parametri meccanici relativi agli elementi portanti in acciaio dei solai putrelle e tavelloni sono stati ricavati dalle informazioni raccolte dalle relazioni di calcolo del Dott. Ing. Ivanoe Balatroni, ed in particolare dalla relazione "Consulenza statica al progetto di ristrutturazione della Residenza Municipale di Ravenna; Parte Seconda: III Edizione: Verifiche (diagnosi) e progetto dei rimedi (terapia) per le strutture dei solai."

In tale relazione il Dott. Ing. Ivanoe Balatroni



Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Ritiene idonei i solai nei quali la massima tensione dell'acciaio delle putrelle del solaio è inferiore o di poco superiore ai 1600 kg/cm<sup>2</sup>. Tale valore corrisponde, secondo le indicazioni della normativa all'epoca vigente, alla tensione ammissibile di un acciaio di classe Fe360B, le cui caratteristiche sono paragonabili a quelle di un odierno acciaio di classe S235.

Tensione ammissibile		
Materiale	$\sigma_{adm}$ N/mm <sup>2</sup>	
	$t \leq 40$	$t > 40$
Fe 360	160	140
Fe 430	190	170
Fe 510	240	210
$t$ = spessore in mm.		

Stato limite		
Materiale	$f_d$ N/mm <sup>2</sup>	
	$t \leq 40$	$t > 40$
Fe 360	235	210
Fe 430	275	250
Fe 510	355	315
$t$ = spessore in mm.		

Nel prosieguo si farà quindi riferimento ad un acciaio di classe S235, per il quale si possono assumere nei calcoli i valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento  $f_{yk}$  e di rottura  $f_{tk}$  riportati nelle tabelle seguenti.

Norme e qualità degli acciai	Spessore nominale dell'elemento			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
UNI EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Tabella 2-1: Caratteristiche acciaio utilizzato

- tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk} = 235$  N/mm<sup>2</sup>
- tensione caratteristica di rottura  $f_{tk} = 360$  N/mm<sup>2</sup>

Per la definizione dei parametri di progetto, si seguono le indicazioni del capitolo 8 delle NTC e quanto indicato al punto §C8.7.2.4 della Circ. n.617/2009.

Avendo a disposizione il rilievo geometrico e non avendo potuto effettuare indagini in-situ limitate sui dettagli costruttivi e sulle proprietà dei materiali si è considerato un livello di conoscenza pari ad LC1, al quale corrisponde un **fattore di confidenza FC=1.35**.



Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Per le analisi statiche lineari, nella valutazione dei meccanismi duttili il valore della resistenza di progetto da considerare è il valore di resistenza caratteristica del S235 diviso il coefficiente di sicurezza, nelle verifiche fragili invece la resistenza di progetto deve essere ulteriormente divisa per il rispettivo coefficiente parziali di sicurezza.

- Meccanismi duttili

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{F_C} \Rightarrow f_{yd} = 174 MPa$$

- Meccanismi fragili

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M F_C} \Rightarrow f_{yd} = 165.8 MPa$$

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

### **3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI UTILIZZATI PER LE OPERE DI CONSOLIDAMENTO E LE OPERE EX-NOVO**

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei materiali utilizzati per gli interventi di consolidamento e le opere di nuova realizzazione.

#### **3.1.1 Calcestruzzo alleggerito per solette**

Per la realizzazione delle solette si è previsto di utilizzare un calcestruzzo alleggerito LC 30/33 di massa D1.6. Le caratteristiche di tale materiale sono le seguenti:

- |   |   |
|---|---|
| - Densità:  | <b>1600 kg/m<sup>3</sup></b>                                    |
| - Classe di resistenza (UNI EN 206-1)                         | <b>LC30/33</b>  |
| - Resistenza caratteristica a compressione certificata a 28gg | <b><math>f_{ck}=31.5</math> MPa; <math>R_{ck}=35</math> MPa</b> |
| - Modulo di elasticità certificato                            | <b>20000MPa</b>   |

#### **3.1.2 Barre per inghisaggi nella muratura e per rete elettrosaldata**

Per gli inghisaggi nella muratura e per la rete elettrosaldata delle solette è previsto l'utilizzo di barre di armatura ad aderenza migliorata in acciaio di classe **B450C** con tensione caratteristica a snervamento  $f_{yk} = 450$  MPa.

Per l'accertamento delle caratteristiche meccaniche delle barre di armatura vale quanto indicato al § 11.3.2.3 del D.M. 14/01/2008.

#### **3.1.3 Strutture in acciaio**

##### **3.1.3.1 Acciaio da carpenteria**

Per la realizzazione di strutture metalliche si utilizzeranno acciai conformi alle norme armonizzate, recanti la marcatura CE secondo norma UNI EN 1090-1:2012.

Si dovranno utilizzare acciai conformi alla norme armonizzate della serie

- |                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| - UNI EN 10025   | (per il laminati)            |
| - UNI EN 10210   | (per i tubi senza saldatura) |
| - UNI EN 10219-1 | (per tubi saldati)           |

In sede di progettazione, per gli acciai di cui alle norme europee EN 10025, EN 10210 ed EN 10219-1, si possono assumere nei calcoli i valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento  $f_{yk}$  e di rottura  $f_{tk}$  riportati nella Tabella 11.3.IX del § 11.3.4.1 del D.M. 14/01/2008 di seguito riportata.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Norme e qualità degli acciai	Spessore nominale dell'elemento			
	$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$	
	$f_{yk} [\text{N/mm}^2]$	$f_{tk} [\text{N/mm}^2]$	$f_{yk} [\text{N/mm}^2]$	$f_{tk} [\text{N/mm}^2]$
UNI EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	420	550
UNI EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
UNI EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
UNI EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490

L'acciaio utilizzato è del tipo **S275 JR** avente le seguenti caratteristiche:

- tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk} = 275 \text{ N/mm}^2$
- tensione caratteristica di rottura  $f_{tk} = 430 \text{ N/mm}^2$

Si prevede un trattamento protettivo di zincatura.

Il coefficiente parziale di sicurezza associato a questo materiale è, in accordo con le normative vigenti,  $\gamma_m = 1,05$ .

### 3.1.3.2 Bulloneria

I bulloni utilizzati nella progettazione degli interventi di miglioramento sismico sono conformi alle caratteristiche dimensionali definite dalle norme UNI EN ISO 4016:2011 ed appartengono ad una delle sottoclassi indicate dalla norma UNI EN ISO 898-1:2013 ed associate alla Tab. 11.3.XII delle D.M. 14/01/2008 di seguito riportata.

	Normali			Ad alta resistenza	
Vite	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
Dado	4	5	6	8	10

Le tensioni di snervamento  $f_{yb}$  e di rottura  $f_{tb}$  dei bulloni appartenuti alle classi indicate nella precedente tabella 11.3.XII. sono riportate nella tabella 11.3.XII.b delle D.M. 14/01/2008, di seguito riportata

Classe	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb} (\text{N/mm}^2)$	240	300	480	649	900
$f_{tb} (\text{N/mm}^2)$	400	500	600	800	1000

I bulloni e le barre filettate utilizzati negli interventi di miglioramento sismico della struttura in esame sono definiti come "*bulloni ad alta resistenza*" ed appartengono alla **classe 8.8**, le cui caratteristiche meccaniche sono:

- tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk} = 640 \text{ N/mm}^2$
- tensione caratteristica di rottura  $f_{tk} = 800 \text{ N/mm}^2$

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Si prevede un trattamento protettivo di zincatura.

### 3.1.4 Strutture lignee

#### 3.1.4.1 Legno lamellare per travi di copertura ex novo

Il legno utilizzato per le travi ex novo di copertura è un legno lamellare di classe GL28h aventi le caratteristiche meccaniche definite dalla norma UNI EN 1194.

Classi di resistenza del legno lamellare		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
<b>Resistenze (in N/mm<sup>2</sup>)</b>					
Flessione	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Trazione parallela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Compressione parallela	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Taglio	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
<b>Moduli elastici (in kN/mm<sup>2</sup>)</b>					
Medio parallelo alle fibre	$E_{0,g,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49
Modulo di taglio medio	$G_{g,mean}$	0,72	0,78	0,85	0,91
<b>Massa volumica (in kg/m<sup>3</sup>)</b>					
Massa volumica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

#### 3.1.4.2 Pannello XLAM

Il pannello XLAM utilizzato per il consolidamento della copertura è un pannello in legno massello di classe C24 (le cui caratteristiche sono definite in accordo con la norma UNI EN 338 ) composto da 3 lamelle ciascuna di spessore 20mm.

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze [MPa]													
flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
trazione parallela alla fibratura	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t90,k}$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
compressione parallela alla fibratura	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c90,k}$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
taglio	$f_{v,k}$	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.8	3.0	3.4	3.8	3.8	3.8
Modulo elastico [GPa]													
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	14	15	16
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4.7	5.4	6.0	6.4	6.7	7.4	7.7	8.0	8.7	9.4	10.0	10.7
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33	0.37	0.38	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53
modulo di taglio medio	$G_{mean}$	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88	0.94	1.00
Massa volumica [kg/m³]													
massa volumica caratteristica	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
massa volumica media	$\rho_m$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

### 3.1.5 Tessuti in fibra di acciaio galvanizzato

La progettazione degli interventi di rinforzo delle murature con tessuti in acciaio è stata effettuata considerando tessuti unidirezionali formati da micro-trefoli di acciaio ad altissima resistenza galvanizzati di cui si riportano brevemente i dati tecnici. Per la realizzazione è possibile adoperare prodotti “**diversi**” purché con caratteristiche geometriche e meccaniche non inferiori a quelle qui riportate e previa autorizzazione da parte del progettista strutturale e della DL. Per il rinforzo delle muratura è stato previsto l’impiego di un tessuto del tipo GeoSteel G600 applicato con matrice a base di calce idraulica naturale tipo GEOCALCE o similare.

- Tensione caratteristica a trazione del filo:  $\sigma_{filo} > 2900 \text{ MPa}$
- Modulo elastico del filo:  $E_{filo} > 205 \text{ GPa}$
- Area del filo:  $A_{filo} = 0,1076 \text{ mm}^2$
- Area effettiva di un trefolo 3x2 (5 fili):  $A_{trefolo} = 0,538 \text{ mm}^2$
- n° trefoli/cm: 1,57 trefoli/cm
- Carico di rottura a trazione di un trefolo  $> 1500 \text{ N}$
- Massa (comprensivo di termosaldatura):  $\approx 670 \text{ g/m}^2$
- Spessore equivalente del nastro secco:  $t_{nastro} \approx 0,084 \text{ mm}$
- Resistenza a trazione del nastro:  $\sigma_{nastro} > 3000 \text{ MPa}$
- Modulo di elasticità normale del nastro:  $E_{nastro} > 190 \text{ GPa}$
- Deformazione a rottura del nastro:  $\sigma_{nastro} > 2,0 \%$

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

### 3.1.6 Barre elicoidali in acciaio inox per ristilatura armata di muratura

La progettazione degli interventi di rinforzo delle murature mediante ristilatura armata è stata effettuata considerando barre elicoidali in acciaio inox AISI 304 di cui si riportano brevemente i dati tecnici. Per la realizzazione è possibile adoperare prodotti “**diversi**” purché con caratteristiche geometriche e meccaniche non inferiori a quelle qui riportate e previa autorizzazione da parte del progettista strutturale e della DL. Per il rinforzo delle muratura è stato previsto l’impiego di barre elicoidali del tipo Steel Helibar 6 applicate con matrice a base di calce idraulica naturale tipo GEOCALCE o similare.

- Materiale:	AISI 304;
- Diametro nominale:	$\varnothing = 6 \text{ mm}$ ;
- Area nominale della barra:	$A_{elica} = 8 \text{ mm}^2$ ;
- Carico di rottura a trazione:	$N > 10 \text{ kN}$ ;
- Carico massimo in campo elastico ( $\epsilon = 0,2\%$ ):	$N_{0,2\%} > 7,2 \text{ kN}$ ;
- Resistenza a trazione della barra:	$\sigma_{barra} > 1250 \text{ MPa}$ ;
- Resistenza a trazione in campo elastico ( $\epsilon = 0,2\%$ ):	$\sigma_{0,2\%} > 900 \text{ MPa}$ ;
- Carico di rottura a taglio della barra:	$T > 6 \text{ kN}$ ;
- Resistenza a taglio della barra:	$\tau > 750 \text{ MPa}$ ;
- Modulo di elasticità della barra:	$E_{barra} > 160 \text{ GPa}$ ;
- Deformazione a rottura della barra :	$\epsilon_{barra} > 5,5\%$

### 3.1.7 Elementi in laterizio

Per la realizzazione di interventi di scuci e cucì su murature esistenti e per la chiusure di nicchie si prevede l’utilizzo di **elementi portanti in laterizio pieno**. Come indicato nel §11.10.1 del D.M. 14/01/2008, gli elementi devono essere conformi alle norme europee armonizzate della serie UNI EN 771 e recare la Marcatura CE.

### 3.1.8 Malte a base di calce idraulica naturale

Per il consolidamento delle murature esistenti, l’applicazione di tessuti in fibra di acciaio e per l’inghisaggio di barre nella muratura si prevede di utilizzare malte a base di calce idraulica naturale NHL 3.5 a norma EN 459-1 avente classe di resistenza minima **M15** tipo GEOCALCE o similare avente le seguenti. É possibile adoperare prodotti “**diversi**” purché con caratteristiche meccaniche non inferiori a quelle qui riportate purché conformi ai requisiti delle linee guida CNR-DT 200 R1/2013 e previa autorizzazione da parte del progettista strutturale e della DL.

- Materiale:	Calce naturale NHL 3.5 e geolegante;
- Classe della malta:	M15;
- Resistenza a compressione a 28 giorni:	$\geq 15 \text{ MPa}$ ;
- Resistenza a trazione per flessione a 28 giorni:	$\geq 5 \text{ MPa}$ ;
- Adesione su laterizio:	$\geq 1 \text{ MPa}$ ;
- Legame di aderenza:	$\geq 0,8 \text{ MPa}$ ;
- Modulo elastico a compressione:	$9,23 \text{ GPa}$ ;
- Contenuto ioni cloruro:	$< 0,05 \%$

Interventi locali di miglioramento necessari alla mitigazione delle principali vulnerabilità della Residenza Municipale

### 3.1.9 Ancoraggi ad iniezione controllata

Per il consolidamento dei merli più bassi di Palazzo Merlato vengono impiegati ancoraggi ad iniezione controllata con calza costituiti da barre ad aderenza migliorata in acciaio inossidabile AISI 304 (A2), (tensione di rottura a trazione 550 N/mm<sup>2</sup> - tensione di snervamento 500 N/mm<sup>2</sup>); ancoraggi multibarra MRBOS.

Per il consolidamento dei merli più alti di Palazzo Merlato vengono impiegati ancoraggi ad iniezione controllata con calza costituiti da barre in acciaio inossidabile AISI 304 (A2) ad alta resistenza (tensione di rottura a trazione 750 N/mm<sup>2</sup> – tensione di snervamento 650 N/mm<sup>2</sup>), con filettatura adeguata all'utilizzo con calza, continua su tutta la lunghezza o parziale, ottenuta tramite processo di rullatura.

L'iniezione è realizzata con una malta dalle seguenti caratteristiche:

- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| - Resistenza a compressione a 28 giorni           | $\sigma_c \geq 51.5 \text{ MPa}$ |
| - Resistenza a trazione per flessione a 28 giorni | $\sigma_t \geq 4.5 \text{ MPa}$  |
| - Modulo di elasticità a 28 giorni                | $E > 28 \text{ MPa}$             |

**Pescara li Ottobre 2016**

**I Progettisti**