



- UNESCO Chair on Landscape, Cultural Heritage and Territorial Governance
- BENECON Research Centre of Competence of the Campania Region for Cultural Heritage, Ecology and Economy, Naples, Italy

Interventi di riparazione su alcune strutture del

Complesso Monumentale di San Lorenzo ad Septimum in Aversa

Università della Campania “Luigi Vanvitelli”
Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale

Consulenza scientifica
Prof. Ing. Giuseppe FAELLA

Progettista
Prof. Arch. Carmine GAMBARDELLA
UNESCO CHAIR on LANDSCAPE

Collaboratori:
Arch. Giovanni BELLO
Arch. Giuliana CHIERCHIELLO
Arch. Alessandro CIAMBRONE
Ing. Vincenzo FERRARO
Arch. Rosaria PARENTE
GIS_Analyst Dario MARTIMUCCI

Relazione tecnica Materiali da impiegare

INDICE

1. MATERIALI	3
1.1 Livelli di conoscenza	3
1.2 Caratteristiche meccaniche dei materiali esistenti	4
1.3 Caratteristiche meccaniche dei materiali di nuovo apporto	7

1. MATERIALI

Le proprietà dei materiali della struttura sono state determinate in accordo a quanto indicato nei capitoli 4 e 11 delle NTC/2018 e nel capitolo C8 della Circolare n. 7/2019. In particolare, i valori delle proprietà meccaniche sono stati ridotti attraverso i fattori di confidenza in relazione al livello di conoscenza raggiunto, e, laddove previsto dalla normativa vigente, anche attraverso i fattori parziali di norma. Nei paragrafi che seguono sono sintetizzate le caratteristiche meccaniche assunte per i materiali strutturali.

1.1 Livelli di conoscenza

Il livello di conoscenza raggiunto è stato inizialmente determinato secondo quanto indicato nella Direttiva del 9 febbraio 2011 ("Linee Guida per la 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") al punto 4.2.

Pertanto, il fattore di confidenza è stato determinato definendo i diversi fattori parziali di confidenza F_{Ck} ($k=1,4$), sulla base dei coefficienti numerici riportati in tabella 4.1 della suddetta Direttiva, i cui valori sono associati alle quattro categorie di indagine e al livello di conoscenza in esse raggiunto.

Nel caso in esame, ai sensi del capitolo 4.2 della suddetta Direttiva, in via cautelativa si ha:

- Rilievo geometrico

rilievo geometrico completo

$FC1 = 0.05$

- Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica

restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)

$FC2 = 0.06$

- Proprietà meccaniche dei materiali

limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali

$FC3 = 0.06$

- Terreno e fondazioni

disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni

FC4 = 0.03

Da quanto sopra si calcola un fattore di confidenza FC pari a 1.20. La Circolare n.7 del 2019, al punto C8.5.4, assume che:

- il livello di conoscenza LC2 si intende raggiunto quando siano stati effettuati, come minimo, l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato (con riferimento al §C8.5.1), il rilievo geometrico completo e indagini estese sui dettagli costruttivi (con riferimento al §C8.5.2), prove estese sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (con riferimento al § C8.5.3); il corrispondente fattore di confidenza è FC=1.2;
- il livello di conoscenza LC1 si intende raggiunto quando siano stati effettuati, come minimo, l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato (con riferimento al §C8.5.1), il rilievo geometrico completo e indagini limitate sui dettagli costruttivi (con riferimento al § C8.5.2), prove limitate sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (con riferimento al § C8.5.3); il corrispondente fattore di confidenza è FC=1.35

Nel caso in esame, oltre a disporre di una estesa analisi storico-critica, sono stati effettuati un rilievo geometrico completo della costruzione (B.I.M.), verifiche estese sui dettagli costruttivi e indagini in situ per la valutazione delle proprietà meccaniche dei materiali: in tal caso la Circolare consente l'adozione di un livello di conoscenza LC2, cui corrisponde un coefficiente di confidenza pari a 1.20.

1.2 Caratteristiche meccaniche dei materiali esistenti

La tipologia delle murature è stata determinata sulla base delle indagini in sito eseguite dalla Società A.G.C. Analisi Generali Costruzioni srl nel 1997, finalizzate alla caratterizzazione geometrica e meccanica delle murature del Complesso di S. Lorenzo.

Erano stati, in particolare, effettuati saggi per l'identificazione delle tessiture murarie, carotaggi per indagini endoscopiche, saggi e indagini endoscopiche nei rinfianchi delle volte, saggi per la caratterizzazione dei solai, esami sulle caratteristiche degli intonaci, indagini con martinetti piatti, prove soniche sulle pareti murarie, indagini termografiche, rilevamenti georadar, carotaggi per l'individuazione della quota di imposta delle fondazioni murarie e l'osservazione diretta delle opere fondali, carotaggi per la caratterizzazione stratigrafica di alcuni terreni. I risultati di tutte le prove effettuate sono sintetizzate nella relazione che costituisce l'Allegato 1 alla presente relazione.

I risultati delle prove con martinetti piatti singoli e doppi, eseguite sulle pareti murarie del chiostro, sono di seguito riassunti:

Postazione	Max tensione misurata [MPa]	Resistenza a compressione [MPa]	Modulo elastico [MPa]
PT ingresso lato parcheggio	0.48	1.73	676.3
PT lato destro	0.65	1.63	769.2
PT lato parcheggio (sottoscala con lesione)	(0.19)	(0.61)	(386.6)
P1 esterno lato parcheggio	0.85	1.45	768.4
P1 esterno lato parcheggio	0.48	---	---
P1 lato destro	0.75	1.69	906.0
P1 lato sinistro	0.58	1.12	689.7
P2 lato destro	0.38	1.53	905.7
P2 lato sinistro	0.38	1.12	688.1
Valore medio (escludendo il sottoscala)		1.47	771.9

Le prove soniche hanno fornito i seguenti valori delle velocità da cui dedurre i corrispondenti valori del modulo elastico:

Postazione	Velocità [m/sec]
PT ingresso lato parcheggio	1136
PT lato destro	869
PT lato sinistro	1036
P1 esterno lato parcheggio	952
P1 lato destro	869
P1 lato sinistro	869
P2 lato destro	682
P2 lato sinistro	571

I suddetti valori confermano mediamente quanto ottenuto mediante le prove con martinetti piatti, considerando che le prove soniche spesso conducono a valori inferiori dei moduli elastici rispetto ai valori ottenuti mediante le prove con martinetti piatti. A tal proposito si ricorda che murature in pietra naturale con caratteristiche di resistenza medio-buona presentano velocità comprese tra 800 e 900 m/sec, mentre le murature a sacco sono in genere caratterizzate da velocità inferiori a 500 m/sec.

Per quanto riguarda i valori delle caratteristiche meccaniche determinati sperimentalmente, si deve tuttavia evidenziare che in genere le prove con martinetti piatti su muratura in pietrame sono sensibili alla dimensione dei blocchi lapidei compresi tra i martinetti; ne consegue che i risultati della prova sono di tipo puntuale mentre la normativa fornisce valori mediati maggiormente realistici ai fini della modellazione della muratura in esame.

Per i suddetti motivi e nel rispetto di quanto previsto dalla normativa vigente per il livello di conoscenza LC2, nelle analisi si è fatto riferimento ai valori delle caratteristiche meccaniche proposti dalla normativa stessa.

Per il livello di conoscenza LC2, la Circolare n. 7 del 2019 richiede che le caratteristiche meccaniche delle murature siano dedotte dalla tabella C8.5.I presente nel capitolo 8 della Circolare stessa. Con riferimento agli intervalli previsti nella suddetta tabella, e riferendosi anche ai risultati delle indagini in sito, cautelativamente sono stati assunti i seguenti valori:

Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo):

$f_m = 1.90 \text{ MPa}$	resistenza media a compressione
$\tau_0 = 0.035 \text{ MPa}$	resistenza media a taglio in assenza di carichi verticali
$E = 1080 \text{ MPa}$	modulo di elasticità normale
$G = 360 \text{ MPa}$	modulo di elasticità a taglio

Muratura in mattoni pieni e malta di calce:

$f_m = 3.20 \text{ MPa}$	resistenza media a compressione
$\tau_0 = 0.076 \text{ MPa}$	resistenza media a taglio in assenza di carichi verticali
$E = 1500 \text{ MPa}$	modulo di elasticità normale
$G = 500 \text{ MPa}$	modulo di elasticità a taglio

Il coefficiente parziale per la resistenza è stato assunto pari a $\gamma_m = 2$, non adottando nessuna riduzione, come previsto dalle NTC/2018 al punto 7.8.1.1.

Resistenze nello stato di fatto

I valori di calcolo delle resistenze sono stati ottenuti dividendo i valori medi riportati in precedenza per il fattore di confidenza e per il coefficiente parziale di sicurezza:

Muratura a conci di pietra tenera (tufo):

- resistenza media a compressione	$f_d = 1.90/(1.20 \times 2) = 0.7916 \text{ MPa}$
- resistenza media a taglio	$\tau_{od} = 0.035/(1.20 \times 2) = 0.0146 \text{ MPa}$

Muratura in mattoni pieni e malta di calce:

- resistenza media a compressione	$f_d = 3.20/(1.20 \times 2) = 1.3333 \text{ MPa}$
- resistenza media a taglio	$\tau_{od} = 0.076/(1.20 \times 2) = 0.0316 \text{ MPa}$

Muratura in blocchi lapidei squadriati

Cautelativamente si assume:

- resistenza media a compressione $f_d = 7.00/(1.20 \times 2) = 2.917 \text{ MPa}$
- resistenza media a taglio $\tau_{od} = 0.105/(1.20 \times 2) = 0.0438 \text{ MPa}$

Acciaio dei tiranti esistenti

- resistenza caratteristica allo snervamento $f_{yk} = 215 \text{ MPa}$
- resistenza di calcolo allo snervamento $f_{yd} = 215/(1.20 \times 1.15) = 155.80 \text{ MPa}$

1.3 Caratteristiche meccaniche dei materiali di nuovo apporto

Negli interventi di consolidamento statico è previsto l'impiego dei seguenti materiali:

- *Blocchi di tufo per muratura:*

- $f_{bk} \geq 2.00 \text{ MPa}$ resistenza caratteristica a compressione

Il coefficiente parziale per le resistenze è stato assunto pari a $\gamma_m = 2$.

- *Malta da muratura a prestazione garantita per usi strutturali (Tipo G - Classe M5)*

- $f_m = 5 \text{ MPa}$ resistenza a compressione
- $t_m \geq 0.15 \text{ MPa}$ resistenza a taglio iniziale
- $t_{ad} \geq 0.5 \text{ MPa}$ aderenza al supporto
- Classe A1 resistenza al fuoco

- *Malta da muratura a prestazione garantita per usi strutturali (Tipo G - Classe M10)*

- $f_m = 10 \text{ MPa}$ resistenza a compressione
- $t_m \geq 0.15 \text{ MPa}$ resistenza a taglio iniziale
- $t_{ad} \geq 0.5 \text{ MPa}$ aderenza al supporto
- Classe A1 resistenza al fuoco

- *Acciaio tipo EN 1.4301 (AISI 304)*

- | | | |
|--|-----------------------------|-------------------------|
| Modulo di elasticità longitudinale | $E = 205000$ | N/mm^2 |
| Coefficiente di Poisson | $\nu = 0.30$ | |
| Peso unità di volume | $\rho = 7900$ | kg/m^3 |
| Coefficiente di dilatazione termica | $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ |
| Tensione caratteristica di snervamento | $R_{p0.2} \geq 230$ | N/mm^2 |
| Resistenza a rottura | $f_{tk} \geq 515$ | N/mm^2 |

Nelle verifiche sono stati utilizzati i seguenti valori per i fattori parziali:

- Verifiche di resistenza delle sezioni $\gamma_{M0} = 1.05$
- Verifiche di instabilità delle aste $\gamma_{M1} = 1.05$

- Materiale d'apporto per saldature Acciaio AISI 304 – EN 1.4301

Tensione caratteristica di snervamento	$R_{p0.2} \geq 430$	N/mm ²
Resistenza a rottura	$f_{tk} \geq 590$	N/mm ²
Deformazione	A5 = 40 %	
Classificazione	AWS A5.4	

- Tessuto in fibra di carbonio unidirezionaleProprietà fibra

$\sigma_{fibra} \geq 4900$ MPa	tensione caratteristica a trazione
$E_{fibra} \sim 240$ GPa	modulo elastico
$\epsilon_{fibra} \sim 2.00$ %	deformazione a rottura
$w_{fibra} = 1.80$ g/cm ³	densità

Proprietà tessuto impregnato

$\mu_{FRP} = 300$ g/m ²	grammatura
$t_{FRP} = 0.165$ mm	spessore equivalente del rinforzo
$f_{FRP,k} = 3700$ MPa	resistenza caratteristica del rinforzo
$E_{FRP} = 230$ GPa	modulo di elasticità normale del rinforzo
$\epsilon_{FRP} = 1.70$ %	deformazione a rottura del rinforzo

Il coefficiente parziale è stato assunto pari a $\gamma_f = 1.25$ per la rottura e pari a $\gamma_{fd} = 1.50$ per il distacco (Applicazione di tipo B), ai sensi delle Linee Guida LLPP del 24.07.2009.

Connettore in fibra di carbonio da sfioccareProprietà fibra

$\sigma_{fibra} \geq 4800$ MPa	tensione caratteristica a trazione
$E_{fibra} \sim 240$ GPa	modulo elastico
$\epsilon_{fibra} \sim 2.00$ %	deformazione a rottura
$w_{fibra} = 1.82$ g/cm ³	densità

Proprietà connettore impregnato

$f_{FRP,k} = 1590$ MPa	resistenza caratteristica a rottura
$E_{FRP} = 215$ GPa	modulo di elasticità normale
$\epsilon_{FRP} = 0.74$ %	deformazione a rottura del rinforzo