

Ministero della Cultura

SOPRINTENDENZA ABAP per le province di Pisa e Livorno

Lungarno Pacinotti, 46, 56126 Pisa PEC. sabap-pi@pec.cultura.gov.it



INTERVENTO

SAN GIULIANO TERME - PISA | Acquedotto mediceo
Lavori di messa in sicurezza e restauro tratto urbano ed extraurbano

FINANZIAMENTO

Finanziamento MiBACT Programmazione finanziata ai sensi dell'articolo 1, commi 9 e 10, della legge 23 dicembre 2014, n. 190 (legge di stabilità 2015) annualità 2019 e 2020 cap 8099/1 Euro 3.200.000,00

STAZIONE APPALTANTE

Soprintendenza ABAP per le province di Pisa e Livorno

LIVELLO

PROGETTO ESECUTIVO

ELABORATO

RELAZIONE DESCRITTIVA GENERALE

CODICE ELABORATO

PE-EG-01-RDG

SOPRINTENDENTE

dr. arch. VALERIO TESI

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

dr. arch. VALERIO TESI

PROGETTISTI

FRANCESCHI GERMANI architetti associati
ingegneri associati TALINI & VENTURI

COORDINATORE PER LA SICUREZZA

dr. arch. EMANUELA MOLLIKA

RILIEVO DIGITALE E FOTOGRAMMETRICO

dr. arch. FRANCESCO TIOLI

INDAGINI DIAGNOSTICHE STRUTTURALI

geom. SILVIO OLIVERIO (SurveyItalia srl)

RELAZIONE GEOLOGICA E INDAGINI GEOGNOSTICHE

dr. geologo ERALDO SANTARNECCHI

REVISIONE

DATA REVISIONE

AGGIORNAMENTI

0

MARZO 2024

EMISSIONE

Indice

Premessa	2
1. L'approccio al progetto	2
1.1. Obiettivi e finalità dell'intervento	2
2. Lo stato di fatto_Inquadramento	3
2.1. Cenni storici	3
2.2. Caratterizzazione geologica-geotecnica	4
2.3. Inquadramento sismico	4
3. Il rilievo dei materiali e delle strutture	4
3.1. Elementi costruttivi l'acquedotto	4
3.2. Materiali e tecniche costruttive impiegate	6
4. Analisi dello stato di conservazione	6
4.1. Analisi del quadro fessurativo-deformativo	7
4.2. Analisi delle forme di alterazione e delle manifestazioni di degrado dei materiali	7
4.3. Degrado, anomalie ed inefficienza di elementi architettonici dell'acquedotto	9
5. Le indagini ed analisi conoscitive	9
5.1. Le operazioni conoscitive	9
5.2. Metodologie e programma delle indagini diagnostiche eseguite	10
6. Il Progetto	12
6.1. Indirizzi progettuali e tipologie degli interventi	12
6.2. I disegni esecutivi	13
6.3. Descrizione generale delle soluzioni progettuali selezionate	14
6.3.1. Indicazioni degli interventi di restauro e conservazione delle superfici	15
6.3.2. Indicazioni degli interventi di restauro delle strutture	16
7. Definizione dell'importo dei lavori	18
7.1. Modalità di preventivazione dell'importo dei lavori	18

Relazione Descrittiva Generale

Premessa

Quanto di seguito esplicito si pone in continuità con ciò che è stato elaborato nella *Relazione Descrittiva Generale* del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica [PFTE_R-DG_EL001] a firma degli scriventi, fatta eccezione per alcuni aspetti non prevedibili nella fase progettuale precedente. Preme mettere in luce che il progetto esecutivo, in riferimento alle indicazioni dei precedenti RUP, dr. arch. Maria Grazia Tampieri e dr. arch. Esmeralda Valente, si è concentrato esclusivamente sul tratto 'urbano' dell'acquedotto, ossia quello ricadente nel comune di Pisa (archi nn. 1-163).

Ragioni di natura economica non hanno permesso di eseguire il rilievo digitale morfometrico dell'intero tratto cittadino, tale contingenza ha implicato l'approfondimento conoscitivo dello stato di conservazione del manufatto mediante l'analisi per campioni. I tre tratti rilevati sono stati identificati come porzioni di acquedotto rappresentativi dell'insieme e significativi per se stessi. L'analisi per campione è stata ulteriormente incentivata dall'architettura stessa che per tipologia altro non è che il risultato della 'ripetizione costante' di un elemento pressoché modulare.

Sulle tre porzioni-campione individuate (via De Amicis archi nn. 6-9 e archi nn. 19-22, via Parini archi nn. 138-149) si sono concentrate tutte le fasi diagnostiche conoscitive: rilievo digitale morfometrico e cromatico, indagini geologiche, indagini strutturali sulle murature e prelievi di microcampioni di materiali (questi ultimi due tipi di analisi hanno coinvolto anche archi al di fuori dei tre tratti-campione).

A seguito di quanto emerso sia dalla mappatura delle patologie di degrado eseguita sui tratti campione sia del rilievo/analisi del quadro fessurativo eseguito su tutto il tratto cittadino (archi nn. 1-163) è stato possibile costruire un sistema informativo valido per indicare con chiarezza e fedeltà di dettagli la localizzazione, l'estensione e la forma tecnica degli interventi.

1. L'approccio al progetto

1.1. Obiettivi e finalità dell'intervento

Il progetto, che prevede la conservazione del manufatto nella sua integrità spaziale e strutturale, deve essere inquadrato nel piano generale di messa in sicurezza di tutto il tracciato dell'acquedotto mediceo e, considerata la complessità del manufatto nonché le specifiche esigenze di messa in sicurezza, deve essere interpretato come intervento imprescindibile per la salvaguardia della fabbrica. La cultura della conservazione e la cultura del progetto di restauro operano a partire dalla conoscenza critica pluridisciplinare profonda e continua, diretta ed indiretta dell'esistente. In questa direzione le analisi dirette sul manufatto, supportate da indagini

indirette (quali ad esempio la ricerca storica-archivistica) o da dati tecnici dedotti da specifiche analisi (geologiche, geotecniche, soniche ecc.), hanno rappresentato l'asse portante dello sviluppo del processo conoscitivo. Le analisi sono state integrate a loro volta dall'attenta lettura:

- delle consistenze e degli apparecchi murari;
- degli elementi architettonici strutturali;
- dalla conoscenza dei materiali e delle tecniche costruttive;
- dalle modifiche apportate dalla stratigrafia costruttiva.

La fase diagnostica conoscitiva ha permesso di poter comprendere meglio le problematiche e la complessità del manufatto al fine di avanzare proposte di intervento congrue e compatibili con il manufatto e sostenibili per il contesto in cui è inserito. Un'approfondita comprensione del monumento può garantire, infatti, una corretta diagnosi dei fenomeni di degrado. Partendo dal presupposto che *ogni arbitraria modifica del patrimonio storico può costituire alterazione di una specifica memoria storica*¹ i principi che hanno guidato le scelte progettuali sono stati: il *minimo intervento*, la potenziale reversibilità o meglio *removibilità*¹, la *distinguibilità* al fine di conservare il manufatto nella sua integrità spaziale e strutturale. Coerentemente sono stati selezionati tecniche e materiali compatibili (chimicamente e fisicamente) con la qualità e la natura delle antiche strutture.

Seguendo i criteri appena espressi possiamo affermare che l'obiettivo principale ricercato nel progetto di consolidamento è stato quello di *neutralizzare* le forme di vulnerabilità e di indebolimento introdotte dai processi di evoluzione della fabbrica. Dato questo che non si è tradotto nella automatica cancellazione delle tracce e degli elementi di trasformazione, ma nell'introduzione mirata di interventi e 'accorgimenti' articolati e progettati in rapporto sia alla valutazione delle effettive forme di vulnerabilità prodotte dalle discontinuità, sia al complesso di condizioni al contorno, di vincoli operativi e di opportunità conservative. L'approccio che ha guidato il gruppo di progettazione si è basato sulla convinzione che un *progetto sistematico di restauro* che interessi le strutture debba operare su due piani distinti: da un lato, la riconduzione del manufatto ad una relativa continuità ed efficienza costruttiva, risarcendo e riparando gli effetti di degrado, dissesto, manomissioni e aggiunte; dall'altro il 'miglioramento sismico' propriamente detto, ossia l'introduzione mirata di accorgimenti ed elementi resistenti a contrasto delle vulnerabilità e dei meccanismi di danno propri della costruzione. Il raggiungimento di una sufficiente continuità ed efficienza costruttiva (primo livello di intervento) risulta, ovviamente, una pre-condizione necessaria, anche se non sufficiente, dell'opera di 'miglioramento' (secondo livello di intervento)².

2. Lo stato di fatto_Inquadramento

2.1. Cenni storici

Per i risultati dell'indagine storico-archivistica ossia per la cronistoria ragionata, l'anamnesi e la bibliografia essenziale di riferimento si rimanda a quanto indicato nella 'Relazione delle Fasi Storiche Evolutive della fabbric'a [PE-RS-02-RFS; PE-A-12-DSI].

¹ Preferiamo impiegare il termine '*removibilità*' in luogo del più diffuso '*reversibilità*' visto che quest'ultimo assume nel campo del restauro un'accezione prossima all'inadeguatezza, con un carattere più teorico che di reale messa in opera.

² Crediamo che sia utile mettere a fuoco separatamente e non confondere tra loro i due livelli, anche se, nella pratica spesso alcune operazioni risultano funzionali a soddisfare entrambi gli obiettivi.

2.2. Caratterizzazione geologica-geotecnica

Le indagini geognostiche condotte sul sito in esame (n. 1 prova penetrometrica statica CPT eseguita nel giardino privato lungo via De Amicis spinta sino a -20,0 m di profondità, e n. 1 prova penetrometrica statica con piezocono CPTU eseguita lungo via Giuseppe Parini spinta sino a -30,0 m di profondità) hanno rilevato la presenza di terreni coesivi prevalentemente plastici caratterizzati da scarse proprietà geotecniche sino alle profondità indagate, con alternati esigui livelli sabbiosi. Da una stima della capacità portante dei terreni emerge che i bulbi delle tensioni si esauriscono a circa -6,7 m di profondità in via De Amicis, mentre a circa -6,3 m di profondità in via Parini. Per i risultati dell'indagini geognostiche e per la relazione geologica si rimanda a quanto descritto nello specifico elaborato a firma del dr. Eraldo Santarnecchi [PE-RS-06-GLG].

2.3. Inquadramento sismico

Al fine di individuare la categoria di suolo e di conseguenza del parametro Vs30 è stata condotta (lungo il tratto di acquedotto tra via Parini e via Averani) dal dr. Eraldo Santarnecchi, un'indagine sismica con tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) che ha individuato un valore di Vs30 pari a 169 m/s al quale corrisponde una categoria di suolo sismico di tipo D così come indicato nella tab. 3.2.11 delle NTC 2018. Per i risultati dell'inquadramento sismico si rimanda a quanto descritto nello specifico elaborato a firma del dr. Eraldo Santarnecchi [PE-RS-06-GLG].

3. Il rilievo dei materiali e delle strutture

3.1. Elementi costruttivi l'acquedotto

L'acquedotto mediceo si configura come un'infrastruttura che si sviluppa sul territorio per una lunghezza di circa 6,2 km, in origine caratterizza dalla presenza di 954 archi, di cui 81 sono andati persi nel corso degli anni a seguito di varie vicissitudini. Il tratto dell'acquedotto che insiste all'interno dei confini della città di Pisa, inizia con l'arco n. 163 sito in località 'la Fontina' ed arriva all'arco n. 1, localizzato in prossimità della porta di Santa Marta in piazza delle Gondole. Di questi 163 archi ne restano attualmente 156.

Il tratto cittadino oggetto del progetto esecutivo si compone dei seguenti elementi architettonici:

- pile (piedritti)
- arcate
- rinfianchi
- canaletta
- speroni/contrafforti

Le **pile** (ovvero i piedritti), nel tratto cittadino risultano essere: dall'arco n. 1 fino all'arco n. 51 prevalentemente interrate o fuori terra solo per un'altezza massima di circa 50 cm (tratto archi nn. 1-29), in elevato si manifestano dall'arco n. 58 fino all'arco n. 163. Le pile visibili si presentano di norma massive con una geometria ricorrente e con dimensioni più o meno costanti: 183 cm di larghezza per una profondità media di circa 120 cm e per un'altezza massima di circa 200 cm.

Le **arcate** risultano essere per la maggior parte a tutto sesto ad eccezione di alcuni casi in cui si presentano ribassate (archi n. 2, n. 3, n. 49, n. 50, n. 52), ellittiche e strombate³ (archi nn. 28-30) o con una luce diversa come gli archi n. 51 (passaggio fosso del Mulino), n. 52, n. 53. Le arcate sono costituite generalmente da una ghiera di mattoni pieni a tre teste ad eccezione degli archi n. 49 e n. 50 che hanno una ghiera a due teste e l'arco n.29 che ha porzioni di ghiera a quattro teste rilevabili nello stacco della pila fino alle reni. A causa di urti riconducibili al passaggio 'forzato' di automezzi pesanti, negli archi n. 102, n. 103, n. 114, n. 115, n. 148, n. 161, n. 162, n.163 siti in prossimità di attuali o dismessi attraversamenti stradali, è possibile rilevare un danneggiamento della sezione muraria a causa della mancanza, in alcune porzioni, anche sostanziale, di materiale fittile.

Ogni dieci archi, in prossimità della chiave, è posta una targa in marmo bianco dove è riportata, in ordine decrescente da Asciano a Pisa, la numerazione (con la cifra delle unità scritta in piccolo)⁴.

I **rinfianchi** sono per la quasi totalità caratterizzati da una muratura mista realizzata con bozze e/o blocchi (di dimensione, forma e natura varia anche molto differente tra loro) e ricorsi singoli in laterizio (*opus vittatum mixtum*) utilizzati per regolarizzare i piani di posa orizzontali, formando ripianamenti che interessano tutto lo spessore della muratura ('cinture'). Localmente è possibile riscontrare la presenza di buche pontae, non passanti, impiegate durante la costruzione dell'opera. Tali elementi risultano talvolta chiusi con mattoni. Fanno eccezione gli archi nn.49-53 che sono caratterizzati da rinfianchi in laterizio.

La **canaletta**, che corre in sommità della struttura, risulta essere realizzata da elementi sovrapposti in cotto di forma semi-ellittica. In origine aperta, la canaletta è stata, in epoche successive, chiusa con elementi in laterizio o con lastre di pietra⁵ al fine di proteggere l'acqua corrente dalle polveri, dagli agenti 'inquinanti' e dal riscaldamento indotto dai raggi solari. Gli elementi in cotto che costituiscono la canaletta sono annegati in un letto di malta (realizzato allo scopo di assicurare l'assestamento della cadente piezometrica), il tutto è alloggiato o all'interno della muratura mista sommitale o entro una sezione in mattoni pieni probabilmente risalente ad integrazioni postume indotte da dissesti⁶. In alcuni tratti questa muratura d'attico è stata oggetto di rivestimento con un intonaco la cui superficie, presumibilmente spianata e lisciata con strumenti di legno risulta, alla vista, piuttosto compatta e levigata.

A seguito della demolizione dell'arco n. 56 e n. 57, al fine di consentire il passaggio stradale della via Centofanti, la sezione della canaletta risulta ben visibile nell'arco n. 58.

In alcune porzioni della muratura perimetrale della canaletta, in posizione mediana tra due archi contigui, sono presenti delle ricuciture in laterizio realizzate a seguito della messa in opera dell'elemento cilindrico 'doccione' in cotto inserito, con molta probabilità in una fase edificatoria successiva, come elemento di fuoriuscita dell'acqua in caso di troppo pieno. Tali elementi è possibile rilevarli, ad esempio, negli archi nn. 66-67, nn. 80-81, nn. 110-11, nn. 127-128.

I **contrafforti** o 'speroni', realizzati in muratura con profilo a scarpa, risultano ricorrenti nel tratto cittadino sin dall'epoca della sua prima fase edificatoria anche se non si escludono alcuni puntuali inserimenti postumi. Gli speroni in *opus vittatum mixtum* nel tratto 'urbano' sono stati inseriti su entrambi i lati della pila (ogni undici arcate) allo scopo di attenuare le spinte trasversali

³ Tale 'anomalia', congenita alla costruzione, è presumibile che possa essere dovuta alla contingenza di adattare il passo ad impedimenti come ad esempio al percorso di canali fluviali che erano presenti all'epoca della costruzione.

⁴ Tale numerazione aveva presumibilmente la funzione di agevolare le opere di manutenzione.

⁵ Oggi le lastre in pietra si presentano degradate, dislocate dalla posizione originale e localmente risultano mancanti.

⁶ Queste sezioni di muratura in laterizio risultano piuttosto evidenti sia per i differenti mattoni impiegati, sia per uno stato di conservazione diverso rispetto a quello rilevabile nelle altre parti sommitali dell'acquedotto.

e contrastare i fenomeni di rotazione fuori piano. La presenza di tali elementi si è resa necessaria in virtù delle problematiche di dissesto che da subito hanno interessato le parti della struttura dell'acquedotto costruite nelle precedenti fasi edificatorie⁷.

Per la schedatura dettagliata degli elementi costruttivi e dei tipi di muratura impiegati si rimanda a quanto indicato nell'elaborato 'Analisi degli Elementi Costruttivi' [PE-RS-03-AEC].

3.2. Materiali e tecniche costruttive impiegate

Nella costruzione dell'acquedotto mediceo sono stati impiegati materiali disomogenei, sia lapidei che fittili, in ogni caso cavati o prodotti in area locale.

A differenza della porzione che va oltre i confini cittadini fino ad arrivare ad Asciano, il tratto di acquedotto compreso tra l'arco n.1 e l'arco n.163 presenta caratteristiche ricorrenti sia per quanto concerne l'uso dei materiali che per quanto riguarda le tecniche costruttive impiegate.

Fondamentalmente gli elementi lapidei utilizzati presentano un medio/basso livello di lavorazione ossia il grado di lavorazione si è fermato a quello della sommaria sgrossatura/sbozzatura, i blocchi lapidei, in maggioranza di natura calcarea, appaiono spaccati e sommariamente regolarizzati nei due lati di appoggio e nella faccia a vista. Solo occasionalmente è riscontrabile la presenza di bugne o di veri e propri conci (presumibilmente elementi di spoglio).

Per quanto concerne il materiale fittile, ossia il laterizio, è possibile riscontrare delle dimensioni ricorrenti nei diversi tratti risalenti alla stessa fase edificatoria ad eccezione delle parti oggetto di ripristino (postume) caratterizzate da cortine in laterizio di dimensioni ed apparecchiature diverse.

L'esame della fabbrica dal punto di vista dei materiali impiegati mette in luce la presenza di una ampia gamma di colori, dato di fatto riconducibile ad un uso miscelato e variegato di elementi lapidei in maggioranza di natura calcarea (calcari selciferi-diasprigni, grezzoni, brecce di Agnano, 'marmo' di San Giuliano) e in minoranza di natura quarzítica (quarziti del Monte Serra), sporadicamente è possibile, altresì, registrare la presenza di pietra arenaria (macigno) e di selce (noduli di selce di modeste dimensioni, totalmente non lavorati, compaiono sporadicamente nell'apparecchio murario, sovente usati come zeppe). Per quanto concerne i litotipi calcarei si presentano di aspetto molto differente (cavernosi, compatti, brecciati) e di colore variabile dai toni del bianco sporco a quelli del grigio ma non sono assenti anche altre tonalità come il beige, il nocciola, il rosato⁸.

4. Analisi dello stato di conservazione

Per un quadro conoscitivo completo ed approfondito relativo allo stato di conservazione dell'acquedotto si rimanda agli specifici elaborati redatti dagli scriventi o da altri professionisti comunque coordinati dagli scriventi⁹ mentre, di seguito, si evidenziano gli aspetti di maggiore rilevanza che il progetto ha dovuto affrontare.

⁷ Il principio su cui si basa questo presidio di rinforzo consiste nell'opporre una forza verticale quale è il peso ad una forza orizzontale al fine di garantire la sicurezza della struttura anche mediante un incremento di sezione resistente.

⁸ Per quanto concerne l'analisi puntuale dei materiali da costruzione si rimanda a quanto indicato nell'elaborato 'Analisi Materiali da Costruzione' [PFTE A-MC EL005] presente all'interno del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica.

⁹ Si veda quanto indicato nel paragrafo § 5.1 'Le operazioni conoscitive' presente all'interno di questo elaborato.

4.1. Analisi del quadro fessurativo-deformativo

Per ciò che concerne l'aspetto più propriamente strutturale dell'acquedotto mediceo si sono registrati i seguenti fenomeni di dissesto:

- gravi fenomeni fessurativi passanti o profondi (sporadicamente 'aperti'¹⁰) con cigli complanari o non complanari rilevati in corrispondenza delle ghiera degli archi (sia alle reni che in chiave) con locali scorrimenti relativi di porzioni di ghiera in corrispondenza del piano dei giunti di malta;
- gravi fenomeni fessurativi passanti o profondi (sporadicamente 'aperti') con andamento orizzontale o sub orizzontale con cigli complanari e non complanari localizzati sul rinfiango (di norma estesi su entrambi gli archi confinanti) che talvolta si estendono anche sulle ghiera degli archi (in prossimità o sulle reni) indotti da cedimenti di fondazione;
- gravi fenomeni fessurativi passanti o profondi (sporadicamente 'aperti') con andamento orizzontale o suborizzontale od obliquo con cigli complanari e non complanari localizzati sulle pile indotti da cedimenti di fondazione e/o da rotazioni fuori dal piano;
- fenomeni fessurativi profondi con andamento orizzontale o sub orizzontale con cigli complanari e non complanari localizzati sul riempimento sovrastante l'arco in corrispondenza della canaletta¹¹ che se sollecitati (ad esempio da azione sismica) potrebbero comportare il rovesciamento della cresta ovvero implicare fenomeni di ribaltamento (rotazioni e/o traslazioni verticali);
- fenomeni fessurativi verticali o subverticali passanti o profondi sul rinfiango o sul riempimento sovrastante l'arco con cigli complanari o non complanari;
- gravi fenomeni di perdita di verticalità della struttura (fuoriuscita del piano attorno alla base della pila) indotta da cedimenti di fondazione;
- frequenti distacchi passanti o profondi della ghiera dell'arco dal rinfiango o dal riempimento sovrastante;
- distacco e perdita di elementi, componenti la ghiera, da ricondurre, fondamentalmente alle lesioni che interessano la struttura;
- fenomeni di dislocamento o caduta di elementi che si rilevano lungo entrambi i fronti della struttura, dovuti ai dissesti di cui sopra ed all'azione meccanica esercitata dalle radici della vegetazione superiore che prolifera nella canaletta sommitale e nelle cavità presenti nella muratura.

Per la schedatura dettagliata dei singoli fenomeni fessurativi e deformativi si rimanda a quanto indicato nell'elaborato 'Analisi Quadro Fessurativo' **[PE-RS-04-AQF]**, mentre per quanto concerne la localizzazione puntuale si rimanda agli elaborati grafici inerenti il 'Rilievo del Quadro Fessurativo' [da **PE-TG-02-QFAC** a **PE-TG-17a-QFAC**].

4.2. Analisi delle forme di alterazione e delle manifestazioni di degrado dei materiali

L'analisi dello stato di conservazione del tratto urbano dell'acquedotto, estesa alle macro categorie edilizie, ha rilevato una sostanziale integrità dal punto di vista della degradazione fisica dei materiali (perdita di materia e/o della morfologia del manufatto), solo localmente, infatti, il decadimento delle superfici murarie esterne si è rilevato in uno stato più avanzato e relativamente più esteso. In questi ultimi casi, le superfici risultano interessate da fenomeni

¹⁰ Ovvero con ventre pronunciato.

¹¹ Questo specifico plesso fessurativo potrebbe in realtà essere non una soluzione di continuità indotta da una carenza statica ma bensì una discontinuità costruttiva indotta da un non idoneo ammorsamento tra il riempimento sopra la ghiera e la fascia sommitale (contenente la canaletta) più volte, in passato, oggetto di intervento/manutenzione fino alla vera e propria ricostruzione.

corrosivi ed erosivi la cui origine può essere attribuita ai fisiologici processi di alterazione chimico-fisica innescati dal contatto con l'atmosfera. Va precisato, in ogni caso, che per quanto concerne la degradazione delle pietre (fondamentalmente calcare selcifero locale) bisogna considerare che essa avviene secondo andamenti simili a quelli delle rocce in natura e deve pertanto essere considerata come un processo evolutivo ineluttabile. Nei contesti urbanizzati come quello dell'acquedotto, ai processi di alterazione di origine 'naturale', generalmente, si associano quelli indotti dalle attività umane; tuttavia nel caso specifico, fatta eccezione per la presenza di numerosi elementi metallici incongrui ed incompatibili riconducibili ad un'attività antropica, l'inquinamento atmosferico sembra aver contribuito in minima parte al degrado. Sulle superfici esterne non sono stati, infatti, riscontrati depositi carboniosi significativi.

La classificazione dei fenomeni di alterazione e degrado dei materiali, nonché dei dissesti e del quadro fessurativo delle strutture rilevati tramite analisi obiettiva diretta della fabbrica, è stata eseguita partendo sia dal lessico UNI-NorMaL (UNI-NorMaL 11182:2006 *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali– Descrizione delle forme di alterazione, Termini e definizioni*, UNI Milano 2006) sia dal glossario illustrato delle forme di alterazione delle pietre edito dall'ISCS dell'ICOMOS (ICOMOS-ISCS *Illustrated glossary on stone deterioration patterns, Monuments and sites* XV). Al fine di evidenziare meglio la fenomenologia di degrado/dissesto è stato, talvolta, necessario integrare i suddetti documenti con altri lemmi più pertinenti¹².

Si tiene a precisare che in questa relazione con il termine 'materiale lapideo' dovranno sempre essere intesi (in accordo con quanto enunciato nelle raccomandazioni UNI-NorMaL) i materiali litici (rocce) ed i materiali litoidi (malte, stucchi e prodotti ceramici). Le superfici del paramento murario risultano soggette fondamentalmente a manifestazioni di alterazione e degrado che possono, indipendentemente dalle cause che li hanno prodotti, essere suddivise sinteticamente in quattro macro 'famiglie' a seconda dell'azione/effetto che sono in grado di esercitare sui materiali. Premesso ciò sono state individuate le seguenti classi (vd. tabella 4.1):

- apporto di materia senza trasformazione o con trasformazioni limitate;
- apporto di materia con trasformazione ovvero con formazione di 'prodotti' secondari;
- perdita di materiale e/o della morfologia;
- né apporto né perdita di materiale.

Tabella 4.1

FENOMENI DI DEGRADO: LITICI E LITOIDI			
con apporto di materia senza trasformazione	con apporto di materia con trasformazione	con perdita di materia	né apporto né perdita di materia
Deposito superficiale	Incrostazione	Disgregazione	Dislocamento
Concrezione	Colaticcio/percolazione	Erosione/Consumazione	Distacco/Allentamento
Macchia	Colonizzazione biologica	Lacuna	Elementi metallici incongrui
	Vegetazione infestante		Fessure e Fratture
	Stuccature incompatibili		

¹² Cfr. FRANCESCHI S., GERMANI L., *Il degrado dei materiali nell'edilizia. Cause e valutazioni delle patologie*, Dei, Roma 2020.

A livello di intervento le differenti manifestazioni di degrado possono essere ulteriormente distinte in due macro 'classi'. La prima 'classe' riguarda le patologie di degrado che, nel caso in oggetto, pur se estese, non richiedono interventi particolarmente significativi (sugli effetti della patologia) visto che non vanno ad inficiare in modo determinante lo stato di conservazione a patto, ovviamente di intervenire sulle cause perturbatrici innescanti tali problematiche. In particolare questo gruppo comprende, fondamentalmente, le manifestazioni dei fenomeni caratterizzati da un apporto di materia, senza trasformazione o con trasformazioni limitate. La seconda 'classe' riguarda, invece, fenomeni degenerativi che, sebbene circoscritti in aree limitate, necessitano un intervento più puntuale e articolato anche dei singoli effetti oltre naturalmente che sulle cause perturbatrici (come ad esempio la ricostituzione della continuità delle malte interstiziali o la sigillatura di fessure) visto che possono compromettere l'insieme delle prestazioni del materiale. In questo secondo gruppo rientrano tutti quei fenomeni di degrado che comportano la perdita di materia e/o della morfologia del manufatto, la deformazione degli elementi o l'apporto di materia con trasformazioni rilevanti.

Per la schedatura dettagliata delle manifestazioni di alterazione e degrado si rimanda a quanto indicato nell'elaborato 'Analisi delle Manifestazioni di Degrado' [PE-RS-05-AMD], mentre per quanto concerne la localizzazione puntuale si rimanda agli elaborati grafici inerenti l'Analisi dei Materiali, dei fenomeni di Degrado e Interventi di conservazione [da PE-TG-18-MDI a PE-TG-32-MDI].

4.3. Degrado, anomalie ed inefficienza di elementi architettonici dell'acquedotto

La parte sommitale dell'acquedotto è caratterizzata dalla presenza della canaletta di scorrimento delle acque realizzata con pezzi speciali in cotto a forma di 'U'. L'elemento architettonico canaletta palesa, in più punti, attraverso la presenza di copiose incrostazioni calcaree ed aree bagnate, anche dopo giorni dall'ultima precipitazione atmosferica, la perdita di tenuta all'acqua compromettendo, di fatto, un qualsivoglia intervento di conservazione delle superfici.

Una seconda problematica, in parte legata alla precedente, riguarda lo smaltimento delle acque piovane che risultano non adeguatamente canalizzate. La relativa lieve pendenza della canaletta, associata ai puntuali dissesti indotti da rotazione fuori dal piano di alcuni tratti di acquedotto, rende stagnante l'acqua meteorica. Tale fenomeno a sua volta accelera le problematiche indotte dal percolamento/infiltrazione delle acque libere nelle murature sottostanti. Attualmente le acque piovane vengono smaltite solo attraverso sporadici doccioni in cotto sporgenti dalle superfici verticali: la limitata sporgenza (talvolta risultante quasi a raso) dei doccioni dalle superfici ha innescato nel tempo e sta innescando tutt'oggi, dei copiosi colaticci sulle murature.

5. Le indagini ed analisi conoscitive

5.1. Le operazioni conoscitive

La conoscenza e la comprensione profonda e dettagliata del manufatto si è rivelata base imprescindibile per progettare un intervento di tutela consapevole e sostenibile. L'insieme delle osservazioni, delle indagini, delle ispezioni e degli accertamenti diagnostici uniti all'anamnesi dell'acquedotto mediceo, hanno consentito di definire un approfondito quadro diagnostico.

Le operazioni conoscitive sull'acquedotto hanno fatto riferimento a differenti tipologie di indagini:

- analisi dei documenti presenti nell'Archivio Generale della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio delle province di Pisa e Livorno;
- lettura, analisi e confronto di documenti, studi e ricerche di natura bibliografica editi e non editi¹³;
- analisi e confronto di fonti di natura iconografica edite e non edite¹⁴;
- analisi e confronto di documenti video;
- analisi e confronto dei documenti presenti nell'Archivio di Stato di Pisa e nell'Archivio Storico del comune di Pisa;
- deduzioni personali indotte da fonti orali raccolte attraverso interviste realizzate in svariate occasioni;
- deduzioni personali acquisite dai progettisti attraverso sopralluoghi, ispezioni, rilievi diretti *in situ* e indagini diagnostiche di varia natura eseguite nell'intervallo di tempo tra giugno 2020 e gennaio 2024.

Per i risultati dell'indagine storico-archivistica (cronistoria ragionata, anamnesi e bibliografia essenziale di riferimento) si rimanda a quanto indicato nella 'Relazione delle Fasi Storiche Evolutive della fabbrica' **[PE-RS-02-RFS]** redatta degli scriventi; per i risultati delle indagini in sito sulle strutture murarie dell'acquedotto si rimanda all'elaborato intitolato 'Indagini Diagnostiche Conoscitive' **[PE-A-13-IDC]** redatto dal geom. Silvio Oliverio (SurveyItalia srl) all'interno del quale è presente la relazione redatta dal dr. Marcello Spampinato inerente le indagini di laboratorio finalizzate alla caratterizzazione chimico-fisico-petrografica dei materiali costitutivi; per le indagini geognostiche e per i saggi esplorativi sulle fondazioni si rimanda all'elaborato intitolato 'Relazione Geologica' **[PE-RS-06-GLG]** redatto dal dr. Eraldo Santarnecchi (studio Lithos) infine per la rielaborazione ed interpretazione dei risultati delle indagini diagnostiche si rimanda al documento intitolato 'Relazione interpretativa dei dati desunti dalle Indagini Diagnostiche' **[PDE-RS-09-RID]** redatto dagli scriventi.

5.2. Metodologie e programma delle indagini diagnostiche eseguite

Le indagini sul terreno condotte dal dr. Eraldo Santarnecchi (studio Lithos) sono state articolate secondo il programma di seguito indicato:

- **n. 2 saggi esplorativi** finalizzati a valutare la consistenza e la tipologia delle strutture fondali. Il primo saggio spinto fino ad una profondità di circa 220 cm è stato eseguito in aderenza al lato esterno della pila che sostiene gli archi nn. 4-5 sita nel giardino privato localizzato in via De Amicis; il secondo saggio spinto fino ad una superficie di 150 cm è stato svolto in aderenza al lato interno della pila che sostiene gli archi nn. 143-144 sita tra via Parini e via Averani;
- **n. 1 prova penetrometrica statica meccanica** CPT spinta sino alla profondità di -20,0 m eseguita nel giardino privato sito in via De Amicis in prossimità dell'arco n.6;
- **n. 1 prova penetrometrica statica** con piezocono CPTU spinta sino alla profondità di -30,0 m eseguita lungo via Giuseppe Parini in prossimità dell'arco nn. 143-144;
- **n. 1 esecuzione profilo sismico a rifrazione con metodologia MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves), attraverso l'analisi spettrale delle onde sismiche superficiali (onde Raylight) al fine di determinare il modello sismico del sottosuolo e categoria sismica di suolo e quindi la velocità media delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità. L'indagine è stata eseguita sul tratto di acquedotto lungo via Parini.

¹³ Sono stati analizzati anche studi non ancora del tutto editi come le tesi di laurea depositate presso i rispettivi Dipartimenti di appartenenza.

¹⁴ Sono state visionate anche immagini fotografiche depositate in archivi personali.

- Le indagini sulle murature condotte dal geom. Silvio Oliverio (SurveyItalia srl) sono state articolate secondo un programma di indagine diviso in tre settori, due soggetti a quadro fessurativo/deformativo severo (tratto compreso tra gli archi nn. 3-5 e tra gli archi nn. 141-146), ed uno con quadro fessurativo/deformativo pressoché assente (tratto compreso tra gli archi nn. 70-75) nello specifico sono state seguite:
- **n.3 prove con martinetti piatti** in configurazione **singola** o **doppia** (ASTM C1196 - C1197). La prova è stata effettuata per brevi step incrementali di carico e scarico. I valori medi di E e G sono stati ricavati in corrispondenza del cambio di direzione dell'involuppo della curva, ricavata dai valori medi dei tre sensori verticali utilizzati come base di misura. L'indagine finalizzata a determinare lo stato tensionale, i moduli elastici e la forza massima o stato limite di fessurazione dell'elemento murario è stata condotta sull'imposta (lato interno) della ghiera dell'arco n. 4 e sulle pile degli archi nn. 74-75 (lato interno) e nn. 141-142 (lato esterno);
- **n.6 analisi penetrometrica** (ASTM C 803) attraverso l'impiego di sclerometro per la classificazione (UNI 998-2016) e la determinazione delle caratteristiche di deformabilità e resistenza a compressione delle malte. Per ogni stazione di prova sono state eseguite almeno tre prove mediate tra loro e per ciascuna serie di battute sono stati impressi sette colpi. L'indagine è stata condotta sulla ghiera dell'arco n. 4, sulla pila degli archi nn. 3-4 sulle pile degli archi nn. 70-71, nn. 74-75, nn. 141-142, nn. 142-143;
- **n.7 indagine sonica** (secondo UNI EN 12504-4) eseguita per trasparenza ovvero ponendo le sonde, emittente e ricevente, sulle facce contrapposte del paramento murario indagato; su ciascun paramento è stata tracciata una griglia con passo costante di 20x20 cm che è stata indagata in più punti con metodo incrociato. L'indagine si è posta il fine di verificare ed estendere il grado di conoscenza della compattezza della struttura muraria, rilevazione di cavità o irregolarità profonde. L'indagine è stata condotta sia su pile 'integre' sia su pile soggette a quadro fessurativo. Per quanto concerne il primo gruppo sono state svolte indagini sulle pile degli archi nn.4-5, nn.74-75, nn.143-144, nn.145-146; mentre per quanto concerne le pile soggette a lesioni si sono indagate quelle relative agli archi nn.3-4, nn.143-144, nn. 145-146;
- **n.6 indagine videoendoscopica** utilizzando endoscopio con telecamera e sonda flessibile diametro 8 mm ed illuminazione a led. L'indagine aveva come obiettivo quello di definire tipologia e stratigrafia della muratura (continua o a nucleo interno), individuare ed osservare eventuali cavità interne, osservare se l'elemento murario indagato risultava essere un 'tamponamento' o se si trattava di elemento strutturale, individuare ed osservare l'eventuale adiacenza di blocchi murari, evidenziare eventuali anomalie. L'indagine è stata condotta sia sulle pile 'integre' inerente gli archi nn. 4-5, nn. 74-75 e nn. 114-115; sia sfruttando i plessi fessurativi presenti sulle pile degli archi nn. 3-4, nn. 143-145, nn. 145-146. Lo spessore indagato è stato di 80 cm per tutte le indagini;
- **n.7 prelievi di campioni** di materiale (malta) al fine di eseguire la caratterizzazione petrografica ossia: analisi petrografiche al microscopio ottico polarizzatore, sulle sezioni sottili e opache, per determinare la composizione mineralogica degli impasti e le granulometrie. Le indagini di laboratorio sono state condotte dal dr. Marcello Spampanato (per conto della SurveyItalia srl) per la localizzazione dei prelievi si veda la tabella 5.1 riporta di seguito:

Tabella 5.1

N PRELIEVO	N ARCO	LOCALIZZAZIONE	TIPOLOGIA ELEMENTO
1	143-144	fondazione pila interna	malta sotto la zattera di fondazione
2	4	rinfianco esterno lato via De Amicis	intonaco

3	146-147	pila interna	malta da allettamento
4	142-143	pila esterna lato via Parini	malta da allettamento
5	113-114	pila interna lato via Parini in prossimità dell'attraversamento via Goldoni	malta nucleo interno
6	102-103	pila interna attraversamento via Carlini	malta da allettamento
7	74-74	pila esterna lato giardino don Bosco	malta da allettamento

6. Il Progetto

6.1. Indirizzi progettuali e tipologie degli interventi

La metodologia progettuale è stata la stessa per tutto il tracciato 'urbano' dell'acquedotto medico: in considerazione dell'estensione dell'area, dell'omogeneità delle fenomenologie di degrado e alterazione ovvero delle casistiche materico-patologiche si sono individuate delle tipologie di intervento riassunte e delineate in Istruzioni Tecniche Operative [ITO]. Le varie ITO riassumono le procedure di esecuzione delle lavorazioni previste e costituiscono il *corpus* della 'Relazione Tecnica Illustrativa' [PE-RS-10-RTI] nella quale ai principali degradi, difetti o guasti, sono stati associati degli interventi di conservazione, di ripristino o di consolidamento statico.

Il progetto prevede la conservazione della fabbrica nella sua integrità spaziale e strutturale e l'utilizzo di tecniche e materiali compatibili con la qualità e la natura delle antiche strutture, selezionati seguendo il criterio del *minimo intervento* e della massima *removibilità*. In buona sostanza, si interverrà solo per 'necessità comprovata' ossia sarà evitato qualunque intervento non rigorosamente indispensabile -direttamente o indirettamente- alla conservazione della fabbrica, in particolare saranno citati i lavori inerenti ad aspetti di ricostruzione del manufatto, di 'abbellimento', di imitazioni di parti interamente mancanti se non strettamente necessari ai fini della conservazione, dato che il segno del tempo è valore storico ed estetico, di straordinaria efficacia evocativa. È, infatti, necessario intervenire tenendo presente che, nella pratica, fenomeni di deterioramento e cause, risulteranno, talvolta, stabilizzati da tempo per cui è da ritenersi superfluo o addirittura inutile -se non controproducente- operare interventi radicali mentre risulterà più proficuo ed idoneo eseguire interventi parziali, così facendo si escluderanno inutili, quanto invasive, operazioni di demolizioni, ripristini o puliture aggressive che potrebbero comportare la perdita di vaste quantità di elementi di 'cultura materiale'. I materiali impiegati presenteranno, di conseguenza, caratteristiche fisico-chimiche il più possibile omogenee/compatibili a quelle dei materiali preesistenti: in particolare è stato previsto l'utilizzo di materiali lapidei o laterizi nonché leganti in tutto simili a quelli in opera, viceversa sono state bandite malte cementizie ed inserti in calcestruzzo.

Dal punto di vista operativo, è stato quindi, scelto di non seguire la strada di un 'rinnovo' generalizzato delle superfici¹⁵ ma di operare in termini di 'attenuazione'¹⁶, di 'mitigazione' dei fenomeni degenerativi in pieno rispetto della struttura preesistente, così da far risultare l'intervento quasi 'trasparente'. L'attenzione è stata traslata da una visione squisitamente tecnica -guidata dalla sola rimozione degli effetti del degrado- verso una forma di 'accettazione' della naturale trasformazione della materia capace di rivolgere 'l'attenzione' verso altri contenuti che richiedono una comprensione della fabbrica che non può essere ottenuta per mera raccolta di dati analizzati singolarmente e governati da un quadro culturale più tecnologico che umanistico. Questo approccio ha portato a considerare i 'segni' del passaggio del tempo impressi sulla 'nuda pietra' come elementi sostanziali dell'identità e della memoria collettiva. Così facendo la fabbrica viene 'valorizzata' da queste specifiche manifestazioni di 'autenticità'¹⁷ in quanto in grado di annotare e di assimilare il tempo, degradandosi senza annullarsi.

Nel consolidamento statico degli elementi strutturali, la conoscenza dell'oggetto e delle sue caratteristiche hanno influenzato le scelte progettuali e le tecniche da adottare finalizzate a garantire il prolungamento in sicurezza della vita della struttura. In buona sostanza il progetto si è basato sui criteri di necessità, di efficacia, di durabilità e dove è stato possibile di limitata invasività ed elevata removibilità, il tutto nel rispetto dell'autenticità del manufatto. Sotto l'aspetto della compatibilità conservativa, è stato, dunque, tenuto presente l'obiettivo generale di *contrastare le forme di vulnerabilità* introdotte dalle soluzioni di continuità e al tempo stesso di *conservare elementi sufficienti alla leggibilità* della traccia di trasformazione o della lesione.

Per tali ragioni, gli interventi a riguardo, sia che adottino tecniche tradizionali o innovative, coadiuvano il sistema statico del monumento, corroborandolo e non sostituendone il potere portante, ma anzi contribuendo a farlo sopravvivere il più possibile integro, intatto e in pieno esercizio.

Premesso ciò, ne consegue che il progetto sviluppato ha ricercato la conservazione della concezione strutturale della fabbrica evitando con cura la sostituzione dell'organismo edilizio statico esistente con uno nuovo, restituendo al contrario alle strutture esistenti i loro compiti e le loro caratteristiche strutturali con l'eventuale aiuto, dove si è rilevato strettamente necessario, di strutture integrative di limitata invasività ed elevata removibilità.

6.2. I disegni esecutivi

Gli elaborati progettuali sono stati sviluppati al fine di costruire un sistema informativo valido per indicare con chiarezza e fedeltà di dettagli la localizzazione, l'estensione e la forma tecnica degli interventi. Il risultato è un apparato grafico di formato idoneo per essere agevolmente usato in cantiere e corredato di puntuali rinvii alle norme capitolari. Al fine di facilitare il meccanismo di richiamo e collegamento tra i disegni esecutivi, le prescrizioni tecnico amministrative e i computi estimativi, le differenti procedure operative sono state dotate di un apposito codice alfanumerico formato da tre lettere capitali identificative la categoria d'intervento **(DSZ Disinfestazioni/**

¹⁵ Tale approccio è stato reputato non praticabile dal punto di vista culturale, in quanto avrebbe rappresentato, in qualche misura, una 'ulteriore' forma di degrado poiché le superfici avrebbero nuovamente perso la loro funzione di testimone del tempo.

¹⁶ A tale concetto fa cenno già Piero Sanpaulesi "La degradazione dei materiali è solitamente la causa prima dell'intervento di restauro. Ma si deve attentamente evitare, ed è bene ripeterlo, di rinnovare i materiali, e anzi è eccellente quel restauro che ha per scopo l'arresto o l'attenuazione delle azioni di degradazione dei materiali antichi che seppur degradati assolvono ancora la loro funzione statica e formale" (P. SANPAULESI, *Discorso sulla metodologia generale del restauro dei monumenti*, Edam, Firenze 1973, p. 36).

¹⁷ L'autenticità dell'opera "non sta nella rispondenza al concetto creativo, [...], ma nella materia che col tempo si trasforma. L'autenticità dell'architettura è il suo stare dentro il tempo, in una continua mutazione che non necessariamente significa degrado, perdita di ordine, perdita di senso" (S. DELLA TORRE, *Il progetto di una conservazione senza barriere*, in «TeMa» n.1/1998, p.19).

Disinfezioni, PLT Puliture, RMZ Rimozioni/Asportazioni, CSD Consolidamenti, INT Integrazioni/Stuccature, PTZ Protezioni) e un numero arabo progressivo.

Specifiche inerenti i disegni esecutivi

La scelta del sistema di rappresentazione è stata dettata da vari fattori quali la natura del manufatto, il suo stato di conservazione e la sua estensione. Il sistema di restituzione valutato più conveniente è stato quello del modello grafico eseguito in ambiente CAD bidimensionale, sulla base del rilievo fotogrammetrico digitale¹⁸.

Le tavole grafiche sono state elaborate cercando di rispondere a due esigenze distinte: a) organizzare le informazioni di natura analitica e diagnostica; b) organizzare le prescrizioni di ordine tecnico ed esecutivo. I risultati delle analisi e i quadri diagnostici che ne derivano sono stati ordinati sistematicamente ed esposti integralmente in differenti tavole grafiche:

- mappe tematiche ‘generali’ (in scala 1:100) di tutto il tratto cittadino contenenti le informazioni inerenti il rilievo del quadro fessurativo e l’analisi dello stato di conservazione (quest’ultimo diviso in tre macro gruppi: cattivo, medio, buono). Il contenuto grafico di partenza è stato desunto dal rilievo grafico e dall’esplorazione sistematica di tutte le superfici esaminate, incluse quelle necessariamente approssimative e provvisorie per via della distanza di osservazione;
- mappe tematiche di dettaglio (in scala 1:50) dei tre tratti-campione rilevati contenenti, attraverso la sovrapposizione di layer, le informazioni sulla caratterizzazione dei materiali costruttivi e sulla natura dei fenomeni di alterazione e degrado. Il supporto grafico delle tavole risulta quindi costituito dal rilievo e da una serie di ‘campi’ delimitanti aree con specifico oggetto informativo ossia aree omogenee colorate per i materiali e aree ‘retinate’ in b/n per i fenomeni di degradazione;
- le prescrizioni progettuali, riguardanti l’intero tratto cittadino, sono state riportate su una serie di tavole grafiche (in scala 1:100) aventi le medesime caratteristiche delle precedenti. La legenda di queste tavole è stata composta descrivendo in modo sintetico il tipo di intervento identificato da un codice alfanumerico. Attraverso tale codice (che rappresenta il collegamento puntuale con tutti gli elaborati tecnico-economici che compongono il progetto) si creerà un collegamento immediato tra le prescrizioni affidate al disegno e quelle del Capitolato Speciale di Appalto così che l’intero ciclo delle ‘istruzioni esecutive’ sia organicamente espresso.

L’apparato grafico è stato completato da una seconda serie di tavole grafiche di dettaglio contenenti le istruzioni tecnico esecutive degli interventi di tipo architettonico-strutturale.

6.3. Descrizione generale delle soluzioni progettuali selezionate

Fondamentalmente il progetto prevede due insiemi di interventi uno a carattere più esteso inerente il restauro delle superfici, l’altro a carattere più puntuale circoscritto ai fenomeni di dissesto statico.

Gli interventi sui differenti materiali riscontrati¹⁹ (laterizi, malte, calcari selciferi) saranno volti a conservare il carattere e le finiture preesistenti attraverso le consuete e collaudate fasi di **disinfestazione, pulitura, consolidamento, integrazione e protezione** mediante tecniche proprie del restauro. L’intervento sulle superfici, in buona sostanza, si articolerà secondo le seguenti fasi esecutive:

¹⁸ Il rilievo tridimensionale digitale integrato è stato elaborato dall’architetto Francesco Tioli ed è stato circoscritto esclusivamente a tre tratti campione del segmento cittadino: archi nn. 6-9, archi nn. 19-22, archi nn.138-150.

¹⁹ Per maggior chiarezza su tale argomento si rimanda a quanto indicato nel paragrafo § 2.3 all’interno della presente relazione e all’elaborato PFTE_A-MC_EL005 presente all’interno del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica.

- operazioni preliminari di pulitura **[PLT]** ossia rimozione dei depositi superficiali incoerenti e/o parzialmente aderenti. Contemporaneamente, ossia in presenza di attacco biologico, si procederà ad eseguire le operazioni di disinfestazione **[DSZ]** e di eliminazione della vegetazione vascolare infestante superiore;
- operazioni di rimozione **[RMZ]** di stuccature ed elementi impropri e incompatibili;
- operazioni di pulitura **[PLT]** vera e propria ossia rimozione di depositi superficiali aderenti e coerenti, come concrezioni, incrostazioni, macchie ecc.;
- operazioni di consolidamento sia delle superfici **[CSD]** sia delle strutture **[CSDS]**;
- operazioni di integrazione, aggiunte e stuccatura **[INT]**;
- operazioni di protezione finale **[PTZ]**.

6.3.1. Indicazioni degli interventi di restauro e conservazione delle superfici²⁰

Tenuto conto della vastità del manufatto, che si estende per circa 1,2 km, in accordo con il RUP (dr. arch. Valerio Tesi) l'intervento di restauro del paramento murario è stato raggruppato e suddiviso in tre macro gruppi in relazione allo stato di conservazione emerso in fase diagnostica. Nel **PRIMO GRUPPO** ricadono le superfici degli archi in **cattivo stato di conservazione** che necessitano di interventi sia di carattere esteso (che riguardano la totalità delle superfici oggetto di intervento o una percentuale delle stesse superiore al 75÷80%) sia 'localizzato' riferito cioè a fenomeni di alterazione o degrado puntuali che, a prescindere dalla loro estensione (talvolta anche vasta) richiedono operazioni più specifiche.

Nel **SECONDO GRUPPO** ricadono le superfici degli archi in **condizioni conservative medie/accettabili** dove gli interventi sia estesi che localizzati risulteranno in percentuale minore.

Nel **TERZO GRUPPO** ricadono le superfici degli archi in **buono stato di conservazione** che comunque necessitano di alcuni interventi sia puntuali che più estesi.

In estrema sintesi, all'interno dei tre gruppi sono previsti i seguenti interventi:

- **rimozione dei depositi superficiali coerenti più o meno adesi e spessi, concrezioni, incrostazioni, strati carbonatati e macchie solubili in genere;**
- **rimozione infestanti vegetali e piante vascolari superiori;**
- **attenuazione del biodeterioramento e dell'azione disgregatrice della vegetazione infestante;**
- **riparazioni localizzate e risanamento di porzioni soggette a lesioni attraverso la sarcitura delle stesse con ricariche di malta e/o, dove strettamente necessario, con opere di scuci e cucì;**
- **integrazioni dell'apparecchio murario indirizzate a garantire la stabilità della costruzione;**
- **ripristino (rabboccatura) dei giunti di malta finalizzato al consolidamento della muratura e al rallentamento dei fenomeni di degrado indotti dal contatto con gli agenti atmosferici (pioggia, vento, particolato atmosferico);**
- **integrazione e/o parziale ripristino della sezione sommitale della fabbrica (cresta e canaletta) compresa la messa in sicurezza degli elementi sconnessi e/o dislocati il tutto finalizzato al consolidamento della muratura sommitale e al rallentamento dei fenomeni di degrado indotti dal percolamento di acque meteoriche;**
- **chiusura della canaletta sommitale al fine di eliminare/rallentare gli effetti indotti dal ristagno e successivo percolamento delle acque meteoriche;**

²⁰ Per maggiori dettagli si rimanda a quanto indicato nel § 2 presente all'interno della Relazione Tecnica Illustrativa **[PE-RS-10-RTI]**.

- **rimozione di elementi metallici quali perni, grappe, ganci, anelli, staffe, chiodi ecc. (fissati con malta di calce o di cemento) e/o residui di impianti tecnologici che per condizione ed ossidazione risultino impropri e causa certa di degrado per il paramento murario;**
- **restauro degli elementi scultorei²¹ (due stemmi con araldica medicea) presenti nel tracciato urbano.**

La volontà di mantenere il repertorio dei 'segni' legati ad eventi significativi che si sono verificati nel tempo²², dovrà guidare anche le operazioni conservative che interessano sia le puliture (che non dovranno mai risultare eccessivamente aggressive) sia le stesure di malta, siano esse utilizzate come giunti che come intonaci.

Per quanto concerne le fasi di pulitura il progetto prevede un'operazione articolata in fasi distinte e successive. Al fine di asportare il solo deposito superficiale incoerente e/o debolmente coerente è stato previsto di eseguire una preliminare pulitura, manuale a secco con l'ausilio di pennellesse, spazzole ed aspiratori. Operazioni di pulitura più puntuali e specifiche quali ad esempio la pulitura con sistema micro aeroabrasivo a vortice rotativo elicoidale a bassa pressione (max 1,5 bar) o con stesura di soluzioni acquose di ammonio carbonato (stese a pennello, ad irrorazione a bassa pressione) saranno impiegate per la rimozione di depositi superficiali particolarmente coerenti e spessi (quali incrostazioni, concrezioni, croste ecc.). Il ricorso a questo secondo tipo di puliture sarà, comunque, valutato in fase cantieristica direttamente dalla Direzione dei Lavori.

Per quanto invece concerne le aggiunte, l'intervento proposto tenderà all'integrazione delle malte presenti, rimuovendo o 'abbassando' quelle irrimediabilmente decoese, distaccate e disgregate o quelle reputate incongrue eseguite durante interventi precedenti con materiali che per composizione o finitura possono interagire con quelli costitutivi (malte cementizie).

Per l'integrazione delle malte sono previsti impasti di tipo tradizionale a base di calce idraulica naturale (NHL), grassello di calce o fior di calce calcica (CL 90 S) materiali pozzolanici (pozzolana romana naturale, cocchiopesto, zeolite naturale), diversificati per tipo, colore e granulometria degli aggregati (sempre comunque naturali di origine alluvionale) che potranno variare a seconda delle diverse esigenze di grana e di aspetto dei giunti o delle lacune da risarcire, in accordo con le valutazioni della Direzione Lavori.

Gli sporadici elementi scultorei decorativi presenti sulle strutture murarie interessate da interventi di messa in sicurezza, saranno stabilizzati e preliminarmente consolidati, seguendo le indicazioni presenti nella specifica scheda tecnica; a queste potranno essere aggiunte le opere migliorative offerte in fase di gara dall'impresa appaltatrice dei lavori. Gli interventi conservativi inerenti le superfici scultoree di rilievo del manufatto dovranno, necessariamente essere affidati a restauratori dei beni culturali, specializzati nel trattamento delle superfici dell'architettura in grado di operare con la necessaria professionalità.

6.3.2. Indicazioni degli interventi di restauro delle strutture²³

Le informazioni utili alla definizione della tipologia degli interventi sono state ricavate nel corso dei sopralluoghi effettuati, congiuntamente con i colleghi che si sono occupati della verifica

²¹ Le lavorazioni degli interventi di restauro 'specialistico' sugli apparati decorativi della fabbrica sono descritte nel dettaglio nella scheda **RSD_01** presente nella *Relazione Tecnica Illustrativa [PE-RS-10-RTI]*. Fermo restando in fase di cantiere di collaudare e mettere a punto lavorazioni differenti, sulla scorta dei risultati di preliminari indagini e prove, o di ulteriori conoscenze acquisite nel corso del restauro da parte della DL.

²² La variabile tempo come segno positivo capace di aggiungere valore e non sottrarlo alla fabbrica è uno dei criteri che ha guidato l'approccio progettuale sin dalla fase preliminare. Per maggior chiarezza si rimanda a quanto indicato nel paragrafo §. 7 dell'elaborato PFTE_R-DG_EL001 presente all'interno del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica.

²³ Per maggiori dettagli si rimanda a quanto indicato nel § 1 presente all'interno della Relazione Tecnica Illustrativa **[PE-RS-10-RTI]**.

sismica e della relazione di calcolo esecutiva (dr. ing. Cristiano Talini e dr. ing. Francesco Venturi) nonché delle indagini geologiche (dr. Eraldo Santarnecchi). Durante i sopralluoghi, facendo particolare riferimento agli interventi di tipo strutturale, è stata focalizzata l'attenzione su quei casi in cui fossero evidenti e inequivocabili le condizioni di elevata criticità strutturale degli elementi portanti per i quali vi fosse, pertanto, il pericolo concreto di compromissione del manufatto. Per questi casi sono state redatte apposite procedure al fine di dare priorità di intervento a tali situazioni, rispetto ad altre per le quali le condizioni di conservazione non sono, ad oggi, caratterizzate da elevata criticità strutturale.

In particolare, le fasi di sopralluogo, di rilievo e di indagine strumentale hanno fornito le informazioni necessarie per ottenere un'adeguata conoscenza sia della geometria degli elementi che presentano criticità da un punto di vista strutturale sia della tipologia dei materiali e delle loro caratteristiche meccaniche, nonché una puntuale mappatura del quadro fessurativo e deformativo che interessano l'elemento (pila, arco, rinfiacco ecc.) singolarmente e inserito in un contesto strutturale; le informazioni sono servite a rendere esecutive le indicazioni di intervento.

Ciascun intervento proposto è stato progettato partendo dall'individuazione del dissesto e delle cause che lo hanno determinato nonché dalla contingenza di vincolo operativo indotto dalla peculiarità del monumento (ovvero monumento realizzato faccia a vista) che è stato volutamente sempre ben evidenziato nella scelta delle differenti tecniche di intervento finalizzate alla salvaguardia dell'opera.

Gli interventi di consolidamento proposti sono classificati dalla normativa sismica NTC18 (secondo il D.M. Del 17 gennaio 2018 e Circolare n.7 del 21 gennaio 2019 secondo il § 8.4.1 e C. 8.4.1.) come 'interventi locali o riparazione': interventi riguardanti singole parti e/o elementi della struttura.

È necessario mettere in luce che sin dalle prime fasi dell'analisi del quadro fessurativo e deformativo il progetto si è orientato verso il consolidamento delle fondazioni, ma se nel tratto extraurbano dell'acquedotto (ossia quello edificato sulla piana di Asciano) questo tipo di intervento potrebbe avere un riscontro attuativo, nel tratto cittadino questo specifico intervento non risulta praticabile. Il tratto urbano è, infatti, non solo caratterizzato da un ambiente limitrofo estremante antropizzato ma le incognite inerenti sia i costi da affrontare per la gestione delle interferenze con le infrastrutture presenti, sia quelle legate alla scarsa conoscenza delle caratteristiche e delle quantità dei sottoservizi, si sono rivelate tali che, le somme a disposizione per eseguire i lavori, avrebbero consentito la realizzazione solo di un intervento parziale. Questa contingenza, a sua volta avrebbe sottoposto il manufatto a una discontinuità di comportamento strutturale estremamente controproducente. Premesso ciò, nell'ambito del restauro statico delle strutture il gruppo di progettazione, in accordo con il RUP, ha selezionato una serie di interventi finalizzati a non modificare il comportamento globale della struttura ma a ripristinare le caratteristiche degli elementi e delle parti danneggiate fuori terra. In sintesi sono previsti i seguenti interventi:

- **sarcitura di soluzioni di continuità o discontinuità costruttive passanti o profonde con iniezioni di malta semifluida espansiva antiritiro a base NHL [CSDS_01];**
- **ripristino di soluzioni di continuità isolata passante a 'scuci e cuci'²⁴ [CSDS_02];**
- **ricostruzione/ristilatura profonda dei giunti di malta decoesi con malta strutturale M10 a base di NHL 3.5) [CSDS_03];**

²⁴ Tale tecnica piuttosto invasiva in linea di principio è stata limitata a rare situazioni che alla luce dei dati in nostro possesso non permettono interventi con tecniche meno invasive. I due tratti individuati (entrambi soggetti a soluzioni di continuità passanti e aperte) sono l'angolo tra il lacerto di imposta dell'arco n. 1 (oggi demolito e sostituito con un setto murario continuo) e l'arco n.2 in via De Amicis e la porzione di ghiera e di riempimento entrambi in laterizio dell'arco n.53.

- consolidamento tramite tecnica del 'reticulatus' [CSDS_04];
- ancoraggio di concio in 'laterizio lamellare' attraverso barre elicoidali in acciaio inox ad alta resistenza (dim. 10 mm) inghisate con malta fluida M15 a base di NHL 3.5) [CSDS_05];
- consolidamento intradossale dell'arco con connettori radiali realizzati con infusione a secco di barre elicoidali in acciaio inox ad alta resistenza (dim. 8 mm) [CSDS_06];
- predisposizione di struttura leggera in acciaio Cor-Ten di nuova progettazione come presidio di ritegno finalizzato a contrastare fenomeni di rotazione [CSDS_07].

7. Definizione dell'importo dei lavori

7.1. Modalità di preventivazione dell'importo dei lavori

Per la preventivazione dell'importo delle opere è stato redatto sia il Computo Metrico degli Interventi [PE-ET-15-CMI] dove sono state indicate, nel dettaglio, le differenti quantità per ogni singola lavorazione sia il Computo Metrico Estimativo [PE-ET-14-CME] dove sono state applicate alle quantità delle lavorazioni (precedentemente individuate) i prezzi unitari [PE-ET-17-EPU] dedotti dal Prezzario Ufficiale dei Lavori Pubblici della Regione Toscana - provincia di Pisa (TOS24). In caso di voci mancanti il prezzo è stato determinato sulla base delle analisi del prezzo [PE-ET-16-APU] che hanno tenuto conto del costo dei materiali, dei noli e della manodopera, presenti nei Prezzario Ufficiale dei Lavori Pubblici della Regione Toscana o applicando indagini di mercato. A questo importo, come suggerito dall'art. 32 del DPR 207/10, sono stati aggiunti i compensi per spese generali ed utili di impresa per tener conto dei maggiori oneri derivanti da una conduzione organizzata e tecnicamente qualificata del cantiere, nella misura complessiva del 26,0% così suddivisa: spese generali 16% (di cui il 4% inerente gli oneri di sicurezza afferenti all'impresa) utili di impresa 10%.

Pisa, 11.03.2024

dr. arch. Stefania FRANCESCHI

dr. arch. Leonardo GERMANI

dr. ing. Cristiano TALINI

dr. ing. Francesco VENTURI