



REGIONE TOSCANA
DIREZIONE DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE
SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO SUPERIORE

**Mitigazione del rischio idraulico per l'abitato di Firenze.
Sistemazione delle difese idrauliche esistenti nel
tratto dalla Nave a Rovezzano al Ponte S.Trinita.**

PROGETTO PRELIMINARE

DIRIGENTE RESPONSABILE DEL CONTRATTO
Ing. Gennarino Costabile

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO
Ing. Simone Nepi

UFFICIO DI PROGETTAZIONE

PROGETTISTI

Geol Pierluigi BALLERINI
Ing. Francesca BARZAGLI
Geom. Francesco DEL VECCHIO
Geom. Luigi DI PACO
Geom. Gianluca GIOINO
Ing. Andrea NAVARRIA
Ing. Valentina NENCINI
Ing. Alessio PAOLETTI

ADEMPIMENTI AMMINISTRATIVI

Riccardo ROCCI
Sandra Gigli

OGGETTO ELABORATO

**13 CARATTERIZZAZIONE FISICO MECCANICA
MATERIALI**

AGOSTO 2021

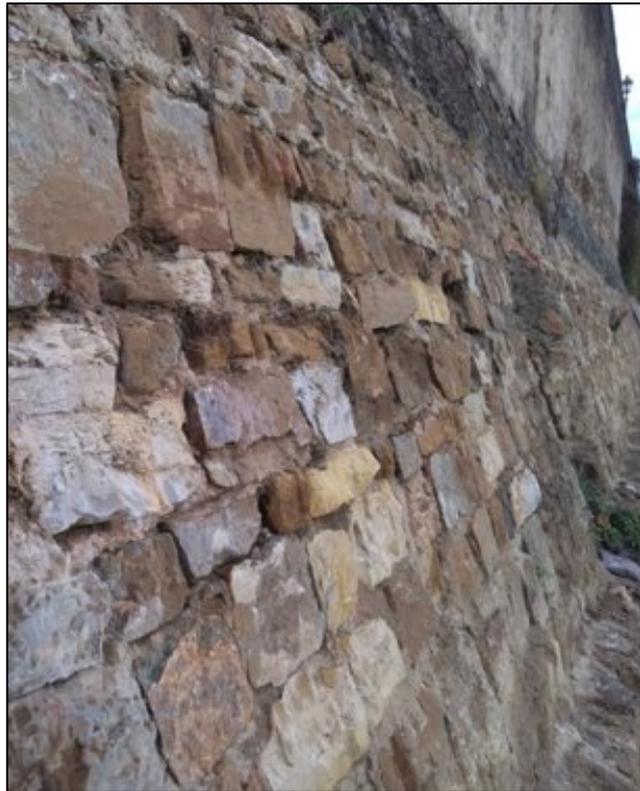
Firenze - Via San Gallo, 34/A - 50129 - Tel. 055/4622711



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DST
DIPARTIMENTO DI
SCIENZE DELLA TERRA



**Caratterizzazione fisico meccanica materiali costituenti
apparecchiature murarie, rivestimenti muraglioni
Lungarno Acciaiuoli e Le Grazie finalizzata all'
adeguamento di strutture di contenimento piene
nell'abitato di Firenze**



Responsabile: Prof. Carlo Alberto Garzonio

Collaboratori: Dott.ssa Teresa Salvatici, Dott.ssa Irene Centauro, Dott.ssa Sara Calandra, Dott. Francesco Pilati

Firenze, 12 luglio 2021

TAVOLA DEI CONTENUTI

GLOSSARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE CAROTE	6
2.1 INDAGINI VIDEO-ENDOSCOPICHE	6
2.2 ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)	21
2.3 DESCRIZIONE MACROSCOPICA	22
2.4 CONSIDERAZIONI	36
3 ESTRATTO DELLE ANALISI MINERO-PETROGRAFICHE	39
4 METODOLOGIE ANALITICHE E RISULTATI	42
4.1 CAMPIONAMENTO	42
4.2 PROVE MECCANICHE	42
4.2.1 <i>Ultrasuoni</i>	42
4.2.2 <i>Sclerometro</i>	47
4.2.3 <i>Prove a compressione uniassiale</i>	48
4.2.4 <i>Determinazione rapporto malta pietrisco macroscopico</i>	50
4.3 PROVE FISICHE	53
4.3.1 <i>Prove di assorbimento totale</i>	53
4.3.2 <i>Prova di assorbimento di acqua per capillarità</i>	57
5 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	60
ALLEGATO A	64
ALLEGATO B	79

Glossario

Malta: miscela di leganti inorganici (calce), aggregati prevalentemente fini, acqua e eventuali aggiunte di additivi, in porzione tali da conferire all'impasto adeguate caratteristiche fisiche e durabilità. Le malte si possono distinguere in base alla tipologia di legante (calce), in particolare si considerano in questo report solo le calce idrauliche.

Calce idraulica: legante realizzato dalla cottura della cottura di calcari contenenti impurezze silicatiche.

Aggregato: la porzione fine (dimensioni tra 2-0,1 mm) aggiunta all'impasto per ottenere la malta.

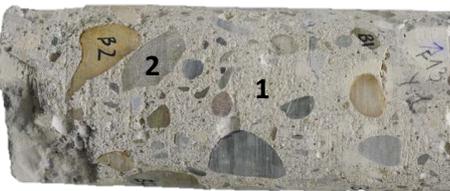
Cemento: legante idraulico miscelato con acqua e additivi, detto anche calcestruzzo moderno.

Calcestruzzo antico: miscela costituita da frammenti di pietra (pietriscio) e malta (aggregati prevalentemente fini, calce e acqua). Le murature ottenuti dall'utilizzo di questa miscela sono definite strutture a nucleo.

Calcestruzzo moderno: cemento (legante idraulico), aggregato (le cui dimensioni possono variare tra 40-0,10 mm), acqua e additivi.

Pietriscio grosso rotondo¹: è una ghiaia grossolana con dimensioni da 200-40 mm, levigata dall'azione dell'acqua.

Pietriscio rotondo: è una ghiaia con dimensioni da 40-8 mm, levigata dall'azione dell'acqua.

	Calcestruzzo antico composto da malta (1) e pietriscio grosso rotondo (2).
	Calcestruzzo antico composto da malta (1) e pietriscio rotondo (2).
	Cemento o calcestruzzo moderno con aggregato di dimensioni di circa 0,8-0,1 mm.
	Cemento o calcestruzzo moderno con aggregato di dimensioni di circa 40-1 mm.

¹ Molto spesso il pietriscio grosso rotondo viene chiamato conglomerato.

1 Introduzione

Il Laboratorio Materiali Lapidei e Geologia Applicata, dell'Ambiente e del Paesaggio (LAM) del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (DST-UNIFI), nelle date del 23, 26, 27 novembre, 1, 2 e 3 dicembre 2021 ha seguito la campagna di carotaggio dei muraglioni dei Lungarni degli Acciaiuoli e delle Grazie, condotta dall'impresa Antonio Lauria. Il LAM si è occupato della descrizione dei materiali in situ, attraverso la caratterizzazione macroscopica delle 14 carote, di cui 7 estratte nel tratto del Lungarno degli Acciaiuoli e 7 dal Lungarno delle Grazie.

In corrispondenza dei fori in situ sono state effettuate le indagini video-endoscopiche, che hanno permesso una prima definizione della stratigrafia dei muraglioni. In generale, le carote sono costituite da pietra corticale e da calcestruzzo antico e moderno.

In laboratorio è stata successivamente effettuata una più approfondita descrizione di ciascuna carota estratta, discriminando da un punto di vista macroscopico diverse tipologie di muratura. Per ogni tipologia è stato selezionato un numero di campioni rappresentativi di ogni carota, seguendo le indicazioni delle normative di riferimento, per effettuarne la caratterizzazione da un punto di vista fisico-meccanico. Le tecniche utilizzate sono: prove ultrasoniche, sclerometriche, prove di resistenza a compressione, prove di assorbimento totale e prova di assorbimento d'acqua per capillarità. Tali analisi permettono di ottenere informazioni sulla resistenza del materiale e sulla porosità, densità e capacità di assorbimento dell'acqua.

Nel report vengono espone le metodologie d'indagine impiegate e i relativi risultati ottenuti.

Inoltre, i dati ottenuti sono stati integrati con i risultati derivanti dalle analisi minero-petrografiche che hanno riguardato la sola porzione di malta, svolte dalla Dott. Cantisani afferente al Centro Nazione delle Ricerche-Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (CNR-ISPC). La selezione dei materiali per la loro caratterizzazione è stata operata congiuntamente con il CNR.

2 Descrizione delle carote

Al fine di determinare la composizione, la stratigrafia, la morfologia e le caratteristiche fisiche meccaniche degli apparecchi murari degli argini ed in particolare delle malte, sono stati effettuati carotaggi continui del diametro di 5 cm, dall'impresa di costruzioni e restauro conservativo Antonio Lauria. Sono state estratte 14 carote, 7 nel muraglione d'argine del Lungarno degli Acciaiuoli (F1-F6) e 7 in quello del Lungarno alle Grazie (F7-F13) (Figura 1).

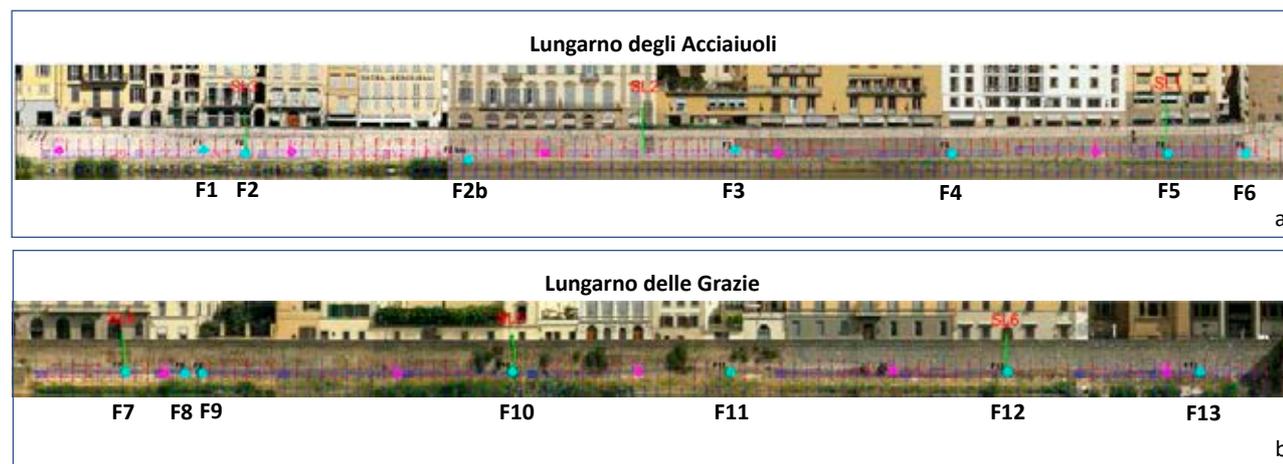


Figura 1 – Ubicazione dei carotaggi effettuati sui muraglioni a) Lungarno degli Acciaiuoli e b) Lungarno delle Grazie, evidenziati in celeste.

Si riporta qui sotto una breve descrizione delle indagini video-endoscopiche effettuate nei fori e delle carote estratte (le foto delle carote riportate sono quelle eseguite durante la campagna di perforazione). Da ciascuna carota sono stati prelevati frammenti di materiale per le analisi mineralogico-petrografiche e blocchi da centimetrici a decimetrici per le indagini fisico meccaniche.

2.1 Indagini video-endoscopiche

Le indagini video-endoscopiche sono state condotte all'interno di tutti i fori di carotaggio indicati in azzurro in Figura 1. Le video-ispezioni dei fori sono state eseguite immediatamente dopo l'estrazione di ogni carota.

Durante le indagini sono state acquisite progressivamente delle immagini ogni 20 cm circa di profondità, o comunque in ogni punto di interesse osservato durante l'ispezione; sono state inoltre acquisite anche le riprese video di tutti i fori ispezionati, lungo tutta la loro profondità.

Le riprese così realizzate integrano le osservazioni macroscopiche delle carote estratte poiché permettono di ispezionare lo spessore murario nella sua integrità, verificando la successione stratigrafica dei materiali e ulteriori aspetti legati alla morfologia del materiale e alla presenza di vuoti o fratture.

Le indagini endoscopiche hanno consentito di distinguere a livello macroscopico diverse tipologie di composizione della muratura, di evidenziare la presenza di alcune fratture, e di individuare i punti di intercettazione del canale fognario. Le principali osservazioni possono essere così riassunte:

- le murature di entrambi i lungarni appaiono piuttosto compatte e con poche cavità e fratture e ben aggregate;
- Il canale viene intercettato nei carotaggi F1, F3 e F4 sul Lungarno degli Acciaiuoli e nel carotaggio F7 sul Lungarno delle Grazie;
- non è stato possibile ispezionare il foro F2bis per la presenza di acqua;
- nel Lungarno degli Acciaiuoli la tipologia materiale prevalente (discriminata a livello macroscopico) nei fori da F1 a F3 presenta malta con pietrisco grosso rotondo; in F4 e F5 è presentano due tipologie di muratura, costituite da cemento con: in F4 con aggregato di dimensioni millimetriche e l'altra con aggregato di dimensioni centimetriche; in F6 invece è presente malta con del pietrisco rotondo;
- nel Lungarno delle Grazie, gli spessori murari indagati in tutti i fori, eccetto F8, presentano due tipologie di muratura, costituite da malta: una con pietrisco grosso rotondo e una con pietrisco rotondo; in F8 è presente solo la prima tipologia;
- in generale non si osservano grosse lacune o cavità negli spessori ispezionati; si evidenziano solo piccole fratture nei punti di ispezione F1, F2, F3 e F6 (per quanto riguarda Lungarno degli Acciaiuoli); riguardo il Lungarno delle Grazie i tratti più profondi all'interno di tutti i fori mostrano una maggiore rugosità superficiale.

I risultati delle indagini video-endoscopiche sono riportati di seguito in forma di schede descrittive contenenti:

- informazioni sulla localizzazione e inclinazione del foro rispetto all'asse verticale del muraglione;
- data di esecuzione dell'indagine;
- profondità e diametro del foro;
- immagini significative con indicazione della profondità di ripresa rispetto all'esterno e descrizione.

FORO F2bis

Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 133 m; distanza verticale da spalletta: 5,40 m.

Inclinazione: 44° rispetto alla verticale del muro.

Data: 16/12/2020

Tipo di materiale: intonaco, pietra, malta

Profondità del foro (cm): 320

Diametro del foro (cm): 5

FORO F1

Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 176 m; distanza verticale da spalletta: 5,10 m.

Inclinazione: 0°

Data: 16/12/2020 (ispezione); 23, 26, 27/11/2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200 (fino al canale)

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
 Pietra	 Malta con pietrisco grosso rotondo (visibili alcune fratture)
<i>Profondità: 80 cm</i>	<i>Profondità: 160 cm</i>
 Malta/argilla	 Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 180 cm</i>	<i>Profondità: 190 cm</i>
 Pietra	 Canale e muro con filari di mattoni sul fondo

FORO F2

Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 169 m; distanza verticale da spalletta: 3,70 m.

Inclinazione: 0°

Data: 16/12/2020 (ispezione); 23, 26, 27/11/2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
 <p>Intonaco esterno</p>	 <p>Malta con pietrisco grosso rotondo</p>
<i>Profondità: 100 cm</i>	<i>Profondità: 140 cm</i>
 <p>Malta con pietrisco grosso rotondo (visibili alcune cavità)</p>	 <p>Malta con pietrisco grosso rotondo</p>
<i>Profondità: 180 cm</i>	<i>Profondità: 200 cm</i>
 <p>Malta con pietrisco grosso rotondo</p>	 <p>Malta con pietrisco grosso rotondo</p>

FORO F3

Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 106 m; distanza verticale da spalletta: 4,46 m.

Inclinazione: 0°

Data: 16/12/2020 (ispezione); 23, 26, 27/11/2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 170 (fino al canale)

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
	
Pietra	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 80 cm</i>	<i>Profondità: 100 cm</i>
	
Malta con pietrisco grosso rotondo (visibili alcune fratture)	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 140 cm</i>	<i>Profondità: 170 cm</i>
	
Malta con pietrisco grosso rotondo	Malta e vuoto (canale)

FORO F4

Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 55 m; distanza verticale da spalletta: 4,53 m.

Inclinazione: 0°

Data: 16/12/2020 (ispezione); 23, 26, 27/11/2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 110 (fino al canale)

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
 <p>Pietra</p>	 <p>Cemento con aggregato di dimensioni millimetriche e ferri</p>
 <p>Cemento con aggregato di dimensioni centimetriche e ferri</p>	 <p>Cemento con aggregato di dimensioni centimetriche</p>
 <p>Cemento con aggregato di dimensioni centimetriche</p>	 <p>Vuoto (canale)</p>

FORO F5

Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 20,10 m; distanza verticale da spalletta: 3,37 m.

Inclinazione: 0°

Data: 16/12/2020 (ispezione); 23, 26, 27/11/2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 180

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>40 cm</i>
	
Cemento con aggregato di dimensioni millimetriche	Cemento con aggregato di dimensioni centimetriche
<i>Profondità: 60 cm</i>	<i>Profondità: 100 cm</i>
	
Cemento con aggregato di dimensioni centimetriche	Cemento con aggregato di dimensioni centimetriche
<i>Profondità: 140 cm</i>	<i>Profondità: 160 cm</i>
	
Materiale frantumato	Materiale frantumato

FORO F6

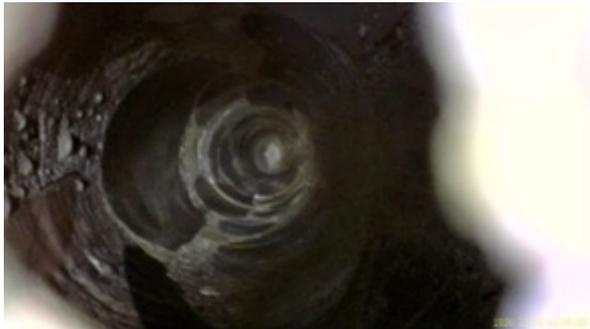
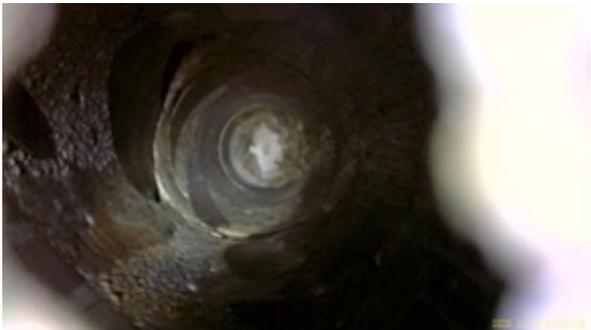
Ubicazione: muraglione Lungarno Acciaiuoli. Distanza orizzontale da mensola Ponte Vecchio (punto 0): 5,25 m; distanza verticale da spalletta: 5,05 m.

Inclinazione: 0°

Data: 16/12/2020 (ispezione); 23, 26, 27/11/2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
	
Pietra	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 100 cm</i>	<i>Profondità: 140 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 190 cm</i>	<i>Profondità: 200 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo

FORO F7

Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 180 m; distanza verticale da spalletta: 2,65 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 180 (fino al canale)

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
 2020/12/03 12:10	 2020/12/03 12:16
Pietra	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 80 cm</i>	<i>Profondità: 100 cm</i>
 2020/12/03 12:09	 2020/12/03 12:08
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 140 cm</i>	<i>Profondità: 180 cm</i>
 2020/12/03 12:06	 2020/12/03 12:03
Malta con pietrisco rotondo	Malta, frammenti

FORO F8

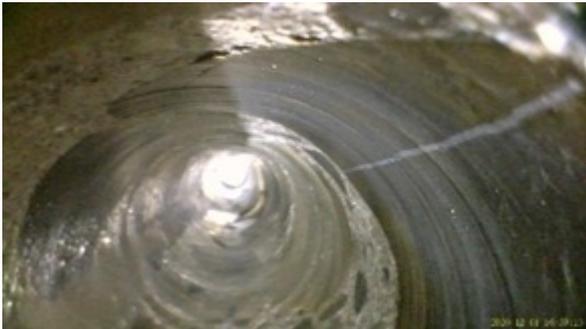
Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 173 m; distanza verticale da spalletta: 7 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>  Malta	<i>Profondità: 40 cm</i>  Malta (visibili alcune fratture)
<i>Profondità: 80 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo	<i>Profondità: 100 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 140 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo (visibili fratture)	<i>Profondità: 160 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo (visibili fratture)

FORO F9

Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 166 m; distanza verticale da spalletta: 7,20 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 20 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo	<i>Profondità: 40 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 80 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo	<i>Profondità: 100 cm</i>  Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 140 cm</i>  Malta con pietrisco rotondo	<i>Profondità: 180 cm</i>  Argilla

FORO F10

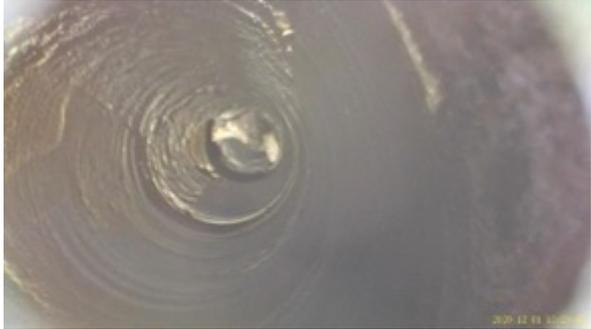
Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 122 m; distanza verticale da spalletta: 2,65 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 150

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 20 cm</i>
	
Pietra	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 60 cm</i>	<i>Profondità: 80 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 100 cm</i>	<i>Profondità: 140 cm</i>
	
Malta disgregata	Malta disgregata con fondo argilla

FORO F11

Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 90 m; distanza verticale da spalletta: 5,85 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 20 cm</i>
	
Pietra	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 60 cm</i>	<i>Profondità: 100 cm</i>
	
Malta con pietrisco grosso rotondo	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 160 cm</i>	<i>Profondità: 190 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo

FORO F12

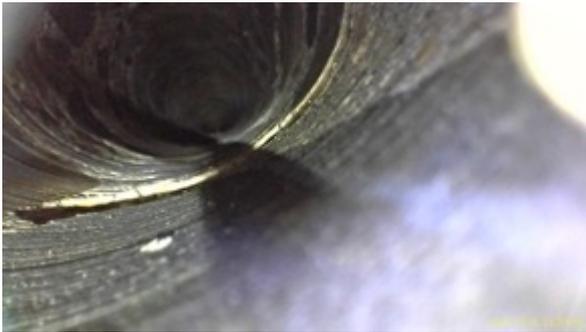
Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 47 m; distanza verticale da spalletta: 6 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: esterno del foro</i>	<i>Profondità: 40 cm</i>
	
Foro	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 60 cm</i>	<i>Profondità: 100 cm</i>
	
Malta con pietrisco grosso rotondo	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 160 cm</i>	<i>Profondità: 190 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo

FORO F13

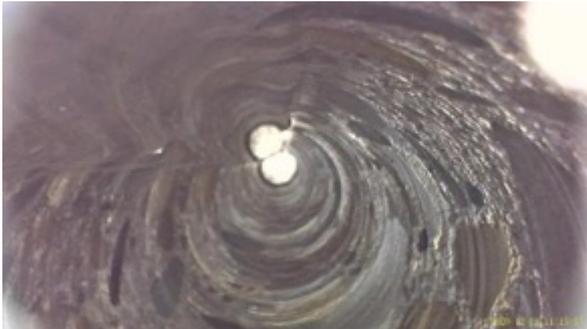
Ubicazione: muraglione Lungarno delle Grazie. Distanza orizzontale dalla torretta adiacente al foro di scarico (punto 0): 16 m; distanza verticale da spalletta: 5,60 m.

Inclinazione: 0°

Data: 1, 2 e 3 dicembre 2020 (foro e carotaggio)

Profondità del foro (cm): 200

Diametro del foro (cm): 5

<i>Profondità: 0 cm</i>	<i>Profondità: 20 cm</i>
	
Pietra/malta	Malta con pietrisco grosso rotondo
<i>Profondità: 80 cm</i>	<i>Profondità: 100 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Malta con pietrisco rotondo
<i>Profondità: 160 cm</i>	<i>Profondità: 190 cm</i>
	
Malta con pietrisco rotondo	Fondo foro

2.2 Rock Quality Designation (RQD)

La prima operazione effettuata precedentemente alla descrizione macroscopica delle carote, è stata quella di calcolare l'Indice RQD. L'RQD è classificazione geotecnica utilizzata solitamente per le rocce, sviluppata da D.U. Deere nel 1964. È stata utilizzata poiché fornisce una stima della percentuale di recupero di una carota estratta da un sondaggio, attraverso la somma delle lunghezze degli spezzoni pari o superiori ai 10 cm (l_{10}) e si calcola la percentuale della lunghezza totale così ottenuta, rispetto alla lunghezza totale della perforazione (L).

$$RQD = 100 \frac{\sum l_{10}}{L} (\%)$$

Questa classificazione si usa per indicare un indice di qualità delle rocce secondo alcune classi stabilite (Figura 2).

RQD (%)	Qualità
<25%	Molto scadente
25-50%	Scadente
50-75%	Media
75-90	Buona
90-100%	Molto buona

Figura 2 – Classi di qualità basate sull'indice RQD.

In Tabella 1 sono riportati i valori di RQD di ogni carota estratta.

Tabella 1 – Risultati calcolo RQD (%).

Campione	RQD (%)	Qualità
F1	57	Media
F2	78	Buona
F2bis	85	Buona
F3	68	Media
F4	82	Buona
F5	62	Media
F6	83	Buona
F7	41	Scadente
F8	69	Media
F9	95	Molto buona
F10	39	Scadente
F11	51	Media
F12	65	Media
F13	96	Molto buona

2.3 Descrizione macroscopica

CAROTA F1

La carota F1 (Figura 3) arriva ad una profondità di 2 m. La parte iniziale è caratterizzata dalla pietra di rivestimento del muraglione, è poi presente una malta con pietrisco grosso rotondo e una parte centrale molto incoerente, in larga parte non recuperata durante la perforazione a causa della presenza di argilla; la carota termina con una pietra, molto probabilmente appartenete al muro del canale che intercetta.

Sono stati prelevati campioni per le prove di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), assorbimento capillare (CAP) e Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 4.



Figura 3 – Foto carota F1 appena estratta.

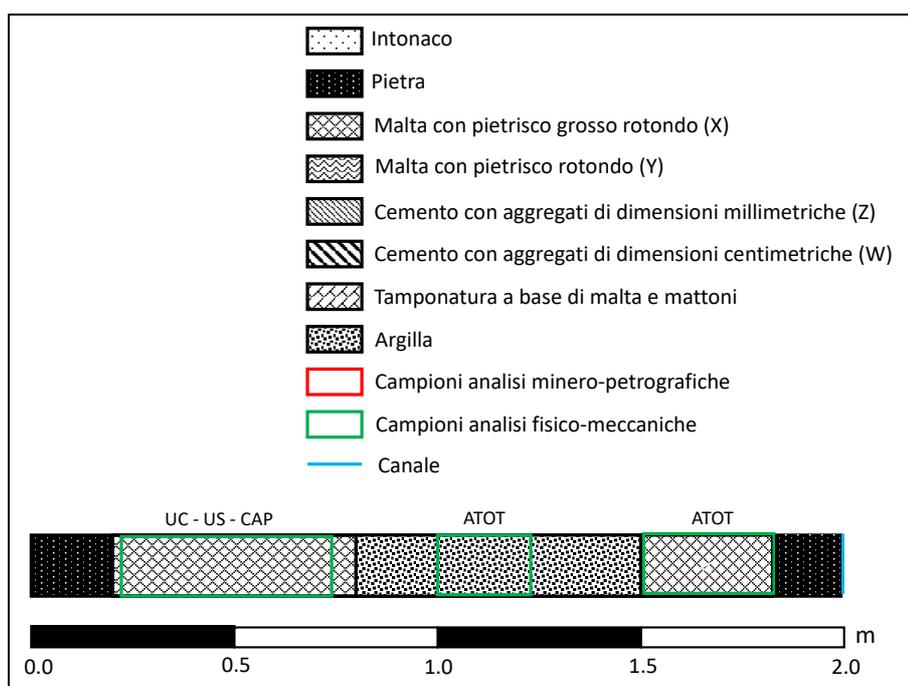


Figura 4 – Schema carota F1 con varie tipologie di muratura, definite tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F2

La carota F2 (Figura 5) arriva ad una profondità di 2 m, corrisponde principalmente da muratura costituita da malta con pietrisco grosso rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Assorbimento Capillare (CAP) e Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 6.



Figura 5 – Foto carota F2 appena estratta.

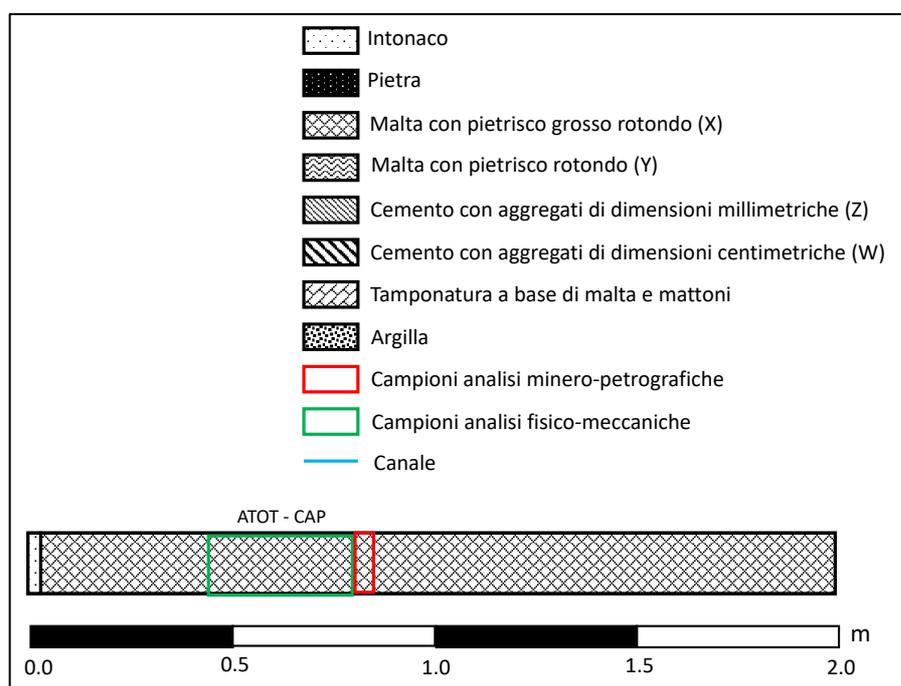


Figura 6 – Schema carota F2 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F2bis

La carota F2bis (Figura 7) arriva ad una profondità di 3 m, estratta da un foro che è stato eseguito con inclinazione di 44 gradi rispetto alla verticale del muro. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da due tipologie di muratura: la prima costituita da malta con pietrisco grosso rotondo, molto simile a quella delle carote F1 e F2; e la seconda costituita malta con pietrisco rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 8.



Figura 7 – Foto carota F2bis appena estratta.

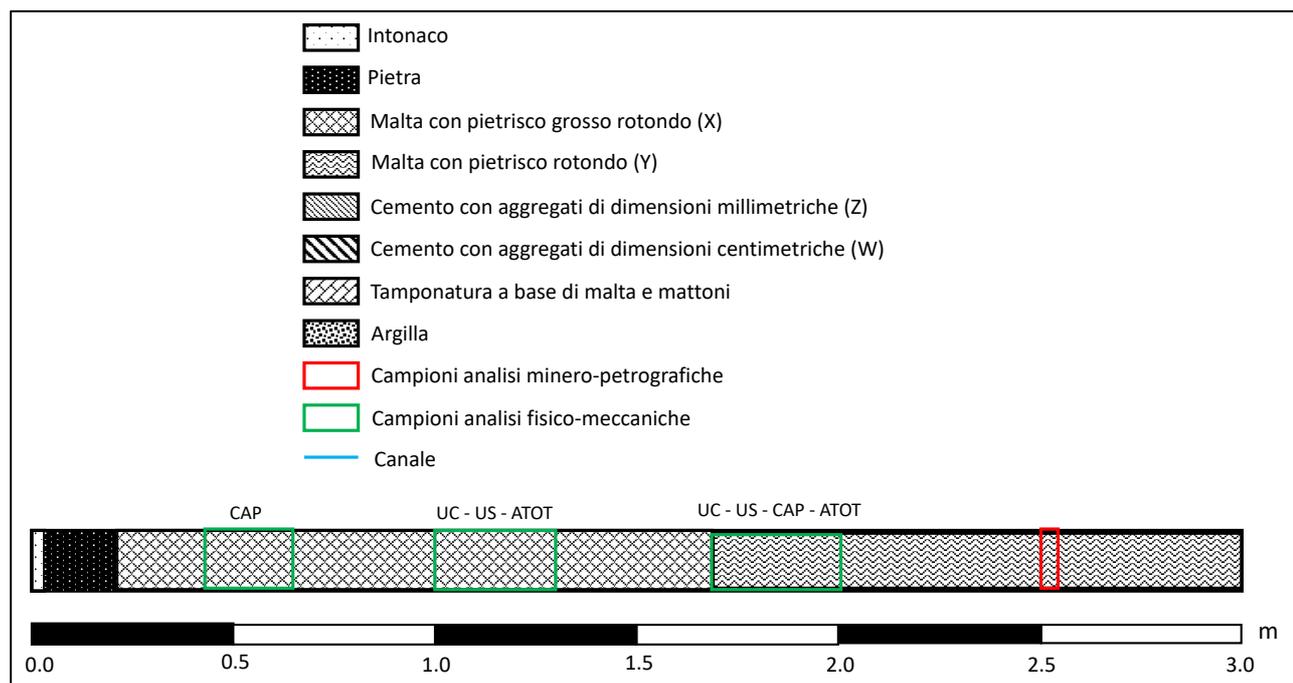


Figura 8 – Schema carota F2bis con varie tipologie di murature, definite tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F3

La carota F3 (Figura 9) arriva ad una profondità di 1,70 m. Dopo la pietra del rivestimento del muraglione si trova una malta con pietrisco grosso rotondo; il foro termina con il canale a circa 1,70 m.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 10.



Figura 9 – Foto carota F3 appena estratta.

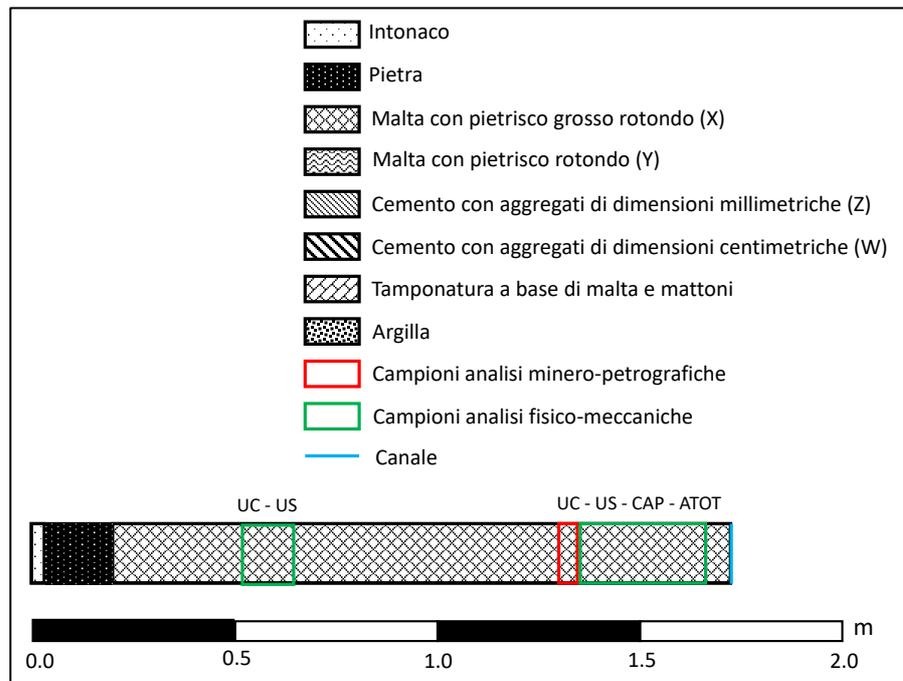


Figura 10 – Schema carota F3 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F4

La carota F4 (Figura 11) arriva ad una profondità di 1,10 m. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da due tipologie di cemento: la prima con aggregati di dimensioni millimetriche; e la seconda costituita da aggregati di dimensioni centimetriche. Della intera lunghezza perforata mancano 50 cm molto probabilmente caduti all'interno del canale intercettato.

Sono stati prelevati campioni per le prove di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 12.



Figura 11 – Foto carota F4 appena estratta.

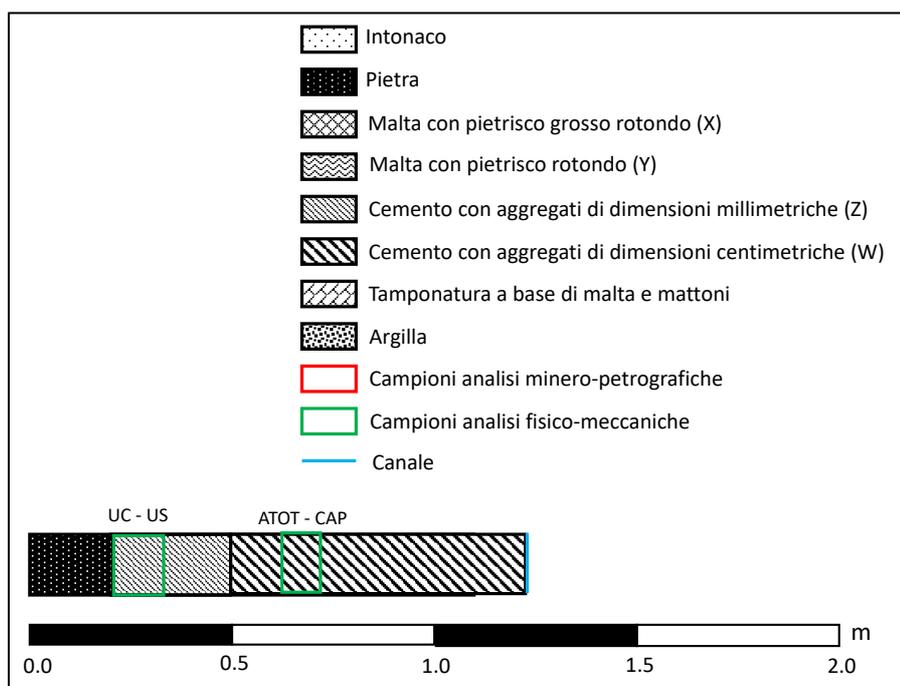


Figura 12 – Schema carota F4 con varie tipologie di muratura, definite tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F5

La carota F5 (Figura 13) arriva ad una profondità di 2 m. La pietra di rivestimento del muraglione non è presente nella foto della carota poiché è stata asportata prima del carotaggio. La carota è composta da due tipologie di cemento: la prima con aggregati di dimensioni millimetriche; la seconda costituita da aggregati di dimensioni centimetriche. La carota termina con una pietra, molto probabilmente appartenete al muro del canale che intercetta.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 14.



Figura 13 – Foto carota F5 appena estratta.

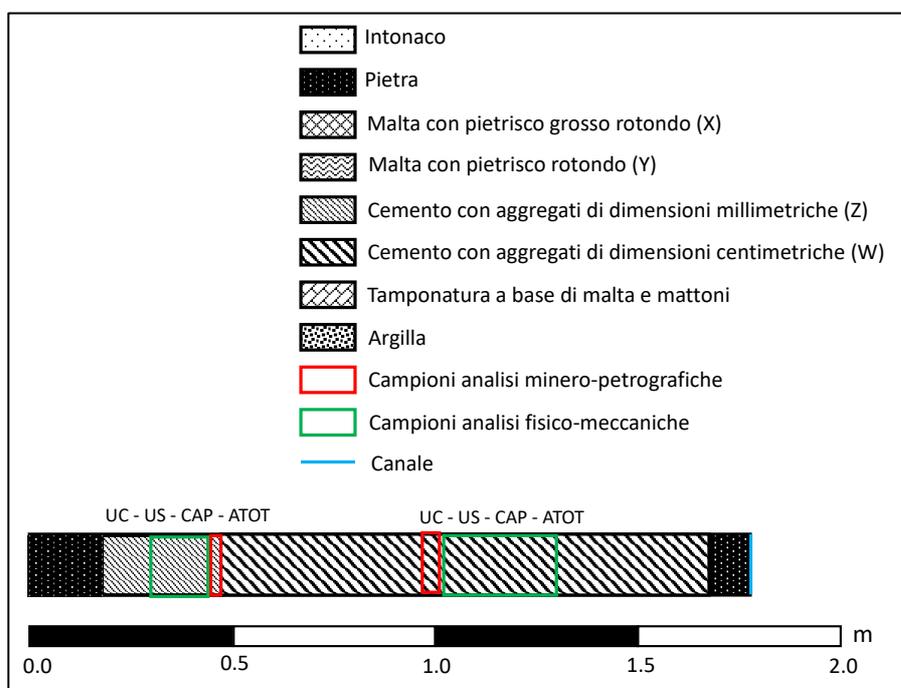


Figura 14 – Schema carota F5 con varie tipologie di muratura, definite tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F6

La carota F6 (Figura 15) arriva ad una profondità di 2 m. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da una malta costituita da pietrisco rotondo simile a quella della seconda tipologia di muratura della carota F2bis.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 16.



Figura 15 – Foto carota F6 appena estratta.

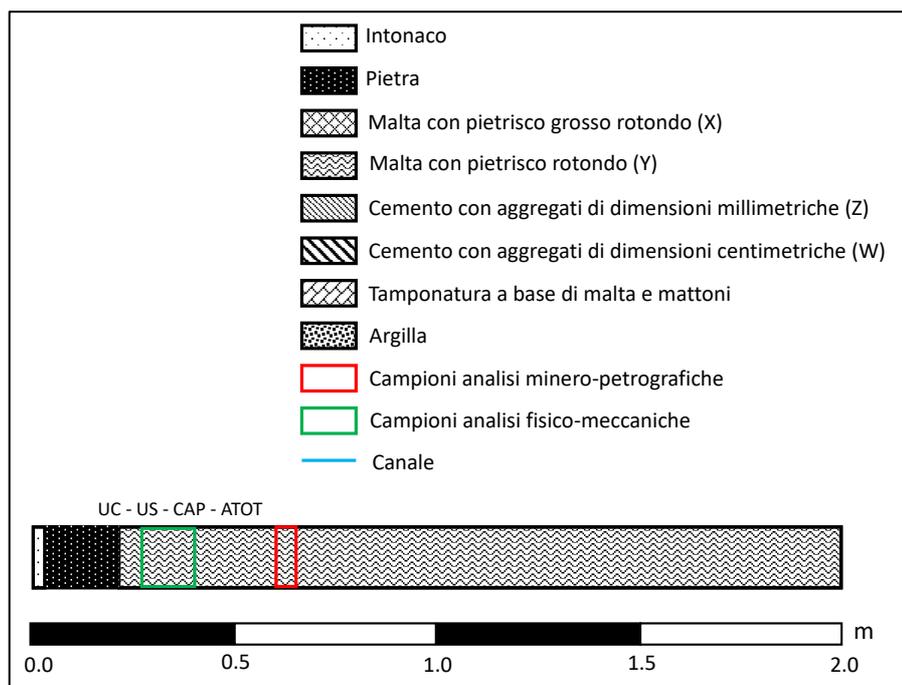


Figura 16 – Schema carota F6 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F7

La carota F7 (Figura 17) arriva ad una profondità di 1,80 m. Dopo la pietra del rivestimento del muraglione si trova una malta con pietrisco grosso rotondo, successivamente, intorno 0,77 m, si trova una malta con pietrisco rotondo; il foro termina con un vuoto a circa 1,80 m.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 18.



Figura 17 – Foto carota F7 appena estratta.

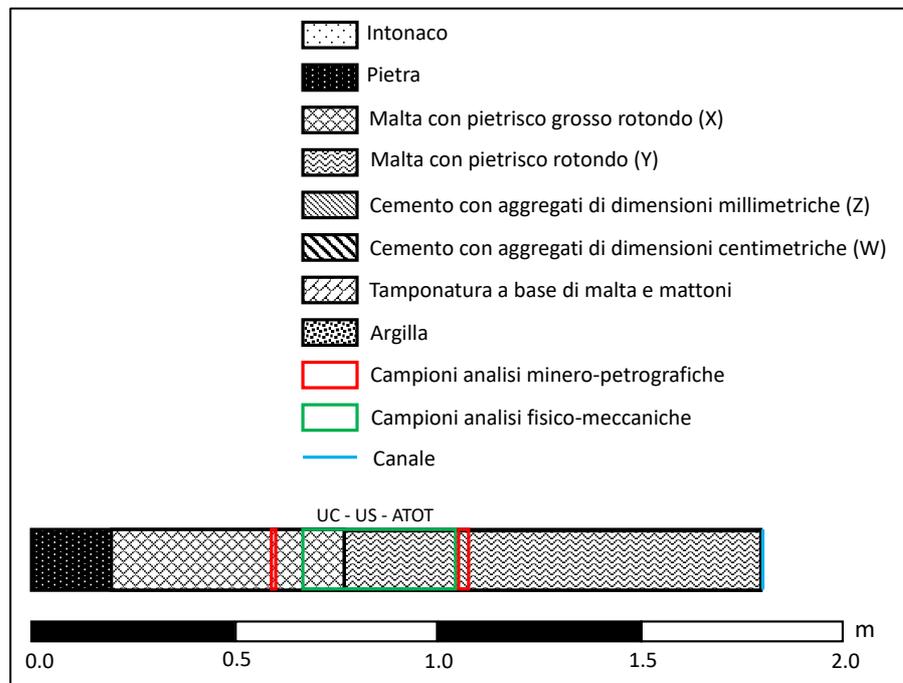


Figura 18 – Schema carota F7 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F8

La carota F8 (Figura 19) arriva ad una profondità di 2 m; non è presente la pietra di rivestimento poiché la carota è stata estratta in una porzione di muro con tamponatura. A testimonianza di tale fatto si nota che la prima porzione è costituita da una malta disgregata con la presenza di mattoni. Ad una profondità maggiore, invece presenta le caratteristiche tipiche delle carote limitrofe con una malta composta da pietrisco grosso rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 20.



Figura 19 – Foto carota F8 appena estratta.

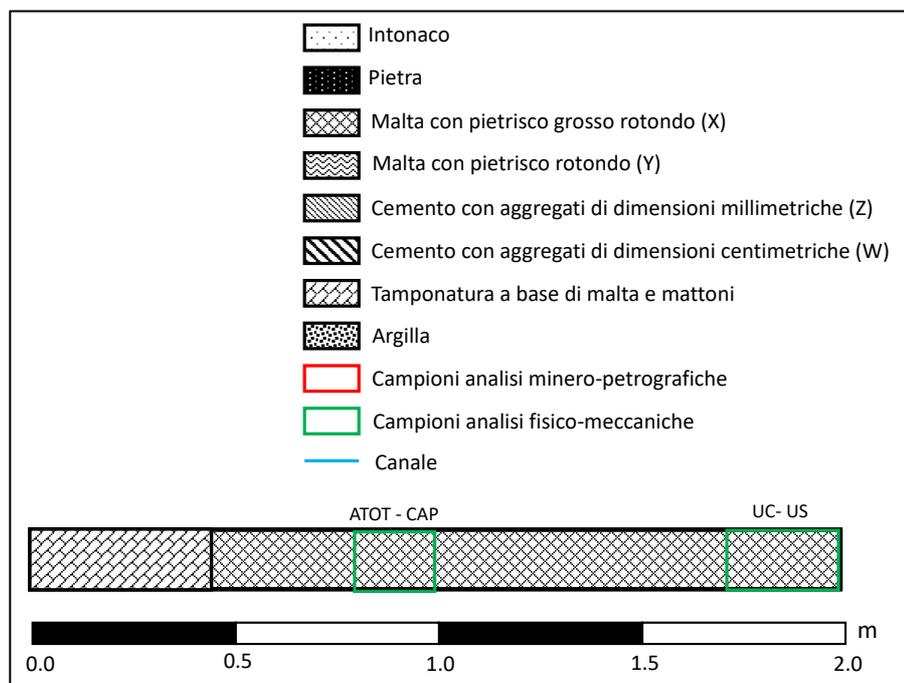


Figura 20 – Schema carota F8 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F9

La carota F9 (Figura 21) arriva ad una profondità di 2 m. La carota è composta da due tipologie di muratura: una con malta con pietrisco grosso rotondo, successivamente, intorno 1,15 m, si trova una malta con pietrisco rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 22.



Figura 21 – Foto carota F9 appena estratta.

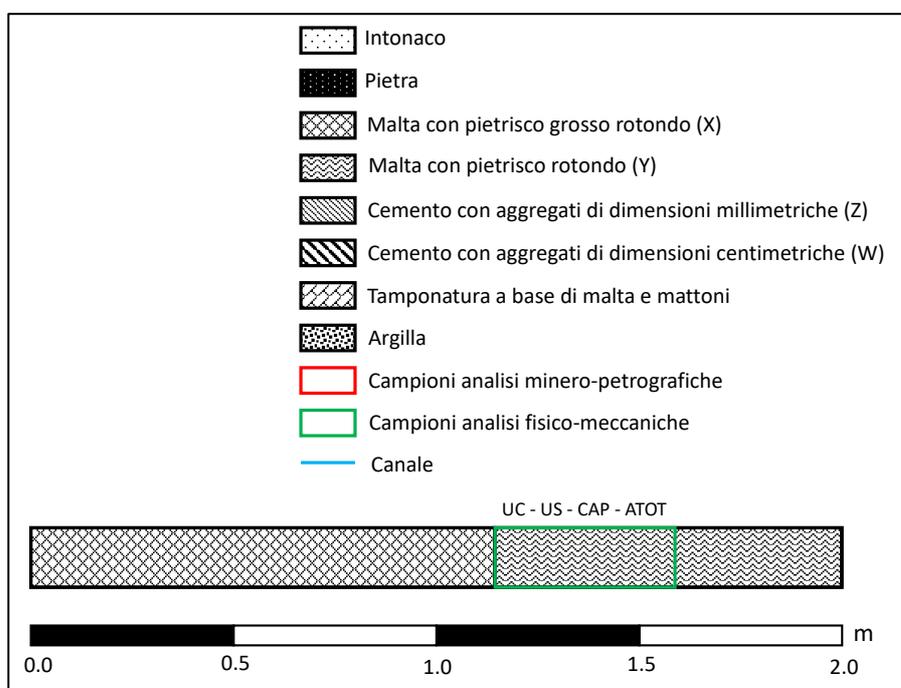


Figura 22 – Schema carota F9 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F10

La carota F10 (Figura 23) arriva ad una profondità di 1,50 m. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da due tipologie di muratura: la prima costituita da malta con pietrisco grosso rotondo, successivamente, intorno 0,45 m, si trova una malta con pietrisco rotondo. Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 24.



Figura 23 – Foto carota F10 appena estratta.

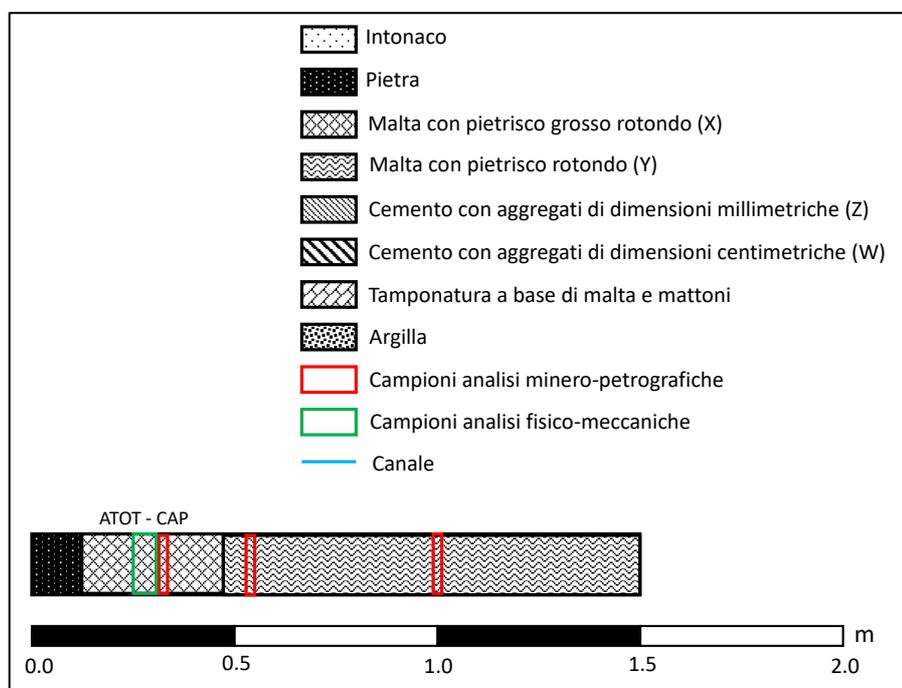


Figura 24 – Schema carota F10 definita tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F11

La carota F11 (Figura 25) arriva ad una profondità di 2 m. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da due tipologie di muratura: la prima con malta con pietrisco grosso rotondo, successivamente, intorno 0,85 m, si trova una malta con pietrisco rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 26.



Figura 25 – Foto carota F11 appena estratta.

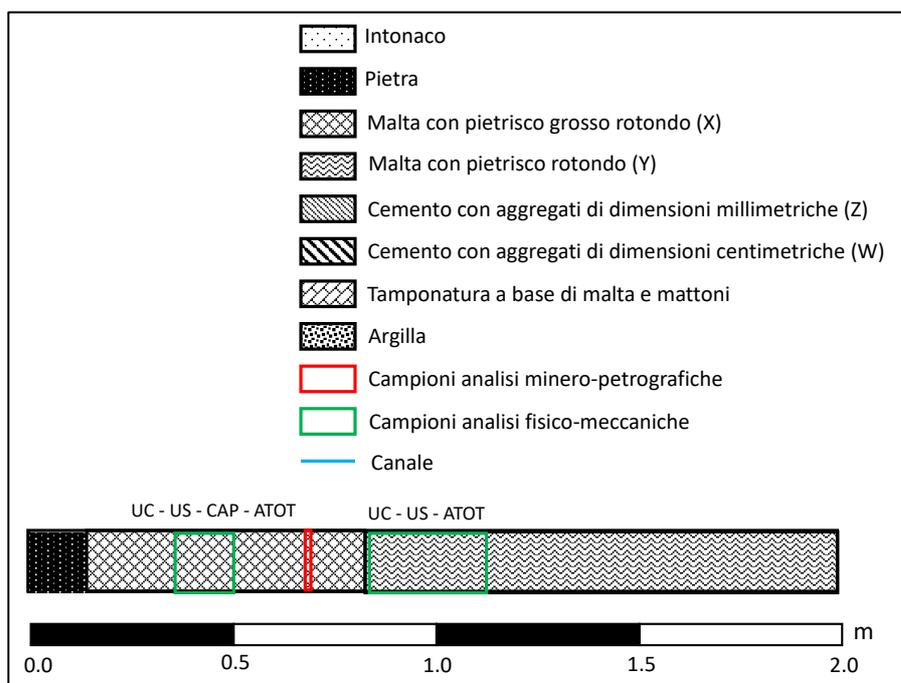


Figura 26 – Schema carota F11 con varie tipologie di murature, definiti tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F12

La carota F12 (Figura 27) arriva ad una profondità di 2 m. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da due tipologie di muratura: la prima costituita da malta con pietrisco grosso rotondo; e la seconda costituita da malta con pietrisco rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 28.



Figura 27 – Foto carota F12 appena estratta.

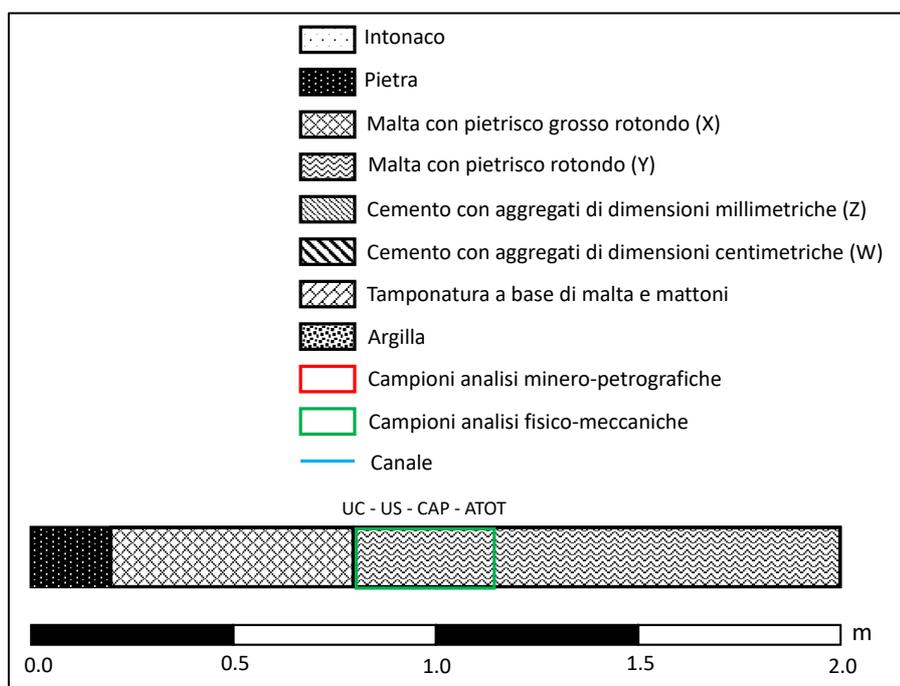


Figura 28 – Schema carota F12 con varie tipologie di murature, definiti tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionati.

CAROTA F13

La carota F13 (Figura 29) arriva ad una profondità di 2 m. Dopo la pietra di rivestimento del muraglione, è composta da due tipologie di muratura: la prima costituita da malta con pietrisco grosso rotondo; e la seconda costituita da malta con pietrisco rotondo.

Sono stati prelevati campioni per le prove minero-petrografiche, di Compressione Uniassiale (UC), Ultrasoniche (US), di Assorbimento Capillare (CAP) e di Assorbimento Totale (ATOT) distribuiti nelle varie porzioni come mostrato in Figura 30.



Figura 29 – Foto carota F13 appena estratta.

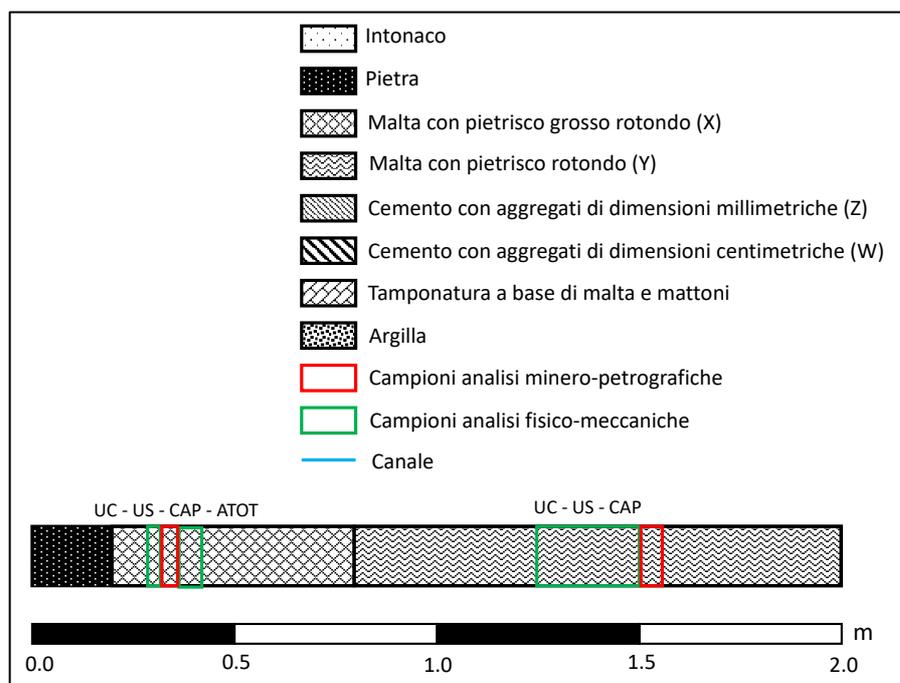


Figura 30 – Schema carota F13 con varie tipologie di murature, definiti tramite descrizione macroscopica, punti di prelievo e tipologia di campioni selezionata.

2.4 Considerazioni

Ogni carota è stata caratterizzata macroscopicamente, sia esaminando le riprese endoscopiche che mostrando i vuoti di tipo strutturale realmente esistenti all'interno della porzione di muro indagata, sia esaminando le carote estratte, e confrontando i molti punti dove si vede la frammentazione della malta dovuta in parte all'azione meccanica del carotaggio.

Da questa prima analisi macroscopica sono state individuate almeno 4 tipologie principali di composizioni della muratura presenti nelle varie porzioni dei muraglioni del Lungarno degli Acciaiuoli e Lungarno delle Grazie, in particolare:

- Malta con pietrisco grosso rotondo (Tipologia X);
- Malta con pietrisco rotondo (Tipologia Y);
- Cemento con aggregati di dimensioni millimetriche (Tipologia Z);
- Cemento con aggregati di dimensioni centimetriche (Tipologia W).

Qui di seguito viene riportata in maniera schematica e con le scale indicate, la distribuzione delle tipologie trovate all'interno dei muraglioni d'argine del Lungarno degli Acciaiuoli e del Lungarno delle Grazie.

La posizione di ogni foro/carota è stata riportata considerando la posizione del centro foro dal parapetto (P) e, per il lungarno degli Acciaiuoli dal centro foro al muro limitrofo a Ponte Vecchio (PV); per il Lungarno delle Grazie, dal centro del foro allo spigolo del muraglione a destra (DX) lato Ponte San Niccolò (Figure 31, 32).

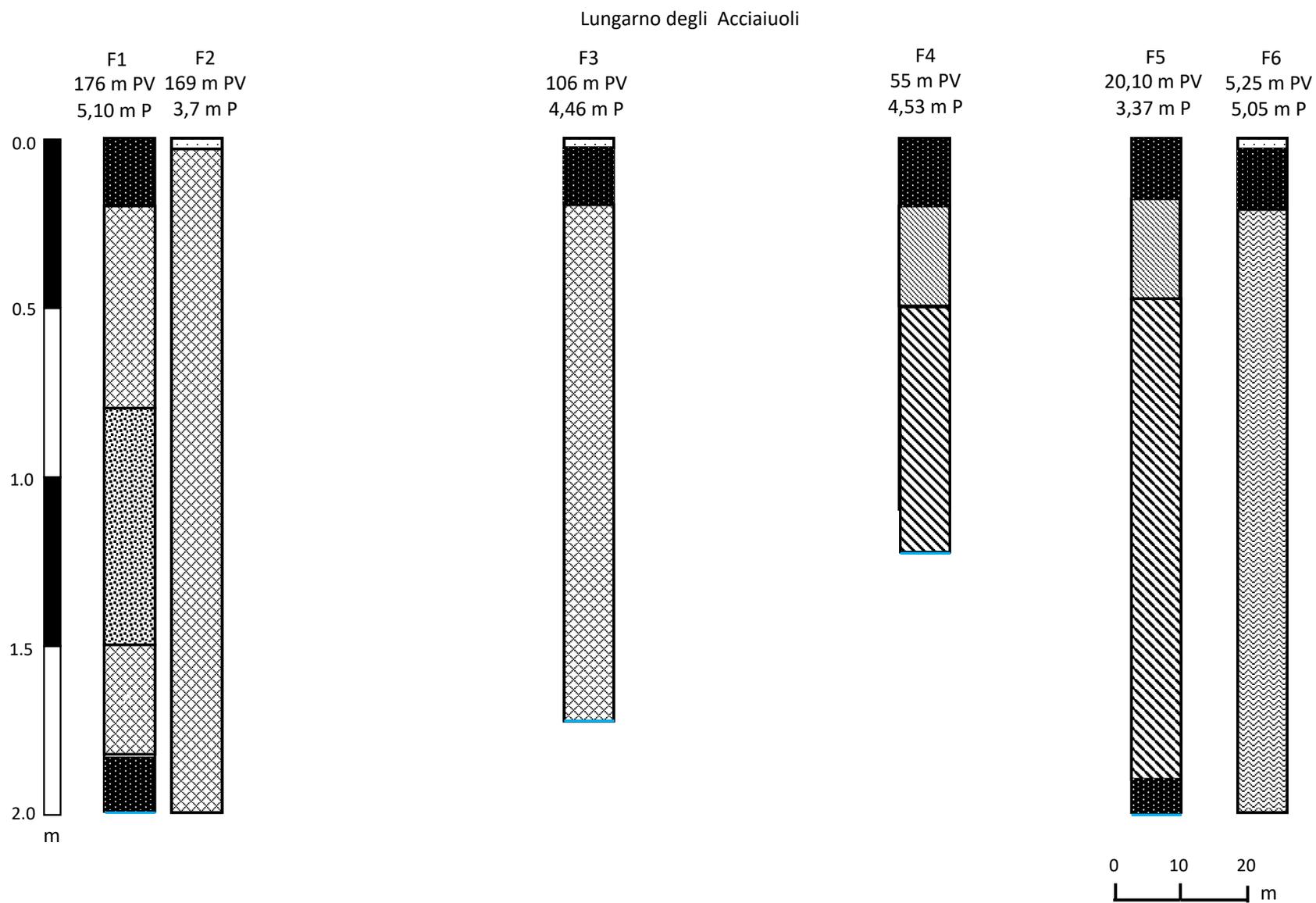


Figura 31- Schema della distribuzione delle tipologie di muratura all'interno del muro d'argine del Lungarno degli Acciaiuoli.

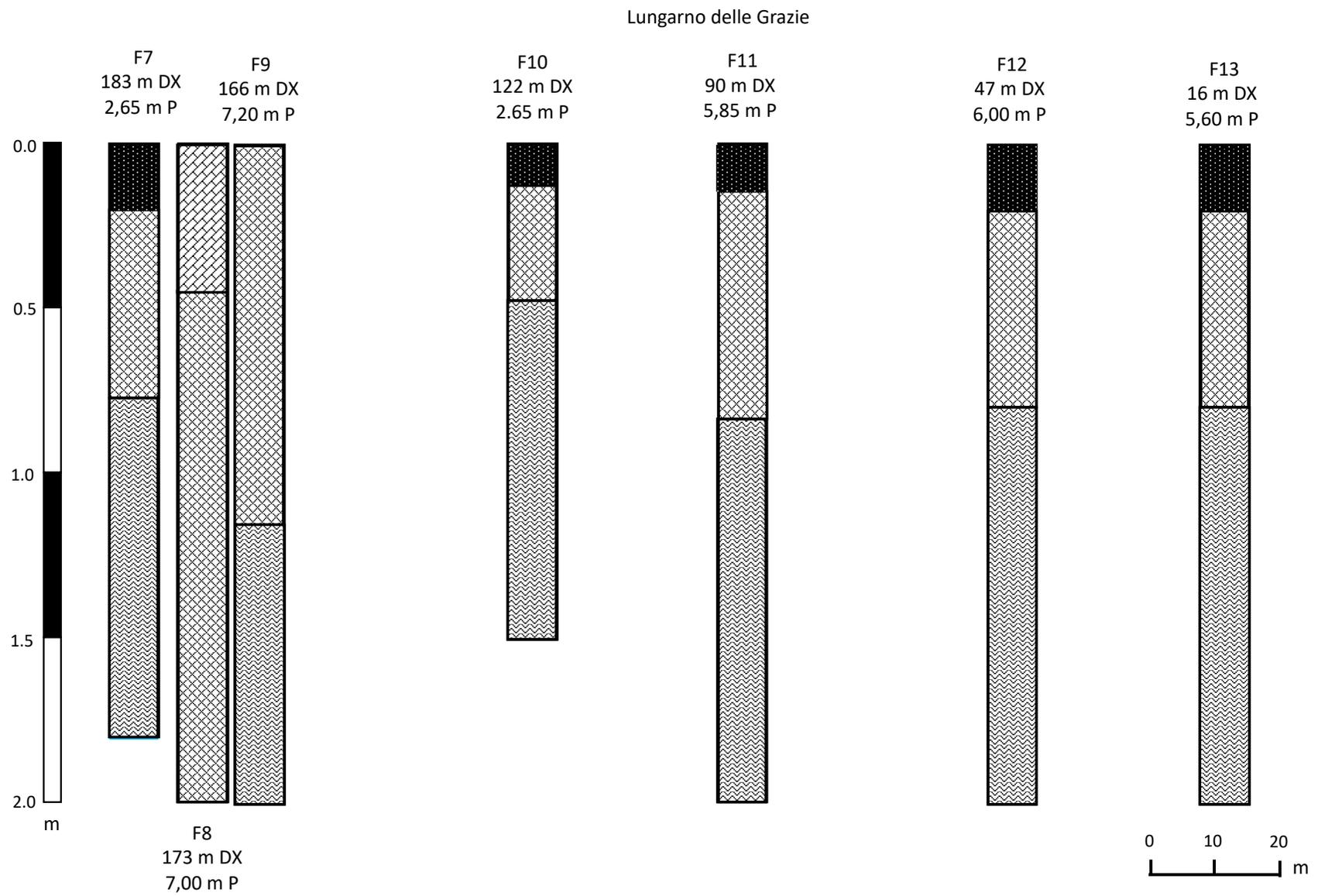


Figura 32- Schema della distribuzione delle tipologie di muratura all'interno del muro d'argine del Lungarno delle Grazie.

3 Estratto delle analisi minero-petrografiche

Si riportano qui di seguito i risultati ottenuti dalla Dott.ssa Emma Cantisani nel suo report: *“Indagini mineralogiche e petrografiche su campioni estratti da carote provenienti dai lungarni fiorentini”*, ritenute necessarie e imprescindibili per la completa caratterizzazione degli apparecchi murari d’argine del Lungarno degli Acciaiuoli e del Lungarno delle Grazie.

Le indagini minero-petrografiche descrivono le malte quindi la sola porzione di miscela costituita da legante (calce), aggregati fini.

Le analisi sono state condotte sui seguenti campioni (in Tabella 2), prelevati nei punti indicati in rosso negli schemi riportati nel paragrafo 3.3.

Tabella 2 – Elenco dei campioni del Lungarno degli Acciaiuoli (evidenziati in azzurro) e delle Grazie, analizzati dal CNR-ISPC e relativa corrispondenza con le tipologie individuate da UNIFI-LAM, descritte nel paragrafo 3.3.

Carota	Descrizione dei campioni	Tipologia
F2	Campione F2A : porzione fine ad una profondità di 80-85 cm nella carota	F2-X
F2BIS	Campione F2BIS : porzione fine ad una profondità di 2.50-2.55 m nella carota	F2bis-Y
F3	Campione F3A : porzione fine ad una profondità di 1.30-1.35 m nella carota	F3-X
F5	Campione F5A : porzione fine ad una profondità di 50-55 cm nella carota	F5-Z
	Campione F5B : porzione fine ad una profondità di 1.06-1.10 m nella carota	F5-W
F6	Campione F6A : porzione fine ad una profondità di 63-65 cm nella carota	F6-Y
F7	Campione F7B : porzione fine ad una profondità di 58-61 cm nella carota	F7-X
	Campione F7C : porzione fine ad una profondità di 1.16-1.18 m nella carota	F7-Y
F10	Campione F10A : porzione fine ad una profondità di 32-36 cm nella carota	F10-X
	Campione F10B : porzione fine ad una profondità di 53-55 cm nella carota	F10-Y
	Campione F10C : porzione fine ad una profondità di 1.00-1.02 m nella carota	F10-Y
F11	Campione F11A : porzione fine ad una profondità di 67-70 cm nella carota	F11-X
F13	Campione F13A : porzione fine ad una profondità di 30-36 cm nella carota	F13-X
	Campione F13B : porzione fine ad una profondità di 1.52-1.56 m nella carota	F13-Y

L'osservazione delle sezioni sottili dei campioni mediante la microscopia ottica a luce trasmessa ha permesso l'analisi dei principali parametri tessiturali-composizionali delle malte, considerando la parte di legante e di aggregato.

Le analisi diffrattometriche sono state effettuate per individuare la composizione mineralogica dei campioni, valutando la componente di legante e di aggregato (Tabella 3).

Tabella 2 – Sintesi risultati analisi minero-petrografiche.

Carota	Analisi petrografiche	Analisi mineralogiche
F2A	Il legante è caratterizzato dalla presenza di grumi riferibili a resti di cottura del Calcare Alberese, tipici di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità medio alta.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F2BIS	Il legante è caratterizzato dalla presenza di grumi riferibili a resti di cottura del Calcare Alberese, tipici di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato abbondante a composizione eterogenea. Macroporosità medio alta.	Quarzo, plagioclasti, k-feldspati, calcite, miche e minerali argillosi.
F3A	Il legante è caratterizzato dalla presenza di grumi riferibili a resti di cottura del Calcare Alberese, tipici di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità medio alta.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F5A	Il legante è idraulico. Aggregato abbondante a composizione eterogenea. Macroporosità scarsa.	Quarzo, plagioclasti, calcite, muscovite in tracce e gesso.
F5B	Il legante è idraulico. Aggregato molto abbondante a composizione eterogenea. Macroporosità scarsa.	Quarzo, plagioclasti, k-feldspati, calcite, muscovite e gesso.
F6	Il legante è tipico di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato abbondante a composizione eterogenea. Macroporosità medio alta.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F7B	Il legante è caratterizzato dalla presenza di grumi riferibili a resti di cottura del Calcare Alberese, tipici di una tecnologia di confezionamento tradizionale. Aggregato abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità intermedia.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F7C	Il legante è caratterizzato dalla presenza di grumi riferibili a resti di cottura del Calcare Alberese, tipici di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato abbondante a composizione eterogenea. Macroporosità intermedia.	Quarzo, plagioclasti, k-feldspati, calcite, miche e minerali argillosi.
F10A	Il legante è tipico di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità intermedia.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F10B	Il legante è tipico di una tecnologia di confezionamento tradizionale. Aggregato abbondante a composizione prevalentemente eterogenea. Macroporosità elevata.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.

F10C	Il legante è tipico di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato molto abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità elevata.	Quarzo, plagioclasti, k-feldspati, calcite, miche e minerali argillosi.
F11A	Il legante è tipico di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato molto abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità intermedia.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F13A	Il legante è tipico di una tecnologia di confezionamento tradizionale. La tessitura del legante risulta fortemente ricristallizzata. Aggregato molto abbondante a composizione prevalentemente silicatica. Macroporosità medio alta.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi.
F13B	Il legante è caratterizzato dalla presenza di grumi riferibili a resti di cottura del Calcare Alberese, tipici di una tecnologia di confezionamento tradizionale. Aggregato abbondante a composizione prevalentemente. Macroporosità intermedia.	Quarzo, plagioclasti, calcite, miche e minerali argillosi, silicati idrati di calcio

Dai risultati delle analisi minero-petrografiche si osserva quanto segue:

- l'abbondanza di aggregato: si tratta infatti di malte molto magre, in cui il quantitativo di legante è ridotto e predomina la frazione dell'aggregato;
- la presenza in alcuni campioni di grumi di Calcare Alberese fa ipotizzare l'uso di questo materiale come pietra da calce. In base al contenuto di minerali argillosi presenti in questo litotipo, impiegato per il confezionamento di malte, si sviluppano diverse caratteristiche meccaniche: maggiore è il contenuto dei minerali argillosi e migliori saranno le loro prestazioni;
- le carote appaiono realizzate a partire da un legante idraulico probabilmente naturale, ottenuto cioè dalla cottura di calcari marnosi con l'aggiunta di un aggregato di composizione prevalentemente silicatica, ben selezionato e con granulometria variabile da campione a campione;
- la carota F5 estratta dal Lungarno degli Acciaiuoli presenta, diversamente dalle altre, un legante idraulico moderno (cemento).

4 Metodologie analitiche e risultati

4.1 Campionamento

Dalle carote descritte nel paragrafo 3.3, sono stati selezionati i campioni al fine di effettuare le prove fisico-meccaniche, seguendo le indicazioni delle normative di riferimento.

In particolare:

- Per le prove ultrasoniche e sclerometriche sono stati ottenuti provini cilindrici con rapporto altezza/diametro di 1:2,5 (ALLEGATO A), considerando un diametro di 5 cm e un'altezza di 12,5 cm; i campioni sono rappresentativi delle diverse tipologie denominate X, Y, Z e W, considerando sia la parte del pietrisco che della malta. Successivamente tali campioni sono stati ulteriormente tagliati per ottenere cilindrici con rapporto 1:1 ed effettuare le prove di compressione uniassiale.
- Per le prove fisiche, assorbimento totale, sono stati ricavati provini di circa 2 x 2 x 2 cm selezionando, dove possibile, la sola frazione di malta.
- Per le prove fisiche, assorbimento capillare, sono stati ricavati provini cilindrici di diametro pari a 5 cm e spessore pari a 2 cm (ALLEGATO B); i campioni sono rappresentativi delle diverse tipologie di murature individuate denominate X, Y, Z e W, considerando sia la parte del pietrisco che della malta.

4.2 Prove meccaniche

L'obiettivo delle prove meccaniche è quello di conoscere il comportamento meccanico e le caratteristiche di resistenza, deformabilità del materiale, di individuare la presenza di difetti interni e disomogeneità, che dipendono dal contributo dei singoli costituenti la struttura muraria stessa.

Lo studio del comportamento meccanico dei materiali costituenti le murature dei lungarni è stato effettuato attraverso:

- indagine ultrasonica;
- indagine sclerometrica;
- prove a compressione uniassiale.

Inoltre, è stato determinato il rapporto legante/aggregato macroscopico per stimare la quantità di malta, pietrisco e vuoti presenti nei campioni analizzati per le prove meccaniche.

4.2.1 Ultrasuoni

Principi teorici

La strumentazione ad ultrasuoni è ampiamente diffusa per la caratteristica di fornire risultati accurati in tempo reale e di individuare difetti localizzati all'interno di un campione. Esse si basano sul principio che esiste una relazione tra la velocità del suono in un mezzo elastico, e le proprietà meccaniche del mezzo stesso come la densità, il modulo elastico e il coefficiente di Poisson.

La banda di frequenze normalmente utilizzate nei test non distruttivi con ultrasuoni è compresa tra 100KHz e 50MHz. Il metodo si basa sull'emissione, da parte di un trasduttore, di un impulso ad ultrasuoni all'interno del materiale per contatto, l'impulso generato si propaga attraverso il materiale da esaminare con la stessa frequenza del generatore, e con velocità che dipende dal materiale attraversato.

Attualmente tutti gli strumenti rivelatori d'ultrasuoni si compongono di due parti: il generatore che invia il segnale nel materiale da esaminare, e il rivelatore che riceve, amplifica, filtra e visualizza i segnali che ritornano alla sonda dopo la propagazione.

L'efficacia del test migliora in base alla morfologia del pezzo da esaminare, ovvero dalla presenza di superfici piane e di piani paralleli; si utilizza un gel ultrasonico per aumentare l'adesione tra la sonda e il campione. Il valore misurato in un test a ultrasuoni è il tempo di volo, ovvero il tempo impiegato dal suono per attraversare il campione. A partire dal tempo di volo (t) e dello spessore del materiale (L) può essere misurata la velocità dell'onda (v).

$$v = \frac{L}{t} \text{ (m/s)}$$

Le tecniche non distruttive ad ultrasuoni sono utilizzate nella caratterizzazione dei difetti all'interno dei materiali lapidei naturali ed artificiali; in particolare, permette di individuare le caratteristiche fisiche e meccaniche anche di campioni eterogenei.

Nel caso in esame le indagini sono state condotte con lo strumento IMG 5200 CSD. Lo strumento utilizza due antenne a bassa frequenza 50 kHz, queste sono calibrate utilizzando una barra standard con un fattore di calibrazione a 52,8 μm .

La metodologia della prova prevede che i trasduttori siano tenuti sulle superficie in esame, seguendo la modalità di trasmissione diretta (Figura 33), ovvero posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le indagini ultrasoniche sono state condotte sui campioni cilindrici preparati per le prove meccaniche (descritti al Paragrafo 4), individuando tre percorsi di misura (01, 02, 03): uno lungo l'asse centrale del cilindro e gli altri due in direzione perpendicolare ad esso, eseguendo in questi ultimi due punti due misure incrociate (direzione AD e direzione BC), schematizzate in Figura 33.

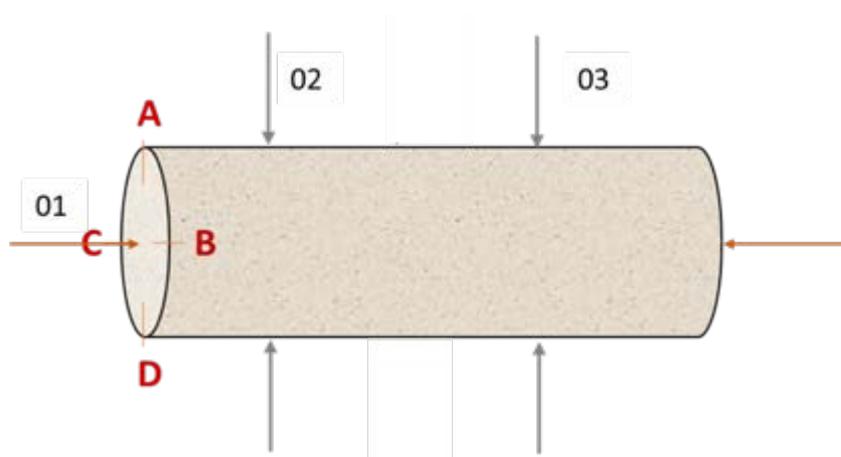


Figura 33 – Metodi di misura ultrasuoni in trasmissione diretta.

Risultati

Le prove ultrasoniche sono state effettuate nei 3 percorsi di misura, schematizzate in Figura 33. I risultati delle analisi sono mostrati in Tabella 4, dove si riporta la velocità media nei punti indagati.

Tabella 4– Velocità ultrasoniche dei campioni dei Lungarni degli Acciaiuoli (evidenziate in azzurro) e delle Grazie.

Campione	Velocità Ultrasoniche (m/s)		
	1	2	3
F1-X1	3548	2173	2658
F1-X2	3453	2345	2265
F2bis-X1	4370	4049	3502
F2bis-X2	3423	3429	2302
F2bis-Y1	2991	3080	2534
F2bis-Y2	3519	2726	3155
F2-X1	3645	3507	3038
F2-X2	3981	3223	3205
F3-X1	4039	1664	1752
F3-X2	3184	2129	1752
F4-Z1	3595	3333	3140
F5-Z1	3594	3367	3244
F5-W1	3536	3465	3273
F5-W2	3362	3305	3450
F6-Y1	4386	3117	2902
F6-Y2	4067	3450	2636
F7-X1	3613	3315	2284
F7-Y1	3367	2697	2324
F8-X1	3916	2530	2294
F8-X2	3427	3267	2505
F9-Y1	3693	2997	3165
F9-Y1	3431	3292	2818
F11-X1	3974	2470	2556
F11-Y1	2752	2275	1991
F11-Y2	3072	2708	2632
F12-Y1	3374	2729	3046
F12-Y2	3585	2756	3189
F13-X1	2656	3147	2651
F13-Y1	3180	2755	2693

Le velocità misurate lungo il percorso 01, attraversando tutto lo spessore del campione, forniscono il dato più rappresentativo. Il valore minimo di velocità è di 2656 m/s, mentre il valore massimo è di 4386 m/s. La grande variabilità di velocità trovate è dovuta alla eterogeneità dei campioni indagati, che sono costituiti in larga parte da frammenti lapidei, come Pietraforte, Pietra Serena e Calcare Alberese, i quali presentano valori ultrasonici con velocità di circa 4500 m/s. Per valutare tale contributo nel paragrafo 5.1.3, sono stati calcolati, per ogni campione indagato, i rapporti tra frammenti lapidei e malta e sono stati correlati con le velocità ultrasoniche lungo il percorso 01.

In generale, i valori registrati indicano un buon grado di coesione del materiale e che l'adesione tra malta e pietrisco è piuttosto elevata.

Lungo i percorsi 02 e 03, come riportato in Tabella 2, il valore minimo di velocità ottenuto è pari a 1664 m/s, mentre il valore massimo è pari a 4049 m/s. Le porzioni caratterizzate da valori di velocità inferiori a 2000 m/s indicano delle zone dove la tenacità o dove l'adesione tra pietrisco e malta sono inferiori. In particolare, i campioni F3-X1 e F3-X2 sono interessati da una frattura che li attraversa in tutta l'altezza, infatti, dalle indagini ultrasoniche svolte lungo i percorsi 02 e 03 si osserva che la velocità è piuttosto bassa (Figura 34).

In Figura 34, sono riportati i valori medi delle velocità misurate lungo i tre percorsi 01, 02 e 03 dei campioni del Lungarno degli Acciaiuoli; mentre in Figura 35 sono mostrati i valori medi delle velocità dei campioni del Lungarno delle Grazie.

Considerando i valori medi delle tipologie di malta individuate nella classificazione, si nota che tutte presentano valori di velocità simili: infatti, i campioni X hanno una velocità ultrasonica pari a 3561 m/s, i campioni Y pari a 3508 m/s, i campioni Z pari a 3594 m/s e i campioni W pari a 3449 m/s.

I test ultrasonici non sono in grado di discriminare il calcestruzzo antico da quello più moderno, poiché sembrerebbe che le loro caratteristiche meccaniche siano le stesse.

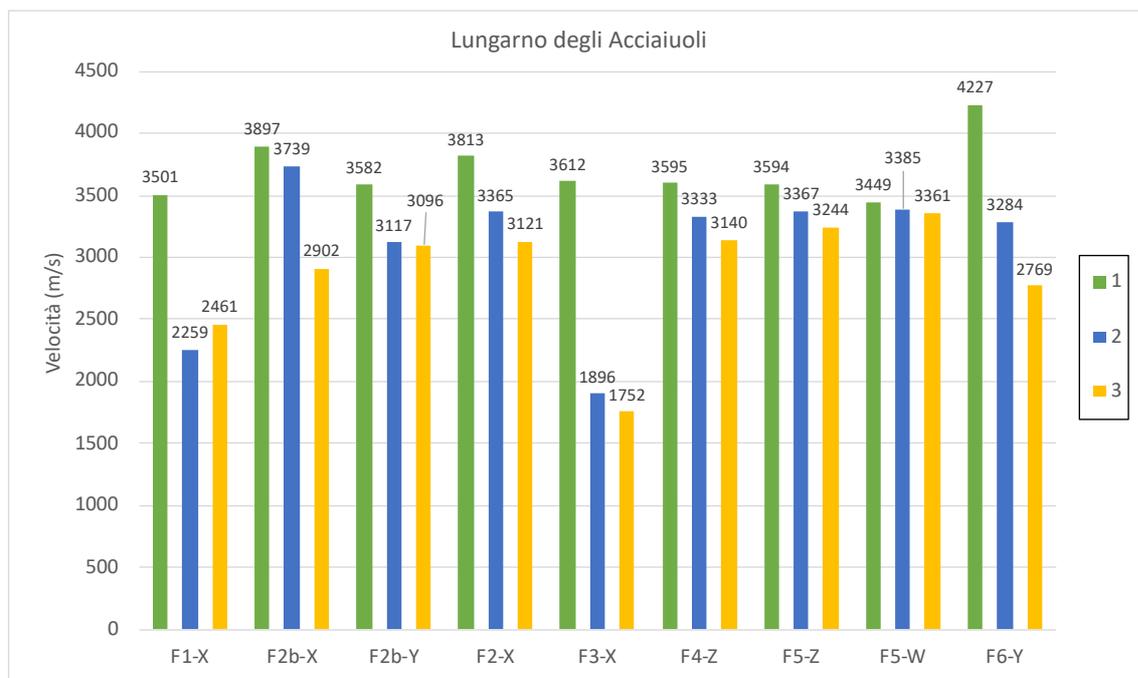


Figura 34- Valori medi delle velocità ultrasoniche nei 3 percorsi di misura 01, 02 e 03 delle carote del Lungarno degli Acciaiuoli.

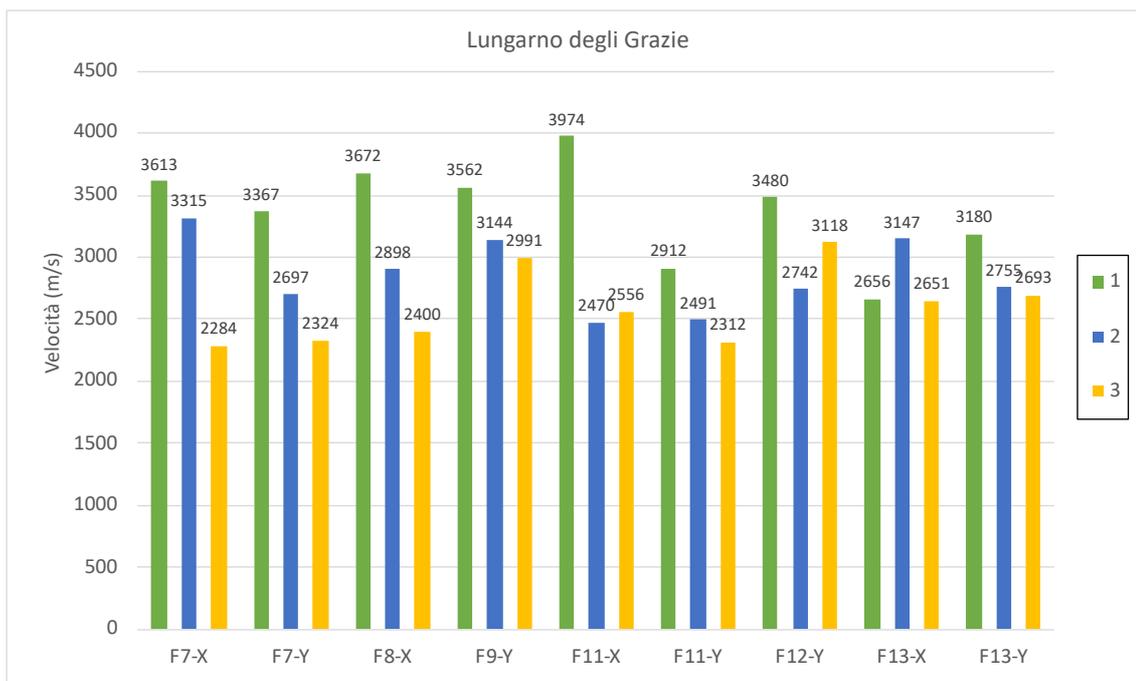


Figura 35- Valori medi delle velocità ultrasoniche nei 3 percorsi di misura 01, 02 e 03 delle carote del Lungarno delle Grazie.

4.2.2 Sclerometro

Principi teorici

Il martello di Schmidt o sclerometro serve per stimare la σ_c (apparente) nella porzione superficiale del campione in esame. Lo strumento è costituito da una massa battente proiettata da una molla contro un'asta metallica di percussione, appoggiata direttamente sul campione in esame. Lo sclerometro utilizzato è di tipo L Geostone della Novatest, con energia di percussione uguale a 0,735 N/m, impiegato per la stima della resistenza a compressione della roccia. Dal rimbalzo elastico della massa (R), funzione della quantità di energia elastica restituita dal materiale su cui viene effettuata la prova, è possibile risalire alla resistenza a compressione del materiale stesso tramite la seguente formula:

$$\sigma_a = 0.0232 \cdot R^{2.2637} \text{ (MPa)}$$

Su ciascuna carota sono state effettuate almeno 6 battute da cui si ricava l'indice di rimbalzo medio, su porzioni di campioni costituiti interamente da malta.

Risultati delle prove sclerometriche

Le prove sclerometriche sono state effettuate sugli stessi campioni indagati per le prove ad ultrasuoni, prendendo in esame solo la porzione di malta ed escludendo il pietrisco. I risultati delle analisi sono mostrati in Tabella 4. L'indice di rimbalzo (R) è compreso tra 14 tra 20, valori coerenti con campioni di malta. Inoltre, in Tabella 5 viene mostrata la resistenza stimata a partire dall'indice di Rimbalzo, indicata con σ_a (MPa).

Si nota che i calcestruzzi moderni (Z, W) presentano Indice di Rimbalzo, e quindi di resistenza, leggermente superiori rispetto alle tipologie X, Y, rappresentanti i calcestruzzi antichi.

Tabella 5 – Indice di Rimbalzo (R) medio dei campioni del Lungarno degli Acciaiuoli e delle Grazie, e i rispettivi valori di resistenza stimata (σ_a).

Campione	Indice di Rimbalzo (R)	σ_a (MPa)
F1-X	16	12
F2-X	18	16
F2b-X	16	12
F2b-Y	14	9
F3-X	14	9
F4-Z	20	20
F5-Z	19	18
F5-W	19	18
F6-Y	18	16
F7-X	16	12
F7-Y	16	12
F8-X	15	11
F9-Y	18	16
F11-X	15	11
F11-Y	17	14
F12-Y	18	16
F13-X	16	12
F13-Y	17	14

4.2.3 Prove a compressione uniassiale

Principi teorici

Questa prova esprime il carico unitario minimo necessario per provocare la rottura di provini di malta opportunamente confezionati, compressi da presse idrauliche. Il carico unitario è definito come la forza applicata all'unità di superficie ortogonale all'asse delle forze agenti. La prova di compressione uniassiale è stata condotta utilizzando una macchina idraulica CONTROLS C250kN, carico max 600 kN, adottando una velocità di carico costante pari a 0,5 MPa/s. Sono stati impiegati dei provini cilindrici di dimensioni di 5 cm di diametro, e 5 cm d'altezza, ottenendo un rapporto 1:1.

La prova consiste nel posizionare il provino tra i piatti di acciaio della pressa aumentando il carico applicato in modo che l'incremento tensione di compressione sia pari a 0,5 Mpa/s. Vengono così misurati la forza applicata dalla pressa F (N) fino a rottura del provino (carico di rottura) e l'area della base del provino a contatto con il piatto della pressa A [mm²], per calcolare la tensione di compressione o sforzo di compressione pari a $\sigma = F/A$ [N/mm² o MPa].

Risultati delle prove a compressione uniassiale

Le prove a compressione sono state effettuate sugli stessi campioni indagati per le prove ad ultrasuoni e sclerometriche. A partire dai cilindri analizzati con tali prove, sono stati ricavati due spezzoni, al fine di migliorare la rappresentatività della prova. I risultati sono mostrati in Tabella 6, dove viene riportato la media dei due valori, caratteristici del calcestruzzo (malta e pietrisco grossolano).

Il valore σ (MPa) è compreso tra 8.2 a 73.2 Mpa. Ad eccezione di qualche campione, come F1-X1, F11-Y1 e F12-X1, i valori sono mediamente elevati ed indicano dei materiali di buona consistenza, la muratura risulta di adeguata resistenza meccanica e la malta presenta buona aderenza alle superfici del pietrisco. In Tabella 6b, sono mostrati i valori medi delle tipologie X, Y, Z, W. Le tipologie X presentano valori mediamente più elevati dei campioni di tipologia Y, questo è dovuto alla presenza di pietrisco grosso che ben ammorsato alla malta rende il calcestruzzo compatto e consistente. In generale si riscontra che le tipologie X e Y presentano dei valori piuttosto variabili, probabilmente dovuti alla diversa selezione del pietrisco, quindi influenzato dal metodo di confezionamento del calcestruzzo. Mentre le tipologie Z e W, mostrano dei valori elevati e omogenei che identificano porzioni murarie realizzate con tecnologie moderne e standard che permettono di avere prestazioni coerenti in tutti i campioni analizzati.

Tabella 6 – a) Valori di sforzo di compressione (σ) dei campioni del Lungarno degli Acciaiuoli e delle Grazie; b) valori medi di σ relativi alle diverse tipologie di muratura presenti in ciascuna carota del Lungarno degli Acciaiuoli e delle Grazie.

a	Campione	σ (MPa)	b	Campione	σ (MPa)
	F1-X1	23.8		F1-X	16.0
	F1-X2	8.2		F2b-X	33.4
	F2b-X1	45.5		F2b-Y	18.8
	F2b-X2	21.3		F2-X	30,8
	F2b-Y1	16.6		F3-X	23,0
	F2b-Y2	20.9		F4-Z	29,3
	F2-X1	30.2		F5-Z	39,7
	F2-X2	31.5		F5-W	36,7
	F3-X2	23.0		F6-Y	38,5
	F4-Z1	29.3		F7-X	19,9
	F5-Z1	39.7		F7-Y	24,1
	F5-W1	38.2		F8-X	45,9
	F5-W2	35.3		F9-Y	15,1
	F6-Y1	31.4		F11-X	24,9
	F6-Y2	45.7		F11-Y	15,2
	F7-X1	19.9		F12-X	12,6
	F7-Y1	24.1		F13-X	20,5
	F8-X1	53,2		F13-Y	12,3
	F8-X2	38,5			
	F9-Y1	17.7			
	F9-Y2	12.6			
	F11-X1	24.9			
	F11-Y1	9.4			
	F11-Y2	21.0			
	F12-X1	9.9			
	F12-X2	15.3			
	F13-X1	20.5			
	F13-Y1	12.3			

4.2.4 Determinazione rapporto malta/pietrisco macroscopico

La determinazione del rapporto malta/pietrisco macroscopico è un metodo per stimare la quantità di malta, pietrisco e vuoti presenti nei campioni analizzati per le prove meccaniche, al fine di individuare il contributo dei vari componenti sui risultati delle prove. La procedura adottata è la seguente:

- elaborazione fotogrammetrica dei campioni, con l'obiettivo di riportare la superficie in 2D;
- riproduzione in scala 1:1 dell'immagine;
- calcolo delle aree occupate da: malta, pietrisco e vuoti;
- calcolo dei valori percentuali di ogni componente rispetto all'area totale.

In Figura 36 viene mostrato un esempio di tale procedura. I campioni identificati con la sigla Z e W non sono stati analizzati in quanto l'aggregato è finemente distribuito nell'impasto e quindi risulta difficile stimarne le componenti.

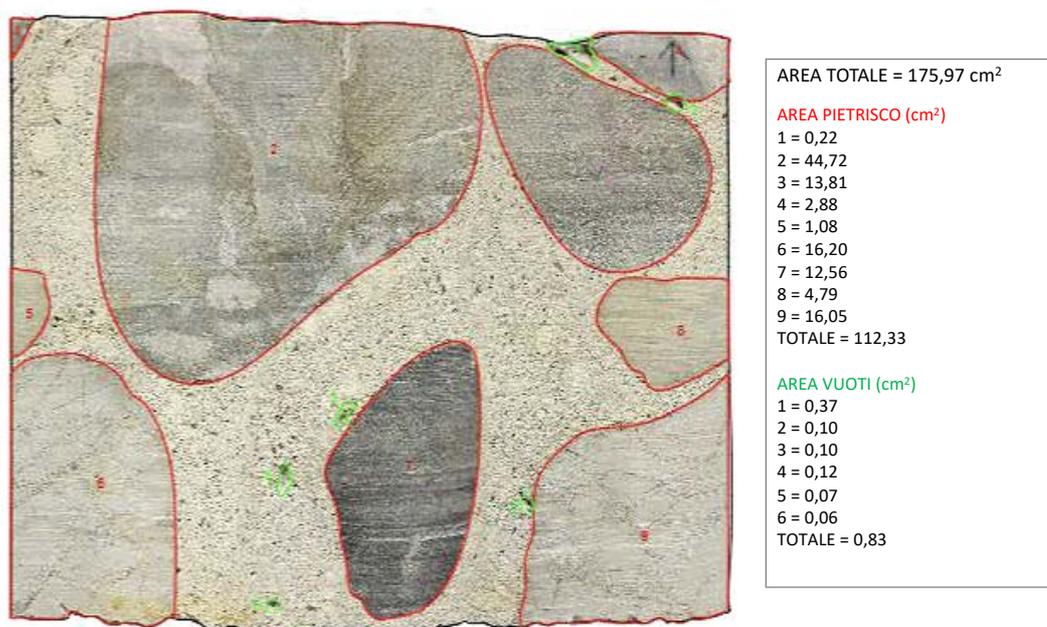


Figura 36 – Esempio di elaborazione grafica per ottenere il rapporto malta/pietrisco macroscopico, ovvero la determinazione della quantità di malta, pietrisco e vuoti presenti nell'intera area.

A partire da questo metodo, sono state ricavate le percentuali di pietrisco, malta e vuoti presenti rispetto all'area totale dei campioni. In Tabella 7, sono riportati tali valori, messi in relazione alle velocità ultrasoniche misurate lungo percorso di misura 01, poiché più rappresentati dell'intero campione.

Si osserva che la quantità di pietrisco e la velocità ultrasonica sono direttamente proporzionali (Figura 37a), mentre la quantità di malta e la velocità sono inversamente proporzionali (Figura 37b).

Per esempio, il campione F2b-X1 mostra un'elevata velocità ultrasonica e questo è in profondo accordo con la percentuale molto alta di pietrisco pari a 76%, quindi la velocità ultrasonica è più rappresentativa del pietrisco. Mentre il caso opposto è rappresentato dal campione F7, dove la velocità ultrasonica è inferiore, infatti la sua % di Pietrisco è pari a 39: questo indica che la velocità è più rappresentativa della componente malta. In ogni caso, come già detto nel paragrafo 5.2.1, i

campioni presentano valori di velocità ultrasoniche piuttosto elevati, a conferma che l'adesione tra la superficie di malta e pietrisco non costituisce un punto di debolezza della muratura.

Tabella 7 – Rapporto malta/pietrisco macroscopico confrontato con i valori di velocità ultrasonica e di sforzo di compressione ottenuti dai campioni dei Lungarni degli Acciaiuoli e delle Grazie.

Campioni	% Pietrisco	% Malta	% Vuoti	Velocità (m/s)	σ (MPa)
F1-X1	54	38	8	3548	23.8
F1-X2	47	51	2	3453	8.2
F2-X1	64	36	0	3645	45.5
F2-X2	55	45	0	3981	21.3
F2b-X1	76	23	1	4370	16.6
F2b-X2	60	35	5	3423	20.9
F2b-Y1	53	46	1	2991	30.2
F2b-Y2	48	51	1	3519	31.5
F3-X1	57	35	8	4039	-
F3-X2	50	46	4	3184	23.0
F6-Y1	53	46	1	4386	29.3
F6-Y2	68	32	0	4067	39.7
F7-Y1	39	61	1	3367	38.2
F7-X1	63	37	0	3613	35.3
F8-X1	57	41	2	3916	31.4
F8-X2	59	41	2	3427	45.7
F9-Y1	38	62	0	3693	19.9
F9-Y2	54	46	0	3431	24.1
F11-X1	38	62	0	3974	73.2
F11-Y1	12	88	3	2752	18.5
F11-Y2	15	85	2	3072	17.7
F12-Y1	35	65	1	3374	12.6
F12-Y2	54	46	1	3585	24.9
F13-X1	35	65	0	2656	9.4
F13-Y1	25	75	0	3180	21.0

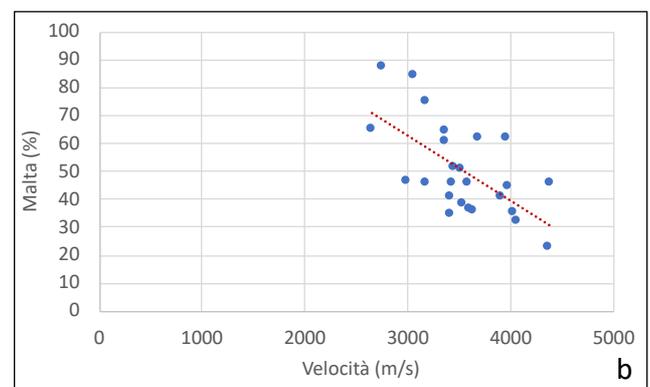
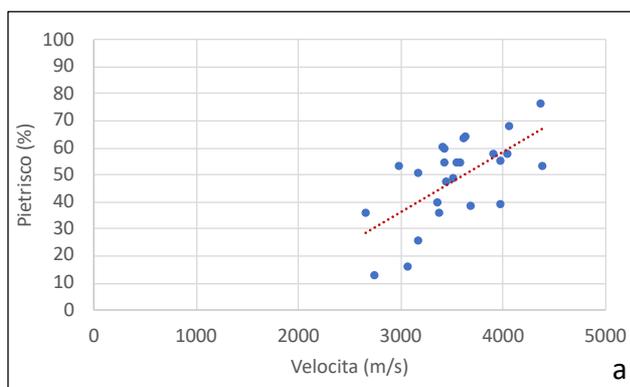


Figura 37 – Grafico che mette in relazione la velocità ultrasonica dei campioni in funzione alla percentuale di pietrisco (a) e di malta (b).

Allo stesso modo, se si confronta il valore di sforzo di compressione con la percentuale di malta e pietrisco si ottiene la stessa relazione (Figura 38).

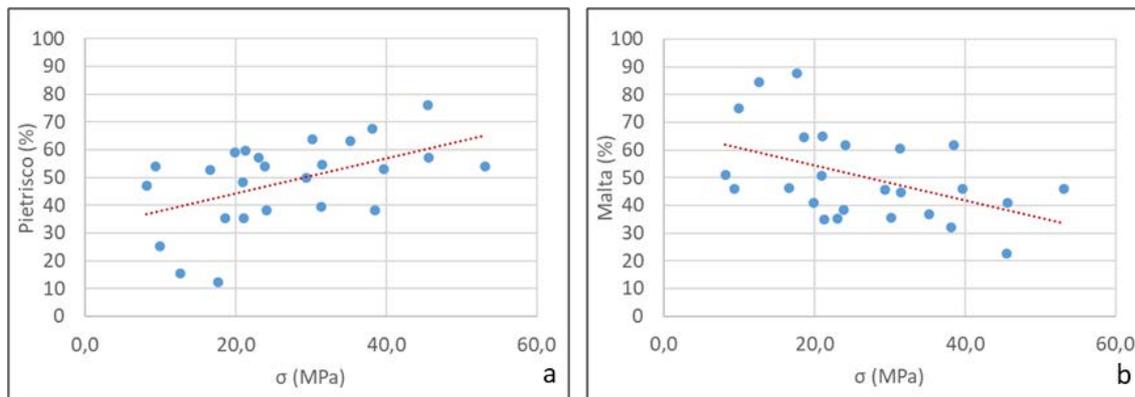


Figura 38 – Grafico che mette in relazione il valore di sforzo di compressione dei campioni in funzione alla percentuale di pietrisco (a) e di malta (b).

4.3 Prove fisiche

La determinazione della porosità e dell'assorbimento dell'acqua sono di fondamentale importanza nello studio dei materiali lapidei naturali e artificiali. La misura di assorbimento può essere effettuata attraverso varie metodologie, quali, nel caso in oggetto, il metodo per immersione totale con l'utilizzo della bilancia idrostatica e il metodo dell'assorbimento per capillarità.

4.3.1 Prove di assorbimento totale

Principi teorici

La misura della porosità accessibile all'acqua è stata eseguita su 3 campioni di ogni porzione di carota, selezionando il più possibile la frazione di malta, di dimensioni 2 x 2 x 2 cm. Questi sono stati posti in essiccatore fino al raggiungimento del peso secco (una settimana a 60°C). Una volta raggiunto il peso secco (P_s), i provini vengono pesati, successivamente introdotti e completamente immersi in un cristallizzatore contenente acqua deionizzata. I campioni sono stati estratti dopo una settimana, e pesati mediante bilancia idrostatica Mettler Toledo Balance modello AG, ricavando:

- il peso idrostatico (P_i), ottenuto posizionando il campione sul cestello della bilancia (immerso in acqua demineralizzata);
- il peso bagnato (P_b), ottenuto estraendo il campione dal cestello, tamponandolo con pelle di daino per eliminare la pellicola d'acqua superficiale e posizionandolo sul piatto della bilancia idrostatica.

Dal rapporto tra questi pesi è possibile ricavare tre grandezze fondamentali per lo studio dei materiali lapidei artificiali e del loro comportamento in acqua:

1) la porosità aperta all'acqua (P_o) che è espressa come il rapporto percentuale tra il volume dei soli pori aperti (V_{va}), appartenenti alla classe dei macro e meso-pori, e il volume apparente (V_a), volume che si ottiene tramite la bilancia idrostatica considerando la densità dell'acqua pari a 1.

$$P_o = \frac{V_{va}}{V_a} * 100 = \frac{P_b - P_s}{P_b - P_i} * 100 (\%)$$

2) Il coefficiente di imbibizione, definito come il rapporto tra l'aumento di massa per immersione totale in acqua del campione fino alla saturazione e la sua massa allo stato asciutto.

$$CI = \frac{P_b - P_s}{P_s} * 100 (\%)$$

Il coefficiente dipende dalla porosità, in quanto la maggiore quantità di pori permette un ampio accesso all'acqua, e dalla tipologia e le dimensioni di essi.

3) La densità (ρ)

$$\rho = \frac{P_b}{P_b - P_s} (g/cm^3)$$

Risultati delle prove d'assorbimento totale

Nelle Tabella 8 e 9 sono riportati i valori di peso secco (Ps) peso bagnato (Pb), peso idrostatico (Pi) misurati sui campioni 2 x 2 x 2 cm utilizzati per le prove di assorbimento totale dei campioni del Lungarno degli Acciaiuoli e del Lungarno delle Grazie. Da essi sono stati calcolati i valori di porosità aperta all'acqua (Po), del coefficiente di imbibizione in peso (CI) e della densità (ρ), ottenuti attraverso l'utilizzo della bilancia idrostatica. I campioni sono stati suddivisi per tipologia di muratura considerando le descrizioni macroscopiche riportate nel paragrafo 3.3. Per tutti i campioni analizzati è stata effettuata anche una breve descrizione per individuare se i campioni sono rappresentativi della malta o anche del pietrisco presente.

Tabella 8 – Risultati prova assorbimento totale dei campioni del Lungarno degli Acciaiuoli.

	F1-X1	F1-X2	F1-X3	F2-X1	F2-X2	F2-X3
Descrizione	poco pietrisco	solo malta				
Ps (g)	10.92	11.19	9.14	10.34	11.50	8.74
Pb (g)	13.49	13.45	11.58	12.47	14.03	11.38
Pi (g)	6.67	6.71	5.41	5.86	6.56	4.99
ρ (g/cm³)	1.98	1.99	1.88	1.89	1.88	1.78
Po (%)	37.73	33.52	39.60	32.23	33.89	41.31
CI (%)	23.57	20.20	26.73	20.58	22.00	30.18
	F2bis-X1	F2bis-X2	F2bis-X3	F2bis-Y1	F2bis-Y2	F2bis-Y3
Descrizione	poco pietrisco	con pietrisco	solo malta	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco
Ps (g)	12.32	8.67	4.47	13.56	12.50	15.70
Pb (g)	14.60	10.21	5.34	14.82	14.58	16.84
Pi (g)	7.21	5.18	2.63	8.36	7.59	9.76
ρ (g/cm³)	1.97	2.03	1.97	2.29	2.08	2.37
Po (%)	30.84	30.73	31.95	19.4	29.83	16.05
CI (%)	18.51	17.82	19.31	9.23	16.68	7.23
	F3-X1	F3-X2	F3-X3	F4-Z1	F4-Z2	F4-Z3
Descrizione	con pietrisco	poco pietrisco	con pietrisco	con aggregati	con aggregati	con aggregati
Ps (g)	14.32	13.87	12.88	10.94	9.18	8.41
Pb (g)	15.48	15.94	14.76	11.88	10.07	9.11
Pi (g)	8.83	8.17	7.54	6.58	5.50	5.15
ρ (g/cm³)	2.32	2.05	2.04	2.24	2.20	2.29
Po (%)	17.46	26.65	26.12	17.75	19.41	17.69
CI (%)	8.11	14.94	14.66	8.60	9.66	8.34
	F5-Z1	F5-Z2	F5-Z3	F5-W1	F5-W2	F5-W3
Descrizione	solo malta	solo malta	solo malta	con aggregati	con aggregati	con aggregati
Ps (g)	13.07	17.29	9.83	16.85	12.35	12.91
Pb (g)	14.00	18.45	10.57	18.03	13.03	13.78
Pi (g)	7.49	9.86	5.66	10.2	7.58	7.89
ρ (g/cm³)	2.15	2.15	2.15	2.3	2.39	2.33
Po (%)	14.29	13.58	15.11	15.07	12.45	14.79
CI (%)	7.11	6.75	7.56	7.00	5.49	6.75

	F6-Y1	F6-Y2	F6-Y3
Descrizione	solo malta	con pietrisco	con pietrisco
Ps (g)	7.58	8.77	10.61
Pb (g)	9.08	10.21	11.95
Pi (g)	4.56	5.30	6.41
ρ (g/cm³)	2.01	2.07	2.15
Po (%)	33.16	29.31	24.12
CI (%)	19.75	16.43	12.59

Tabella 9 – Risultati prova assorbimento totale dei campioni del Lungarno delle Grazie.

	F7-Y1	F7-Y2	F7-Y3	F8-X1	F8-X2	F8-X3
Descrizione	solo malta	solo malta	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco
Ps (g)	9.943	5.876	11.245	11.1	9.738	13.015
Pb (g)	11.153	6.720	12.0317	12.803	11.970	14.307
Pi (g)	5.789	3.359	6.773	6.767	5.886	8.070
ρ (g/cm³)	2.075	2.000	2.283	2.117	1.945	2.290
Po (%)	22.554	25.104	14.959	28.210	36.692	20.716
CI (%)	12.167	14.360	6.996	15.340	22.924	9.927
	F9-Y1	F9-Y2	F9-Y3	F10-X1	F10-X2	F10-X3
Descrizione	solo malta	con pietrisco	solo malta	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco
Ps (g)	16.616	12.011	13.241	11.169	15.476	13.583
Pb (g)	19.407	13.876	15.3027	12.827	17.849	16.0916
Pi (g)	10.172	7.413	8.146	4.917	10.081	7.863
ρ (g/cm³)	2.098	2.143	2.134	2.145	2.203	2.084
Po (%)	30.225	28.859	28.808	20.961	30.545	30.485
CI (%)	16.799	15.530	15.571	14.845	15.332	18.469
	F11-X1	F11-X2	F11-X3	F11-Y1	F11-Y2	F11-Y4
Descrizione	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco	solo malta	con pietrisco	con pietrisco
Ps (g)	13.805	7.650	6.325	11.996	12.243	11.445
Pb (g)	15.047	8.892	7.9013	14.130	15.129	12.9433
Pi (g)	10.986	4.686	3.781	6.933	7.056	6.7888
ρ (g/cm³)	2.056	2.110	1.914	1.960	1.871	2.099
Po (%)	30.584	29.537	38.258	29.649	35.747	24.345
CI (%)	8.997	16.239	24.922	17.786	23.569	13.091
	F12-Y1	F12-Y2	F12-Y3	F13-X1	F13-X3	F13-X4
Descrizione	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco	con pietrisco	solo malta	solo malta
Ps (g)	17.131	15.476	15.424	9.439	9.018	8.732
Pb (g)	18.677	17.380	17.564	10.748	10.8126	10.1791
Pi (g)	11.695	10.081	9.827	5.425	5.108	4.9052
ρ (g/cm³)	2.120	2.103	2.097	2.015	1.892	1.927
Po (%)	22.148	26.085	27.659	24.591	31.456	27.439
CI (%)	9.027	12.303	13.874	13.868	19.900	16.572

Nella Figura 39 sono mostrati i valori medi di densità, di porosità aperta e del coefficiente di imbibizione in peso ottenuti per ogni campione prelevato dalle carote del Lungarno degli Acciaiuoli.

Si nota che la densità media è simile per tutti i campioni ed è una densità tipica delle malte.

Per quanto riguarda la porosità aperta, si nota che la muratura definita “malta con pietrisco grosso rotondo” Tipo X, rappresentante i campioni F1-X, F2-X, F2bis-X e F3-X, varia da un valore minimo di 23,41% a 36,95%, ed è molto maggiore rispetto ai campioni di cemento, sia con aggregati centimetrici (F4-W e F5-W), che con aggregati millimetrici (F5-Z), i quali presentano valori di porosità aperta tra il 14,10% e 18,28%. Il campione F6-Y sembra macroscopicamente composto da malta con pietrisco rotondo simile alla tipologia presente nel campione F2bis-Y, la loro porosità aperta è 28,87% e 21,76%, rispettivamente.

Lo stesso comportamento si osserva per il coefficiente di imbibizione, i campioni F1-X, F2-X, F2bis-X e F3-X presentano CI maggiori, mentre i campioni costituiti da cemento e aggregati F4-W, F5-Z e F5-W molto inferiori. Il comportamento dei campioni F6-Y e F2bis-Y è simile a quello dei campioni di Tipo Y.

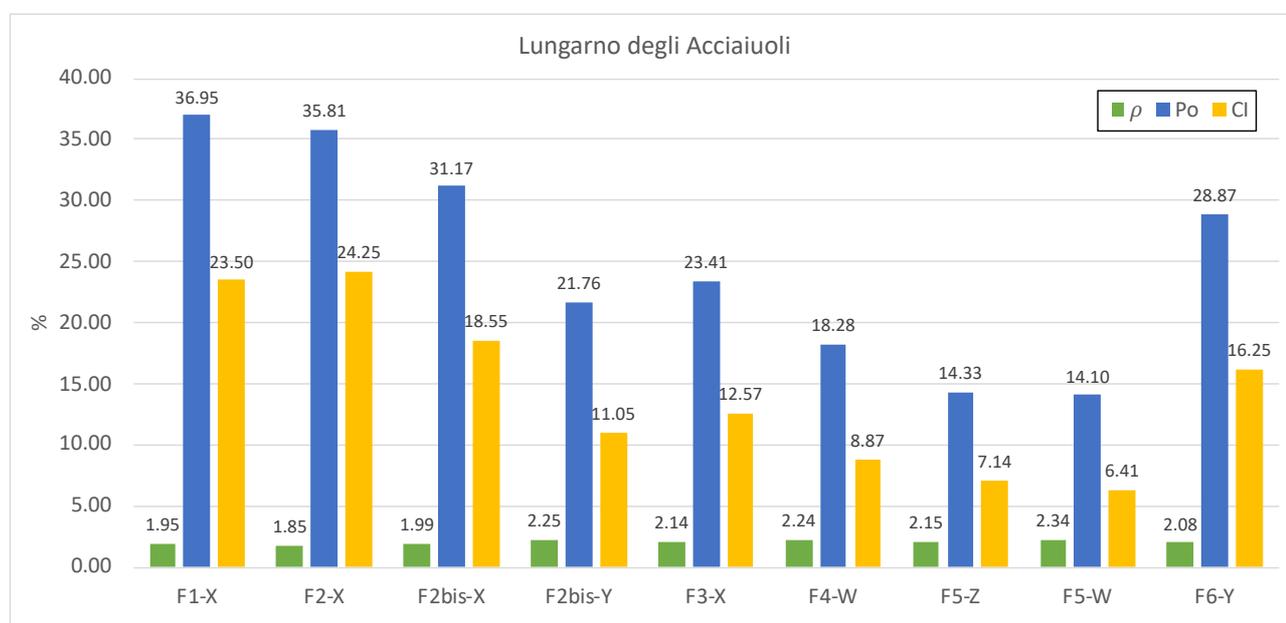


Figura 39 – Valori medi di densità, di porosità aperta e coefficiente di imbibizione in peso, campioni Lungarno degli Acciaiuoli.

Nella Figura 40 sono mostrati i valori medi di densità, di porosità aperta e del coefficiente di imbibizione in peso ottenuti per ogni campione prelevato dalle carote del Lungarno delle Grazie.

Si nota che la densità media è simile per tutti i campioni ed è una densità tipica delle malte.

Per quanto riguarda la porosità aperta, si nota che la muratura definita “malta con pietrisco grosso rotondo” Tipo X, rappresentante i campioni F8-X, F10-X, F11-X e F13-X, varia da un valore minimo di 25,83% a 28,54%. I valori sono simili a quelli dei campioni rappresentanti la muratura di Tipo Y, come i campioni F7-Y, F9-Y, F11-Y, F12-Y i quali sono composti da malta con pietrisco rotondo ma comunque la malta di base sembra essere la stessa.

Lo stesso comportamento si osserva per il coefficiente di imbibizione, i campioni F1-X, F2-X, F2bis-X e F3-X F1-X, F2-X, F2bis-X e F3-X hanno comportamento simile ai campioni F7-Y, F9-Y, F11-Y, F12-Y.

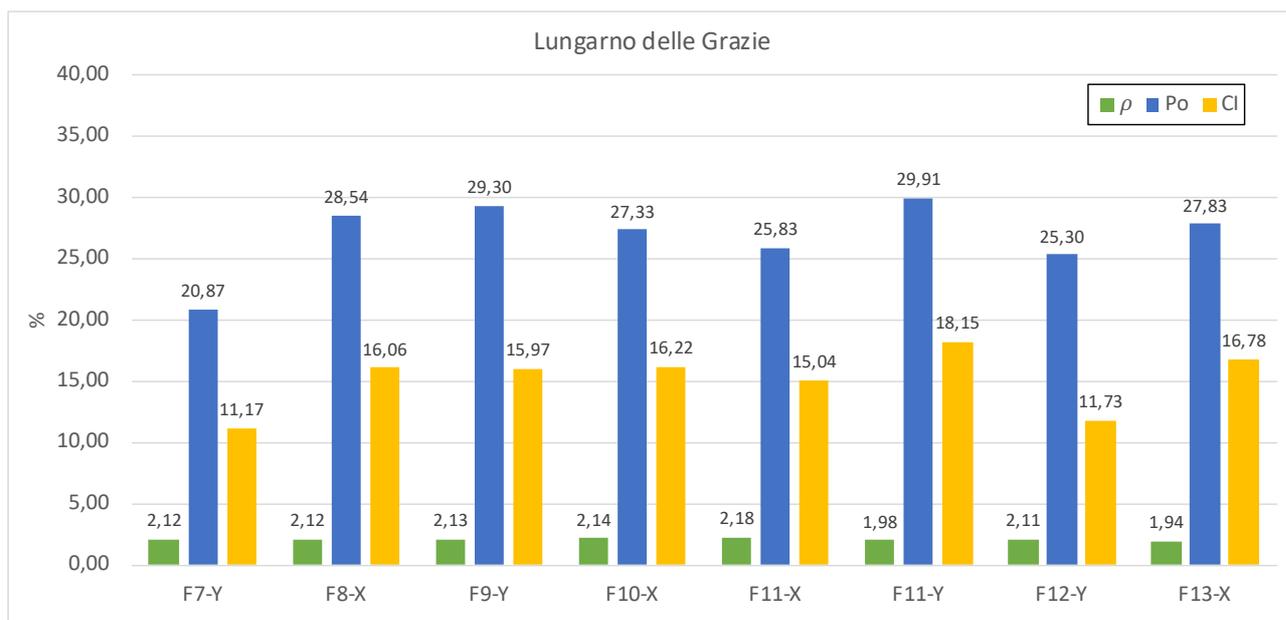


Figura 40 – Valori medi di densità, di porosità aperta e coefficiente di imbibizione in peso, campioni Lungarno delle Grazie.

Si nota quindi che le murature di tipo X e Y sembrano avere lo stesso comportamento all’assorbimento totale di acqua e quindi la stessa porosità, mentre le tipologie Z e W presentano valori di porosità aperta e di coefficiente di imbibizione inferiori.

4.3.2 Prova di assorbimento di acqua per capillarità

Principi teorici

La prova per la determinazione dell’assorbimento di acqua per capillarità di provini di malta, prevede la misura su campioni di sezione circolare conformi alla normativa [UNI- EN 15801:2010]. Per ciascuna carota sono stati preparati almeno 3 campioni rappresentativi.

I campioni, dopo essere stati essiccati in stufa (a 60°C), sono stati pesati (Ps) e posti in una vasca di assorbimento riempita in acqua distillata fino al bordo superiore di uno speciale supporto a contatto con una spugna porosa e bagnata. I campioni sono poi pesati ad intervalli di tempo successivi (Pt). Si misura il coefficiente di assorbimento dell’acqua per capillarità riportando in un grafico la massa d’acqua assorbita, divisa per l’area della base immersa del provino, in funzione della radice quadrata del tempo. Il valore che si ottiene da questa prova è il coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità (Ca), ottenuto attraverso la seguente formula:

$$Ca = \frac{Pt - Ps}{A\sqrt{t}} \quad (g/cm^2 * s^{1.5})$$

Dove Pt è la massa del provino al ti; ti tempo trascorso dall’inizio della prova; A è l’area del provino a contatto con l’acqua.

Risultati

I risultati della prova di assorbimento d’acqua per capillarità sono elencati in Tabella 10 seguendo la norma UNI 15801-10.

I risultati ottenuti mostrano che tutti i provini hanno coefficienti di assorbimento capillare tipici dei cementi e delle malte con valori medi di $20 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$ e $15 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$. In generale tutti i campioni analizzati mostrano un'imbibizione molto rapida nelle fasi iniziali della prova poiché le porosità più grandi vengono subito saturate per contatto. Osservando i risultati dei coefficienti riportati in Figura 41, si osserva la netta distinzione tra i valori ottenuti per i campioni rappresentati da calcestruzzo moderno (Z e W) rispetto a quelli costituiti da calcestruzzo antico (X e Y). In generale la tipologia di muratura X presenta valori di coefficiente di assorbimento capillare leggermente inferiori rispetto alla tipologia Y; con media di $14,91 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$ e di $22,51 \text{ g/m}^2\text{s}^{0,5}$, rispettivamente.

Unica eccezione è rappresentata dal campione F3-X, il quale mostra un assorbimento capillare particolarmente alto. Ciò è dovuto alle caratteristiche della porzione di carota selezionata per la prova, la quale mostra una discontinuità che la separa nettamente in due porzioni (Figura 42). Questa discontinuità rappresenta una via preferenziale di accesso all'acqua.

Tabella 10 – Risultati analisi assorbimento capillare, in azzurro campioni del Lungarno degli Acciaiuoli in bianco campioni del Lungarno delle Grazie.

Campioni	Coefficienti di assorbimento capillare ($\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$)
F1-X	7.03
F2-X	14.62
F2bis-X	9.39
F2bis-Y	17.69
F3-X	24.19
F4-W	12.03
F5-Z	4.40
F5-W	7.85
F6-Y	21.23
F7-X	16.56
F8-X	19.16
F9-Y	18.47
F10-X	10.33
F11-X	15.73
F12-X	14.00
F13-X	18.04
F13-Y	32.64

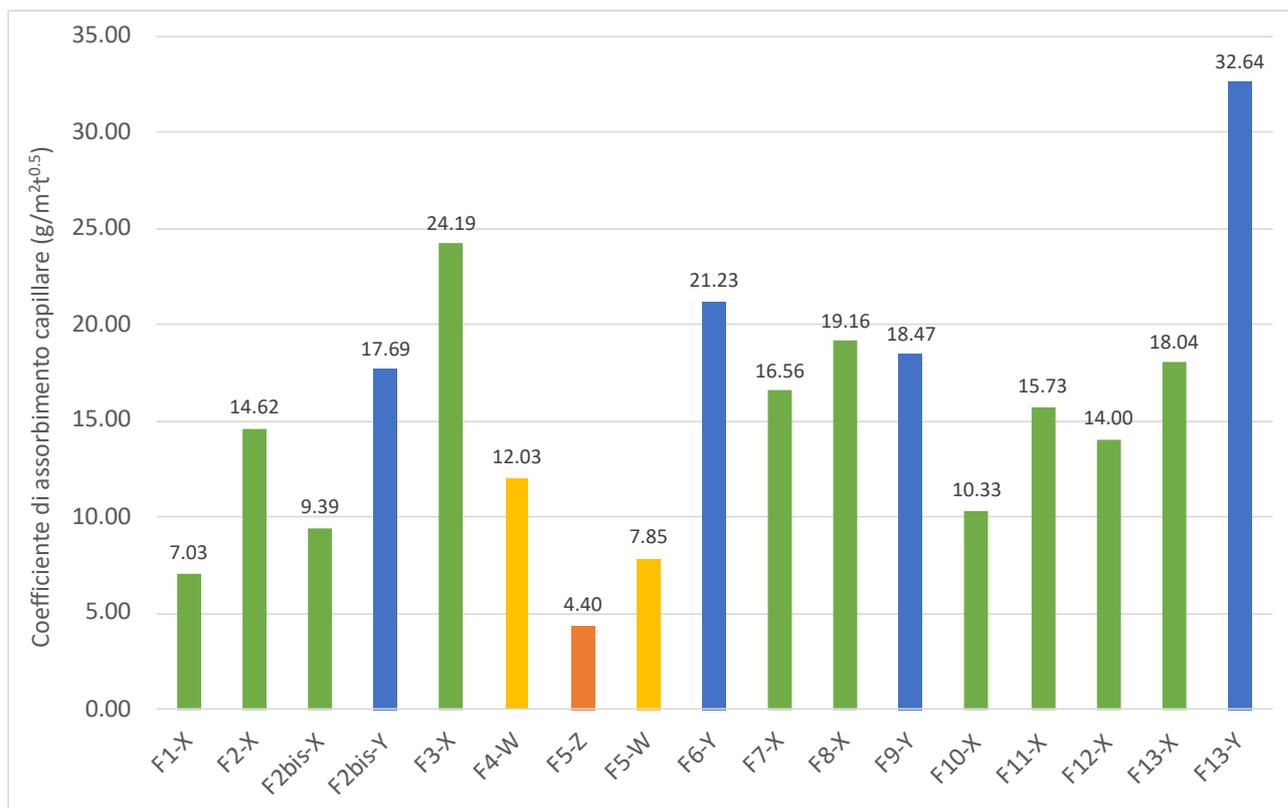


Figura 41 – Valori medi coefficiente di assorbimento capillare per i campioni delle carote del Lungarno degli Acciaiuoli e Lungarno delle Grazie.



Figura 42 – Campioni F3-X1, F3-X2 e F3-X3 selezionati per le prove di assorbimento capillare, si nota la discontinuità che separa in due porzioni distinte il campione.

5 Discussione e conclusioni

La possibilità di prelevare numerose carote dai muraglioni dei Lungarni ha permesso di evidenziare diverse tipologie di muratura e di determinarne le caratteristiche fisico-meccaniche, utilizzando molteplici tecniche analitiche.

A livello macroscopico sono state individuate 4 classi principali:

- Malta con pietrisco grosso rotondo (Tipologia X);
- Malta con pietrisco rotondo (Tipologia Y);
- Cemento con aggregati di dimensioni millimetriche (Tipologia Z);
- Cemento con aggregati di dimensioni centimetriche (Tipologia W).

Una prima stima qualitativa della percentuale di recupero delle carote è stata effettuata tramite il calcolo dell'indice RQD (Rock Quality Designation): questa stima permette di valutare la compattezza generale del materiale. Si è riscontrato che solamente 2 delle 14 carote mostrano un indice RQD corrispondente ad una qualità scadente.

Dalle indagini meccaniche è stato possibile determinare una stima tramite correlazione con l'indice di rimbalzo sclerometrico della resistenza meccanica del materiale ed individuare la presenza di difetti interni e cavità con l'utilizzo della tecnica ultrasonica. Quest'ultima fornisce anche delle importanti informazioni sulla buona adesione tra malta e pietrisco (per la tipologia X, Y) e tra cemento e aggregato (per la tipologia Z, W), quindi sulla tenacità della muratura indagata. Per le indagini fisiche sono state determinate la porosità aperta all'acqua, la densità e la capacità di assorbimento di tali materiali. Ciascuna tipologia di muratura è stata campionata, selezionando delle porzioni rappresentative della stratigrafia di ogni carota estratta. A partire dai risultati ottenuti, vengono riportate le considerazioni fisico-meccaniche caratterizzanti le varie tipologie.

Tipologia X

La tipologia X è presente sia nel Lungarno degli Acciaiuoli che nel Lungarno delle Grazie, ha caratteristiche riferibili a tecnologie tradizionali, quindi probabilmente di origine storica. Le murature realizzate con questa tipologia (calcestruzzo antico) sono definite strutture "a nucleo".

Le indagini ultrasoniche restituiscono dei valori compatibili con materiali caratterizzati da buona compattezza e tenacità. La quantità di pietrisco stimata dalla determinazione del rapporto malta/pietrisco macroscopico di questa tipologia di campioni risulta medio-alta. La presenza di pietrisco grosso rotondo non rappresenta un punto di debolezza del materiale, ovvero vi è una buona adesione tra le superficie di contatto della frazione fine di malta con i frammenti lapidei. I valori di resistenza meccanica ricavati dalle prove sclerometriche e di compressione, indicano che la resistenza di tale tipologia è mediamente 23 MPa, confermano il livello di coesione mostrato dai risultati delle indagini ultrasoniche.

Dalle prove fisiche svolte sui campioni, si osserva che la porosità aperta e il coefficiente d'imbibizione sono piuttosto elevati; anche il coefficiente di assorbimento capillare risulta medio-alto. Tale tipologia di muratura, visto le caratteristiche di porosità, può essere sottoposta all'azione dell'acqua con fenomeni di assorbimento.

In generale, le caratteristiche fisico-meccaniche risultano adatte a svolgere la funzione strutturale, tuttavia la carota F3 presenta una discontinuità (frattura) che si estende su tutto lo spessore della

stessa. Infatti, i valori risultanti dalle prove fisico-meccaniche mostrano delle caratteristiche più scadenti.

Tipologia Y

La tipologia Y è presente sia nel Lungarno degli Acciaiuoli che nel Lungarno delle Grazie; ha caratteristiche riferibili a tecnologie tradizionali, quindi probabilmente di origine storica. Le murature realizzate con questa tipologia (calcestruzzo antico) sono definite strutture “a nucleo”.

Le informazioni ricavate dalle analisi meccaniche sono analoghe a quelle ottenute dalla tipologia X, con resistenza a compressione solo leggermente inferiore di circa 18 MPa.

La dimensione del pietrisco e la loro percentuale risulta inferiore rispetto alla tipologia X; tuttavia la distribuzione del pietrisco non influisce molto sulle proprietà meccaniche dei campioni. Infatti, le indagini ultrasoniche e sclerometriche mostrano un comportamento meccanico confrontabile con quello della tipologia X.

Le caratteristiche di porosità (porosità aperta e coefficiente d’imbibizione) sono anch’esse del tutto simili ai campioni X analizzati. Si riscontra una lieve differenza dei valori di coefficiente d’assorbimento capillare, che risultano leggermente maggiori, probabilmente dovuta alla maggiore quantità di frazione di malta presente nei campioni.

Tipologie W e Z

Le tipologie W e Z sono presenti solo in alcune carote del Lungarno degli Acciaiuoli, corrispondenti alla porzione di muraglione oggetto di rifacimenti successivi e quindi definibili come murature realizzate da calcestruzzi moderni. Sebbene i campioni delle tipologie W e Z mostrino valori ultrasonici simili alle tipologie X e Y, indice di un buon livello di coesione del materiale, si osservano invece differenze nella stima della resistenza ottenuta dalle prove sclerometriche e anche a compressione uniassiale. I campioni di tipologia W e Z, infatti, mostrano valori di circa 38 MPa e di 34 MPa rispettivamente, superiori rispetto a quelli ottenuti dai campioni delle tipologie X e Y. Gli aggregati nelle malte di tipologia W e Z risultano finemente distribuiti nell’impasto e non influenzano le caratteristiche di tenacità del materiale.

Le informazioni ricavate dalle analisi fisiche di porosità aperta, coefficiente d’imbibizione e coefficiente di assorbimento capillare mostrano in entrambe le tipologie W e Z una porosità piuttosto bassa e quindi nettamente inferiore delle precedenti. Le tipologie W e Z risultano quindi meno esposte all’azione dell’acqua. Tuttavia, come affermato, si tratta di prodotti moderni che risultano meno compatibili con la stratigrafia rilevata e indagata nelle altre sezioni murarie.

Nell’ambito della caratterizzazione dei materiali da un punto di vista minero-petrografico, sono state svolte delle analisi petrografiche tramite microscopia ottica ed analisi mineralogiche mediante diffrattometria a raggi X, per individuare le materie prime impiegate per la realizzazione delle murature. Dai risultati riportati nel report scientifico svolto dalla Dott.ssa Cantisani, si evidenziano due macrocategorie:

- legante idraulico probabilmente naturale, ottenuto cioè dalla cottura di calcari marnosi con l’aggiunta di un aggregato di composizione prevalentemente silicatica, ben selezionato e con granulometria variabile. Questa tipologia comprende le classi indicate come X e Y;
- legante idraulico moderno, indicate come tipologie Z e W.

In generale, la classificazione svolta a livello macroscopico risulta compatibile con quella effettuata a livello microscopico dalle analisi minero-petrografiche.

Le tipologie X e Y appartengono alla prima macrocategoria, costituita da legante idraulico naturale; a livello macroscopico, sono state distinte in base alla dimensione e distribuzione del pietrisco. Tuttavia, la porzione di malta risulta la medesima.

Le analisi fisiche (porosità aperta, coefficiente d'imbibizione e coefficiente d'assorbimento capillare) possono essere confrontate con le osservazioni della macroporosità svolte dall'osservazione della sezione sottile al microscopio ottico. Le informazioni ricavate dalle prove fisiche sono in accordo con la stima della macroporosità effettuata su ciascun campione.

La elaborazione di tutte le informazioni, dai rilievi storici, geometrici, a quelli geofisici, etc., contenuti nei due report delle convenzioni, sono in grado di mettere a punto i modelli statici e strutturali, con la scelta dei parametri meccanici delle murature, necessari per effettuare le verifiche della stabilità dei vari tratti dei muraglioni e conseguentemente la progettazione di interventi.

ALLEGATI



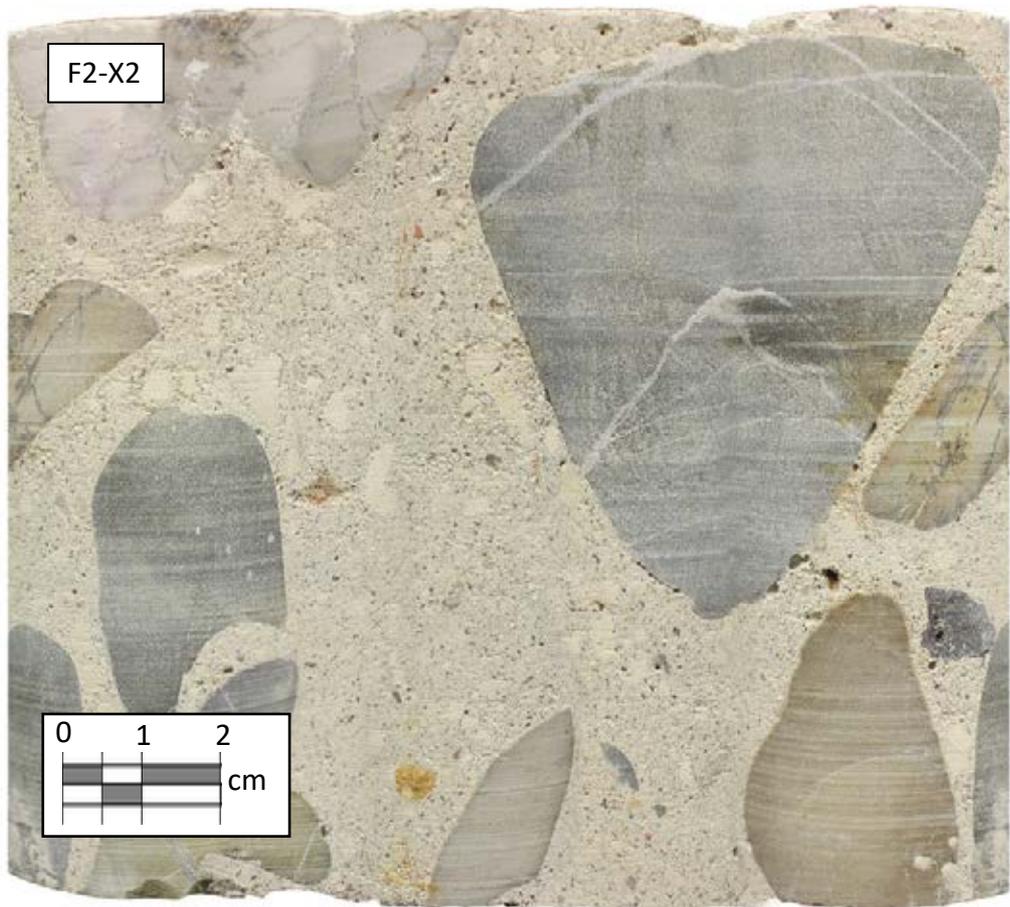
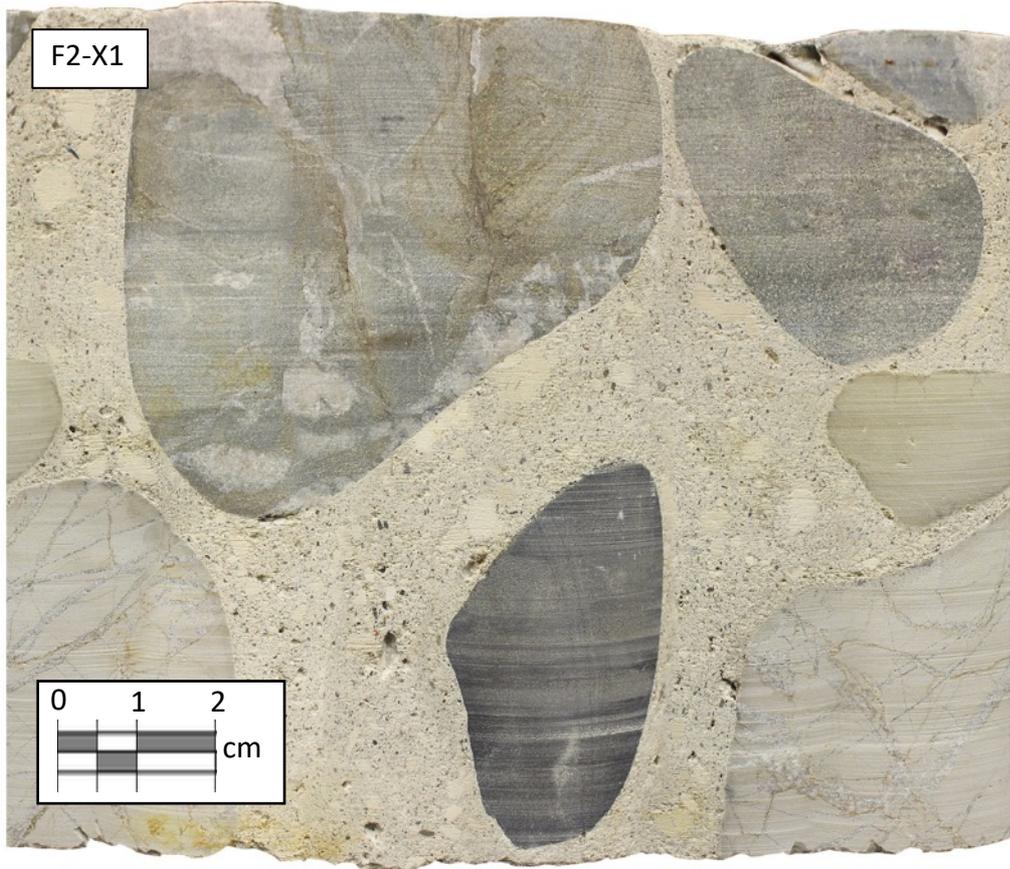
Responsabile: Prof. Carlo Alberto Garzonio

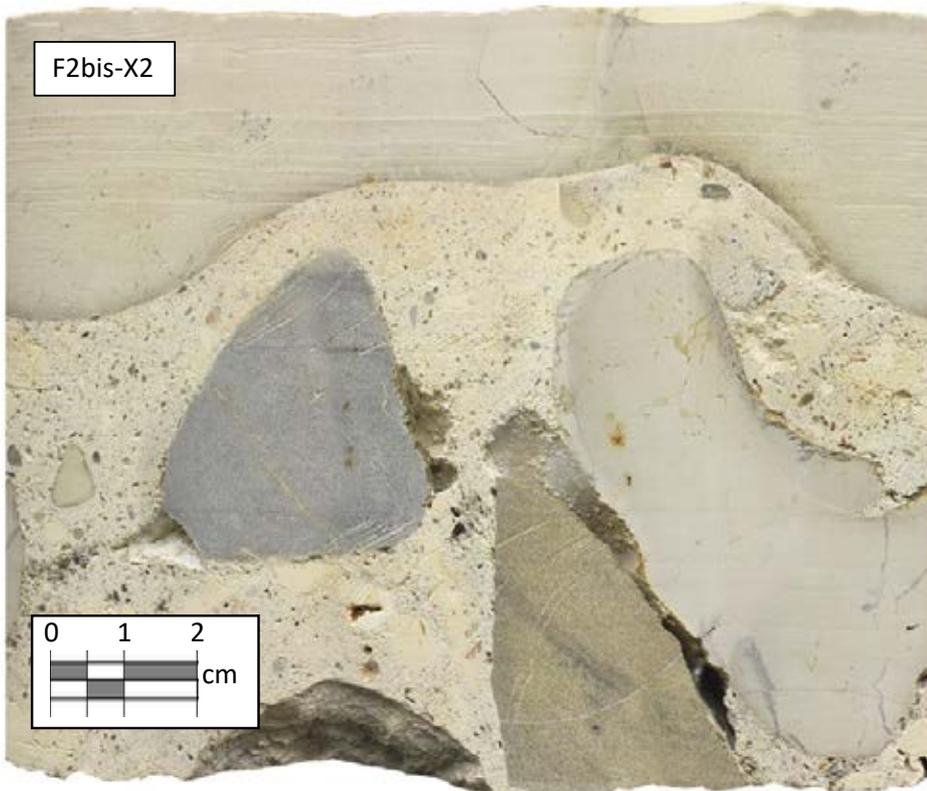
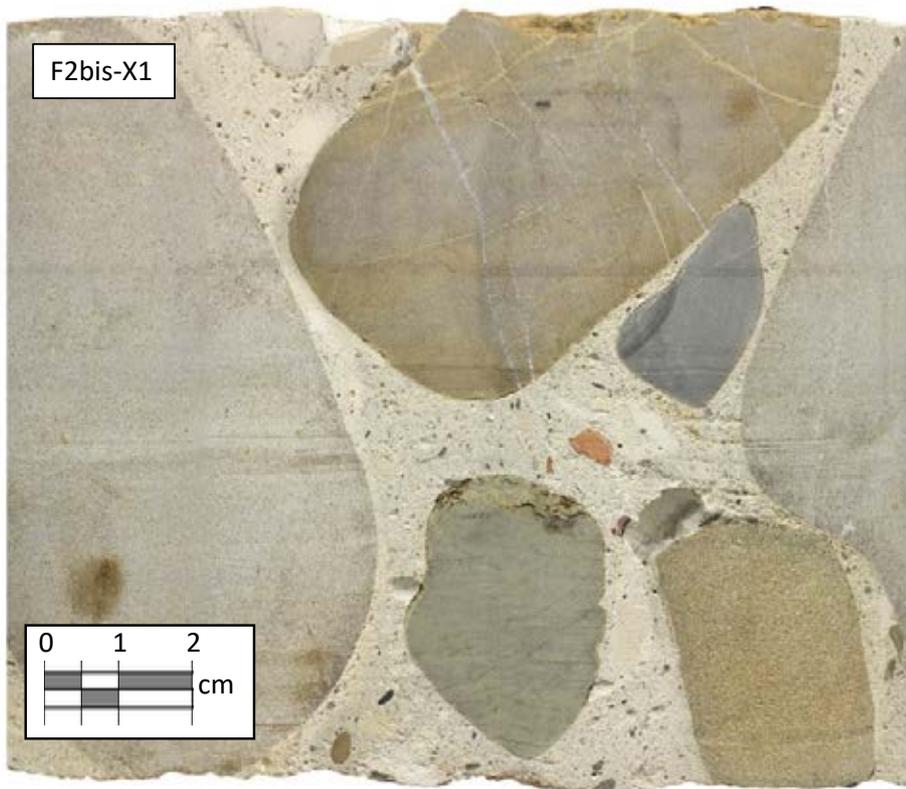
Collaboratori: Dott.ssa Teresa Salvatici, Dott.ssa Irene Centauro, Dott.ssa Sara Calandra, Dott. Francesco Pilati

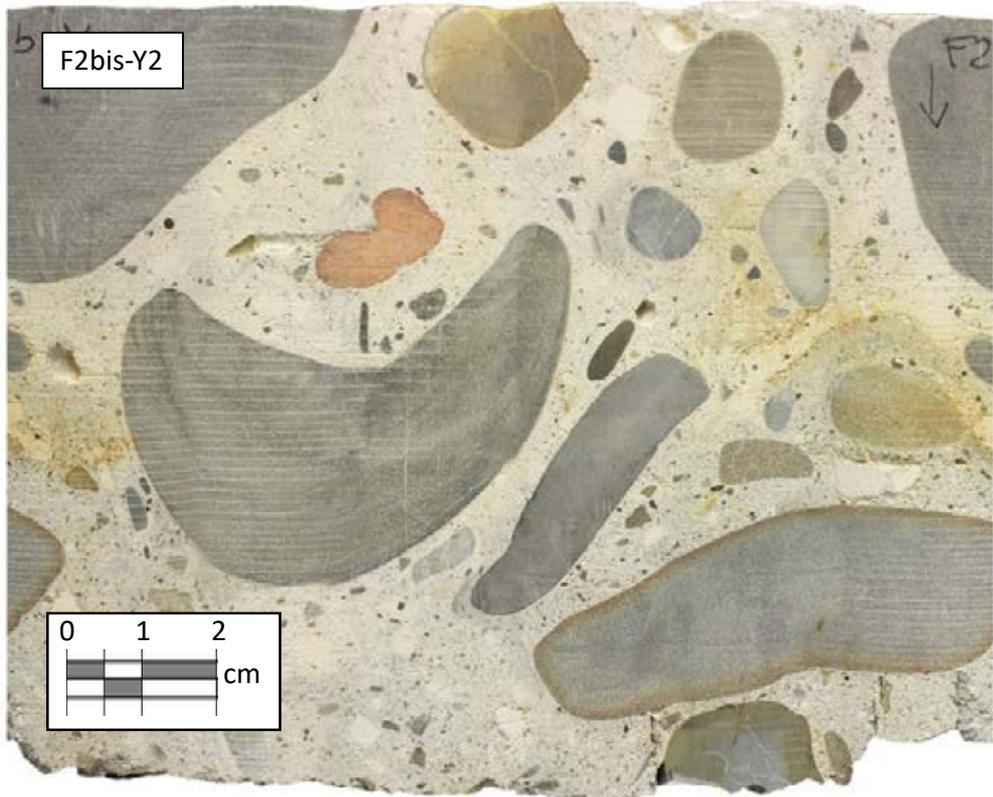
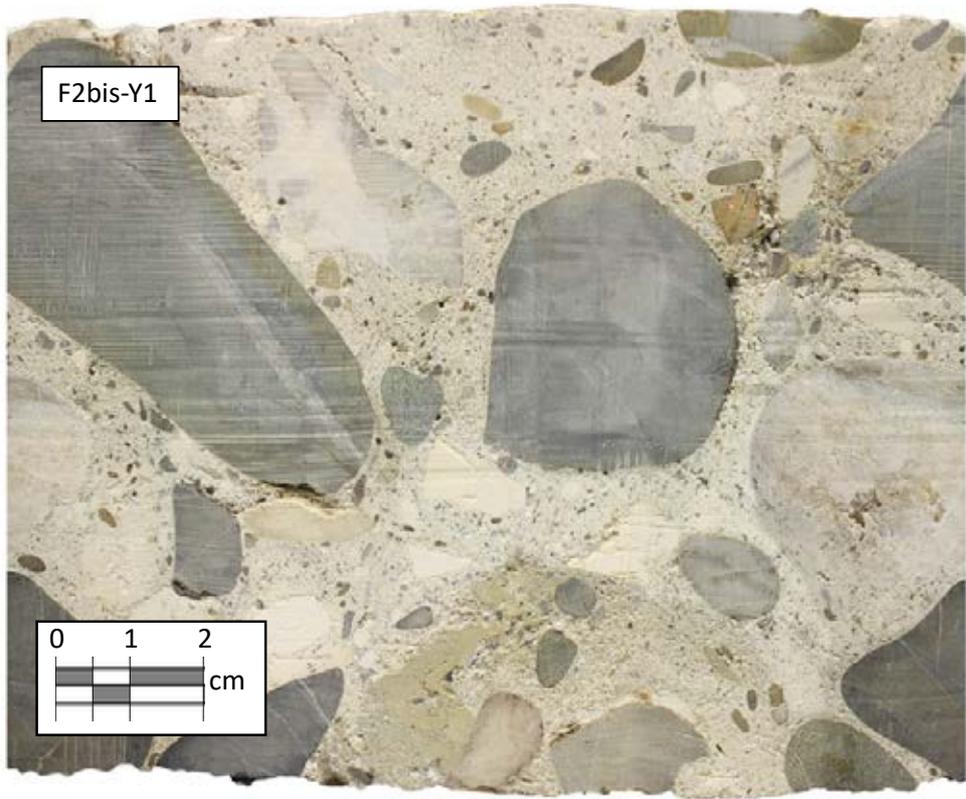
Firenze, 12 luglio 2021

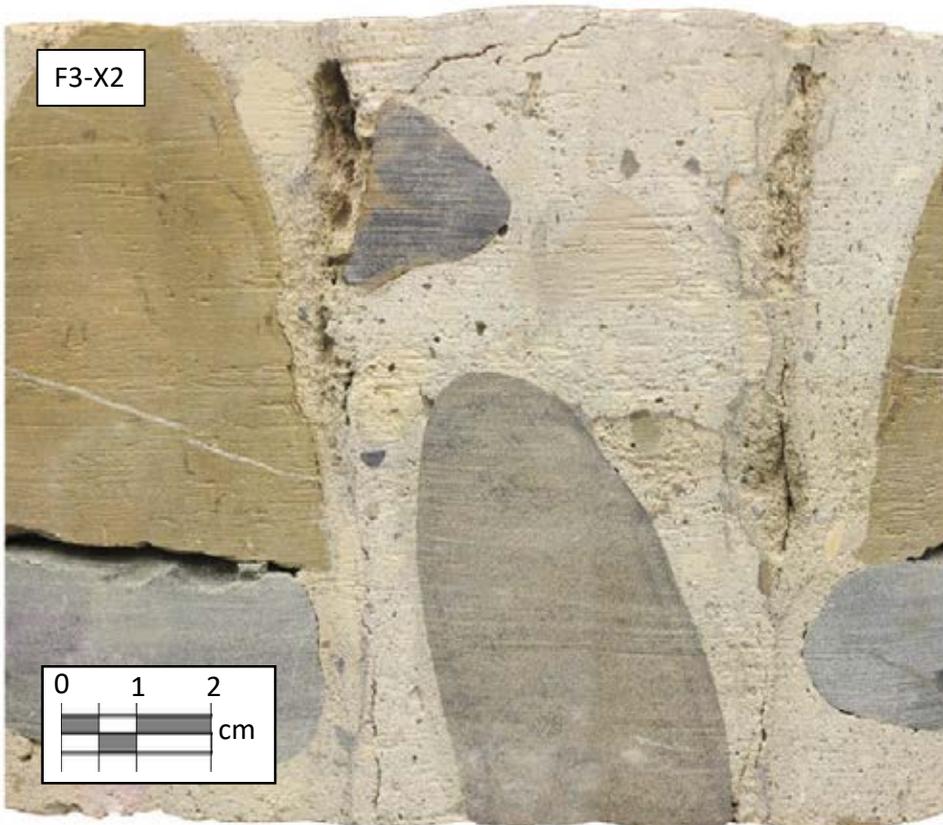
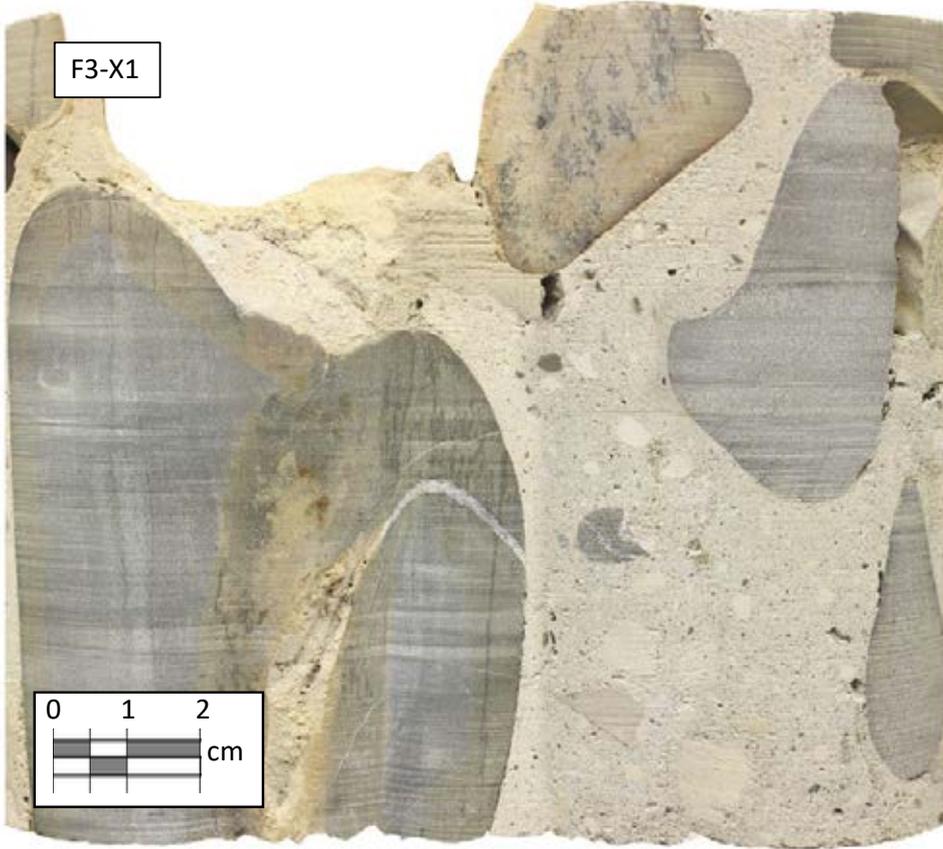
ALLEGATO A

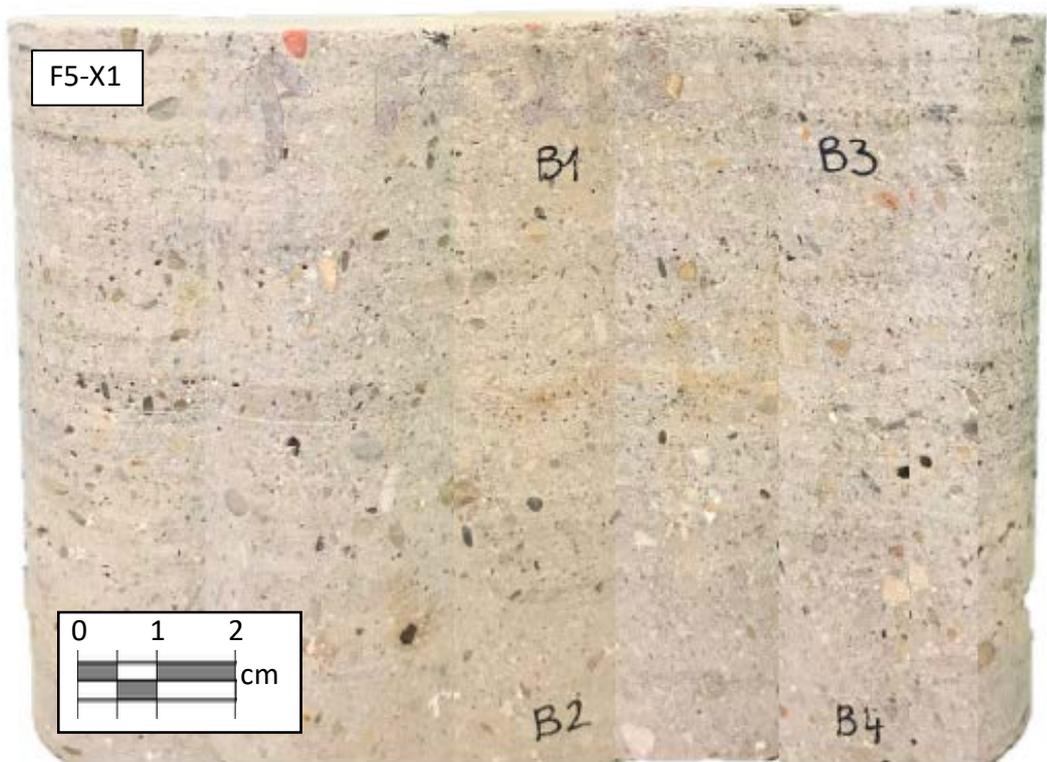
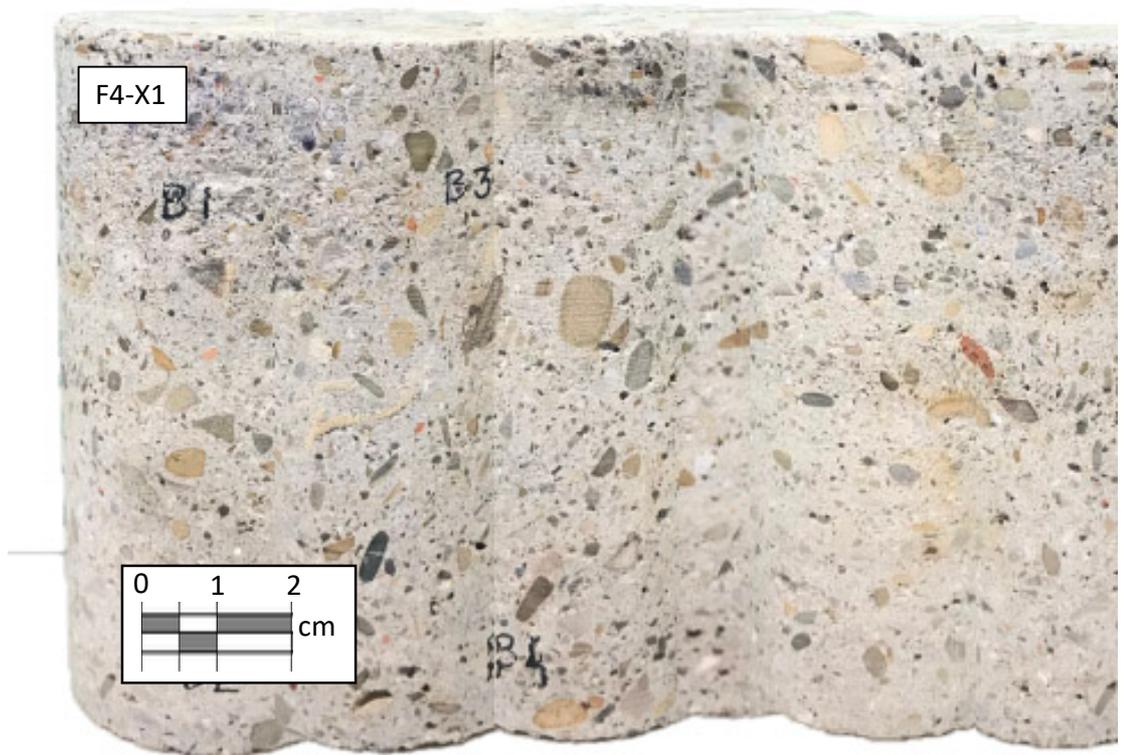


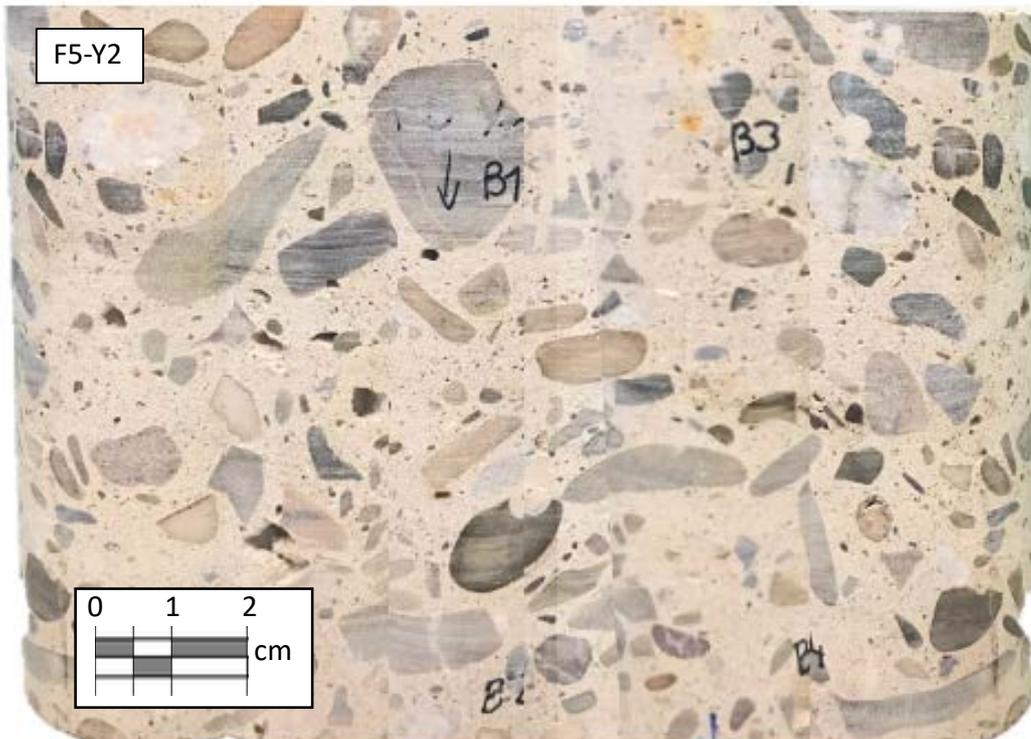
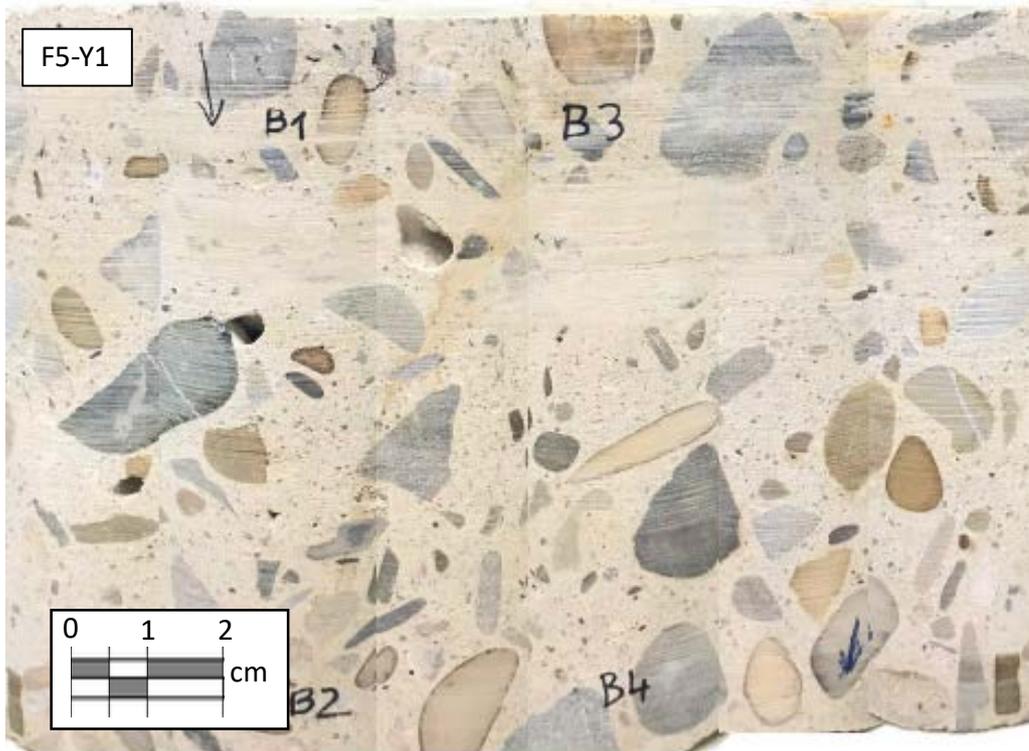


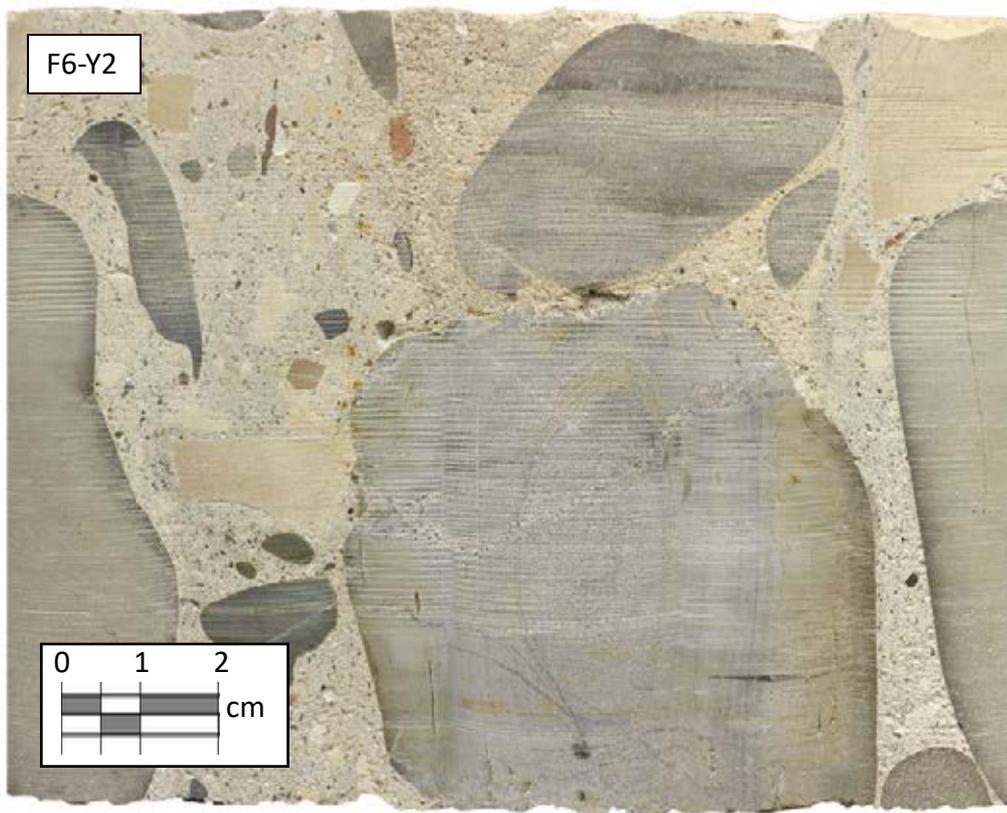


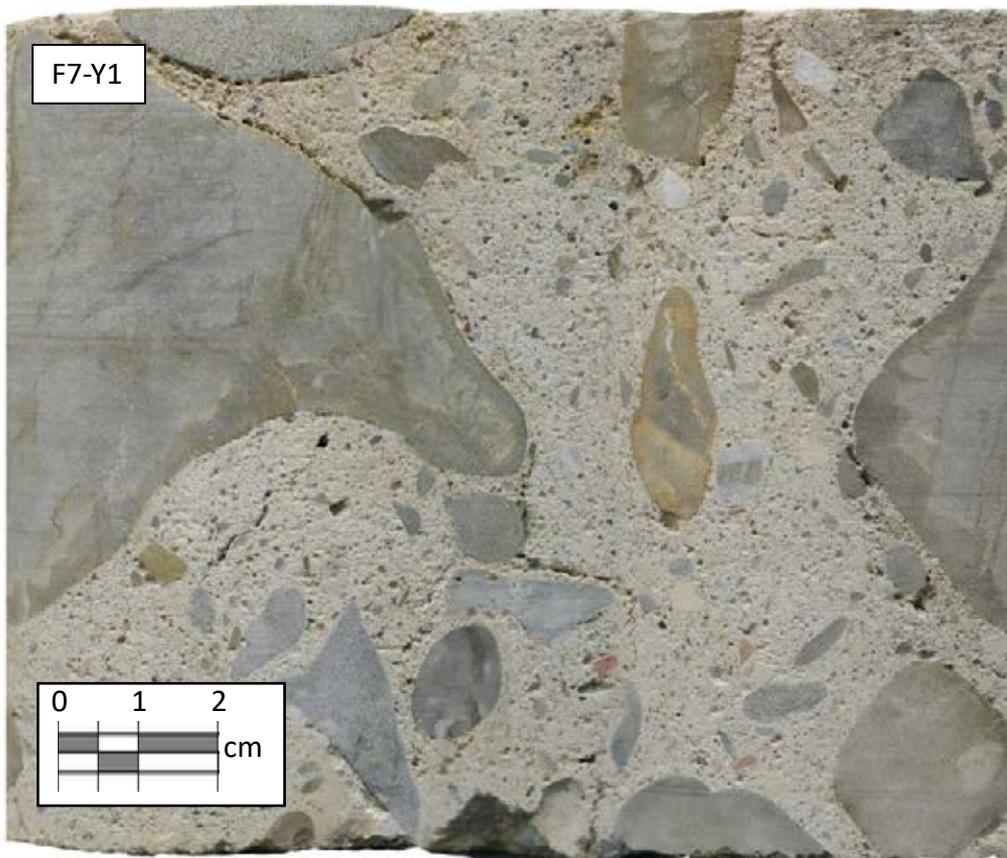
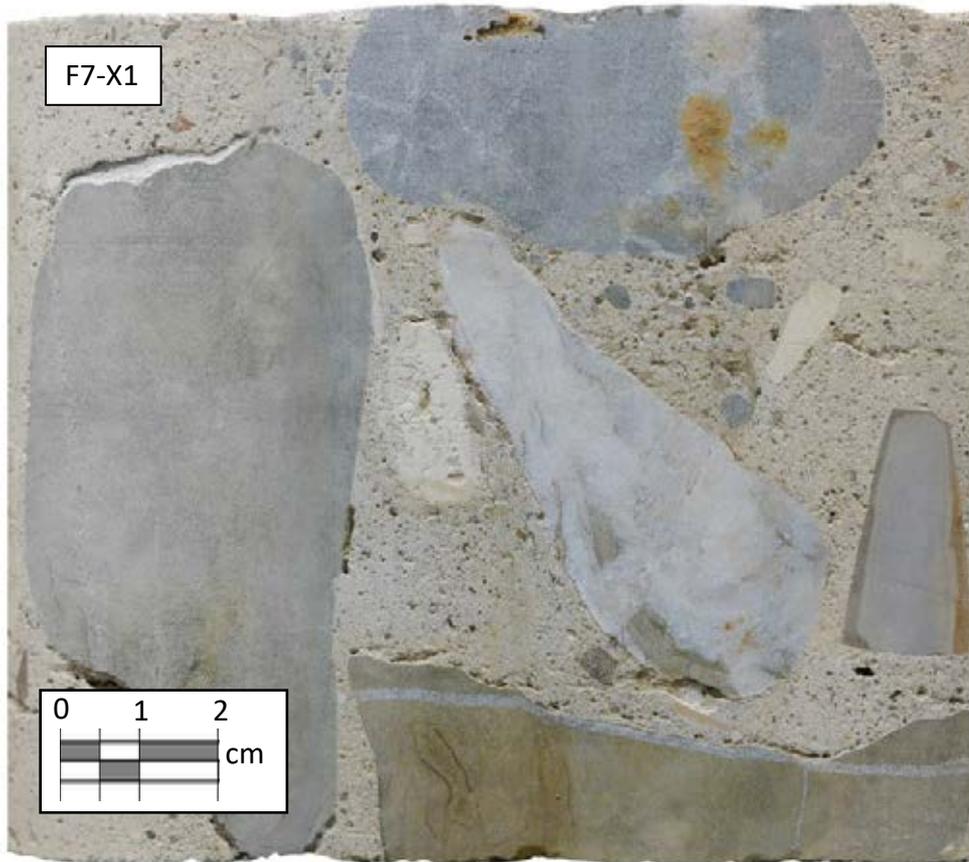


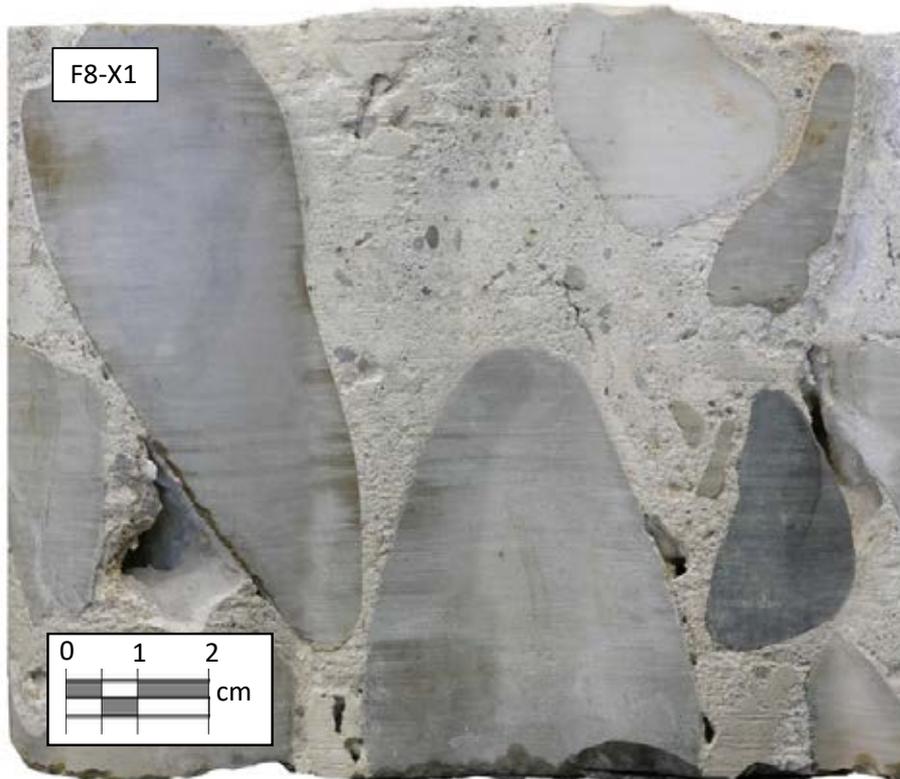


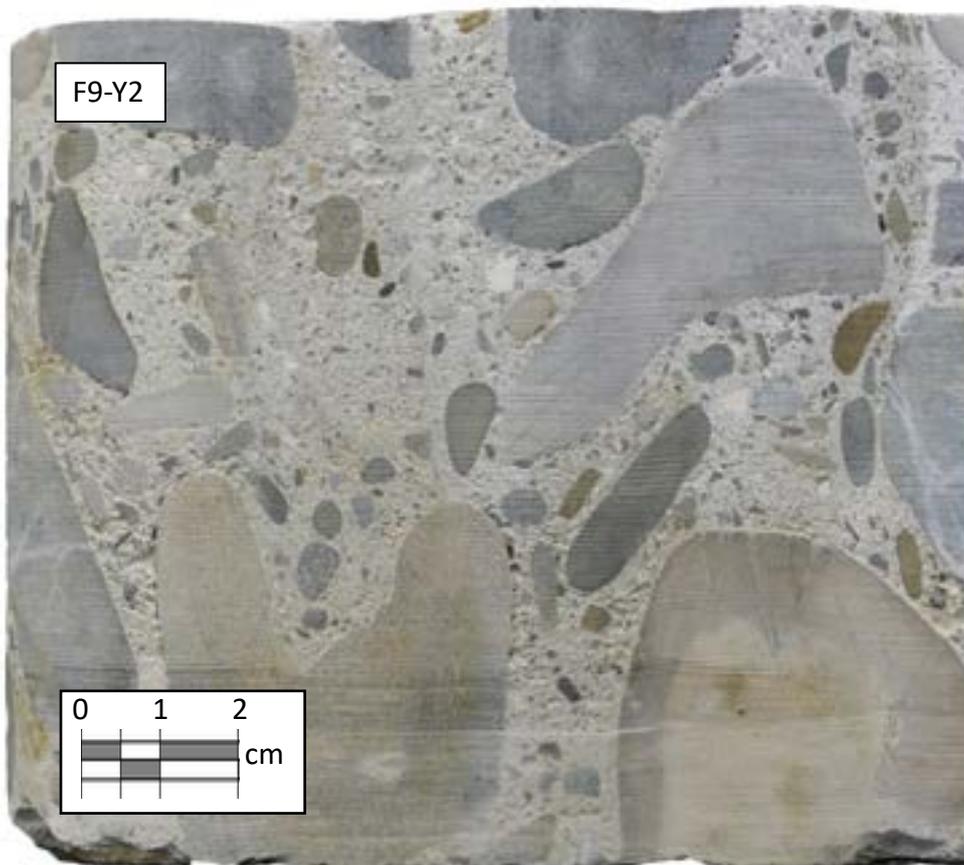
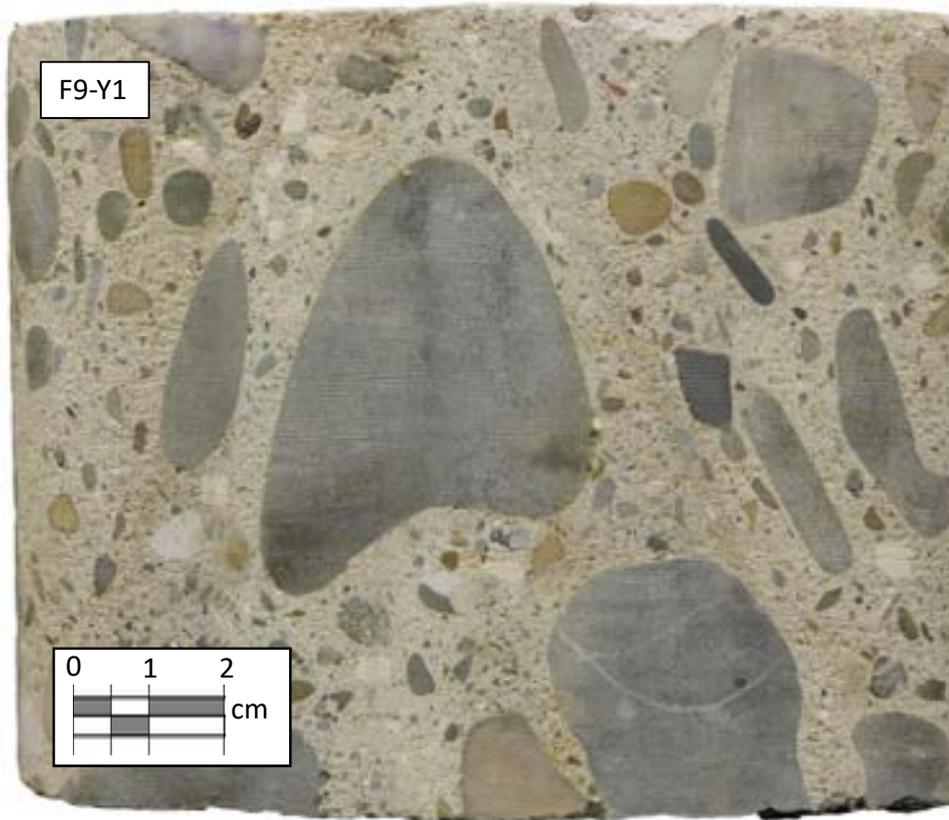


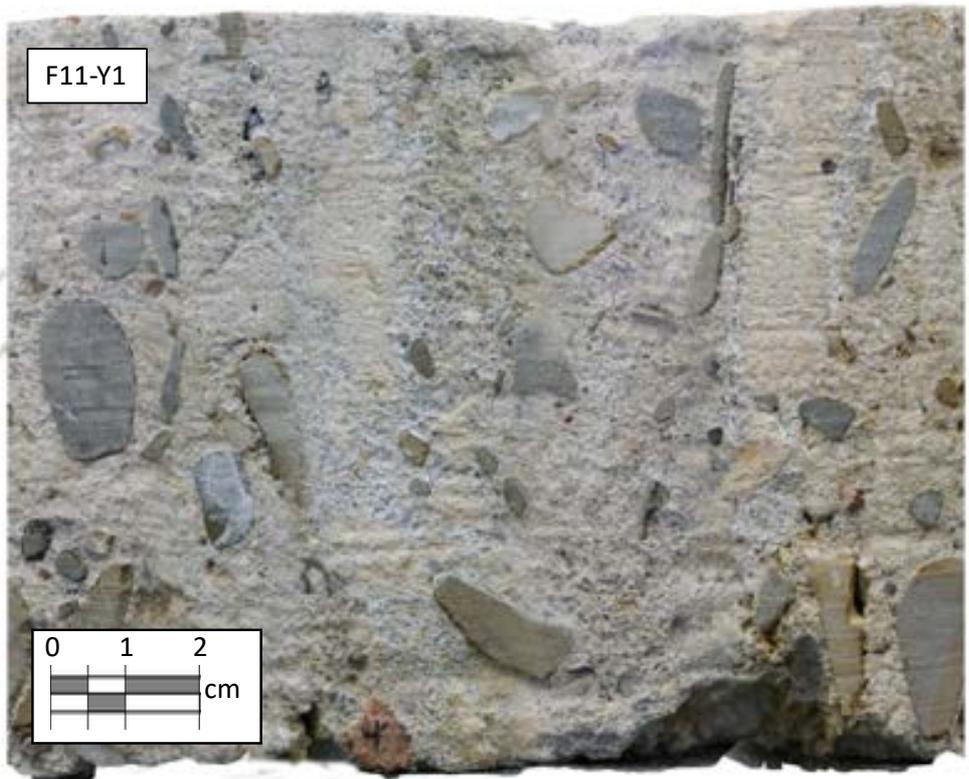
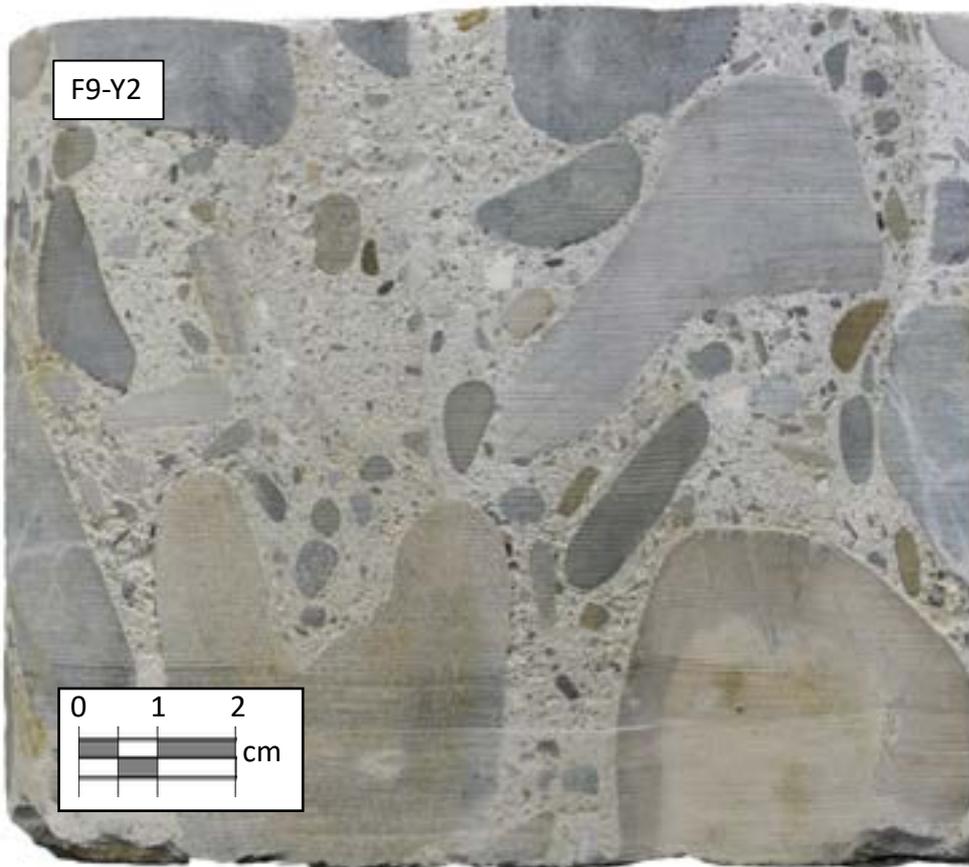


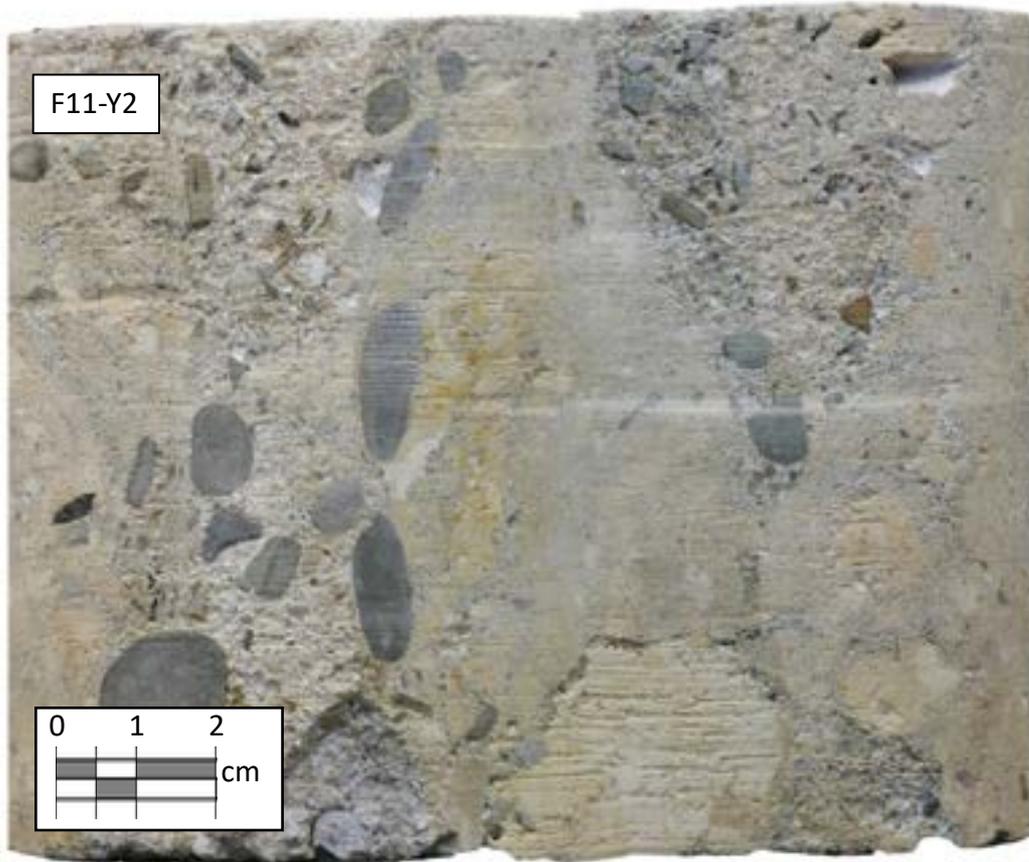


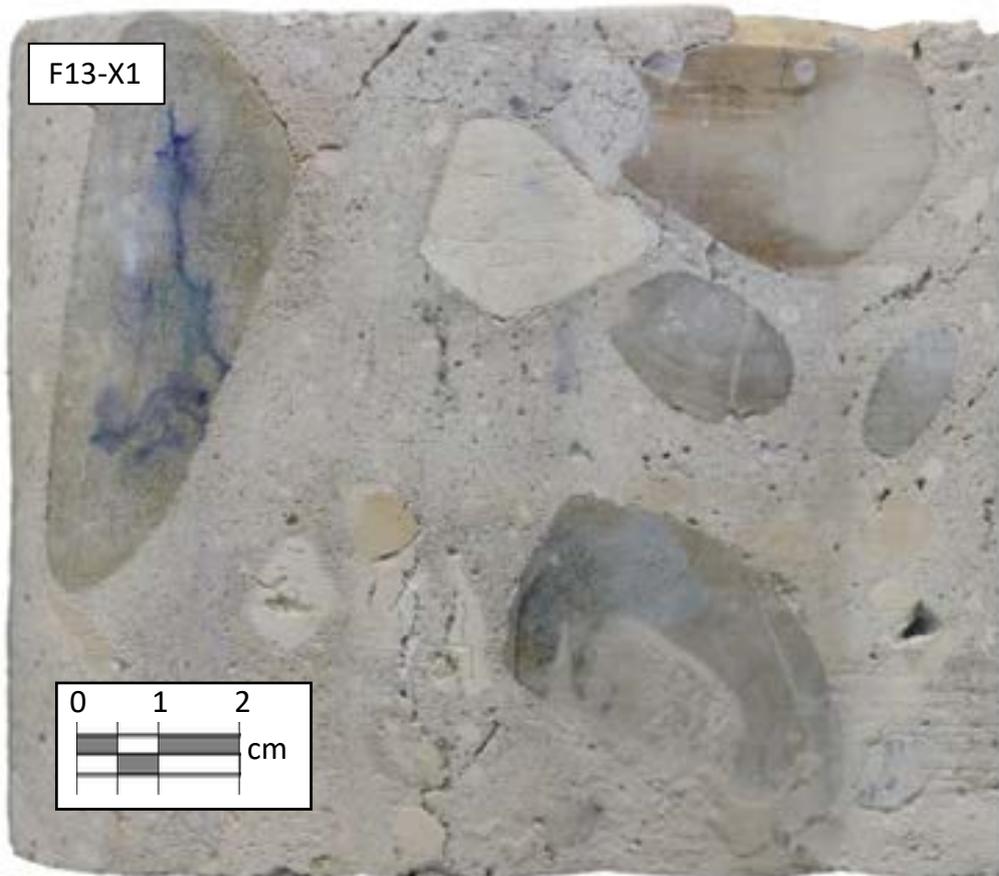
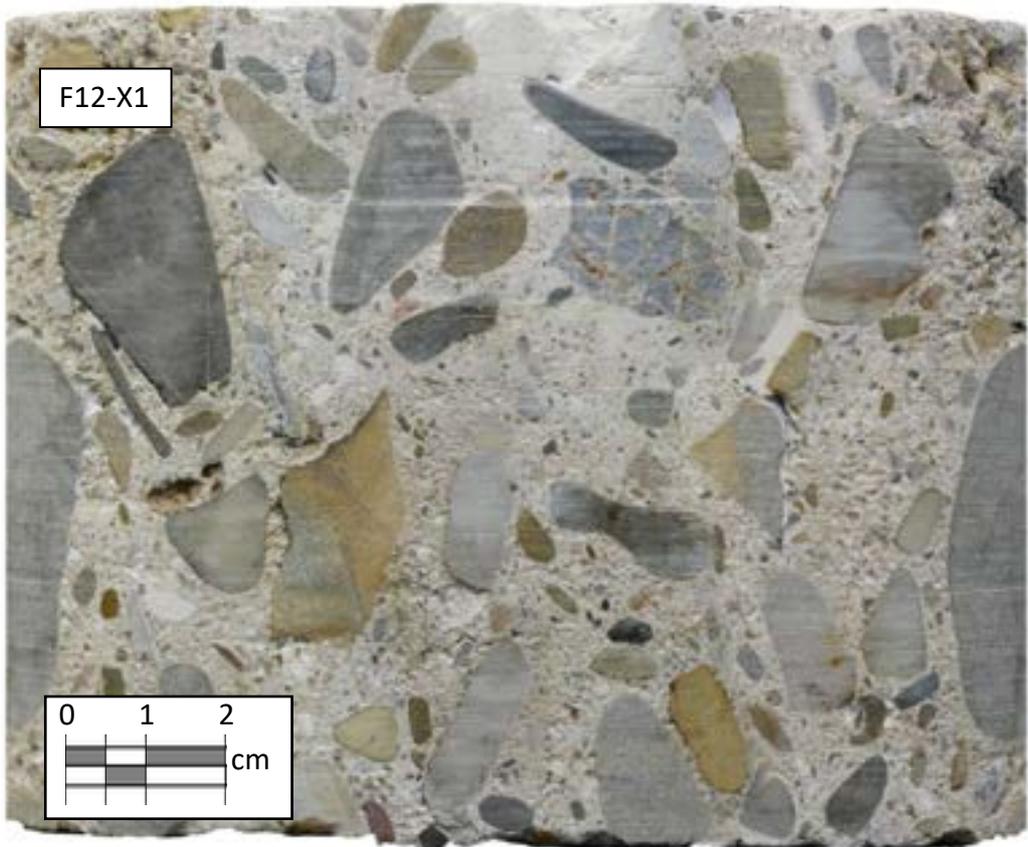














ALLEGATO B

