Università
Ca'Foscari
Venezia

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro

Tesi di Laurea

Proposta di valutazione degli impatti ambientali su superfici lapidee di alcuni edifici veneziani

Ca' Foscari
Dorsoduro 3246
30123 Venezia

Relatore
Ch. Prof.ssa Elisabetta Zendri
Co-Relatore
Dott.sa Laura Falchi

Laureanda
Elisa Orio
Matricola 830117

Anno Accademico
2015 / 2016

Indice

Scopo della tesi 1

SEZIONE 1

1.1) Introduzione 3

1.2) Il rischio e la sua valutazione in ambito storico-artistico 9

1.2.1) La stima del rischio in ambito storico-artistico 9

1.2.2) La Carta del Rischio 10

1.2.3) Le tipologie di rischio nella Carta del Rischio 12

1.2.4) La Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale-aria in ambito storico-artistico 13

1.3) La Pericolosità Territoriale nel domino ambientale-aria in relazione al patrimonio culturale: i fattori determinanti 17

1.3.1) Gli inquinanti atmosferici e le loro fonti di emissione 17

1.3.2) L'aerosol marino e il vento 23

1.3.3) Le precipitazioni e il vento 26

1.4) L'effetto sinergico dei fattori di Pericolosità Territoriale sulla Pietra d'Istria 28

1.4.1) La Pietra d'Istria 29

1.4.2) Ambiente e le superfici lapidee 31

SEZIONE 2

2.1) Valutazione della Pericolosità Territoriale per i beni culturali di Venezia e Provincia nel dominio ambientale-aria sulla base della Carta del Rischio 45

2.1.1) Metodologia 45

2.1.2) Analisi delle informazioni ottenibili dalla Carta del Rischio 45

2.2) Valutazione dell'andamento delle Pericolosità Territoriale di Venezia considerando il dominio ambientale-aria sulla base dei dati ARPAV Venezia 50

2.2.1) Metodologia 50

2.2.2) Analisi delle concentrazioni di NO_2 e PM_{10} in atmosfera nella citta di Venezia e Provincia dal 2002 l 2014 52

2.2.3) Analisi della piovosità nella Provincia di Venezia dal 2002 al 2014 57

2.2.4) Presentazione dei dati inerenti ai venti nella provincia di Venezia dal 2002 al 2014 60

2.3) Discussione dei risultati riguardanti la valutazione della Pericolosità Territoriale per il dominio ambientale-aria in centro storico a Venezia 62

SEZIONE 3

3) Proposta per la valutazione della vulnerabilità della Pietra d'Istria 64

3.1) Gli edifici caso di studio 64

3.1.1) Cà Foscari 65

3.1.2) Cà Dolfin 67

3.1.3) Cà Bembo 68

3.1.4) Cà Bottacin 69

3.2) Metodologia di approccio e studio per la stima della vulnerabilità della Pietra d'Istria esposta all'ambiente esterno e lagunare 70

3.2.1) Osservazioni delle superfici in situ 70

3.2.2) Campionamento e tecniche d'analisi dei composti e dei depositi superficiali presenti sui supporti lapidei degli edifici caso di studio 70

3.2.3) I calchi della Pietra d'Istria con Gomma Siliconica GSP-400N 72

3.2.4) Rielaborazione di scansioni dai calchi eseguiti 73

3.2.5) Sezionamento dei calchi e loro rielaborazione profilometrica 76

3.2.6) La rugosità superficiale e la rielaborazione dei dati ottenuti dai profili dei calchi 82

3.3) Risultati e discussione 87

3.3.1) Osservazioni delle superfici degli edifici caso di studio con Microscopio Dino-Lite e dei campioni con Microscopio Ottico 87

3.3.2) Analisi dei composti e dei depositi superficiali presenti sui supporti lapidei degli edifici caso di studio: FT-IR in ATR e XRF 91

3.3.3) Analisi dei calchi: Image Processing e Profilometria 100

3.3.4) Surface Plots 101

3.3.5) Analisi delle sezioni: stima della rugosità (Lr) 106

3.3.6) Analisi delle sezioni: valutazione dei parametri Ra, Rmax e R^2 112

SEZIONE 4

4.1) Conclusioni e prospettive 119

Bibliografia e sitografia 126

Appendici i

Appendice I: Mappatura e analisi degli edifici caso di studio i

Appendice II: Surface Plots xxiv

Appendice III: Dati Profilometrici xxvii

Appendice IV: Scheda tecnica Gomma Siliconica in Pasta GSP- 400N xxxv

Ringraziamenti

Scopo della tesi

Lo scopo di questo elaborato è di proporre e analizzare alcuni elementi utili al fine dello sviluppo futuro di metodiche atte alla stima della vulnerabilità e del rischio atmosferico di un materiale molto utilizzato nella città di Venezia: la Pietra d'Istria. Gli elementi studiati riguardano l'interazione dei materiali con l'ambiente e comprendono agenti atmosferici di degrado, fattori e proprietà intrinseci del materiale esposto e gli effetti che i primi hanno causato sui secondi nel tempo.

I modelli per la stima della vulnerabilità esistenti sono usualmente costruiti per ottenere informazioni su scala macroscopica; non esistono spesso sufficienti dati per poter scendere in scale di dettaglio. In questo caso invece si è cercato di ottenere informazioni di dettaglio per gli elementi investigati, inerenti quindi agli effetti di un ambiente particolarmente aggressivo come quello veneziano, sulla pietra d'Istria, concentrandosi in particolar modo su due fenomeni già molto studiati in passato: erosione/dilavamento e formazione di croste nere. A differenza degli studi già esistenti, i quali hanno permesso di conoscere le reazioni che si verificano tra materiali e ambiente, in questa tesi si considerano gli elementi relativi all'ambiente atmosferico come fattori di pericolo e si cerca di individuarne l'aggressività in relazione alla gravità degli effetti di dilavamento o formazione di croste nere sulla pietra d'Istria. All'analisi composizionale e microscopica delle superfici si aggiunge quindi un'analisi di dettaglio della morfologia superficiale per individuare parametri per l'elaborazione di un modello specifico che permetta di stimare la vulnerabilità della Pietra d'Istria nel centro storico di Venezia.

In questa tesi, dunque, si è proceduto partendo dalle Carte del Rischio, create dall' Istituto Superiore Centrale del Restauro (ISCR), che forniscono informazioni macroscopiche e mediate per l'intero comune di Venezia. Le carte hanno permesso di risalire ad una stima della pericolosità territoriale per l'intero Comune di Venezia. Sulla base delle informazioni da esse ottenute si è proceduto analizzando più nel dettaglio i dati ambientali inerenti alla concentrazione di inquinanti e di piovosità-precipitazioni atmosferiche descrittivi del periodo 2002-2014, sia per l'intero Comune di Venezia che per la Municipalità di Venezia Murano Burano (relativa quindi al solo centro storico). Gli inquinanti presi in considerazione sono quelli utilizzati dai modelli applicati nel *Sistema Informativo*

Territoriale (SIT), software e struttura portante delle Carte del Rischio per stimare la pericolosità territoriale italiana. Il fine di questa parte dello studio prevede la valutazione dell'andamento della pericolosità territoriale dovuta a precipitazioni meteoriche e atmosfera della città lagunare nel tempo ed evidenziare se vi fossero stati periodi, tra il 2002 e il 2014 in cui l'aria risultasse maggiormente aggressiva per la conservazione dei materiali dell'architettura cittadina.

In seguito sono stati individuati gli edifici caso di studio per l'indagine nel dettaglio degli effetti degli elementi atmosferici su superfici esposte. Essi sono tutti di proprietà dell' Università Cà Foscari, ubicati nel centro storico di Venezia e presentano delle superfici lapidee in Pietra d'Istria. La scelta degli edifici è stata condotta considerando che le superfici caso di studio devono essere soggette a condizioni ambientali simili, dunque comparabili, inoltre i palazzi presentano due esposizioni caratteristiche dei beni immobili storici veneziani: una facciata rivolta verso il canale e una verso la corte interna.

Il degrado del materiale è stato studiato inizialmente grazie ad analisi non invasive, quali rilievo fotografico e analisi con microscopio ottico a contatto Dino-Lite. L'analisi morfologia è stata quindi estesa allo studio dell'erosione lapidea attraverso l'analisi profilometrica di calchi per ottenere informazioni in merito all'*andamento della superficie*, alla *rugosità* e *all'effettivo stato di conservazione del materiale*, sia nel caso in cui esso fosse sottoposto al fenomeno di *dilavamento* che di *deposizione di particolato atmosferico*, a seconda dell'esposizione. Queste informazioni sono state ottenute applicando tecniche di *Image analysis*.

Terminate le analisi di tipo non invasivo, si e proceduto con il *campionamento*, svolto sulle medesime aree precedentemente indagate con i calchi. La composizione dei campioni ottenuta mediante indagini FT-IR in ATR e XRF è stata rapportata all'andamento superficiale del materiale rilevata tramite il calco e considerando l'esposizione si è cercato di individuare, quando possibile, quale fosse il fattore ambientale maggiormente significativo per la tipologia di degrado riscontrata, così da poter ottenere informazioni in merito alla *vulnerabilità del supporto lapideo*

1.1) Il restauro e la conservazione nella storia

Viene proposto in questo capitolo un breve excursus storico al fine di porre in evidenza il precorso concettuale e pratico che ha portato alla definizione di vulnerabilità di un bene culturale. Si intende sottolineare come già storicamente si fosse consci dell'interazione ambiente-bene culturale e che vi fosse una particolare attenzione nello scegliere opportunamente e mantenere i materiali costituenti le opere d'arte esposte in ambiente esterno, così da garantirne una maggiore fruibilità e durata.

Capire e osservare come nella storia sia cambiata la percezione del restauro e della conservazione dei beni culturali è basilare per comprendere le dinamiche di sviluppo della scienza della conservazione e per definire al meglio lo stato di degrado di un sistema e la sua vulnerabilità. Al fine di individuare metodologie e strategie di conoscenza e di gestione adeguate, che garantiscano una completata tutela del bene, non si può prescindere dal percorso storico che ha portato alla definizione di Pericolosità, Vulnerabilità e rischio nel campo dei beni culturali.

I monumenti, fin dall'antichità, furono eretti dall'uomo con lo scopo di lasciare testimonianze di grandiosità e ricchezza tangibili ai posteri.

Per questo motivo, i materiali impiegati nelle costruzioni venivano scelti tra quelli considerati maggiormente duraturi, come la pietra, seppur fossero già stati individuati i processi che ne avrebbero causato il degrado.[1] Gli architetti e le maestranze impegnate nella costruzioni, tramite l'esperienza e l'osservazione, individuarono come cause prime di tali processi il contatto diretto delle superfici dei materiali con l'ambiente circostante.

Fin dai primi secoli d.C., come riporta Plinio il Vecchio in *Naturalis Historiae*[2], vennero individuati dei trattamenti superficiali volti a isolare la superficie del manufatto dall'ambiente circostante, e talvolta aventi anche funzione estetica[3]. I trattamenti protettivi inizialmente prevedevano l'utilizzo di materiali di origine naturale, per lo più di natura organica (come: oli, cere, bitumi, colle animali) ai quali, talvolta, venivano addizionati pigmenti così da proteggere la superficie e al

[1] M. Sgobbi, E.Zendri, F.C.Izzo, G.Biscontin "*La prevenzione del degrado a Venezia nel XIX-XX secolo: studio delle superfici di Ca' Rezzonico*"; Scienza e Beni culturali XXVI, 2010

[2] Gaio Plinio Secondo, detto Plinio il Vecchio per distinguerlo dal nipote e figlio adottivo Plinio il Giovane, fu uno scrittore latino vissuto nel I secolo d.C.; fu l'autore della "*Naturalis Historiae*", un'importante enciclopedia sulle scienze naturali

[3] Marco Vitruvio Pollione, *De architectura*, libro VII

contempo decorarla.

La tipologia dei materiali utilizzati per tali scopi restò pressoché invariata fino al XIX secolo con l'avvento della Rivoluzione Industriale[4]. In rapporto a questo evento storico, infatti, si verificò una profonda ed irreversibile trasformazione sia a livello socioculturale che industriale. Lo sviluppo di quest'ultimo favorì il progresso di molti campi tecnologici e scientifici tra cui quello chimico, che comportò la formulazione e la sintesi di nuovi prodotti (per lo più di natura inorganica) mirati alla conservazione e protezione delle superfici lapidee utilizzabili anche per diversi manufatti antichi.

In concomitanza al fiorente sviluppo in ambito chimico, in Europa, si aprì un dibattito inerente alle filosofie di restauro e conservazione dei materiali di cui erano costituiti i beni artistici . Le teorie ritenute di maggior rilevanza furono quelle di Jhon Ruskin e quella ad essa opposta di Eugéne Violett-Le-Duc .

Nel 1849 venne pubblicato il libro di Jhon Ruskin, "*Le sette lampade dell'architettura*", in cui l'architetto inglese dichiarava: *" Il cosiddetto restauro è la peggiore delle distruzioni"*[5]. Egli sosteneva fosse un dovere morale intervenire sui materiali così da prolungarne la durata, senza però svolgere azioni di restauro ma limitandosi ad *operazioni di manutenzione*. Tale tipologia di pensiero si opponeva fortemente a quella dell'architetto francese Eugéne Viollet-Le-Duc il quale, nel suo trattato *"Dizionario dell'architettura francese dal XI al XVI secolo"* enunciava: "*restaurare una costruzione, non è mantenerla, ripararla o rifarla, è ristabilirla in uno stato completo che può non essere mai esistito fino a quel momento"*[6]. Egli dunque era a favore dei *restauri stilistici* che prevedevano la distruzione di tutto ciò che pareva discostarsi dallo stile puro dell'opera ed integrando, nel caso si ritenesse opportuno, ai fini di dar compiutezza all'edificio.

Il dibattito si protrasse molto nel tempo sino a quando nel 1883, si riunirono per il loro IV Congresso Ingegneri e Architetti. Lo scopo del congresso era trovare un punto di mediazione comune sul tema del restauro, infatti, esso permise di individuare alcuni principi che oltre a garantire la conservazione dei beni, ne permettesse anche una corretta lettura, non più soggettiva ma comunitaria.

---

[4] P.Rossi Manaresi, *Stone Protection From Antiquity to the beginning of the industrial revolution*, Science and Technology for Cultural Heritage, n°2, 1993, pp.149-159

[5] John Ruskin, *Le sette lampade dell'architettura*, Jaca Book, Milano 1982.

[6] Grodecki, Eugéne Viollet Le Duc, "*Encyclopaedia Universalis,*Vol.16, Parigi, 1974 pp.850-852

Dal Congresso iniziò a svilupparsi una graduale e complessa elaborazione di principi inerenti a tale tema.

Nel 1931 si tenne nella capitale greca, la Conferenza Internazionale degli architetti, durante la quale si compilò la *Carta del restauro d'Atene*[7]. Essa venne articolata in 10 punti in cui vennero dettate delle raccomandazioni rivolte ai governi degli Stati partecipanti, inerenti alla cura del patrimonio architettonico, all'uniformazione delle legislazioni e ampliamento dello studio delle opere d'arte.

Nello specifico, nell'articolo 2 del documento si invitava a prediligere gli interventi di manutenzione regolare atti ad assicurare la conservazione degli edifici e riducendo così quelli di restauro che, nel caso in cui fossero risultati indispensabili a causa di degradazioni e distruzioni, dovevano essere eseguiti rispettando le caratteristiche storiche e artistiche del periodo in cui il manufatto fu eseguito, senza sovrascrivere lo stile originale con quello di qualunque altra epoca.

Altro argomento importante affrontato in tale Conferenza, correlato in modo stretto alla conservazione, era quello inerente alla valutazione delle problematiche ambientali. Si invitò alla collaborazione tra architetti e dotti in ambito fisico, chimico e naturale per individuare delle metodiche di intervento specifiche e sicure per il caso di studio, le quali prendessero in considerazione anche le minacce provocate dagli agenti ambientali caratteristici del luogo in cui il bene immobile si trovava[8].

Sulla traccia dettata dai principi della *Carta del restauro d'Atene*, un anno più tardi in Italia, il Consiglio Superiore delle Antichità e Belle Arti emanò la prima *Carta Italiana del Restauro* nella quale venivano riportate le direttive ufficiali dello Stato Italiano in merito a suddetto argomento, con lo scopo di mantenere e perfezionare il primato in questa attività basata sulla scienza, sull'arte e sulla tecnica.

Nel primo articolo, venne ricalcata l'importanza della *cure assidue di manutenzione* e delle *opere di consolidamento* svolte con l'intento di dare nuovamente *resistenza* al monumento verso plurimi fattori di deterioramento; mentre nell'articolo 7 veniva dettata l'etica di reintegro ove le aggiunte effettuate

[7] La Carta del restauro di Atene del 1931 è un documento pubblicato a seguito della Conferenza Internazionale degli Architetti tenutasi nell'omonima città tra il 21 e il 31 Ottobre dello stesso anno.
[8] Conferenza Internazionale degli Architetti, Carta del restauro d'Atene, Atene, 1931, Punto VI

con materiali nuovi dovevano essere ridotte al minimo indispensabile e dovevano presentare il *carattere di nuda semplicità* e rispettare lo schema costruttivo originale del bene.

Dal 1939 al 1945 lo Stato Italiano fu coinvolto nel secondo conflitto armato su scala mondiale.

Al termine della Seconda Guerra Mondiale, il patrimonio architettonico Italiano ed Europeo risultò sensibilmente colpito: tornarono in auge le problematiche in merito alla tipologia d'approccio di cui avvalersi in fase di ricostruzione e reintegro sia di lacune che di mancanze. In questo frangente particolare si decise di adottare in tutta Europa un approccio volto al ripristino totale (o quasi) degli edifici: si procedette ricostruendo sul modello originale, ove possibile applicando la tecnica di *anastilosi*[9], mentre nel caso in cui dell'edificio non fosse rimasto che una rovina si decise di procedere riedificandolo totalmente, rischiando di commettere dei veri e propri falsi storici. Quest'ultima metodologia di ricostruzione venne accettata perché volta alla cancellazione, per quanto possibile, della sofferenza psicologica e della distruzione generata dalla guerra.

Conclusa la ricostruzione post-bellica, sulla base delle teorie sviluppate negli anni precedenti, venne teorizzato da Cesare Brandi[10] il *Restauro Preventivo*.

Con questo vocabolo, nel saggio *Teoria del restauro* edito per la prima volta nel 1963, egli non voleva riferirsi alle azioni volte a *"immunizzare l'opera d'arte nel suo corso nel tempo"*[11]. Con il termine *Restauro Preventivo* l'autore intendeva l'insieme di azioni volte alla *"tutela, remozione di pericoli, assicurazione di condizioni favorevoli"*[12] volte al mantenimento del bene culturale. Col semplice vocabolo *restauro,* invece, intendeva *"il momento metodologico del riconoscimento dell'opera d'arte nella sua duplice polarità estetica e storica*[13]*"*[14].

---

[9] L'anastilosi prevede il reintegro di parti mancanti di un edificio con l'aggiunta di elementi neutri che permettano la lettura del bene e ne assicurino la sua conservazione risultando facilmente riconoscibili.

[10] Cesare Brandi, Siena 8 Aprile 1906-Vignano 19 Gennaio 1988; fu un critico e storico dell'arte, fondatore dell'Istituto Centrale del Restauro (ICR).saggista specialista nella teoria del restauro

[11] Cesare Brandi, "*Teoria del restauro*", Torino, Ed. Piccola Biblioteca Einaudi, 2000, p.53

[12] Brandi, Op.cit, p.54

[13] L'istanza estetica è per l'autore correlata all' "artisticità" del oggetto di manifattura umana preso in analisi, essa è la causa per la quale esso viene catalogato ed identificato come bene culturale, nel caso in cui tale caratteristica non venga individuata il manufatto risulterà essere solo un relitto; l'istanza storica è legata alla fase di creazione dell'oggetto, è dipendente dal luogo dell'esecuzione, dal tempo e dal maestro. Il tempo attuale in cui si trova il manufatto, cioè il tempo intermedio tra quello dalla sua creazione a quello corrente, sarà costituito da successivi presenti storici che diverranno passato, e ogni passaggio sarà rintracciabile in quanto conservato tramite traccia.

[14] Brandi, Op.cit, p.54 e ss.

Il *momento metodologico* è il processo della coscienza individuale volto al riconoscimento dell'opera d'arte come tale, che successivamente verrà esteso a livello universale. Il riconoscimento di un manufatto come opera d'arte ne garantisce la conservazione e la trasmissione ai posteri. Questo compito di tutela porta all'individuazione di quello che viene definito appunto *Restauro Preventivo*. Brandi sottolineò inoltre che un'opera d'arte è composta da diversi materiali in diverse quantità, i quali per concorso di circostanze e agenti specifici, possono subire alterazioni di varia tipologia e genere. Le alterazioni sono sensibilmente correlate alle caratteristiche chimico fisiche del materiale di cui è composta l'opera e, secondo l'autore, possono essere previste. Al contempo Brandi sottolinea che non tutte le alterazioni dovranno essere prevenute, perché si correrebbe il rischio di togliere caratteristiche indispensabili all'opera d'arte per essere riconosciuta come tale[15]. L'autore ritiene, inoltre, che per poter applicare concretamente la filosofia di *restauro preventivo* si debba procedere accostando la metodologia filologica e scientifica[15]: così facendo si avrà sia una valutazione dell'efficienza dell'immagine dell'opera, che informazioni in merito allo stato di conservazione delle materie che la compongono permettendo poi di confermarne la sua autenticità in futuro[14].

Nel saggio viene accentuata l'importanza dell'applicazione di un restauro preventivo rispetto ad un intervento d'urgenza: il primo è volto proprio ad evitare il secondo. Infatti un intervento di restauro d'urgenza difficilmente permetterà di salvare l'opera integralmente , quindi in tutte le sue più piccole parti[14], ed essendo essa un *unicum,*anche il deperimento o la scomparsa di una sola parte non potrà mai essere reintegrata completamente e tanto meno alleviata dalla presenza di un manufatto simile a quello esaminato seppur esso sia ben conservato[14].

Dal 1963 in poi iniziarono a diffondersi sia la "*teoria brandiana*" che la volontà di mantenimento e prevenzione dei beni artistici.

Nel 1964, si tenne a Venezia il Secondo Congresso Internazionale degli Architetti. Dal 25 al 31 Maggio , si lavorò per definire una nuova carta del restauro: "*La Carta di Venezia*". Per la stesura di tale documento la teoria di Brandi fu presa molto in considerazione. In questa Carta si trovano riassunti i principi per

[15] La metodologia scientifica venne introdotta nel campo del restauro dall'ingegnere e architetto Gustavo Giovannoni, (Roma 1 Gennaio 1873- Roma, 15 Luglio 1947) il quale suggerì di sfruttare per gli interventi di restauro e conservazione tutte le più moderne tecnologie disponibili.

intervenire correttamente su un bene architettonico enunciati nei documenti degli anni precedenti, vengono sottolineati l'importanza della storicità e del passaggio nel tempo dell'edificio, le modalità di reintegro e i concetti di salvaguardia dell'ambiente che circonda il bene immobile. Per salvaguardia dell' ambiente circostante il manufatto, si intendeva la negazione in merito alla costruzione di ulteriori edifici e la loro eventuale distruzione se eretti in prossimità del monumento così da tutelarne i volumi e i colori[16].
Giovanni Urbani[17], studiando la filosofia del restauro preventivo di Brandi e la *Carta di Venezia* del 1964, propose un'ulteriore punto di vista: *la teoria della conservazione programmata.* Questa teoria venne stesa all'interno del saggio "*Problemi di conservazione*"[18]edito per la prima volta nel 1973, ma già precedentemente divulgata. Questa teoria mise in evidenza l'importanza del controllo delle condizioni ambientali in cui un bene culturale viene conservato[19]. Urbani riteneva fosse rilevante ed indispensabile conoscere dettagliatamente le correlazioni che si instaurano tra ambiente e l'opera. In questo modo, riteneva si potessero individuare delle tecniche che permettessero di rallentare, per quanto possibile, le cinetiche di degrado e, in futuro, permettere interventi a tempo pari e specifici per il caso e il materiale.[20]
A fronte di ciò, il 6 Aprile 1972 venne diffusa dal Ministero della Pubblica Istruzione, (tramite circolare, in quanto non avente valenza di legge), a tutte le Soprintendenze e capi di Istituti autonomi, la *Carta Italiana del Restauro*; documento al quale bisognava riferirsi scrupolosamente per ogni intervento di restauro. Al suo interno vennero definiti, sulle basi dei precedenti documenti emessi, quali fossero gli oggetti assoggettati alla tutela, come riconoscerli, le eventuali modalità di restauro e salvaguardia *ammesse* e *proibite.* Elemento nuovo, solamente accennato in precedenza e trattato dettagliatamente nell'articolo 10 di questo documento , è l'attenzione volta allo studio dei danni arrecati ai beni culturali da parte dell'inquinamento atmosferico e dalle variazioni

[16]Carta di Venezia, Venezia, 1964, art.6-14
[17] Giovanni Urbani,Roma 1926-1994, si laureò in storia dell'arte e fu un allievo dell'ICR e successivamente ne divenne il direttore dal 1973 al 1983
[18] G. Urbani, *Problemi di conservazione*, Compositori, Bologna 1973
[19] Giovanni Urbani, *Quale cultura della conservazione per maturare la scienza della durabilità del patrimonio dei territori storici*?, a cura di P. Segala, R. Boschi, C. Minelli, Nardini Editore, Firenze 2013
[20] Giovanni Urbani, *Intorno al restauro*, a cura di Bruno Zanardi, Milano, Ed. Biblioteca d'arte Skira, 2000, pag.104

termogravimetriche dell'ambiente.
Sulla base di quanto enunciato nell'ultimo articolo della Carta del Restauro, venne steso e promosso da Urbani stesso il "*Piano pilota per la conservazione dei beni culturali dell'Umbria*" (1973), ed in seguito al terremoto che colpì la Basilicata e la Campania nel 1980, diresse anche le ricerche sulla *"Protezione del patrimonio monumentale dal rischio sismico"* (1983)[21].
Da questi studi di ricerca, circa 10 anni dopo, venne elaborata e realizzata dall'Istituto Centrale del Restauro la "*Carta del Rischio del Patrimonio Culturale*" attraverso la quale è stato possibile concretizzare il concetto di *restauro preventivo* e *conservazione programmata*[22].

1.2) Il rischio e la sua valutazione in ambito storico-artistico

I processi di deterioramento che colpiscono i materiali di un monumento esposto ai fattori ambientali causano gravi e seri danni fino alla completa distruzione del materiale. Essi sono determinati da un numero molto elevato di fattori che risultano dal punto di vista statistico come variabili articolate, strettamente correlate, difficilmente calcolabili con indici univoci. Sono quindi difficilmente semplificabili con modelli, perché il sistema risulta essere a variazione continua. Tuttavia, risulta necessario, a fronte della severità di tali processi, riuscire a definire quanto un monumento possa essere esposto a degrado e riconoscere quantificare i danni che può subire. Tale analisi può essere affrontata individuando i pericoli a cui il bene è sottoposto, valutando le sue condizioni di conservazione, la sua esposizione e di conseguenza valutando il rischio di degrado.

1.2.1) La stima del rischio in ambito storico-artistico

Generalmente i fattori utilizzati per stimare il rischio sono articolati in due componenti: *Vulnerabilità* e *Pericolosità*.

[21] http://www.icr.beniculturali.it/documenti/allegati/Lectio%20magistralis%20su%20Giovanni%20Urbani%20-%20profilo.pdf
[22] Angela M. Ferroni, Carlo Cacace, *Carta del rischio: la vulnerabilità archeologica*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali e Istituto Centrale per il Restauro, Roma

La *Vulnerabilità* (**V**) è la componente del rischio che viene definita dallo stato di conservazione della superficie dei materiali, della struttura e dalle modalità d'uso del bene. Essa può essere calcolata attraverso i valori assunti dalle grandezze del rispettivo dominio e utilizza come indicatore il livello di esposizione al danno a cui l'i-esimo bene è sottoposto[23].

La *Pericolosità* (**P**), anch'essa è una componente del rischio, ma descrive il processo fisico/chimico di deterioramento dei beni e le cause di degrado dei beni. Può essere calcolata attraverso i valori assunti dai fattori di pericolosità del rispettivo dominio[24] ed è utilizzata come indicatore della potenziale aggressione esercitata dall'ambiente rispetto alla superficie del manufatto, alla struttura ed al danno derivante da attività dirette dell'uomo per il bene i-esimo eventualmente presente sull'area territoriale del comune j-esimo.[25]

L'intensità del *Rischio* (**R**) dunque risulta esprimibile in funzione della Vulnerabilità, la quale permette di stimare la predisposizione di un bene ad essere danneggiato dai fattori ambientali, e della Pericolosità, la quale invece stima l' intensità potenziale dell'aggressione caratteristica del territorio in cui sono collocati i monumenti. Attraverso la misura di grandezze fisiche che concorrono alla determinazione dei fattori **V** e **P** si ottiene il rischio **R** tramite la relazione:

$$R = V \times P$$

1.2.2) La carta del rischio

Nei primi anni '90, come anticipato nel *Cap.1*, l'*Istituto Centrale per il Restauro*, oggi *Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro* (ISCR), guidato da Giovanni Urbani, sviluppò la *"Carta del rischio del Patrimonio Culturale"* la quale riassumeva il concetto di *restauro preventivo* , di *conservazione programmata* ed inoltre, conteneva le modalità d'approccio da seguire per individuare la procedura idonea per il conseguimento di questi scopi, considerando anche l'aggressività dell'ambiente.

Lo scopo della Carta del Rischio è quello di fornire uno strumento di supporto per l'attività scientifica ed amministrativa che permetta di esplorare, sovrapporre ed

[23] Op.Cit. Mucchi
[24] Ad esempio, nel dominio ambientale-aria i fattori che permettono la stima della pericolosità attualmente sono l'indice di annerimento ed erosione
[25] Op.Cit. Mucchi

elaborare informazioni relative ai potenziali fattori di rischio a cui regolarmente sono sottoposti i monumenti. Sfruttando questo strumento quindi è possibile svolgere un'adeguata attività preventiva individuando quali siano le opere architettoniche che necessitino prioritariamente di un intervento.

Per questo motivo è stato creato un software adatto all'individuazione dei beni tutelati e dei relativi pericoli a cui essi possono essere soggetti. Tale software è stato strutturato sulla base di un *Sistema Informativo Territoriale* (SIT) o *Geographic Information System* (GIS), uno strumento tecnico informatico che, a seguito dell'inserimento di dati inerenti la posizione dei beni tutelati, i fattori di degrado che si è soliti riscontrare su beni culturali esposti in l'ambiente esterno, i potenziali danni che essi possono causare, i pericoli ed i rischi a cui sono sottoposti, genera rappresentazioni cartografiche tematiche dei livelli di rischio i quali sono correlati alla relativa pericolosità del contesto locale preso in considerazione[26]. L'intensità del rischio varia nel tempo in relazione anche allo stato di conservazione del bene ed è diversa in rapporto alle caratteristiche territoriali ed ambientali in cui il bene è collocato.

Per questo motivo i meccanismi di degrado che inducono processi chimico-fisici di trasformazione dei materiali costitutivi i beni culturali, studiati mediante applicazione di metodologie scientifiche specifiche, vengo utilizzati come indicatori e filtri per selezionare dati utili al fine di costruire una Carta del Rischio descrittiva, la quale idealmente permetterebbe di individuare i beni culturali che necessitano di un intervento di manutenzione prima del verificarsi di un danno per cui siano necessarie operazioni di restauro. In realtà, l'inserimento dei beni culturali all'interno della Carta del Rischio risulta ancora incompleto[27], anche poiché lo Stato Italiano custodisce un'altissima percentuale del patrimonio culturale mondiale[28]. Essendo il SIT stato sviluppato sfruttando un approccio statistico riesce in parte a sopperire a questa problematica. Infatti esso consente di estendere l'analisi sullo stato di conservazione di un caso analizzato ad una più vasta popolazione di monumenti in prossimità a quello già inserito all'interno del

[26] M. Acierno, C. Cacace, A. M. Giovagnoli; "*La carta del Rischio: un approccio possibile alla manutenzione programmata. Il caso di Ancona*", Strutture e materiali. Problemi di conservazione, Nuova serie, anno III (2014), 5-6, Roma, pagg. 81-82

[27] L. Mucchi, "*La carta del rischio*", Materiale Didattico, Università di Firenze, Dipartimento di Ingegneria

[28] B.Bonanni, C. Cacace, A. Giovagnoli, R. Gaddi; "*Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto*", ICR e APAT, 2004

sistema informatico[5]. Ovviamente tale modalità d'estensione è stata studiata in modo da poter essere applicata solo nel caso in cui i monumenti presentino caratteristiche tra loro comparabili e siano soggetti a medesimi fattori di pericolosità[5]. Attualmente la necessità di assunzioni generiche per il calcolo della pericolosità, mediate su aree piuttosto ampie, e la cronica mancanza di risorse per valutare lo stato di conservazione di ogni singolo edificio portano alla generazione di mappe di rischio indicative, più che descrittive. Cionondimeno, le mappe hanno il grande vantaggio di visualizzare ed incrociare i dati di aggressività (mediata) dell'ambiente con il posizionamento dei beni e anche qualche dato sui meccanismi di degrado più comuni studiati su specifici casi ed allargati ad assetti culturali omogenei o confinanti (es. processi di annerimento delle superfici carbonatiche). La possibilità di procedere allargando i dati noti a casi simili permette di stimare e prevedere il *rischio* di danno di una vasta popolazione statistica, seppur con un certo grado di incertezza, consentendo così l'individuazione di una relazione tra quantità di degrado che un dato evento provoca sull'oggetto analizzato o sulla popolazione statistica considerata e la probabilità che esso si verifichi. Tutto ciò fornisce informazioni essenziali agli organi ed istituzioni deputati alla gestione del territorio per l'ottimizzazione delle risorse disponibili nell'attuazione di misure per la riduzione di fattori specifici di rischio.

1.2.3) Le tipologie di Rischio nella Carta del Rischio

L'ISCR ha evidenziato la presenza di diverse tipologie di rischio a cui un bene culturale può essere sottoposto, classificandole con il termine *dominio*; mentre con il temine *livelli* si indicano le scale di analisi.

I possibili *domini* , cioè le tipologie di rischio individuate, sono tre:

1- <u>*Dominio Statico-strutturale*</u>: il quale descrive un degrado del materiale che induce problematiche di tipo statico le cui cause spesso possono essere ricondotte a sismi, frane, dissesti, valanghe, fenomeni vulcanici, esondazioni, dinamiche dei litorali;

2- <u>*Dominio Antropico*</u>:è connesso ai fattori che tendono a modificare lo stato di conservazione del bene o alterano il contesto in cui esso si trova e possono essere

relazionati alla densità demografica, all'abbandono di aree o centri abitati, ai flussi turistici e ai furti;

3- *Dominio Ambientale-Aria:* descrive il danno subito dai materiali a causa dei fattori climatici e ambientali, quali l'inquinamento atmosferico e precipitazioni, caratteristici del territorio in cui i monumenti sono collocati.

Queste tre tipologie di rischio sono considerate indipendenti e vengono calcolate e analizzate singolarmente.

Con il temine *livello* , invece, si indica la scala di analisi. Anche in questo caso ne sono state riscontrate tre:

1) *Livello Territoriale*: si riferisce al grado di suscettibilità al processo di degrado di un materiale dettato dalle caratteristiche territoriali in cui il bene o un aggregato di essi sono situati. Il calcolo per la sua stima è svolto in funzione dei differenti livelli di pericolosità territoriale e delle caratteristiche del bene o beni considerati;

2)*Livello Individuale*: anch'esso si riferisce al grado si suscettibilità del bene, ma in questo caso si riferisce esclusivamente al singolo oggetto. Viene stimato tramite il prodotto tra la Pericolosità riscontrata a livello Comunale e la Vulnerabilità del bene preso in considerazione;

3) *Livello Locale*: come nel caso del rischio individuale si riferisce alla suscettibilità della singola unità (edificio) ma, in questo caso, la pericolosità viene calcolata a livello sub-comunale, moltiplicando la pericolosità nell'intorno del bene per la vulnerabilità stimata del bene medesimo.

1.2.4) La Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale-aria in ambito storico-artistico

L'inquinamento atmosferico e i fattori climatici implicano un deperimento dei materiali lapidei che costituiscono un'opera d'arte.[29] Il degrado di un'opera inizia subito dopo la sua realizzazione e la velocità con cui procede è correlata sia a fattori naturali che antropogenici[30]. Il processo è progressivo ed irreversibile e le modalità di impatto differiscono in funzione alla tipologia del materiale e dell'agente fisico-chimico coinvolto. Lo studio del fenomeno risulta essere molto

[29] Op.cit. Mucchi

[30] P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli, *I risultati dello studio sperimentale APAT-ICR per la valutazione del danno dei beni storico-artistici esposti all'aperto*, Rapporto APAT e ICR, 2006, pp. 63-74 www.isprambiente.gov.it/files/aria/inquinamento-degrado.pdf

complesso in quanto è molto difficile separare gli effetti dei vari agenti di degrado: nessun fattore agisce singolarmente: l'effetto di un fattore può catalizzare o rendere maggiormente suscettibile il materiale ad una successiva azione da parte di altri. Il degrado osservato è dunque frutto di una sinergia di più fattori, ed è visibile perché i materiali lapidei essendo supporti non resilienti non presentano sistemi di autodifesa e rigenerazione, come invece avviene negli esseri viventi.[31]

Per stimare la Pericolosità Territoriale nel dominio ambientale-aria è stato messo a punto dall'ISCR un sistema normalizzato per il reperimento dei dati. Inizialmente le informazioni venivano rilevate tramite formati numerici o formati cartacei ma esse non risultavano omogenee e standard. Per questo motivo sono stati individuati degli indici chimico-fisici specifici per la stima della Pericolosità Territoriale nel dominio ambientale-aria: *l'indice di erosione* , il quale permette di stimare la perdita di materiale lapideo; *l indice di annerimento* determinato dal deposito di particelle carboniose sulla superficie e *l'indice di stress-fisico* che esprime l'entità di danno fisico del materiale legato alla sua interazione termica e igrometrica con l'ambiente. Per quanto riguarda quest'ultimo indice, si stanno svolgendo degli studi che permettano di esprimerlo attraverso degli algoritmi, come già è possibile per l'indice di erosione e di annerimento.

Gli indici di erosione e annerimento vengono stimati tenendo in considerazione i fattori che risultano essere maggiormente determinanti per la loro manifestazione: piogge e inquinamento atmosferico.[32]

Da letteratura, l'*indice di erosione* è esprimibile applicando o la *formula di Lipfert* o la *funzione dose-risposta di Keculera*, le quali necessitano di dati ambientali molto articolati, che possono essere ottenuti tramite monitoraggio ambientale costante e specifico.

La *formula di Lipfert* applica la seguente relazione:

$$\mathbf{R = 18{,}8 \cdot Rain + 0{,}016\,[H^+] \cdot Rain + 0{,}18 \cdot (V_{ds} \cdot [SO_2] + V_{dn} \cdot [HNO_3])}$$

In cui: **R** = recessione superficiale (µm/anno); **18,8** = coefficiente che rappresenta la solubilità di $CaCO_3$ in equilibrio con 330 ppm di CO_2; **Rain** = precipitazioni (mm/anno); $[\mathbf{H^+}]$ = concentrazione di ioni idrogeno (mg/L); $\mathbf{V_{ds}}$ = velocità di deposizione di biossido di zolfo (cm/s); $[\mathbf{SO_2}]$ = concentrazione del biossido di

[31] Op. Cit. P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli

[32] Iscr- Ispra: "*Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma*", Roma, Settembre 2011, pag. 7

zolfo in aria (μg/m^3); $\mathbf{V_{dn}}$ = velocità di deposizione di acido nitrico (cm/s); [$\mathbf{HNO_3}$] = concentrazione di acido nitrico in aria (μg/m^3)

Analizzando nel particolare la relazione, si evince che:

18,8 • Rain = contributo della pioggia pulita (*effetto carsico*)

0,016 [$\mathbf{H^+}$] **• Rain** = effetto della pioggia acida (*acidità dovuta alla presenza di ioni SO_4^{2-}, NO_3^-*)

0,18 • $\mathbf{V_{ds}}$ **•** [$\mathbf{SO_2}$] = deposizione di SO_2

0,18 • $\mathbf{V_{dn}}$ **•** [$\mathbf{HNO_3}$] = deposizione di HNO_3

Per quanto concerne invece la *funzione dose-risposta di Kulcera*, la relazione è la seguente:

$$\mathbf{R = 4 + 0{,}0059 \cdot [SO_2] \cdot Rh_{60} + 0{,}054 \cdot Rain \cdot [H^+] + 0{,}078 \cdot [HNO_3] \cdot Rh_{60} + 0{,}0258 \cdot [PM_{10}]}$$

In cui: **R** = recessione superficiale (μm/anno); [$\mathbf{SO_2}$] = concentrazione del biossido di zolfo in aria (μg/m^3); [$\mathbf{HNO_3}$] = concentrazione di acido nitrico in aria (μg/m^3); [$\mathbf{PM_{10}}$] = concentrazione del particolato atmosferico PM_{10} in aria (μg/m^3); $\mathbf{Rh_{60}}$ = umidità relativa Rh – 60%; [$\mathbf{H^+}$] = concentrazione di ioni idrogeno (mg/L); **Rain** = precipitazioni (mm/anno); **4** = valore calcolato sperimentalmente che rappresenta il degrado in assenza di inquinanti; **0,054 • Rain •** [$\mathbf{H^+}$] = effetto della pioggia acida **0,0059 •** [$\mathbf{SO_2}$] **•** $\mathbf{Rh_{60}}$ = deposizione di SO_2; **0,078 •** [$\mathbf{HNO_3}$] **•** $\mathbf{Rh_{60}}$ = deposizione di HNO_3 **0,0258 •** [$\mathbf{PM_{10}}$] = deposizione di PM_{10}

Entrambe queste relazioni stimano la perdita di materiale in funzione alla presenza di SO_2 , HNO_3 e delle precipitazioni acide. La *formula di Kulcera* permette di stimare più realisticamente il potenziale danno indotto dall'erosione in area urbana, poichè oltre ai parametri climatici, include anche la presenza di alcuni inquinanti quali ossidi di azoto e particolato atmosferico i quali forniscono un contributo significativo al processo di perdita di materiale.[33]

L'*indice di annerimento* risulta genericamente stimato applicando una funzione che pone in relazione la concentrazione totale di particolato atmosferico in aria e la sua velocità di deposizione.[34]

$$\mathbf{I_{an} = f\,(PST, V_{dep})}$$

In cui: $\mathbf{I_{an}}$ = indice di annerimento della superficie **PST** = concentrazione totale di particolato atmosferico in aria $\mathbf{V_{dep}}$ = velocità di deposizione del particolato atmosferico

Gli algoritmi dei modelli presentati permettono di valutare uno o due parametri per volta e necessitano di dati specifici per il calcolo, quindi necessitano di

[33] Multiasses: "*Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage*", report 2005

[34] P. Bonanni, Op. Cit.

postazioni di rilievo specifiche e strutturate ad hoc, spesso non sono disponibili. Ad esempio, per il centro storico di Venezia, i dati esistenti di qualità dell'aria (SO_2, NO_x, acidità pioggie, ecc.) vengono attualmente raccolti su una sola centralina, posta a Sacca Fisola, zona di forte circolazione di correnti e non significativa per modellare degli indici specifici per parti più interne della città. Nel presente studio, si terrà quindi conto degli indici generali indicati dalla carta del rischio mediati su tutto il comune di Venezia affiancandolo all'individuazione di un sistema alternativo rispetto al calcolo degli indici sopra presentati per poter stimare l'effetto sinergico e degradativo di fattori quali acque meteoritiche, aerosol marino, inquinamento atmosferico e ed esposizione ai venti sulle superfici in Pietra d'Istria,

Per procedere in tale senso si è ritenuto necessario conoscere l'andamento della pericolosità territoriale nel dominio ambientale-aria della città di Venezia nel tempo, dal 2002 al 2014 compreso, valutando e discutendo singolarmente i principali parametri riportati nelle formule di Lipfert, Kulchera (come la concentrazione di NO_2) e per la stima dell'indice di annerimento (considerando la concentrazione di PM_{10}), integrando anche i dati inerenti agli eventi di precipitazioni meteoritiche, così da poter evidenziare se vi fossero stati periodi in cui l'aggressività ambientale (pericolosità territoriale) risulta maggiore rispetto alla situazione odierna. In aggiunta, si propone un sistema di monitoraggio delle superfici, che misuri l'effetto atmosferico e che stimi l'avanzamento di degrado, quindi la vulnerabilità, del materiale posto a determinate condizioni ambientali,. Si propone in particolare una tecnica d'analisi diretta del materiale, basata sullo studio della morfologia superficiale di parti più o meno esposte permettendo di valutare l'effetto cumulativo e non solo parziale di tutti i fattori degradativi ambientali.

1.3) La Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale-Aria in relazione al patrimonio culturale: i fattori determinanti

Come già anticipato nel *Cap. 1.2* , i fattori che tramite la loro azione sinergica inducono un decadimento dei materiali rilevabile attraverso i due indici d' annerimento ed erosione, sono gli inquinanti atmosferici e le piogge.
Essendo il territorio analizzato un'insieme di isole poste nel Mar Adriatico, oltre a questi due fattori si è ritenuto importante considerare anche l'effetto dell'aerosol marino.
Prima di descrivere i processi che comportano il degrado dei materiali lapidei verranno descritti brevemente i fattori considerati e le loro caratteristiche.

1.3.1) Gli inquinanti atmosferici e le loro fonti di emissione

Con il termine *inquinanti atmosferici* si è soliti indicare la presenza in aria di sostanze sotto forma di diversi stati: gassoso, di vapore, nebbie o pulviscoli. Essi risultano essere nocivi e/o dannosi sia per la salute dell'uomo, che per gli ecosistemi presenti sul territorio oltre che causa integrante del decadimento dei materiali lapidei[35]. La pericolosità di queste sostanze è connessa alla loro concentrazione e tipologia, in relazione al sistema considerato, alle caratteristiche e posizione delle sorgenti di emissione e delle condizioni ambientali[36]. Recenti studi hanno dimostrato che la pericolosità può accrescere in copresenza di fattori i quali possono fungere da catalizzatori.[37]
Gli inquinanti atmosferici possono essere classificati in tre gruppi principali, seppur questa distinzione risulti molto complessa a causa delle molteplici caratteristiche di questi composti. Una possibile *classificazione*, dunque, può essere effettuata in base alle *fonti di emissione*, al loro *processo di formazione* e alla loro *natura chimico-fisica*.
La prima classe distintiva è quella determinata dalle *fonti d'emissione* delle sostanze pericolose, le quali possono essere emesse in atmosfera da sorgenti

[35] http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/emissioni-di-inquinanti/emissioni-di-inquinanti/?searchterm=inquinanti%20atmosferici
[36] Dlgs 155 del 13 Agosto 2010
[37] D. De la Fuente, J.M. Vega, F. Viejo, I. Dìaz, M. Morcillo, *Mapping air pollution effects on atmospheric degradation of cultural heritage*, Journal of Cultural Heritage, 2012
M.Z. Jacobson, *Atmospheric pollution: history, science and religion*, Cambrige University, 2002

naturali o antropiche. Le sorgenti naturali sono riconducibili a processi legati ai cicli del pianeta terra, ovvero eruzioni vulcaniche, emissione di gas dal terreno o da aree paludose e da processi microbiologici. Le sorgenti antropiche, invece, sono legate alle molteplici attività dell'uomo. Le attività maggiormente incisive risultano essere quelle connesse alla combustione di idrocarburi, (processo sfruttato dalle centrali termoelettriche, per la locomozione veicolare, per la lavorazione di manufatti in processi industriali), la cui scomposizione genera gas. I gas così sprigionati possono essere ossidi di Azoto (generalmente raggruppati come NO_x), Anidride carbonica (CO_2), composti dello zolfo (generalmente raggruppati come SO_x), particelle carboniose e talvolta metalli pesanti. Le sorgenti antropiche risultano controllabili, a differenza di quelle di origine naturale, e per questo motivo vengono costantemente monitorate.[38]

Altra tipologia di distinzione è quella individuata in base al *processo di formazione*. Analizzando questo processo è possibile individuare *inquinanti primari e secondari*. I *primari* risultano essere quelli emessi direttamente in atmosfera, la cui origine può essere antropica o naturale e possono essere soggetti a fenomeni di trasporto, diffusione e deposizione.[39] Gli *inquinanti secondari* derivano dai primari e vengono generati tramite processi di trasformazione chimico-fisica[40]. Questi processi di trasformazione, generano nuove specie le quali possono presentare un coefficiente di pericolosità maggiore rispetto a quelle da cui derivano[41]; ad esempio numerosi studi hanno individuato che tramite ossidazione degli NO_x e SO_2 si può arrivare alla formazione di acido nitrico (HNO_3) e solforico (H_2SO_4) i quali reagendo con composti basici possono portare alla formazione di Sali.[42]

---

[38] J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci, *The effects ot air pollution on Cultural heritage*, Ed. Springer, 2009

[39] G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation: atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection*, Elsevier, Amsterdam, 1983
G. Amoroso, M. Camaiti, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea, Firenze, 2002
V. Fassina, *Environmental pollution in relation to stone decay* , in *Air pollution and Conservation*, ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 133-170, 1988
G. Berti, C. Galassi, A. Faustini, F. Forastiere, *Inquinamento atmosferico e salute: sorveglianza epidemiologica e interventi di prevenzione*, Epidemiol Prev, 2009, pp. 1-144

[40] F. Liguori, Tesi specialistica in Scienze ambientali, *Inquinamento di atmosfere urbane. Interpretazione dei dati e nowcasting con reti,* Dipartimento di Scienze ambientali, Venezia 2006.
http://www.arpa.emr.it/motap/ravenna/RELAZI8.HTM

[41] Op. Cit. G. Amoroso, V. Fassina
Op. Cit. G. Amoroso, M. Camaiti
Op.Cit. J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci

[42] Op. Cit. G. Amoroso, V. Fassina

Ultima classe distintiva è quella individuabile analizzando la *natura chimico-fisica* dei composti. A seconda del loro stato in condizioni di temperatura ambiente possono essere distinti in *inquinanti atmosferici*, se presenti in fase gassosa (NO_2, SO_2 e O_3), o in *particolato* se presenti in fase solida o liquida. Il termine particolato atmosferico viene utilizzato per indicare tutti i composti che possono essere soggetti al fenomeno di trasporto indotto dal vento o di sospensione nell'aria a causa delle ridotte dimensioni[43].

Il particolato atmosferico e la sua composizione

Il *particolato atmosferico* è un insieme di *particelle eterogenee* allo stato solido e liquido che presentano al loro interno sia *composti organici* che *inorganici*: sabbie, polveri, fuliggine, ceneri, composti metallici, fibre, sali solubili e diversi elementi come Carbonio, Vanadio, Nichel[44] e polveri comunemente denominate *PM_{10}, $PM_{2,5}$ e PM_1* [45] .

Le *polveri*, cioè le *Particulate Matter* (PM), si distinguono in diverse frazioni caratterizzate dal diametro aerodinamico: inferiore a 10 μm vengono denominate PM_{10} , inferiori a 2,5 μm $PM_{2,5}$ ed inferiore a 1 μm PM_1[46]. La dimensione delle particelle determina la tipologia di trasporto e di deposizione delle polveri sulle superfici oltre che la classe di appartenenza[47]. Infatti a seconda delle dimensioni le polveri possono essere classificate come *fini* o *grossolane*.

Op. Cit. G. Amoroso, M. Camaiti,
Op.Cit. V. Fassina,
[43] P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli, *I risultati dello studio sperimentale APAT-ICR per la valutazione del danno dei beni storico-artistici esposti all'aperto*, Rapporto APAT e ICR, 2006, pp. 63-74
Op. Cit. J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci
M.C. Facchini, S. Decesaris, M. Mircea, F.Cavalli, S. Fuzzi, *Chemical effects on cloud activation with special emphasis on the effect of carbonaceous aerosol from biomass burning*, EGS-AGU Joint Assembly, Nice 2003, France
[44] A.Marconi, *Materiale particellare aerodisperso: definizioni, effetti sanitari, misura e sintesi dele indagini ambientali effettuate a Roma. Laboratorio di Igiene Ambientale*, Istituto Superiore della Sanità, Roma. Ann. ISt. Super. Sanità, 2003, pp. 329-342
Op. Cit. P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli,
[45] Op. Cit. J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci
[46] Op. Cit. P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli,
[47] Op. Cit. J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci
Op. Cit. M.C. Facchini, S. Decesaris, M. Mircea, F.Cavalli, S. Fuzzi

Le *polveri fini* solitamente sono originate sia da sorgenti naturali che antropiche, comprendono particelle solide e liquide sospese in aria, persistono in sospensione per qualche settimana, e presentano un diametro inferiore a 1 μm (PM_1).[48]

Le *polveri grossolane* sono sia di origine naturale che antropica, presentano tempistiche di sedimentazione brevi dell'ordine di qualche ora. Le loro dimensioni sono variabili e comprendono sia le PM_{10} che $PM_{2,5}$[49]. Queste due classi sono quelle ritenute maggiormente pericolose per la salute dell'uomo[50].

In numerosi studi tramite l'applicazione di metodologie analitiche, come già brevemente anticipato, è stata determinata la composizione chimica del particolato atmosferico, il quale include *componenti organiche* ed *inorganiche*.

La *componente organica* è principalmente composta da carbonio elementare emesso in atmosfera tramite processi di combustione dal quale poi deriva, tramite processi ossidativi, di condensazione e dissoluzione, quello organico. Dal traffico veicolare deriva buona parte della frazione organica che comprende idrocarburi policiclici aromatici, benzaldeidi ed alcani[51]. Oltre a tale tipologia di composti materiale biologico come pollini, batteri, spore[52].

Nel caso specifico di Venezia i composti organici solitamente rivelati[53], in quanto dannosi sia per la salute umana che per l'ambiente[54], sono i policlobifenoli (PCBs), gli idrocarburi policiclici aromatici (PAHs) e i polibromodifenileteri (PBDEs)[55].

---

[48] V. Ariola, A. D'Alessandro, F. Lucareli, G. Marcazzan, F. Mazzei, S. Nava, I. Garcia-Orellana, P.Prati, G. Valli, R. Vecchi, *A. Zucchiati, Elemental characterization of PM10, PM2,5 and PM1 in the town of Genoa (Italy),* Chemosfere, 2006 62, pp. 226-232

[49] M.Martuzzi, F. Mitis, I. Iavarone, M. Serinelli, *Health impact of PM10 and ozone in 13 Italian cities*, World Health Organization, Copenhagen, 2002, Denmark.
http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0012/9110/E88700.pdf
World Health Organization, *Air quality guidelines for parti culate matter, ozone, nitrose dioxide and sulfur dioxid*e, Geneva, 2005, Switzerland,
http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

[50] F.Raes, R. Van Dingenen, E. Vignati, J. Wilson, J. Putaud, J. Seinfeld, P. Adams, *Formation and cycling of aerosol in the global troposphere*, Atomospheric Environment, 2000, 34, pp 4215-4240

[51] W.F. Rogge, M.A. Mazurek, L.M. Hildemann, G.R. Cass, B.R.T. Simoneit, *Quantification of urban organic aerosols at a molecular level: identification, abundance and seasonal variation*, Atmospheric Environment, 1993, 27, pp. 1309-1330

[52] P. Lenschow, H.J. Abraham, K. Kutzner, M. Lutz, J.D. Preub, W. Reichenbacher*, Some ideas about the sources of PM10. Atmospheric Environment*, 2001, 35, pp. 23-33

[53] B. Lauby-Secretan, D. Loomis, Y. Grosse, F. El Ghissassi, V. Bouvard, L. Benbrahim-Tallaa, N. Guha, Robert Baan, Heidi Mattock, Kurt Straif,*Carcinogenicity of polychlorinated biphenyls and polybrominated biphenyls*, in *The Lancet Oncology*, vol. 14, nº 4, aprile 2013, pp.287-288

[54] I limiti di concentrazione sono dettati dal DM 471/1999

[55] T. Secco, F. Pellizzato, A. Sfriso, B. Pavoni, *The changing state of contamination in the Lagoon of Venice. Part 1: organic pollutants*, Chemosphere, 2005, 58, pp. 279-290

Altra componente del particolato atmosferico è quella *inorganica* al cui interno è possibile rintracciare ioni nitrato (NO_3^-), ioni ammonio (NH_4^+) e ioni solfato (SO_4^{--}) i quali derivano prevalentemente all' aerosol marino.[56]
Oltre a questi ioni è possibile rintracciare anche la presenza di ioni metallici e non metallici come: Al, Fe, Ca, Si, V, Pb e Zn. Essi posso essere originati da plurime sorgenti, ad esempio da combustione incompleta dei combustibili fossili e rifiuti.[57]

La deposizione degli inquinanti atmosferici sulle superfici architettoniche

Gli inquinanti atmosferici vengono emessi da parte di una sorgente, successivamente si disperdono nell'aria. Durante le fase di dispersione possono verificarsi reazioni che comportano la trasformazione degli inquinanti primari in secondari. Il processo si conclude con la fase di deposizione su organismi e superfici.[58]
I processi di deposizione che possono verificarsi sono di due tipologie: deposizione per via secca (*dry deposition*) o umida (*wet deposition*), e si diversificano a seconda delle condizioni ambientali presenti durante questa fase. [59]
Quest'elaborato verte sullo studio della superfici lapidee di alcuni edifici veneziani, quindi i processi di deposizione verranno descritti considerando questa tipologia di supporto.

Il processo di *dry deposition* si verifica quando gli inquinati agiscono sotto forma di gas o aerosol, i quali a seconda delle dimensioni possono raggiungere la

---

A. Gambaro, M. Radaelli, R. Piazza, A.M. Stortini, D. Contini, F. Belosi, R. Zangrando, P. Cescon, *Organic micropollutants in wet and dry deposition in the Venice lagoon*, Chemosphere, 2009, 76, pp. 1017-1022

[56] G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation : atmospheric pollution, clearing, consolidation and protection,* Elsevier, Amsterdam, 1983; G. Amoroso, M. Camaiti, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea, Firenze, 2002
J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci, *The effects ot air pollution on Cultural heritage*, Ed. Springer, 2009

[57] H.D. Van der Gon, M. Magdalen Jozwicka, E. Hendricks, M. Mhtenkeni Gondwe, M. Schaap, *Mineral dust as a component of Particulate Matte*r, Netherlands Research Program on Particulate Matter, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2010, http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500099003.pdf
C. Colombi, S. Angius, V. Gianelle, M. Lazzarini, *Particulate Matter concentration, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system,* Atmospheric Environment, 2013
F. Luccarelli, P.A. Mando, S. Nava, P. Prati, A. Zucchiatti, *Elemental composition of urban aerosol collected in Florence, Italy*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 161-163, 2000,pp. 819-824
Op. Cit. A.G. Nord, A. Svardh, K. Tronner

[58] Op.Cit J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci; M. Obadesi, A. Sofuoglu, N. Vardar, Y. Tasdemir, T. M. Holsen, *Measurement of dry deposition and air-water excanghe of polycyclic aromatic hydrocarbons with the water sampler*, Environmental Science Technologies, 1999, 33, pp. 426-434; C. Leifu, P. Shaolin, L. Jingang, H. Qianqian, *Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou, China*, Lournal of Environmental Sciences, 2012, 24, pp. 632-639

[59] Op. Cit. G. Amoroso

pietra depositandosi su essa attraverso quattro diversi meccanismi: *diffusione molecolare browniana e fenomeni di turbolenza, termoforesi, flusso idrodinamico di Stefan,* e per *gravità.*[60]

La *diffusione molecolare browniana e fenomeni di turbolenza* si verificano quando le particelle che si trovano nell'aria, solitamente aventi dimensioni <0,1 μm, presentano un movimento casuale irregolare di tipo browniano, provocato dal continuo bombardamento che esse subiscono da parte delle molecole del mezzo in cui esse sono in sospensione. Questa tipologia di movimento comporta uno scontro tra le particelle e superfici, le quali possono catturarle. Questa tipologia di deposizione e trasporto è influenzata dalla turbolenza dell'aria, dalle condizioni di umidità e dalla rugosità della superficie lapidea.[61]

Il fenomeno di *termoforesi,* generalmente, consiste nella migrazione di particelle in ambiente gassoso o liquido indotto da un gradiente di temperatura. Particelle di inquinanti, aventi dimensioni comprese tra 0,1 μm e 1 μm, tendono a depositarsi sulla superficie lapidea quando la pietra presenta una temperatura inferiore rispetto all'aria circostante.[25]

La *deposizione per flusso idrodinamico di Stefan* si può verificare in presenza di condensa sulla superficie lapidea del monumento. In queste condizioni si crea in prossimità della pietra un flusso idrodinamico il quale permette una maggiore deposizione degli inquinanti atmosferici. E' possibile anche che si verifichi una situazione contraria, ovvero che la condensa sulla superficie della pietra evapori, questo comporta la formazione di un flusso idrodinamico che allontana gli aerosol e non permetta la deposizione degli inquinanti.[25]

Ulteriore tipologia di deposizione via secca è quella che avviene per *gravità.* Questo fenomeno è riscontrabile maggiormente su superfici orizzontali e in condizione di aria calma. Le particelle che maggiormente risentono di questa tipologia di sedimentazione sono quelle che presentano una dimensione piuttosto rilevante, in quanto possono restare in sospensione per tempi minori e possono essere trasportate dal vento per brevi tratte.[25]

---

[60] Op. Cit. J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci,
P. Gasparoli, *Le superfici esterne degli edifici*, Alinea, Firenze, 2003
[61] Op. Cit. G. Amoroso , M. Camaiti
Op. Cit.G. Amoroso, V. Fassina

La *wet deposition* è strettamente legata alle precipitazioni. Come tratteremo dettagliatamente nel *Cap. 1.4.1.3*, inerente al degrado chimico della pietra, al verificarsi di eventi piovosi le concentrazioni di inquinanti in atmosfera calano, dando luogo ad un processo di depurazione dell'aria. L'aria risulterà depurata perché,tramite fenomeno di coalescenza, all'interno delle gocce di acqua verranno inclusi gli inquinanti precedentemente dispersi in aria a concentrazione differente a seconda della dimensione della goccia. Questo fenomeno però comporta una variazione del pH dell'acqua[62], che può assumere valori talvolta inferiori a 5 (se in atmosfera vi erano NO_x e SO_x), e ciò determina l'instaurarsi d' interazioni di tipo chimico-fisico con la superficie lapidea con cui entreranno in contatto.

1.3.2) L'aerosol marino ed il vento

L'*aerosol marino* è parte integrante del particolato atmosferico.[63] La sua formazione può essere ricondotta a due meccanismi: il primo è legato al vento il quale soffiando sulle croste delle onde del mare può generare uno spray; il secondo è legato alla rottura delle bolle d'aria presenti sulla superficie delle onde. Entrambi i meccanismi inducono la formazione di particelle il cui ordine di grandezza può raggiungere i 100 µm (nel caso siano generate dal vento), ed essere comprese tra 1 e 10 micron nel caso siano prodotte per collasso delle bolle d'aria. Le particelle generate dalla rottura di bolle d'aria vengono denominate *film drops*, quelle invece generate dall'azione del vento *jet drops*[64].

Le *film drops* e *jet drops* una volta in atmosfera possono subire un processo di evaporazione e divenire così *brine drops.* Questo fenomeno si può verificare quando l'umidità relativa UR[65] della superficie del mare è al 98% a 25°C[66]. Nel

---

[62]Op. Cit. G. Amoroso , M. Camaiti
A.J. Hutchinson, J. B. Johnson, G. E. Thompson, G. C. Wood, P.W. Sage, M. J. Cooke, *Stone degradation due to wet deposition of pollutants*, Corrosion Science, 1993, pp. 1881-1889
R. Alaimo, S. Deganello, L. Di Franco, G. Montana, *Caratteristiche composizionali del particolato atmosferico e chimichismo delle acque di precipitazione nell'area urbana di Palermo*, in: Atti del I Simposio int. La conservazione dei monumenti nel bacino Mediterraneo: influenza dell'ambiente costiero e dello spray marino sulla pietra calcarea e sul marmo, Bari, 7-10 Giugno 1989, Italia, pp. 369-377
[63] K.Torfs, R. Van Griken, *Chemical relations between atmospheric aerosol, deposition and stone decay layers on historic buildings at the maditerranean coast*, Atmospheric Enviroment, 15, 2179-2192, 1997
[64] S.Riato*, Interazioni chimico-fisiche di manufatti lapidei con l'ambiente e studio di trattamenti conservativi*, Tesi di dottorato T00420, Università Cà Foscari, 2004-2006
[65] L'umidità relativa è il rapporto moltiplicato per 100 tra umidità assoluta dell'aria e umidità assoluta dell'aria satura di vapore nelle condizioni di pressione totale e temperatura.

caso in cui l'atmosfera presenti UR intorno al 70-74% le *brine drops* subiscono un cambio di fase e le gocce supersature divengono particelle di sale. Solitamente le particelle presenti nell'aerosol marino presentano dimensioni pari a 0,1- 400µm. La concentrazione di aerosol marino in atmosfera è strettamente correlata alla velocità del vento e all'altitudine.

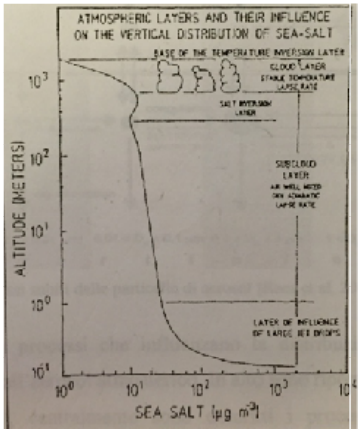


Figura 1 Schema riassuntivo dei diversi livelli atmosferici
e la loro influenza sulla distribuzione verticale del sale marino[66]

La concentrazione di Sali risulta essere maggiore in prossimità della superficie dell'acqua marina e cala al crescere dell'altezza.[67] Come si evince dalla schema riportato in *Fig. 1*, in prossimità della superficie dell'acqua salmastra la concentrazione dei Sali risulta essere maggiore ed e riconducibile all'elevata concentrazione di *jet drops* che possono subire un breve processo di trasporto per poi ritornare in mare. A circa 100 metri di altitudine la situazione tende a stabilizzarsi: la quantità di Sali presenti diminuisce molto più lentamente. Ad altitudini molto elevate, in prossimità della base delle nuvole, area denominata *salt inversion layer*, si verifica un'inversione di tendenza riconducibile a due meccanismi. Il primo è correlato alla velocità elevata a cui si muovono le nuvole rispetto all'aria sottostante, il secondo è legato invece al moto sovrastante di una grande quantità di particelle saline le cui dimensioni solitamente tendono ad aumentare al ridursi della distanza dalle aree umide al di sotto delle nubi. Il *salt inversion layer* risulta essere un accumulo di Sali in quanto la velocità di caduta

[66] F. Zezza, F. Macrì, *Marine aerosol and stone dacay*, The science of the total Enviroment, 167, 123-143, 1995
[67] F.Raes, V. Dingenen, E. Vignati, J. Wilson, J. Putaud, J. Seinfeld, P. Adams, *Formation and cycling of aerosol in the glogal troposphere*, Atmospheric Enviroment, 34, 4215-4240, 2000

delle particelle è compensata dalla velocità di risalita.

L'aerosol marino quando diffuso in atmosfera può subire alterazioni, rimozioni e distruzioni tramite *deposizione wet* o *dry*. Ovviamente anche in questo caso, la deposizione dei Sali contenuti nell'aerosol implicherà dei processi degradativi al supporto lapideo, in questo caso di tipologia fisica-meccanica (*Cap.1.4*).

La composizione dell' aerosol marino

L'aerosol marino, derivando dalle acque salmastre solitamente presenta la medesima composizione di esse, con minime variazioni talvolta indotte da agenti endogeni[68]. Mediamente la salinità delle acque marine risulta attorno a 35g/Kg e il composto maggiormente presente è NaCl.[69] Oltre al cloruro di sodio sono presenti numerosi altri Sali, ad esempio $MgSO_4$, $MgCl_2$, KCl, NaBr e $CaCO_3$ [70]. Il carbonato di calcio viene solitamente ricondotto ad agenti endogeni.

Le acque marine della laguna di Venezia, analizzate in uno studio condotto nel 1995[71] hanno rilevato una salinità media di circa 30 g/L e gli ioni rivelati risultarono essere Cl^-, SO_4^{2-}, NO^{3-}, I^-, Br^- e PO_4^{3-}. Recenti studi condotti nel 2005[72], hanno evidenziato che la composizione dell'aerosol della laguna veneziana presenta una composizione similare a quella dell'acqua marina[73]. E' stata confermata e analizzata la presenza di NaCl e Na_2SO_4 all'interno dell'aerosol tramite rapporti in peso. Per quanto riguarda il rapporto Na^+/Cl^-, è stato possibile individuare che la concentrazione di ioni Cl^- presenti in aria risulta maggiore (1,9 – 4,9) rispetto a quello rintracciabile nell'acqua marina (1,8 in peso) il che è stato ricondotto ad attività antropiche. Medesima tipologia di rapporto è stata applicata a Na_2SO_4 il quale ha evidenziato anche in questo caso un valore molto maggiore di SO_4^{2-}, in un range compreso tra 15 e 40, rispetto a

---

[68] S.Riato, *Interazioni chimico-fisiche di manufatti lapidei con l'ambiente e studio di trattamenti conservativi*, Tesi di dottorato T00420, Università Cà Foscari, 2004-2006

[69] R. Cohen-Adad, Chr. Balarew, S. Tepavitcharova, *Sea-water solubility phase diagram, Application to an extractive process*, Pure Applied Chemestry, 74, 10, 1811-1821, 2002

[70] Ridley Chester, Introduction to marine chemistry, London, New York Academic Press, 60-133, 1971

[71] S.Riato, *Interazioni chimico-fisiche di manufatti lapidei con l'ambiente e studio di trattamenti conservativi*, Tesi di dottorato T00420, Università Cà Foscari, 2004-2006

[72] F. Prodi, F. Belosi, S. Ferrari, G. Santachiara, P. Masia, L. Di Matteo, *Aerosol Characterization in the Venice Lagoon,* Scientific Research and Safeguarding of Venice, Research Programme 2004-2006, Volume V, 2005, p.171

[73] A.G. Nord, A. Svardh, K. Tronner, *Air pollution levels reflected in deposits on building stone, Atmospheric Environment*, 1994, 28, pp. 2615-2622

K. Torfs , R. Van Grieken, *Chemical relation between atmospheric aerosols, deposition and stone decay on historic buildings at the Mediterranean coast,* Atmospheric Environment, 1997, 31, pp. 2179-2192

quello riscontrato nella acque salmastre, di circa 0,25. Inoltre analizzando la componente fine di deposito dell'aerosol, è stata rilevata la presenza di K e Mn, mentre nelle frazioni *coarse* sono stati rintracciati Ca, Si, Mg e metalli di origine antropica, quali Ti, Zn, As e Ni.

1.2.3) Le precipitazioni e il vento

Essa presenta delle peculiarità che la distinguono dagli altri liquidi, esempio sono la sua densità che varia in funzione alla temperatura: aumenta da 0 a 4°C e solo successivamente diminuisce; o l'aumento del suo volume al verificarsi del passaggio di stato da liquido a solido. Un'altra caratteristica che presenta questo composto è la diminuzione della temperatura di solidificazione all'aumentare della pressione.

Inoltre l'acqua presenta un'elevata costante dielettrica (78,5)[74], e per questo risulta essere un ottimo solvente e agente dissociante, caratteristica molto importante per quanto riguarda il suo impatto sulle superfici lapidee.[75]

In questa tesi verrà considerato l'impatto indotto principalmente dalle precipitazioni, escludendo ulteriori variabili.

Le precipitazioni vengono originate dalle nuvole, costituite da una massa d'aria satura di vapore in cui vi sono sospese numerose gocce di acqua liquida. All'interno di questo sistema la temperatura risulta essere inferiore a 0°C, ma essendo in condizioni di sovrasaturazione l'acqua risulta essere ancora allo stato liquido. Il sistema però risulta essere instabile e con estrema facilità si può verificare un cambio di stato da liquido a solido, il che comporta la formazione di cristalli di ghiaccio. A seconda della temperatura atmosferica le precipitazioni sul pianeta possono manifestarsi in diverse forme: neve, grandine, pioggia.[76]

Per il verificarsi di un evento piovoso, le goccioline che compongono le nubi devono aumentare di volume e di conseguenza anche di peso, così che la forza di gravità risulti essere superiore rispetto alle forze ascensionali presenti nella nuvola. Inoltre deve verificarsi la condizione in cui le gocce non tendano ad

---

[74] Caratteristica dei solventi , definisce la capacità solubilizzante ed è correlata alla polarità

[75] G. Amoroso, M. Camaiti, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea, Firenze,pp. 94, 2002

[76] G. Amoroso, M. Camaiti, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea, Firenze,pp. 100, 2002

evaporare nel momento in cui entreranno in contatto con l'ambiente esterno alla nube, povero di umidità. E' stato calcolato che una goccia per percorrere qualche centinaio di metri senza evaporare deve presentare un diametro non inferiore ai 200 μm.[77]

La quantità, la durata dell'evento piovoso e la grandezza delle gocce sono strettamente correlate ai fenomeni che inducono la formazione di quest'ultime.

Le precipitazioni possono essere classificate in base ad alcuni elementi morfologici: diametro e velocità della caduta della goccia, quantità di precipitazione. Queste informazioni vengono reperite tramite analisi pluviometriche con strumenti quali pluviometri e pluviografi, che restituiscono informazioni in merito alla quantità di acqua meteoritica (espressa in mm/h) su un suolo orizzontale e piano, impermeabile ed in assenza di fenomeni di evaporazione, e pluvioscopi che forniscono informazioni in merito alla durata dell'evento.[78] Sulla base di questi elementi quindi gli eventi possono essere classificati come: Nebbia, pioviggine, pioggia leggera, moderata, forte, violenta e nubifragio(*Tab. 1*)[82].

Eventi atmosferici				
Ordine di grandezza degli elementi caratteristici delle precipitazioni delle acque				
Precipitazione	Quantità delle precipitazioni (mm/h)	Diametro massimo della velocità di caduta delle gocce (mm)	Velocità di caduta delle gocce al suolo (mm/s)	Umidità assoluta atmosferica (acqua in mg/m^3 di aria)
Nebbia secca	Tracce	0,01	0,003	-
Nebbia umida	0,05	0,1	0,25	50
Pioviggine	0,25	0,2	0,75	100
Pioggia leggera	1	0,5	2	150
Pioggia moderata	4	1	4	300
Pioggia forte	15	1,5	5	800
Pioggia violenta	40	2	6	1800
Nubifragio	100	3	8	5400

Tabella 1: Eventi atmosferici e ordini di grandezza[77]

Nel caso in cui durante un evento piovoso sia presente anche il vento, si possono originare le *piogge battenti*. Esse colpiscono principalmente i piani superiori degli edifici in quanto essi risultano maggiormente esposti alle turbolenze d'aria. Il vento inoltre, come nel caso di Venezia e per qualunque altra città posta in prossimità del mare, può influenzare la composizione chimica delle acque

[77] Enciclopedia Treccani, voce: pioggia
[78] Enciclopedia Treccani, voce: pluviometria

meteoriche, ciò è dovuto alla possibilità di generare spray salmastro dalle creste delle onde marine arricchendo l'atmosfera di ioni, come già specificato nel *Cap. 1.3.2.*[79]

La composizione delle precipitazioni

La composizione della pioggia viene anche modificata dalla presenza in atmosfera di inquinanti (*Cap.1.3.1)*, quali ad esempio ossidi di azoto, anidride solforosa e PM, che vengono inglobati dalle gocce al verificarsi di un evento piovoso/nevoso o in presenza di umidità a valori elevati. Si formano così delle soluzioni e dispersioni e tramite coalescenza l'acqua trascina gli inquinanti verso il suolo. Il verificarsi di tale processo comporta la formazione di composti acidi, dando luogo alle cosi chiamate *piogge acide* e *deposizione acida.* I meccanismi di formazione delle piogge acide e i loro effetti sui materiali edili di matrice carbonatica, verranno descritti nel dettaglio nel *Cap.1.4.*

1.4.) L'effetto sinergico dei fattori di pericolosità territoriale sulla Pietra d'Istria

Risulta estremamente difficoltoso descrivere singolarmente i fattori che determinano il degrado delle superfici lapidee, in quanto essi risultano essere strettamente correlati l'uno all'altro. In questo capitolo si cercherà di descrivere, per quanto possibile, i processi sinergici che comportano i fenomeni d'*alterazione* e *degrado* dei supporti lapidei carbonatici. E' importante ricordare che i termini *alterazione* e *degrado* presentano una definizione ben distinta[80]. L'*alterazione* non comporta necessariamente un peggioramento delle caratteristiche del materiale roccioso per quanto concerne la sua conservazione (es: variazioni cromatiche), al contrario il *degrado* lo comporta sempre (alveolazione, disgregazione, scagliatura,

[79] G. Amoroso, M. Camaiti, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea, Firenze,pp. 101, 2002

[80] UNESCO, *Rapporto su Venezia,* Ed. scientifiche e tecniche Mondadori, Milano,1969

ecc.)[81]. Entrambi risultano essere fenomeni degradanti ed irreversibili: non vi è alcun materiale che possa mantenere intatte le sue qualità e caratteristiche per tempistiche illimitate[82].

Prima di illustrare i possibili processi degradativi a cui può essere soggetta la Pietra d'Istria in ambiente lagunare, verranno brevemente descritte le caratteristiche peculiari di questa roccia.

1.4.1) La pietra d'Istria

La penisola Istriana è situata nel mare Adriatico tra il Golfo di Trieste, le Alpi Dinariche e il Golfo del Quarnaro. Questo territorio fece parte della Serenissima dal 1450 circa fino al 1797, anno in cui la supremazia veneziana decadde[83].

Figura 1 Inquadramento territoriale della penisola Istriana

La Pietra d'Istria veniva, ed è tuttora, estratta dalle cave poste nei pressi delle città di Parenzo, Orsera e Rovigno.

Le analisi petrografiche condotte su questa roccia hanno permesso di classificarla come *Micrite* o *Mudstone*, cioè una roccia formatasi da fango calcareo costituito da cristalli di calcite a grana estremamente fina, avente dimensioni inferiori ai 4 millesimi di millimetro, attraverso il processo di diagenesi. Presenta una struttura isotropa in cui è possibile osservare venature orientate, riempite di calcite secondaria e talvolta possono esservi materiali argillosi ed ossidi di ferro concentrati principalmente lungo i piani di sedimentazione e stilo litici[84]. Generalmente presenta una colorazione biancastra, tendente al grigio o al giallo, con rare impurità di pirite, clorite e argille. Una peculiarità di questo materiale è la

---

[81] L. Campanella, A. Casoli, M. P. Colombini, R. Marini Bettolo, M. Matteini, L. M. Migneco, A. Montenero, L. Nodari, C. Piccioli, M. Plossi Zappalà, G. Portalone, U. Russo, M. P. Sammartino, *Chimica per l'arte*, Ed. Zanichelli,Roma, 2007

UNESCO, *Rapporto su Venezia,* Ed. scientifiche e tecniche Mondadori, Milano,1969

[82] G. Amoroso, C. Felix, *Les produits de traitements de la pierre de taille et la lutte contre l'irriversibilité des processus d'alteration*, Matèriaux et Technique, SIRPE Paris, 3 Mars 1978, 7-8 Juin-juillet 1978, 9-10 Septembre-Octobre 1978, 11-12 Novembre- Dècembre 1978

G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 45-46

[83] N. Fiorentin, *La pietra d'Istria a Venezia: atti del seminario di studio*, Venezia, 3 Ottobre 2003, Regione del Veneto, Sommacampagna, ed. Cierre, Verona, 2006

UNESCO, *Rapporto su Venezia,* Ed. scientifiche e tecniche Mondadori, Milano,1969

[84] UNESCO, *Rapporto su Venezia,* Ed. scientifiche e tecniche Mondadori, Milano,1969

sua bassa porosità, solitamente compresa tra 0,2-0,3 cm^3/100g e con pori generalmente globulari o allungati aventi un raggio medio superiore ai 10μm. Tale caratteristica conferisce al materiale un'elevata compattezza e una buona impermeabilità. Per questo motivo risultò idonea ad essere applicata come materiale edile nella città di Venezia in quanto creava una barriera alla risalita capillare a cui altri materiali, come i mattoni aventi una porosità maggiore, risultano soggetti[85]. Altre caratteristiche della Pietra d'Istria sono un'elevata resistenza alla compressione, circa 163 MPa, e un coefficiente di resistenza all'abrasione pari a 12,6 cm^3/ 50 cm^2 [86].

L'insieme di queste caratteristiche conferiscono alla pietra un'elevata resistenza al degrado indotto dall'aggressione da parte dell'ambiente, che si manifesta soprattutto sulla superficie. Nel caso in cui il materiale presenti evidenti strati di sedimentazione essi possono risultare punti sensibili all'attacco chimico-fisico e compromettere la stabilità del materiale[87], ad esempio all'interno delle intercapedini possono depositarsi Sali e acqua che in determinate condizioni ambientali possono cambiare il loro stato fisico e volume provocando delle pressioni interne al sistema minerale, provocando esfoliazioni e distacchi (il processo verrà descritto dettagliatamente nel *Cap. 1.4.2*)

Le caratteristiche che conferiscono a questa pietra calcarea una buona resistenza ai fattori aggressivi dell'ambiente, ed in particolare a quello marino, vennero individuate già nell'antichità, e per questo venne utilizzata sia per le fondazioni della città che come materiale ornamentale.

Si presume, perché ancora non è nota una data certa, che la Pietra d'Istria giunse a Venezia intorno alla fine del 1200, dopo le conquiste di Parenzo e Giustinopoli avvenute nel 1267 e 1276, in piccole quantità a fine decorativo per la costruzione delle basi scolpite delle due colonne di Marco e Todaro della Piazzetta[88].

Successivamente l'utilizzo della pietra d'Istria si estese ed il suo commercio fu fiorente fino all'inizio del 1900, periodo in cui la qualità della roccia estratto

---

[85] M. Simunic Bursic, D. Alijinovic, D. Orsulic, *Kirmenjak- the stone on which Venice was built*, Geophysical Research Abstracts 7, 10520, 2005

[86] M. Simunic Bursic, D. Alijinovic, D. Orsulic, *Kirmenjak- the stone on which Venice was built*, Geophysical Research Abstracts 7, 10520, 2005

[87] G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation : atmospheric pollution, clearing, consolidation and protection,* Elsevier, Amsterdam, 1983

[88] N. Fiorentin, *La pietra d'Istria a Venezia: atti del seminario di studio*, Venezia, 3 Ottobre 2003, Regione del Veneto, Sommacampagna, ed. Cierre, Verona, 2006

iniziò a diminuire ed in parallelo altri materiali iniziarono ad essere concorrenziali, per questo motivo l'importazione diminuì considerevolmente fino a quasi completo arresto[89].

1.4.2) Ambiente e le superfici lapidee

Il *degrado* dei materiali minerali è riconducibile alle *proprietà intrinseche* ad esso, cioè alle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche, che possono renderli più o meno resistenti alle sollecitazioni dell'ambiente.

Come descritto nel *Cap. 1.4.1*, la Pietra d'Istria, in linea generale, presente delle proprietà composizionali e strutturali che le garantiscono una buona stabilità e resistenza.

In un ambiente poco inquinato, i composti liquidi e gassosi che risultano aggressivi per le superfici lapidee presenterebbero concentrazioni estremamente ridotte, e la velocità dei processi di degrado ridotta. Lo sbilanciamento di tale rapporto, nel caso di materiali lapidei posti in opera, si traduce in un'accelerazione dei processi alterativi, i quali modificano le caratteristiche chimico-fisiche-meccaniche del materiale.[90]

Nel *Cap. 1.3*, sono stati evidenziati i fattori predominanti che caratterizzano la pericolosità territoriale nel domino ambientale-aria indagati per la città di Venezia. Questi fattori, quali inquinamento atmosferico, aerosol marino, precipitazioni, non agiscono mai singolarmente e ciò comporta l'aumento del loro potere aggressivo quando entrano in contatto con le superfici lapidee.

Il degrado e le alterazioni dei materiali si possono manifestare in più forme, e le loro cause possono essere ricondotte a due tipologie di processi: *chimico e fisico-meccanico.*

I *processi* che comportano degrado e alterazioni di *tipo chimico* sono quelli che prevedono reazioni chimiche vere e proprie con lapietra, le quali inducono modifiche di carattere composizionale. Per poter manifestarsi tali reazioni necessitano della presenza, oltre che dell'inquinante, anche dell'acqua sia di derivazione meteoritica che aerosol. In queste condizioni la Pietra d'Istria subisce

---

[89] Op. Cit. N. Fiorentin

[90] L. Campanella, A. Casoli, M. P. Colombini, R. Marini Bettolo, M. Matteini, L. M. Migneco, A. Montenero, L. Nodari, C. Piccioli, M. Plossi Zappalà, G. Portalone, U. Russo, M. P. Sammartino, *Chimica per l'arte*, Ed. Zanichelli,Roma, 2007

processi di degrado caratteristici, che si manifestano sotto forma di croste e patine nere, fenomeni di dilavamento i quali apportano modifiche anche di carattere fisico.

I *processi* di *degrado fisico-meccanico* prevedono l'interazione dei fattori ambientali con la struttura del materiale; possono provocare effetti abrasivi e stress meccanici aventi un'intensità tale da comportarne la disgregazione. Esempi di tali processi sono i fenomeni di gelo-disgelo, processi di cristallizzazione di Sali e il fenomeno di erosione idrica superficiale. Quest'ultimo non comporta stress meccanico interno, ma prevede l'asportazione di materiale indotto dal *ruscellamento* di acque sulla superficie.

I *processi di degrado chimico e fisico-meccanico* si manifestano molto spesso simultaneamente su una stessa superficie lapidea. La presenza di un processo facilita l'attacco dell'altro. Per questo motivo, la descrizione dei processi di degrado non verrà suddivisa per tipologia (chimico,fisico-meccanica), ma considerando un possibile percorso di manifestazione.

Già nel 1861, lo studio del degrado delle superfici lapidee ornamentali portò all'individuazione diretta della correlazione tra i livelli di inquinamento, le piogge e il decadimento del materiale. Nel 1872, Robert Angus Smith nel libro *Air and rain: the beginning of chemical climatology,* teorizzò e descrisse l'effetto delle *piogge acide,* termine da lui coniato per descrivere tutti i processi di ricaduta dall'atmosfera di particelle, gas e precipitazioni acide, differenziando la terminologia nel caso in cui siano le nebbie o la rugiada a depositarsi con *deposizioni acide umide*[91].

Sulla base del progetto di Smith si svilupparono molti studi e nel 1968, per la prima volta ne venne condotto uno completo su dato fenomeno da parte dello svedese Svantè Odèn[92].

I *gas inquinanti* individuati come responsabili del *degrado* dei materiali lapidei in presenza di acqua sono gli *ossidi di Zolfo e Azoto*. L'azione acida dei gas si

---

[91] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002
Quando le nebbie o la rugiada ricche di inquinanti vengono a diretto contatto con i materiali, tendono a depositarsi sotto forma di velo sottile. Al verificarsi di un lieve aumento della temperatura l'acqua presente tenderà ad evaporare con facilità e di conseguenza la concentrazione degli acidi presenti risulterà molto più elevata causando così danni aventi carattere degradante superiore.

[92] S.Oden,*The acidification of air and its consequences in the natural environment*, Ecology Committee Bulletin N°1, Stockholm 1968

esplica quando essi, reagendo con acqua, di origine meteoritica o sotto forma di aerosol, formano i rispettivi *acidi forti*.

Lo *Zolfo* è un elemento essenziale per il verificarsi di cicli biogeochimici della Terra e per questo risulta essere presente in quantità relativamente abbondanti. In atmosfera è presente maggiormente sotto forma di anidride solforosa (SO_2), acido solforico (H_2SO_4) e solfati (SO_4^{2-})[93]. Le loro concentrazioni in atmosfera, nell'epoca moderna, hanno subito però un aumento considerevole a causa dei processi di combustione di combustibili atti alla locomozione veicolare e processi di fusione di minerali da parte delle industrie metallurgiche.[94] L'anidride solforosa può persistere in atmosfera per alcuni giorni, sino a quando non viene ossidata dall'Ossigeno:

$$2\,SO_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \rightarrow 2SO_{3\,(g)}$$

Il processo ossidativo può risultare molto lento, ma in presenza di cationi metallici la cinetica della reazione può essere velocizzata come, ad esempio, in presenza di Fe^{3+}:

$$2\,FeO + ½\,O_2 \rightarrow Fe_2O_3$$

$$2\,SO_2 + Fe_2O_3 + ½\,O_2 \rightarrow 2\,SO_3 + 2\,FeO$$

Non solo i cationi metallici possono risultare dei buoni catalizzatori. Anche in presenza di altri inquinanti, come NO_2 e O_3, o a determinati range di temperatura e umidità, la cinetica della reazione può essere favorita.

L'SO_3, derivata dalla reazione di ossidazione, in presenza di acqua (anche in quantità ridotta) può reagire con essa portando alla formazione di acido solforico:

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

L'acido solforico può essere ottenuto anche tramite *processi radicalici*. I radicali che permettono tale tipologia di reazione si formano attraverso *processi fotochimici*[95].

---

[93] L. Campanella, A. Casoli, M. P. Colombini, R. Marini Bettolo, M. Matteini, L. M. Migneco, A. Montenero, L. Nodari, C. Piccioli, M. Plossi Zappalà, G. Portalone, U. Russo, M. P. Sammartino, *Chimica per l'arte*, Ed. Zanichelli,Roma, 2007

[94] La produzione di SO_2 in atmosfera da parte delle industrie metallurgiche si manifesta quando lo zolfo risulta essere presente come impurezza nel minerale metallico[94]:$Cu_2S + 2O_2 \rightarrow 2CuO + SO_2$
Nella reazione riportata, il gas viene liberato tramite il riscaldamento del Cu_2S (solfuro di rame) con il fine i ottenere ossido di rame (CuO) che successivamente verrà ridotto per ottenere il metallo.

[95] Nella reazione sopra riportata, si descrive il processo di formazione dell' acido solforico in presenza del *radicale ossidrile* (•OH). Questo radicale si ottiene tramite il processo di *fotolisi dell'acqua*: $H_2O + h\nu \rightarrow \bullet OH + H\bullet$

$$SO_2 + OH\bullet + O_2 \rightarrow SO_3 + HOO\bullet$$
$$2\ HOO\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2$$
$$SO_2 + H_2O_2 \rightarrow H_2SO_4$$
$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

E' importante ricordare, che la concentrazione di SO_2 in aria negli ultimi anni è calata, e per questo motivo viene ancora rilevata dalle centraline dell'ARPAV, per evidenziare variazioni significative, ma non è più ritenuto un composto altamente pericoloso.

Un altro elemento che in formato di ossido gassoso tramite reazione con l'acqua può generare un acido forte è l'*Azoto*.

Gli ossidi di Azoto (generalmente indicati come NO_x) si formano o attraverso processi di combustione di combustibili fossili, o per processi di lavorazione industriali o per reazione diretta tra Azoto e Ossigeno ad temperature elevate. In quest'ultimo caso la reazione può essere descritta in forma semplificata:

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$
$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

L'ossido di azoto, grazie all'energia fornite dalla radiazione UV, può dissociarsi liberando ossigeno atomico, elemento molto reattivo, il quale può nuovamente reagire con Ossigeno biatomico e portare alla formazione di Ozono (O_3):

$$NO_2 \xrightarrow{Uv} NO + O$$
$$O_2 + O \rightarrow O_3$$

L' O_3 a sua volta, può reagire nuovamente con NO e portare nuovamente alla formazione di NO_2 secondo la reazione:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

Successivamente l' NO_2, entrando in contatto con NO e l'acqua porta alla formazione di acido nitrico (HNO_3):

$$NO_2 + NO \rightarrow N_2O_5$$
$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$$

Un gas presente in natura come componente dell' atmosfera, e per questo non viene considerato propriamente un inquinante pericoloso, è l' *anidride carbonica* (CO_2). La concentrazione di questo gas, soprattutto nell'epoca della rivoluzione industriale, ha subito un incremento molto elevato a causa dell'intensificarsi delle attività antropiche industriali. Ad oggi i suoi valori di concentrazione in aria sono

in calo ma son da ritenersi comunque rilevanti[96].

La CO_2 è solubile in H_2O, la loro interazione porta alla formazione di precipitazioni aventi un pH di circa 5,6. Ciò è dovuto alla formazione di Acido Carbonico:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$$

Una volta formatosi, quest'acido durante la fase di deposizione sul materiale minerale a matrice carbonatica, provocherà la dissoluzione del carbonato di calcio, portando alla formazione del bicarbonato di calcio (sale instabile)*:*

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca\,(HCO_3)_2$$

Questo processo aumenta la solubilità del carbonato di calcio, inizialmente pari a 0,014 g/L a 20°C, il quale viene trasformato in bicarbonato di calcio che presenta una solubilità pari a 166 g/L. Il Ca $(HCO_3)_2$ può facilmente essere rimosso dalla superficie al verificarsi di un evento piovoso oppure riprecipitarvi.

La *riprecipitazione del $CaCO_3$* è correlata al fenomeno di evaporazione dell'acqua:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CO_{2(g)} \uparrow + H_2O_{(l)} \uparrow + CaCO_{3(s)} \downarrow$$

Un'ulteriore reazione che può modificare sensibilmente la solubilità del $CaCO_3$ è la *reazione di solfatazione e* quella che prevede *l'attacco dell'acido nitrico*.

La *reazione di solfatazione* si manifesta quando la superficie della pietra viene intaccata da piogge ricche di acido solforico. Il carbonato di calcio diviene quindi Solfato di calcio biidrato, avente una solubilità pari a 2,4 g/L. La reazione che riporteremo di seguito è in forma semplificata:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2\,H_2O + CO_2$$

L'a*ttacco del $CaCO_3$ da parte del HNO_3,* invece, porta alla formazione di nitrato di calcio $Ca(NO_3)_2$:

$$CaCO_3 + 2HNO_3 + H_2O \rightarrow Ca(NO_3)_2 \cdot 4\,H_2O + CO_2 + H_2O$$

Il $Ca(NO_3)_2$ è un sale avente solubilità pari a 121,2 g/100ml (a 20°C).

Riassumendo, a seguito di tutti questi processi il pH dell'acqua risulta acido ed entrando in contatto con la superficie lapidea in Pietra d'Istria aumenta la solubilità del $CaCO_3$ (suo costituente principale), attraverso processi di dissoluzione di tipo corrosivo e/o azione prettamente meccanica di dilavamento del materiale solubile, inducendo una perdita di materiale.

Le superfici che risultano maggiormente soggette a questa tipologia di

[96]G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 73-75

dissoluzione corrosiva e al fenomeno di dilavamento sono quelle che risultano maggiormente esposte.

Gli effetti del *fenomeno di dilavamento e dissoluzione corrosiva*, vengono descritti dalla Norma 1/88 con il termine *erosione*. L'erosione è l'*asportazione di materiale dalla superficie dovuta a processi di diversa natura.* Quando siano noti i meccanismi per cui essa si manifesta è possibile applicare termini specifici quali *erosione e corrosione per abrasione* (cause fisico-meccaniche), *erosione* (chimiche) *o usura* (antropiche).

Nel caso della Pietra d'Istria, si manifesta erosione sia per cause chimiche che fisico-meccaniche. Le *cause chimiche* sono indotte ai processi ricollegabili alla presenza della piogge acide, quelle meccaniche al fenomeno di *erosione idrica superficiale*. Questo fenomeno fisico-meccanico si manifesta per urto diretto delle acque sulla superficie e sottoforma di *ruscellamento* che possono comportare il distacco e il trasporto di materiale lapideo e particelle. L'acqua che scorre sulla superficie lapidea trasporterà verso il basso le impurità ed i Sali solubili, presenti lungo direttrici privilegiate.

Un fenomeno di precipitazione debole seguito da un tempo soleggiato non produce alcun danno rilevabile sul supporto, perché quest'ultimo tenderà ad asciugarsi rapidamente tramite evaporazione e il fenomeno di ruscellamento sarà ridotto al minimo, se non nullo[97]. Nel caso in cui invece si verifichi un episodio di pioggia violenta, l'acqua potrà penetrare più in profondità, le tempistiche di asciugatura risulteranno molto più lente e il percorso superficiale dell'acqua risulterà maggiore[98].

Le aree sottoposte a dilavamento, presentano aree biancastre perché i depositi superficiali risultano costantemente rimossi[99]. Queste superfici a livello macroscopico d'indagine non presentano trasformazioni, ma tramite analisi microscopiche si possono riscontrare strati di calcite ricristallizzata che altera le proprietà chimico-fisiche originali del materiale.

Considerando le reazioni:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca\,(HCO_3)_2$$

$$Ca(HCO_3)_2 \leftrightarrow CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} + CaCO_{3(s)}$$

[97] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 101
[98] A. Wexler, *Humidity and moisture*, Reinhold, New York, 1965
[99] G. Rocchi, *Istruzioni di restauro dei beni architettonici e ambientali*, Hoepli, Milano 1994

Il carbonato che viene a riformarsi, non è più parte integrante del reticolo cristallino della matrice originale, esso risulta essere una polvere finemente suddivisa, con una maggiore superficie di esposizione e maggiormente sensibile ad ulteriori attacchi acidi da parte dell'ambiente. Inoltre, durante il fenomeno di ruscellamento la presenza di tali polveri enfatizza il fenomeno erosivo: l'acqua durante il suo percorso si arricchisce maggiormente di particelle che a seconda della velocità di scorrimento possono abradere ulteriormente la superficie. Quando la velocità di scorrimento non risulterà più sufficiente per il trasporto le particelle tenderanno a depositasi nuovamente ad avvenuta evaporazione delle molecole d'acqua. [100]

Se in concomitanza di un evento piovoso verrà riscontrata anche la presenza del vento, potranno verificarsi le cosiddette *piogge battenti.* Questa tipologia di pioggia colpisce soprattutto i piani superiori degli edifici che risultano maggiormente esposti a causa delle maggiori turbolenze d'aria e della maggiore inclinazione della pioggia.

La presenza del vento, inoltre, può modificare la composizione chimica delle acque meteoritiche: nel territorio veneziano, posto in area marina, le precipitazioni verranno arricchite di sali provenienti dal mare. La concentrazione dei sali presenti sarà riconducibile alla velocità del vento e alla composizione dell'acqua salmastra. I sali maggiormente presenti nell'acqua marina veneziana generalmente, come già descritto nel *Cap.1.3.2*, sono NaCl, KCl, $MgCl_2$ e KBr[101]. La deposizione di questi sali sulle superfici lapidee, come descriveremo in seguito, può comportare una tipologia di degrado specifica (*Pag.42*).

Per quanto riguarda invece le <u>aree riparate</u> la tipologia di degrado che si manifesta è ricollegabile alla deposizione dei materiali solubili, prodotti di degrado dei processi chimici, i quali portano alla formazione di una particolare tipologia di degrado, ancora una volta correlata all'inquinamento atmosferico: le *patine e croste nere.*

Le *patine e croste nere*, dunque, tendono a formarsi in aree riparate e meno soggette al fenomeno di dilavamento diretto. Può succedere di rintracciarle anche

[100] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 101
[101] G. Zabbia, C. Sabbioni, G. Gobbi, Weathering layers on stone monuments in marine localities of Northern and Central Italy, La Conservazione dei Monumenti nel Bacino del Mediterraneo, Bari 1989, pagg. 79-82

su parapetti degli edifici esposti alle precipitazioni, ma in corrispondenza delle *zone d'ombra termica* in cui i depositi tendono a persistere e/o a riformarsi grazie alla capacità della pietra di non riscaldarsi e/o raffreddarsi rapidamente con conseguente riduzione del fenomeno d'evaporazione dell'acqua o della condensa riconducibile all'umidità[102].

Nella Normal 1/88, le *patine* o *concrezion*i vengono definite come *deposito compatto, generalmente formato da elementi di estensione limitata, sviluppato preferenzialmente in una sola direzione non coincidente con la superficie lapidea*; mentre le *croste* sono definite come uno *strato superficiale di alterazione del materiale lapideo o di prodotti utilizzati per eventuali trattamenti. Di spessore variabile, sono dure, fragili e distinguibili dalle parti sottostanti per le caratteristiche morfologiche e spesso per il colore. possono distaccarsi, anche spontaneamente, dal substrato che, in genere si presenta poi disgregato e/o pulverulento.*

Come già anticipato, la loro formazione è strettamente correlata alla presenza di inquinanti. Il materiale, tramite le reazioni dovute alla presenza delle piogge acide precedentemente descritte, subisce una trasformazione chimica che porta alla formazione di composti aventi una funzione legante dell'accumulo di inquinanti e ulteriori prodotti della pietra stessa. Il legante che accomuna sia la composizione delle concrezioni che la composizione delle croste è il gesso. Esso si presenta sotto forma di cristalli aghiformi aventi crescita perpendicolare alla superficie di alterazione. All'interno della matrice gessosa è possibile rintracciare particelle di varia natura: particolato atmosferico, polline, ossalati, calcite ottenuta tramite il processo di ricristallizzazione e sostanze bituminose e/o carboniose di forma sferica. Quest'ultime inclusioni causano la colorazione predominante delle croste, le quali risultano essere per lo più nere. Questa colorazione particolare, comporta un maggior assorbimento delle radiazioni solari, solo nel caso in cui esse non risultano poste in *zone d'ombra termica)*, con un maggior riscaldamento della pietra che conseguentemente accentua i danni al supporto lapideo sottostante ad esse.

Oltre al gesso e alla calcite, all'interno delle croste nere è possibile rintracciare gli ossalati di calcio. Le forme più comuni sono la *Whewellite* ($CaC_2O_4 \cdot H_2O$)

[102] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002

ovvero ossalato di calcio in forma monoidrata caratterizzato da cristalli monoclini e la *Weddellite* ($CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$), ossalato di calcio biidrato a cristalli tetragonali. Studi specifici condotti su queste tipologie di degrado riscontrabili sulla Pietra d'Istria a Venezia[103] hanno permesso di ottenere i dati riportati in *Tabella 2:*

Aree	Tipologia di crosta	Composizione	Porosità ($cm^3/g\%$)			Sali solubili (%)			Spessore (mm)
			Valore max	Valore min	Valore medio	Valore max	Valore min	Valore Medio	
non soggette a dilavamento	Croste nere dendritiche	Gesso Ossalato di calcio Nitrato di Potassio Cloruro di sodio	12,67	2,65	6,58	70,30	14,50	50,40	0,5- 3 mm
soggette a dilavamento parziale	Croste nere compatte e patine grigie	Gesso Ossalati Calcite	3,82	0,81	2,17	6,7	2,3	4,00	0,1 - 1 mm
soggette a dilavamento	Patine bianche	Ossalati Calcite	3,04	0,51	1,91	6,7	2,10	3,90	polvere

Tabella 2: Eventi atmosferici e ordini di grandezza

Dalla *Tab. 2*, è possibile evidenziare che lo spessore è estremamente differente a seconda dell'area indagata. Nel caso delle croste nere dendritiche è da tenersi in considerazione la presenza dello zolfo, sotto forma quasi esclusiva di gesso, che incrementa il volume della crosta. Esso a causa della sua elevata solubilità in acqua può sciogliersi e successivamente ricristallizzarsi . Il solfato di calcio idrato presenta un volume maggiore del 70% rispetto alla calcite e un coefficiente di espansione termico 5 volte superiore, che al verificarsi di variazioni termiche possono comportare delle contrazioni e dilatazioni differenziate dei due minerali che inducono quindi una laminatura della superficie lapidea e il conseguente distacco.[104] Questi processi *desquamanti*[105] inducono una perdita di materiale di circa 15μm/anno di Pietra d'Istria.[106]

Sia il fenomeno di erosione che la formazione di croste e patine comportano delle modifiche della superficie lapidea.

Nel caso di *aree dilavate*, dunque soggette a dissoluzione della matrice, la pietra carbonatica presenterà una superficie ondulata e ricca di cariature, bioclasti di calcite microcristallina che appariranno in rilievo. La porosità del materiale

[103] P. Maravelaki, E. Zendri, G. Biscontin, G. Repaci, *Indagini sulle superfici in Pietra d'Istria a Venezia*, Le pietre nell'architettura: struttura e superfici, Bressanone ,1991, 911-921

[104] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 101

[105] Consiste in un distacco superficiale di frammenti a forma di scaglie per la differenza di dilatazione tra le parti esterne della roccia e quelle interne.

[106] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 101

potrebbe risultare ridotta, a causa della presenza di cristalli di calcite di neoformazione all'interno dei pori.

Nel caso di aree in cui invece si manifestano depositi di materiale degradato, la superficie sottostante potrebbe risultare maggiormente porosa, e al verificarsi del distacco della crosta verrà esposto nuovo materiale minerale facilmente aggredibile.

Entrambe le modifiche superficiali del materiale alterano le prestazioni chimico-fisiche della pietra originale.

La Pietra d'Istria, originariamente presenta una struttura compatta e poco porosa, che le permette di resistere discretamente all'ambiente, anche in condizioni in cui vi siano alte concentrazioni di sali solubili. Ma anch'essa, quando soggetta alle tipologie di degrado precedentemente descritte, risulta più facilmente attaccabile.

Nel caso di superfici che presentano un occlusione dei pori, dettata dalla formazione di neocristalli di $CaCO_3$, la permeabilità del materiale risulterà ridotta. Se si considera tale fattore dall'esterno verso l'interno, si potrebbe pensare che l'occlusione potrebbe ridurre l'entità di attacco degradante da parte dell'ambiente, ma se si considera la possibile presenza di Sali o umidità all'intero dei pori, si evidenzieranno un fenomeni definiti *esfoliazione e fratturazione o fessurazione*. Con il termine *esfoliazione* ci si riferisce alla *degradazione del materiale che si manifesta con un distacco, spesso seguito da caduta, di uno o più strati superficiali sub-paralleli tra loro*; mentre con il termine *fratturazione o fessurazione* ci si riferisce ad un fenomeno di degrado *che si manifesta con la formazione di soluzioni di discontinuità nel materiale e che può implicare lo spostamento reciproco della parti.*[107] Nella Pietra d'Istria queste tipologie di degrado si manifestano anche nel caso in cui il materiale sia soggetto a dilavamento. Nel caso in cui il materiale presenti evidenti strati di sedimentazione, essi vengono posti in evidenza e dunque risultare punti sensibili all'attacco chimico-fisico e compromettere la stabilità del materiale[108].

Al verificarsi del distacco della crosta nera, invece, la superficie lapidea ad essa sottostante può presentare un aumento di porosità e parte di gesso ancora ad essa

[107] Normal 1/88

[108] G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation : atmospheric pollution, clearing, consolidation and protection,* Elsevier, Amsterdam, 1983

aderente. La presenza di quest'ultimo può facilitare la riformazione della crosta nera in tempistiche ridotte, offrendo già dei possibili cristalli di gemmazione e nucleazione.

Per quanto riguarda invece *l'aumento della porosità*, la pietra risulterà facilmente soggetta a due tipologie di fattori degradanti che inducono uno stress-meccanico interno al materiale: *i cicli di gelo-disgelo e i processi di cristallizzazione dei Sali.* Entrambi i fenomeni sono ricondotti all'aumento di volume indotto dall'acqua durante il suo cambio di stato o al processo di cristallizzazione dei Sali e alla saturazione dei sistemi porosi.

Il cambiamento di stato, da liquido a solido, dell'acqua è reso complesso da differenti fattori. L'acqua raramente risulta essere pura, solitamente è presente sottoforma di soluzioni saline a concentrazione variabile che ne abbassano il punto di congelamento[109]. A tali condizioni non si avrà più uno specifico punto di fusione, ma un intervallo di temperature entro cui la soluzione potrà solidificarsi: quando nella soluzione si avvierà il processo di congelamento sarà esclusivamente il solvente a svolgerlo e tenderà a separarsi, mentre il soluto tenderà a restare in soluzione. Ciò comporta quindi un aumento della concentrazione di sali presenti all'interno del soluto ancora in fase liquida sempre maggiore e il punto di congelamento continuerà a abbassarsi. Inoltre, il punto di congelamento è strettamente legato anche alle dimensioni dei pori/capillari presenti nella pietra. A causa della tensione superficiale l'acqua presente all'interno del sistema poroso si troverà ad uno strato di compressione tanto più elevato tanto minore sarà il diametro del poro.[109] In condizioni particolari, anche a diametri molto ridotti, si può manifestare comunque il congelamento dell'acqua. Ciò si verifica a causa delle interazioni molecolari che si possono instaurare tra le pareti del capillare e il liquido in esso presente.

Il degrado indotto dal gelo, si manifesta quando il materiale risulta soggetto a frequenti variazioni di temperatura. Esse inducono uno stress superiore al materiale, in quanto il liquido presente al suo interno effettua passaggi di stato repentini, con conseguente aumento e diminuzione del volume. L'acqua, durante il suo cambio di stato, presenta un aumenta di volume di circa il 10 % . Quando

[109]G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 113

ciò si verifica in uno spazio circoscritto, le forti pressioni che vengono a generarsi sulle pareti possono comportare il collasso del capillare in cui precedentemente il liquido era contenuto. Quando la Pietra d'Istria non presenta alcuna tipologia di degrado, viene classificata come *non geliva*. Il suo coefficiente di saturazione, determinato tramite il rapporto tra la quantità d'acqua che può assorbire e la sua porosità assoluta, è nettamente inferiore a 0,8[110].

Sulla Pietra d'Istria degradata, dunque in condizioni particolari ove le sue caratteristiche di pietra a bassa porosità vengono alterate, gli effetti dei cicli di gelo e disgelo possono manifestarsi, seppur lievemente, attraverso *fratturazione o fessurazione, esfoliazioni, scagliature superficiali e disgregazione*[111].

E' assai raro rintracciare pietre degradate da questi cicli a Venezia, in cui la temperatura raramente è rigida. La tipologia di degrado che si può riscontrare, seppur in modo poco evidente per le elevate a causa delle caratteristiche del materiale, è quella causata dalla pressione esercitato da sali solubili in processi di cristallizzazione ed idratazione: *stress di cristallizzazione e pressione d'idratazione*.

Come già anticipato, l'acqua solitamente è presente sotto forma di soluzione salina. L'acqua è soggetta al fenomeno di evaporazione, per cui la soluzione salina tenderà a concentrarsi sempre di più fino a sovra saturazione e precipitazione del sale con la formazione di cristalli. Il processo di cristallizzazione è accompagnato dall'accrescimento di volume, che può manifestarsi sulla superficie del manufatto (*efflorescenza*[112]), al di sotto della superficie (*subfflorescenza*) o all'interno dei pori (*criptoefflorescenza*)[113]. Quest'ultimo fenomeno, solitamente, può svilupparsi un range di spessore massimo di qualche millimetro, raramente tende a manifestarsi in profondità, e si

[110] Limite massimo del coefficiente di saturazione di una pietra per poter essere definita non geliva

[111] Scagliature: degradazione che si manifesta col distacco totale o parziale di scaglie spesso in presenza di sezioni di discontinuità del materiale originario. Al''apparenza le scagli risultano essere di materiale inalterato, presentano forma irregolare e spessore consistente e disomogeneo. Al di sotto di esse possono esserci efflorescenze.

[112] Efflorescenza: Formazione di sostanze, generalmente dal colore biancastro e di aspetto cristallino, pulverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto. Nel caso di efflorescenze saline, la cristallizzazione può avvenire anche all'interno del materiale provocando spesso il distacco delle parti più superficiali.

[113] J. Weber, *Salt-induced deterioration of romanesque wall painting in the Church of St. Georgen, Styria, Austria: a case study aiming a better understanding of the behaviour of salt systems in ancient walls*, International workshop on conservation of cultural surfaces: stone and wall covering, Venece, 2000, Elsevier

manifesta soprattutto in materiale altamente porosi[114].

Quando si verifica la *criptoefflorescenza* vengono esercitate delle pressioni sulle pareti delimitanti i pori, legata alla variazione di volume dei Sali, e può essere quantificata tramite l'equazione dello *stress di cristallizzazione (P_{cris})*:

$$P_{cris} = \left(\frac{RT}{Vs}\right) \ln \left(\frac{C}{Cs}\right)$$

In cui : R è la costante dei gas ideali, T la temperatura in gradi Kelvin, V_s è il volume del sale cristallizzato, C e C_s sono la concentrazione del sale e la concentrazione dello stesso in condizione di sovra saturazione.[115]

Le pressioni che possono essere generate dai Sali si diversificano a seconda delle loro caratteristiche, risultano essere elevate (ad esempio il $CaSO_2 \cdot 2H_2O$ che presenta una solubilità di 0,23 g/100ml con un volume di 55 cm^3/mol e una pressione di cristallizzazione pari a 28,2 N/mm^2, o NaCl con solubilità 37 g/100ml, volume di 28 cm^3/mol una pressione pari a 55 N/mm^2)[116] e possono alterare, come nei casi dei cicli di gelo-disgelo, la consistenza del materiale il quale tende a divenire più *poroso e decoeso*.

Come nel caso del gesso, vi sono numerosi Sali che possono presentare un volume differente a seconda delle molecole d'acqua che possono risultare disponibili nell'ambiente ($CaSO_2 \cdot 2H_2O$ o $CaSO_2 \cdot 10H_2O$) e in tal caso di manifesterà anche la *pressione di idratazione (P_i)*:

$$P_i = \left(\frac{nRT}{Vh-Vo}\right) \ln \left(\frac{Po}{Ph}\right)$$

In cui: n numero delle moli di acqua acquistate, P_o pressione parziale del vapor d'acqua espresso in mmHg a data temperatura, P_h tensione del vapore del sale idrato e V_h e V_o sono i volumi molari del sale idrato e anidro.

Essendo Venezia una città lagunare, la vicinanza del mare comporta la veicolazione dei sali all'interno dei pori non solo attraverso l'acqua meteoritica, ma anche attraverso la presenza di aerosol marino. Sono stati condotti numerosi studi in merito alla deposizione di sali sulle superfici da parte dell'aerosol, ed è stato evidenziato che in loro presenza le incrostazioni possono superare lo spessore di 100µm, come si è verificano nel caso di Palazzo Grimani ubicato in

[114] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002

[115] S.Riato, *Interazioni chimico-fisiche di manufatti lapidei con l'ambiente e studio di trattamenti conservativi*, Tesi di dottorato T00420, Università Cà Foscari, 2004-2006

[116] G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti,* ed. Alinea, Firenze, 2002, pp. 101

prossimità del Canal Grande.[117]

Come anticipato, la cristallizzazione e idratazione dei Sali può manifestarsi attraverso *efflorescenza*, *subfflorescenza* o *criptoefflorescenza*. Il verificarsi di questi fenomeni può indurre degradi di tipo *decoesivo, rigonfiamenti*[118] *e fratturazioni*.

Riassumendo, dunque la Pietra d'Istria, quando intaccata da degrado chimico, può subire differenti tipologie di degrado fisico. Riassumeremo nella *Tab. 3* seguente i possibili degrado subiti da tale materiale:

Materiale	Tipologia di ambiente	Dominio considerato	Meccanismo del degrado	Fattori	Tipologia di degrado
Pietra d'Istria	Lagunare-urbano	Ambientale- aria	- Chimico -Fisico-meccanico	-Inquinamento -H_2O -Vento -Aerosol marino	-Croste e patine nere -Dilavamento -Erosione -Disgregazione -Esfoliazione -Scagliature -Rigonfiamenti -Fratture -Fessurazione -Distacchi -Decoesioni -Efflorescenze

Tabella 3: Tipologie di degrado riscontrabili nella Pietra d'Istria

[117] S.Riato, *Interazioni chimico-fisiche di manufatti lapidei con l'ambiente e studio di trattamenti conservativi*, Tesi di dottorato T00420, Università Cà Foscari, 2004-2006

[118] Rigonfiamento: sollevamento superficiale e localizzato del materiale, che assume una forma e consistenza variabili.

2.1) Valutazione della Pericolosità territoriale per i beni culturali di Venezia e Provincia del dominio aria sulla base della Carta del Rischio

2.1.1) Metodologia

In questa tesi si è usufruito della Carta del Rischio per avere una prima idea della pericolosità del dominio aria della città di Venezia anche a confronto con le aree limitrofe per il periodo 2004-2014.

Tramite la ricerca bibliografica eseguita con il fine di individuare una possibile metodica d'approccio volta alla stima della vulnerabilità della Pietra d'Istria, è stata studiata la Carta del Rischio ideata dall'ISCR. La Carta del Rischio presenta dei *layers e layers raster* di diversa tinta e forma, che vengono appositamente selezionati e attivati dall'utente, a seconda delle informazioni che si necessita ottenere in merito ad una area del suolo italiano o di determinati beni culturali in essa ubicati in differenti domini e livelli. La lettura di queste informazioni avviene attraverso l'applicazione di filtri che ricoprono il territorio indagato con differente colorazione rappresentativa delle differenti classi individuate. I *layers raster*, invece, identificano per lo più i beni culturali e li classificano per tipologia.

Per permettere agli utenti di ottenere queste informazioni, l'ISCR ha introdotto nel sofware SIT dei dati specifici per la stima della pericolosità e del rischio. Per quanto concerne la *Pericolosità del dominio Ambientale – Aria* su *livello territoriale* (funzione indagata in questa sezione) i dati inseriti nel SIT risultano essere: l'*indice di annerimento* e di *erosione*. Conoscendo i dati necessari per la stima dei due indici, sapendo che per essere stimati vengono sfruttati dei dati ambientali, i cui omologhi per Venezia sono rintracciabili nel sito dell'ARPAV, si è proceduto analizzando ulteriormente tali dati utili alla stima dell'andamento nel tempo della pericolosità territoriale della provincia di Venezia nel dominio ambientale-aria nel periodo compreso dal 2002 al 2014.

In questa tesi si è usufruito della sezione *consultazione dei dati* del sito della Carta del Rischio (www.cartadelrischio.it), la quale permette di indagare un' area ben precisa del territorio nazionale, ottenere informazioni in merito alla collocazione dei beni.

2.1.2)Analisi delle informazioni ottenibili dalla Carta del Rischio

Il SIT presenta in schermata d'avvio una maschera raffigurante l'intero territorio nazionale italiano sul quale vi sono tracciati unicamente i confini regionali. Selezionando la regione d'interesse, la schermata successiva permette di avere una visione via più ristretta del territorio, fino al raggiungimento dell'area d'interesse per lo studio.

Applicando successivamente lo *strumento di zoom* , in modo da individuare una porzione di territorio sufficientemente ristretta, è possibile avviare le funzioni presenti nella barra

laterale posta sulla destra, selezionando quelle volte ad ottenere le informazioni necessarie. Come appare nella *Fig. 2* è stata selezionata la funzione *Beni Architettonici*.

Figura 1 Regione Veneto in scala 1: 1.538.024 (attesa svincolo ©)

Come si può osservare nelle *Fig.2* Venezia appare ricca di beni immobili, i quali sono individuati sul territorio dal SIT tramite l'inserimento di *layer raster*[1]*:* croce rossa.
Il passaggio successivo ha previsto la sovrapposizione della funzione "*Beni Architettonici"* con quella *"Ortofoto*", così da permettere un orientamento spaziale e una localizzazione cartografica dei beni.

Figura 2 L'isola di Venezia in scala 1: 21.868 con funzione "Beni Architettonici" e "Ortofoto" (attesa svincolo ©)

L'integrazione dei dati nella Carta del Rischio è ancora in fase d'aggiornamento. Una delle funzioni, per esempio, ad estensione limitata è quella inerente alla stima della *Pericolosità Statico-Strutturale dei monumenti*. All'interno di questa funzione vi sono raccolte delle schede catalogative specifiche per ogni bene sottoposto a tale tipologia di pericolosità, le quali sono state sviluppate in occasione di catastrofi naturali abbattutesi sulle regioni Campania, Marche, Abruzzo, Toscana e Sicilia[2].
La schermata successiva di maggior interesse per lo studio condotto in questo elaborato è la *valutazione della Pericolosità del dominio Ambientale – Aria* e dei suoi effetti sul patrimonio monumentale presente nella città lagunare.

[1] Livelli sfruttati in grafica per descrivere immagini e dati sfruttando griglie di pixel
[2] La regione Sicilia è l'unica tra le regioni a statuto speciale che risulta momentaneamente schedata dal sistema

SEZIONE 2

Per analizzare la Pericolosità Territoriale nel dominio ambientale-aria sono state abilitate le funzioni inerenti alla classificazione dell'*indice di erosione* ed *annerimento* dell'area del regione Veneto. La Pericolosità Territoriale espressa attraverso l' *indice di erosione* (*Fig. 3*) per l'intera città di Venezia, che risulta essere di *classe 2*.

Per quanto concerne invece l' *indice di annerimento*, dall'immagine riportata nella *Fig. 4* la città risulta essere appartenente alla *classe 4*. Applicando invece il *layer* inerente al *Rischio*, riportato in *Fig. 5*, si evince che la città lagunare risulta essere esposta ad un livello *elevato*, il che è correlato a tutti gli indici di pericolosità territoriali calcolati per l'isola. Nel nostro casi si è proceduto analizzando solo quella inerente al dominio ambientale aria.

nessun dato
Classe 1
Classe 2
Classe 3
Classe 4
Classe 5

Figura 3 Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale – Aria dell'indice di erosione dell'isola di Venezia in scala 1: 24.032 in assenza della funzione ortofoto e Legenda delle classi di Pericolosità Ambientale - Aria indice di erosione(attesa svincolo ©)

nessun dato
Classe 1
Classe 2
Classe 3
Classe 4
Classe 5

Figura 4 Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale - Aria dell'isola di Venezia in scala 1: 24.032 espressa attraverso l'indice di annerimento Legenda delle classi di Pericolosità Ambientale - Aria dell'indice di annerimento(attesa svincolo ©)

n.c.
Basso
Medio
Alto
Elevato

Figura 5 Rischio nel dominio Ambientale - Aria dell'isola di Venezia in scala 1: 24.032 in assenza della funzione ortofoto con Legenda dei livelli del Rischio Ambientale - Aria (attesa svincolo ©)

Figura 6 Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale - Aria della Provincia di Venezia in scala 1: 370.232 espressa attraverso l'indice di erosione(attesa svincolo ©)

Figura 7 Pericolosità Territoriale nel dominio Ambientale - Aria della Provincia di Venezia in scala 1: 370.232 espressa attraverso l'indice di annerimento(attesa svincolo ©)

Dopo aver individuato la Pericolosità territoriale e il Rischio di Venezia, si è ritenuto opportuno estendere la medesima analisi anche ai comuni limitrofi.

Confrontando le *Fig. 6,7* emerge che la Provincia risulta soggetta a differenti classi di Pericolosità espresse dell'*indice di erosione* e *annerimento*. I dati relativi a Venezia sono mediati sull'intero territorio comunale risultano quindi gli stessi anche per la municipalità di Mestre o Marghera, medesima classe del Comune di Venezia la presentano anche i comuni di Dolo, Mira, Mirano, Salzano, Martellago e Mogliano Veneto. La pericolosità dettata dall'indice di erosione per questi comuni risulta essere di classe 2. Si distinguono invece i comuni di Spinea e Marcon, che risultano soggetti all'erosione a classe 4. Per quanto concerne l'indice di annerimento, invece, risultano esposti alla medesima classe, cioè 4, Venezia, Mestre e il comune di Marcon; Dolo, Mira, Mirano, Salzano, Martellago e Mogliano Veneto invece risultano essere tutti descritti dalla classe 2. Essendo a conoscenza di come vengono calcolate le classi di pericolosità da attribuire ai territori si può dunque ipotizzare che le città che presentano livelli di erosione e annerimento di classe 4 probabilmente risultano soggette a concentrazioni di inquinanti atmosferici più elevate, probabilmente costanti (a causa di attività antropiche) e che la direzione del vento e delle correnti risultino ad esse sfavorevoli, comportando il trasferimento degli inquinanti dai comuni limitrofi (solitamente di classe 2).

Figura 8 Rischio nel dominio Ambientale - Aria dalla Provincia di Venezia in scala 1: 370.232(attesa svincolo ©)

Sulla medesima scala (1: 370.232) la Provincia Veneziana, è stata indagata applicando la funzione per la stima del rischio.

Nella *Fig.8* si evidenziano diversi livelli di rischio su scala provinciale. Come nei casi precedenti a causa dell'utilizzo di dati mediati, Venezia e Mestre figurano esposte al medesimo livello di rischio (elevato) nonostante le caratteristiche territoriali non siano propriamente le medesime. Per quanto concerne Dolo, Mira, Mirano, Spinea il rischio cala, dunque sono definite mediamente a rischio. I comuni di Salzano, Martellago e Mogliano Veneto, invece, risultano essere esposti ad un rischio basso.

L'andamento del rischio, analizzando gli indici di pericolosità evidenzia che i comuni che presentano classe 2 sia per l'indice di erosione che annerimento risultano soggette a un rischio basso o mediamente basso nel dominio considerato, mentre nel caso in cui una delle due classi risulti essere 4, si evidenzia un aumento del rischio, il che può essere correlato a quanto precedentemente evidenziato in merito all'andamento della pericolosità territoriale.

2.2) Valutazione dell'andamento della pericolosità territoriale di Venezia considerando il dominio ambientale aria sulla base dei dati ambientali ARPAV

2.2.1) Metodologia

Sulla base delle informazioni estrapolate dalle Carte del Rischio, si è proceduto analizzando i dati ARPAV inerenti all'ambiente della provincia di Venezia, sia per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico (NO_2 e PM_{10}) che inerenti alla piovosità[3] per valutare la pericolosità territoriale del centro storico di Venezia per il dominio ambientale aria nel decennio 2004-2014.

Per quanto riguarda l'analisi del dell'inquinamento atmosferico, i dati disponibili risultano essere incentrati per lo più nell'entroterra. Questo perché nel centro storico è presente un'unica centralina di raccolta dati. I dati ambientali reperiti non sono stati tutti considerati e si è ritenuto utile considerare solo le informazioni provenienti dalle centraline di campionamento e rilevamento della qualità dell'aria che risultassero poste in territori limitrofi al centro storico di Venezia, e che ad essa fossero più comparabili possibile, come le centraline ubicate a Mestre.

E' stato possibile ottenere informazioni riguardanti la quantità di pioggia mensile per ogni anno, e dunque conoscere la piovosità media mensile nell'arco degli anni considerati e la media della pioggia annuale, il numero di eventi piovosi per mese, e si è potuti risalire alla media mensile degli eventi piovosi, stimare il numero di eventi su scala annuale e la loro media.

Sono stati rinvenuti anche dati in merito al vento, alla sua velocità, direzione ed inoltre è stato possibile risalire al numero di giorni mensili per anno caratterizzati dall'assenza di tale fattore. Tuttavia in questa tesi, il fattore vento è stato solo parzialmente considerato. Questa decisone è stata presa a fronte di tre differenti fattori: la particolare struttura urbana della città di Venezia, la mancanza di rilevatori specifici del fenomeno in prossimità degli edifici caso di studio e la possibile inesattezza dei dati dovuta alla strumentazione. Per quanto riguarda la struttura urbana della città, Venezia presenta numerose calli di dimensioni estremamente variabili e aventi un orientamento ed una direzione scostante. Le calli dunque possono risultare prive di correnti d'aria o essere dei canali direzionali di essa, i quali inoltre possono essere deviati a seconda dell'ingombro degli edifici. Per poter valutare l'effettivo impatto del vento sulle superfici architettoniche indagate in questa tesi, sarebbe stato necessario misurare tramite specifica strumentazione la velocità e la direzione di tale fattore in prossimità dell'edificio e con più misuratori,

[3] I dati inerenti alla piovosità in merito al comune di Venezia sono stati ottenuti dal bollettino pluriennale dell' ARPAV edito dal centro meteorologico di Teolo e rielaborati nel mese di Febbraio 2016 dall'Istituto Cavanis.

così che i dati risultassero significativi per il caso specifico. Altro fattore importante è l'indicazione presente all'interno dello stesso bollettino ARPAV, in cui viene specificato che i dati inerenti al vento sono da considerarsi indicativi in quanto non risulta possibile effettuare una taratura precisa della strumentazione in campo. alcuni dati generici riguardanti il vento veranno comunque presentati seppur non siano specifici per i casi di studio analizzati, come già precedentemente analizzato. Essendo il vento un fattore rilevante per quanto riguarda lo studio dell'ambiente, soprattutto per la città di Venezia, si è ritenuto fosse utile fornire alcune indicazioni ad esso inerenti.

Per quanto riguarda l'analisi delle concentrazioni di NO_2 e PM_{10} in atmosfera nella città di Venezia e Provincia dal 2002 al 2014, sono stati consultati i bollettini annuali dell'ARPAV riportanti le concentrazioni di gas NO_2 e PM_{10} presenti in aria. Sono state analizzate queste due tipologie di gas e particolato atmosferico, perché sono le uniche due sostanze che risultano attentamente indagate con discreta continuità da parte dell'ente.

Attualmente il Decreto Legislativo vigente è il n° 155 del 13 Agosto 2010, inerente all' *attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa*. Sulla base delle indicazioni in esso presenti sono stati individuati i limiti delle concentrazione di tali inquinanti in aria. Va ricordato che i limiti indicati sono stati stimati valutando gli effetti delle concentrazioni di inquinanti sulla salute dell'essere umano, senza rapportarli direttamente allo stato conservativo dei beni[4].

Sulla base di studi precedentemente condotti[5], i limiti posti dal decreto legislativo sono stati suddivisi in classi di pericolosità, così da valutare l'andamento di quest'ultima nel tempo ponendoli in rapporto alla media annua dell'area territoriale considerata.

I dati della piovosità ottenuti dal bollettino del Febbraio 2016, sono stati tabulati considerando la quantità di pioggia espressa in mm ed il numero degli eventi piovosi.

Nelle tabelle è stata riportata la quantità di pioggia rilevata per ogni mese dell'anno (in mm), da cui poi è stata ottenuta la quantità di pioggia totale annuale, la media per anno e la media mensile per ogni anno. La tabella inerente ai dati riguardanti al numero di eventi piovosi, ha previsto il conteggio cumulativo degli eventi piovosi per ogni mese dell'anno, da cui è stata ottenuta la quantità totale di eventi piovosi per anno, quindi la loro media per anno e successivamente la media mensile per anno. Secondo l'ARPAV un evento è da considerarsi piovoso quando la quantità di precipitazioni che raggiungono il suolo risulta essere pari a 1 mm, in caso contrario non verrà conteggiato. Al termine del calcolo dei valori cumulativi annuali e delle medie mensili e annuali, sono stati implementati degli

---

[4] P. Bonanni, C. Cacace, A. Giovagnoli, R. Gaddi, *Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto,*

[5] ISPRA,ISCR, *Calcolo del rischio territoriale e del rischio individuale per i beni di interesse storico-artistico a Torino*, Rapporti 88/2009, ISPRA, Roma

istogrammi e diagrammi circolari.

I dati inerenti al vento vengono presentati per il periodo di tempo compreso tra il 2002 e il 2014. I dati sono stati leggermente rielaborati, ma verranno riportati a solo titolo informativo. Contengono informazioni in merito alla velocità del vento espressa in m/s , alla direzione e al numero di eventi in cui il fenomeno non si è verificato. Sono state calcolate le medie delle velocità, della direzione per mese di ogni anno considerato e quelle generali alla media per anno. I dati inerenti invece all'assenza di evento ventoso non sono stati rielaborati.

2.2.2) Analisi delle concentrazioni di NO_2 e PM_{10} in atmosfera nella città di Venezia e Provincia dal 2002 al 2014

La rielaborazione dei dati ha previsto una tabulazione iniziale, in cui sono state inserite solamente le informazioni provenienti dalle centraline di rilevamento poste in: Parco della Bissuola, Via Circonvallazione, Via Tagliamento, Via A. da Mestre, Via Bottenigo, Via Fratelli Bandiera, Via Malcontenta e Favaro Veneto e Sacca Fisola. Quest'ultima centralina risulta essere l'unica presente ed attiva nel centro storico della città. Successivamente sono state inserite le differenti concentrazioni dell'inquinante indagato rilevate e il numero di eventi in cui il limite dettato dal Decreto Legge n°155, pari a 200 $\mu g/m^3$ per NO_2 e 40 $\mu g/m^3$ per PM_{10}, fosse stato superato. Poi per poter procedere con la stima della pericolosità territoriale, è stata eseguita una media dei valori dell'area considerata. A seconda del valore ottenuto è stata poi attribuita la classe di pericolosità, (seguendo le indicazioni rintracciate nello studio condotto dall'ISCR per la città di Torino[6]) appartenente a dato anno, cosi da verificarne l'andamento nel periodo compreso tra il 2002 e il 2014.

Come riportato nella *Tab.1*, (così come accade anche per la *Tab.2*) non tutte le centraline risultano essere attive con continuità. A fronte di ciò, nella fase che ha previsto la media dei dati per l'area considerata si è operato escludendole dal conteggio per l'anno analizzato. Per quanto concerne invece la media inerente ai 13 anni considerati si è deciso di analizzare nel dettaglio esclusivamente le centraline che presentano una matrice completa per l'intero periodo considerato, dunque quelle di Sacca Fisola (posta a Venezia in centro storico) e quella di Parco della Bissuola (Mestre).

La classe di pericolosità territoriale in relazione alla concentrazione di NO_2 in aria risulta essere *2*, e risulta essere costante per l'arco di tempo considerato. Il dato ottenuto non può essere direttamente confrontato con quello rintracciato dal sistema SIT nella Carta del Rischio. In questo caso viene analizzata la concentrazione singola del gas inquinante, senza considerare una serie di numerosi parametri che portano alla determinazione

[6] ISPRA,ISCR, *Calcolo del rischio territoriale e del rischio individuale per i beni di interesse storico-artistico a Torino*, Rapporti 88/2009, ISPRA, Roma

dell'*indice di erosione*, quali ad esempio la concentrazione di ioni H^+ e quella dell' HNO_3. Dalla rielaborazione di questi dati, si può ipotizzare però un basso potere incisivo (classe 2) da parte dell'acido nitrico che ipoteticamente si sarà creato al manifestarsi di eventi piovosi, o che ipoteticamente si sarà formato direttamente sulla superficie del bene a causa dell'interazione dell'acqua meteoritica e nitrocalcite presente sulla superficie del bene.

Medesima procedura è stata applicata per l'analisi della concentrazione di $PM_{10,}$ seppur gli anni che si sono potuti analizzare risultino essere dal 2004 al 2014.

Tabella 1 Dati inerenti alle concentrazione di NO_2 rilevati dalle centraline selezionate e stima della classe di pericolosità

[NO_2]	Anni																											
Centraline	2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		**Media per centralina**	**σ**
Parco della Bissuola	29	0	41	0	38	0	25	0	34	0	34	0	35	0	34	0	30	0	38	0	32	0	29	0	27	0	32,77	4,68
Via Circonvallazione	-	-	-	-	61	0	54	0	53	0	50	0	45	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52,60*	5,86*
Via Tagliamento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	0	43	0	42	0	48	0	44	0	37	0	32	0	41,71*	5,50*
Sacca Fisola	41	0	43	0	39	0	35	0	37	0	36	0	36	0	35	0	34	0	34	0	32	0	32	0	29	0	35,62	3,80
Via A. da Mestre	-	-	30	0	-	-	44	-	35	0	34	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,75*	5,91*
Via Bottenigo	42	0	46	0	-	-	39	0	40	0	39	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,20*	2,95*
Via Fratelli Bandiera	-	-	-	-	-	-	61	0	65	0	63	0	57	0	54	0	52	0	-	-	-	-	-	-	-	-	58,67*	5,16*
Via Malcontenta	35	0	42	0	37	0	46	0	38	0	32	0	-	-	35	0	31	0	35	0	35	0	33	0	30	0	35,75*	4,58*
Via Beccaria	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	0	41	0	-	-	-	-	-	-	-	-	40,50*	0,71*
Favaro Veneto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	0	34	0	-	-	-	-	-	-	-	-	31,50*	3,54*
Media annua area considerata	36,75		40,40		43,75		37,71		43,14		37,28		43,80		38,57		38,75		35,75		37,75		35,80		32		**Differenza tra le medie considerate**	
σ	6,02		6,11		11,53		11,96		11,54		11,35		8,93		8,14		7,80		6,40		5,68		3,30		2,08		- 0,78	
Classe PT	2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2			

(*****) i dati medi contraddistinti da un asterisco presentano una matrice dati incompleta

	Media anno µg/m^3
	N° superamenti soglia
200 µg/m^3	[NO_2] Limite vigente

Classe di pericolosità territoriale	
1	PT ≤ 30 µg/m^3
2	30 < PT ≤ 50 µg/m^3
3	50 < PT ≤ 100 µg/m^3
4	100< PT ≤ 200 µg/m^3
5	PT > 200 µg/m^3

Tabella 2 Dati inerenti alle concentrazione di PM_{10} rilevati dalle centraline selezionate e stima della classe di pericolosità

[PM_{10}]	Anni																											
Centraline	2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		**Media per centralina**	**σ**
Parco della Bissuola	-	-	-	-	42	79	48	122	47	120	47	116	38	83	37	72	34	75	39	91	36	76	31	55	28	46	38,81	6,65
Via Circonvallazione	-	-	-	-	51	96	56	158	57	172	57	150	47	112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,6*	4,45*
Via Tagliamento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	119	44	101	39	89	46	108	40	97	33	56	29	44	39,71*	6,73*
Sacca Fisola	-	-	-	-	42	82	40	96	38	73	43	102	36	59	35	61	32	52	38	79	34	71	30	44	28	42	36	4,80
Via A. da Mestre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Via Bottenigo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Via Fratelli Bandiera	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	108	-	-	-	-	-	-	-	-	45*	-
Via Malcontenta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	83	40	88	36	64	35	66	38,25*	3,30*
Via Beccaria	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	74	33	66	35*	2,83*
Favaro Veneto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Media annua area considerata	-		-		45		48		47,3		49		42		37,6		37,5		41,25		37,5		33,4		30,6		**Differenza tra le medie considerate**	
σ	-		-		5,20		8,00		9,50		7,21		5,83		4,73		5,80		3,59		3,00		3,05		3,21		2,81	
Classe PT	-		-		5		5		5		5		5		4		4		5		4		4		4			

(*) i dati medi contraddistinti da un asterisco presentano una matrice dati incompleta

	Media anno µg/m^3
	N° superamenti soglia
40 µg/m^3	[PM_{10}] Limite vigente

Classe di pericolosità territoriale	
1	PT < 20 µg/m^3
2	20 < PT ≤ 25 µg/m^3
3	25 < PT ≤ 30 µg/m^3
4	30 < PT ≤ 40 µg/m^3
5	PT > 40 µg/m^3

Dalla *Tab.2,* si evince che la pericolosità territoriale indotta dalla concentrazione di PM_{10} risulta essere attualmente appartenete alla *classe 4*, ma vi sono stati anni (dal 2004 al 2008 e nel 2011) in cui era di *classe 5*.

Comparando il risultato dei dati ottenuti da questa rielaborazione con quelli acquisiti dalla Carta del Rischio, si evince che l'indice di annerimento rilevato attualmente è in linea con quello indicato dalla Carta del Rischio. In questo caso i risultati ottenuti sfruttando i rilievi condotti dall'ARPAV Venezia, risultano essere comparabili con quelli della Carta del Rischio, perchè la stima di quest'indice, in entrambe le rielaborazioni, viene svolta considerando la concentrazione diretta di questo inquinante, e quindi non sono state eliminate variabili estremamente rilevanti nella fase di calcolo.

In entrambe le *Tab.1e 2*, sull'estrema destra è presente una colonna che determina la media delle concentrazioni di inquinanti rilevate dalle stazioni di Sacca Fisola e Parco della Bissuola nel corso dei 13 anni analizzati. Essendo presenti unicamente due centraline attive costantemente sia per la città di Mestre che per quella di Venezia, non è possibile trarre conclusioni definitive in merito alla rappresentatività della differenza tra le medie delle concentrazioni rilevate. Si osserva tuttavia che la tendenza della concentrazione dei PM_{10} a Mestre risulta superiore rispetto a quella rilevata nel centro storico, si ritiene che tale dato posso essere correlato al traffico veicolare in terraferma. Inoltre, essendo la centralina di Sacca Fisola posta in un area particolare della città di Venezia, la quale risulta sottoposta a ricircolo di aria costante, si ritiene che i valori possano risultare leggermente inferiori rispetto a quelli delle zone più interne della città e del Canal Grande. In merito alla concentrazione del gas NO_2 i valori invece presentano una differenza nettamente inferiore rispetto alla precedente, ma il valore medio risulta superiore nel centro storico, il che può essere ricondotto al transito delle grandi navi in laguna[7] .

Purtroppo non tutte le centraline risultano attive con continuità, e le matrici dei dati risultano spesso incomplete. Nel caso in cui invece i dati fossero stati rilevati con continuità , e dunque la matrice fosse completa, si sarebbero potute ricavare informazioni significative in merito alle discrepanze dei valori tra Mestre e Venezia e dunque ottenere indicazioni per poter modificare il modello applicato per la creazione della Carta del Rischio dei due siti.

[7]http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/qualita-dellaria/approfondimenti/inquinamento atmosferico-in-ambito-portuale-approfondimenti
http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/file-e-allegati/portiaria/Stima%20Grandi%20Navi.pdf

2.2.3) Analisi della piovosità nella Provincia di Venezia dal 2002 al 2014

Nelle *Tab. 3 e 4* vengono riportati i dati suddivisi per quantità di pioggia espressa in mm e numero di eventi piovosi. Vengono poi elaborati grafici per lo studio della piovosità e dei suoi eventi sfruttando i grafici a istogramma.

Anno	Mm di pioggia												Mm Pioggia annuale	Media della pioggia annuale
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre		
2002	40,2	41,4	7,4	129	101	147,6	125,8	114,2	84,8	132,8	73,4	75,8	1073,4	89,45
2003	42,2	18,8	5	123,8	21,6	35,2	16,8	32,2	79,8	59,6	115,4	64,6	615	51,25
2004	40,2	157	82,4	56,4	108,8	58	35,4	64	71	120,4	59,8	57,8	911,2	75,93
2005	24	0,8	10,4	92,6	57,6	28	72,4	92,2	123,8	162,4	50	48,6	762,8	63,56
2006	32,2	27,4	45,4	88	51,6	13,2	58,4	154,2	170,2	17,8	31,2	48,6	738,2	61,51
2007	17,8	82,8	90	0,2	83,6	43,2	31,2	65,8	225,2	41,2	19,2	31,6	731,8	60,98
2008	75,8	37,6	71,6	100,2	118,8	145,6	113,2	82	109,6	29,4	177,8	139,6	1201,2	100,1
2009	85,4	66,6	102,6	123	15,4	107,8	37,2	23,6	167,2	87,8	97	89,6	1003,2	83,6
2010	65,4	121,4	50,8	48	51,4	142,8	91,4	90,2	152,8	50,6	169,4	126,4	1160,6	96,71
2011	21,4	41,6	112,4	5,8	21,4	49,6	79	5	21,4	67,8	47,2	25,4	498	41,5
2012	8,8	22,6	4,4	62,8	66,4	22,6	7,6	18,4	104,4	122,8	74,8	39,8	555,4	46,28
2013	94	93	260	82,4	107,6	33,4	16,4	39,4	18,2	73	108,2	6,8	932,4	77,7
2014	167,4	133,6	74,2	29,6	85,8	33	168,4	54,4	185,4	25,6	141,9	85,4	1184,7	98,72
Media Mensile mm	54,98	64,96	70,50	72,44	68,53	66,15	65,63	64,27	116,44	76,24	89,63	64,61		

Tabella 3 Dati inerenti ai mm di pioggia per mese e per gli anni dal2002 al 2004

Nella *Tab. 3* sono riportati tutti i dati inerenti alla quantità di pioggia rilevata dall'ARPAV. All'estrema destra vi sono le colonne in cui vengono riportate la quantità di pioggia annuale totale espressa in mm, e la media della piovosità per anno. Nell'ultima riga, invece, è stata calcolata la quantità di pioggia media per ogni mese considerando il periodo temporale indagato.

Il grafico riportato in *Fig. 9* è rappresentativo della piovosità annuale totale. Nel pluviogramma è possibile apprezzare che l'anno maggiormente piovoso è risultato essere il 2008, con una piovosità annua totale pari a 1201,2 mm (corrispondente all'11% dei 13 anni dal 2002-2014), seguito dal 2014 con 1184,7 mm (10%) e 2010 a 1160,6 mm (10%). Gli anni in cui i livelli di pioggia risultano molto inferiori si sono rilevati nel 2011 con 498 mm (4%), 2012 con 555,4 mm (5%) e 2003 con 615 mm (5%). Si può ipotizzare che gli anni che sono risultati maggiormente piovosi ed incisivi in merito a degrado derivante dalle precipitazioni, nel range di tempo considerato sono: 2008 con una percentuale pari a 11% e il 2010, 2014 e 2002 i quali presentano una percentuale di piovosità al 10%.

In merito alla piovosità media per anno *(Fig. 10)* espressa in mm, le informazioni estrapolabili dai grafici risultano essere le medesime dei grafici precedenti.

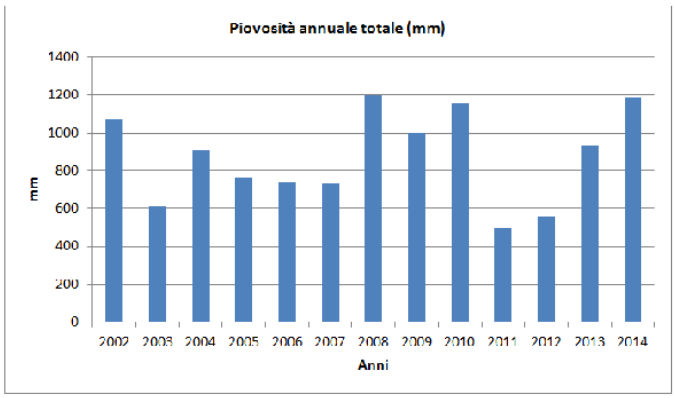


Figura 9 Pluviogramma rappresentativo dei mm di pioggia annuale totale per gli anni dal 2002 al 2004

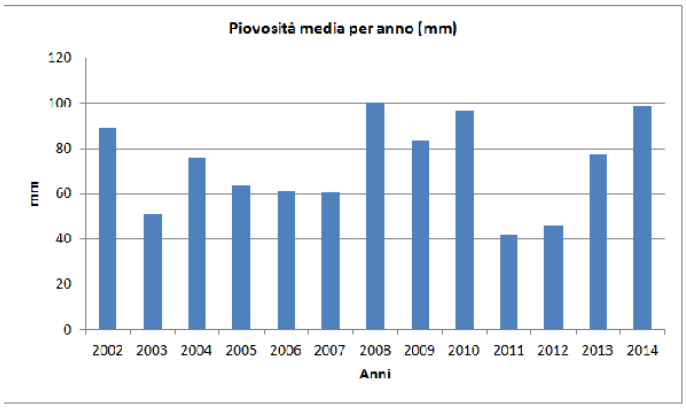


Figura 10 Pluviogramma rappresentativo dei mm di pioggia medi per gli anni dal 2002 al 2004

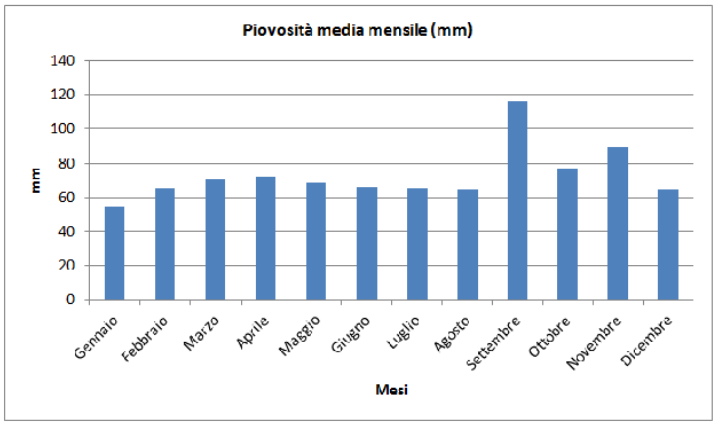


Figura 11 Pluviogramma rappresentativo della piovosità media mensile

Per quanto riguarda invece la piovosità media mensile espressa in mm, raffigurata nell' *Fig. 11*, si evince che il mese maggiormente piovoso nel periodo di tempo compreso tra il 2002-2014, risulta essere Settembre. Inoltre si può facilmente evidenziare che il periodo dell'anno maggiormente piovoso risulta essere il periodo compreso tra la stagione autunnale e quella invernale. Nei mesi compresi tra Gennaio e Febbraio la piovosità risulta pressoché costante, intorno a 70 mm. Analizzando ulteriormente i dati si evidenzia che da Settembre la piovosità tende a calare, passando dal 13% al 7% nel mese di Dicembre.

L'analisi condotta invece sulla frequenza degli eventi piovosi *(Tab. 4)* ha previsto il

calcolo del numero di manifestazioni piovose per anno e la loro media, oltre che la media mensile per ogni mese nel periodo di tempo compreso tra il 2002-2014

Anno	Numero di eventi piovosi												Somma annuale eventi piovosi	Media della eventi annuali
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre		
2002	1	3	1	11	11	7	9	10	6	6	13	8	86	≈7
2003	5	1	1	8	3	7	2	2	7	8	7	6	57	≈5
2004	8	10	8	10	11	7	6	5	3	7	6	10	91	≈7
2005	2	0	1	9	7	3	8	12	5	8	4	8	65	≈6
2006	5	9	7	7	4	4	5	12	6	3	4	5	71	≈6
2007	3	12	8	0	6	7	5	6	6	6	4	4	67	≈6
2008	7	4	9	13	5	8	8	5	4	4	13	10	90	≈7
2009	11	7	7	12	2	6	5	4	2	5	12	8	81	≈7
2010	9	11	7	6	8	10	5	6	9	8	14	13	106	≈9
2011	5	3	8	2	3	5	7	2	6	4	5	6	56	≈5
2012	2	2	1	12	7	4	1	4	10	8	7	7	65	≈5
2013	12	9	19	10	14	2	4	5	4	7	7	2	95	≈8
2014	13	13	4	5	7	9	12	9	7	4	13	9	105	≈9
Media mensile eventi piovosi	≈6	≈6	≈6	≈8	≈6	≈6	≈6	≈6	≈6	6	≈8	≈7		

Tabella 4 Dati inerenti al numero di eventi piovosi per mese e per gli anni dal 2002 al 2004

Analizzando le medie mensili e annuali degli eventi piovosi, si evidenziano valori molto simili, da ricondurre al fatto che la media annuale è stata stimata per i dodici mesi per anno, mentre la media mensile per i tredici anni del range temporale analizzato. I valori riportati sono espressi per evento piovoso, quindi per unità.

Nelle Fig. *9, 10, 11*, si evince che gli anni caratterizzati da un maggior numero di eventi piovosi,sia in merito alla somma annuale che alla media, risultano essere il 2010 con 106 eventi (10%) e il 2014 con 105 (10%). Gli anni in cui si sono verificate un numero inferiore di giornate caratterizzate dal mal tempo risultano essere il 2011 con 56 eventi piovosi (corrispondenti al 5 % del periodo temporale stimato ovvero quello dei 13 anni analizzati), 2012 con 65 eventi (6%) e il 2003 con 57 eventi (6%).

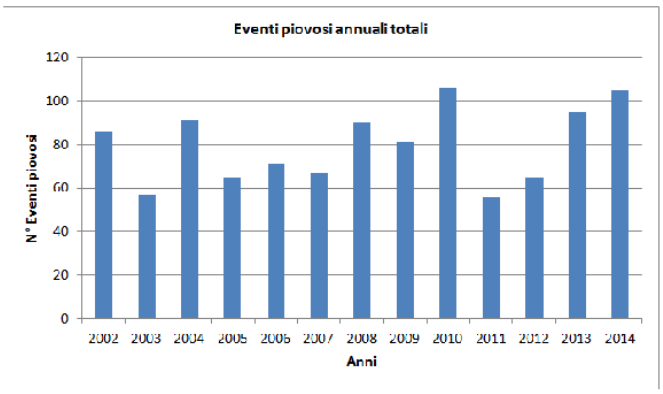


Figura 12 Pluviogramma rappresentativo degli eventi piovosi annuali totali

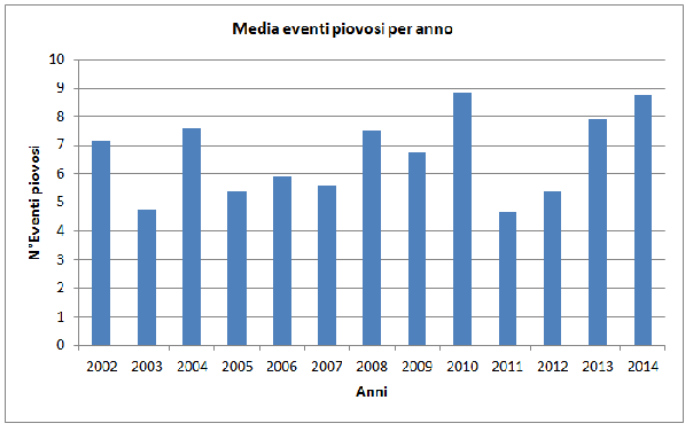


Figura 13 Pluviogramma rappresentativo della media degli eventi piovosi per anno

L'analisi degli eventi piovosi medi mensili ha permesso di individuare i periodi in cui si siano manifestate il maggior o minor numero di giornate caratterizzate da maltempo. Dai *Fig. 13 e 14* si evince che i mesi caratterizzati dal maggior numero di giorni piovosi per gli anni tra il 2004 e 2014 sono il mese di Novembre con una media pari a 8,38 eventi (11%), Aprile con 8,07 eventi (10%) e Dicembre con 7,38 eventi (9%). I mesi invece in cui il bel tempo ha prevalso sono Luglio con una media di 5,92 eventi piovosi (7%) e Settembre con 5,76 eventi (7%).

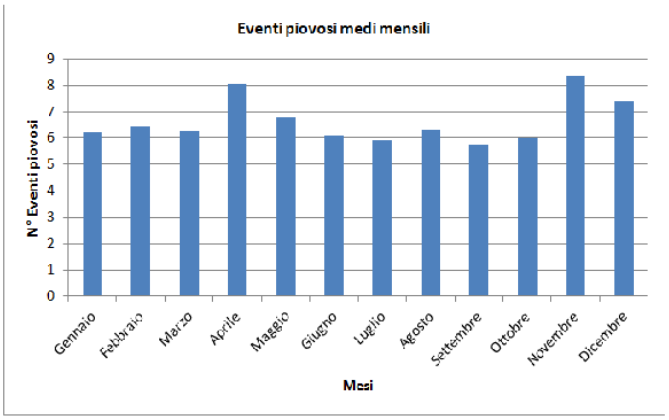


Figura 14 Pluviogramma rappresentativo della media degli eventi piovosi per mese

2.2.4) Presentazione dei dati inerenti ai venti nella Provincia di Venezia

Nel periodo di tempo considerato, la città di Venezia e la sua provincia è stata soggetta al fattore vento. Esso presenta una data velocità, direzione e una regolarità incostante. Le tabelle seguenti riportano i dati ottenuti dal bollettino dell'ARPAV, a semplice scopo informativo, come già specificato nel *Cap. 2.5*.

Nelle tabelle che seguono, se nella casella è presente il simbolo *">>"* significa che il dato non è disponibile.

Nella *Tab. 6,* in cui vengono riportati i dati inerenti alla direzione del vento, i calcoli sono stati svolti da parte dell' Istituto Cavanis su dati rilevati ogni 10 minuti.

Dalla *Tab. 5* la media annua della velocità in m/s del vento ha permesso di identificare l'anno 2010 come quello in cui sono state registrate velocità maggiori di questo fattore, 1,85 m/s, mentre nell'anno 2005 è risultata inferiore, pari a 1,42 m/s. In questa breve descrizione dei dati, si è deciso di escludere dalla citazione i dati inerenti agli anni 2007 e 2008 in quanto la matrice dati risultava incompleta.

La direzione generalmente predominante del vento è quella tendente verso Nord-Est, ma sia nella media mensile che annuale, la tendenza del vento è maggiormente verso Nord.

Analizzando la *Tab.7* si evince che la città di Venezia e la sua Provincia risulta generalmente soggetta al fenomeno del vento. Come riportato in tabella, risultano essere numericamente maggiori i giorni soggetti alla presenza di vento rispetto a quelli privi.

Anno	Velocità del vento (m/s)												Media annuale del vento
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	
2002	0,8	1,3	1,2	1,8	1,5	1,6	1,6	1,5	1,7	1,5	1,5	1,7	1,47
2003	1,3	1,7	1,2	1,9	1,6	1,6	1,6	1,6	1,4	1,6	1,3	1,5	1,52
2004	1,1	1,4	1,5	1,6	1,7	1,6	1,7	1,6	1,6	1,3	1,2	1,2	1,45
2005	1,1	1,5	1,3	1,7	1,6	1,6	1,4	1,4	1,5	1,3	1,3	1,4	1,42
2006	1,5	1,4	1,4	1,4	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,3	1	1,6	1,45
2007	1,3	1,2	2,2	1,7	2	2	2,1	1,8	2,1	>>	>>	>>	1,82
2008	>>	>>	>>	>>	>>	>>	2	1,9	2	1,6	1,8	2,2	1,91
2009	1,7	1,6	2	2	1,9	2	1,9	1,8	2	1,7	1,5	1,8	1,82
2010	1,6	1,7	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,9	1,9	2,2	1,8	1,7	1,85
2011	1,7	1,6	2,1	1,9	1,7	1,7	1,8	1,6	1,6	1,7	1,3	0,9	1,63
2012	1,1	2,3	1,3	1,6	1,6	1,7	2	1,7	1,6	1,5	1,5	0,9	1,56
2013	1,3	1,7	1,7	1,5	1,9	1,6	1,5	1,7	1,6	1,4	1,7	1	1,55
2014	1	1,5	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5	1,3	1,4	1,4	1,3	1,43
Media mensile del vento	1,29	1,57	1,61	1,70	1,71	1,70	1,72	1,66	1,68	1,54	1,44	1,43	

Tabella 5 Dati inerenti alla velocità del vento per mese e per anno

Anno	Direzione del vento prevalente (m/s)												Media annuale Direzione del vento
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	
2002	NNO	NNE	N	NNE	NE	ESE	NNO	NNO	N	N	N	N	N
2003	NNE	NNE	SE	NE	NNE	SE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
2004	NNE	NE	NE	NE	SE	SE	SE	SE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
2005	N	N	N	N	NE	NE	N	N	N	N	N	N	N
2006	N	N	N	N	NE	ESE	N	N	N	N	N	N	N
2007	N	N	NE	N	N	N	N	N	N	>>	>>	>>	N
2008	>>	>>	>>	>>	>>	>>	N	N	N	N	N	NNE	N
2009	N	N	N	NNE	ESE	NE	N	N	N	N	N	N	N
2010	NNE	NE	NE	NNE	ESE	ESE	ESE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE
2011	NNE	NNE	ENE	NE	SE	N	N	N	N	N	N	N	N
2012	N	NE	N	NE	N	NE	NE	NE	N	N	N	N	N
2013	N	N	NE	NE	N	SE	N	N	N	N	NNE	N	N
2014	N	NNE	NE	NE	N	NE	N	N	N	N	N	N	N
Media mensile direzione del vento	N	N	NE	N	N	NNE	N	N	N	N	N	N	

Tabella 6 Dati inerenti alla direzione del vento per mese e per anno

Anno	Giorni in assenza di vento											
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
2002	3	7	4	0	0	0	0	0	9	0	0	0
2003	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
2004	0	3	0	0	0	4	0	0	0	0	3	0
2005	0	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	2
2006	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	19	>>	>>	>>
2008	>>	>>	>>	>>	>>	>>	2	0	0	0	0	0
2009	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	2	0	2	3	0	0	0	0
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 7 Dati inerenti ai giorni di assenza del vento per mese e per anno

2.3) Discussione dei risultati riguardanti la valutazione della pericolosità per il dominio area in centro storico di Venezia

La rielaborazione della Pericolosità Territoriale, svolta estrapolando i dati dalla Carta del Rischio per conoscere la classe attuale della città di Venezia, correlandoli poi con la matrice dati inerente all'inquinamento atmosferico dettato da PM_{10} e NO_2, ha evidenziato che l'*indice di annerimento* stimato considerando le Particulate Matter 10 è il medesimo di quello stimato dall'ISCR: classe 4.

L'analisi condotta su scala temporale ha permesso di evidenziare un andamento scostante di classe: dal 2004 al 2008 e nel 2011 la classe di appartenenza della città di Venezia è risultata di classe 5, per poi stabilizzarsi in classe 4.

Per quanto riguarda l'*indice di erosione*, i dati rielaborati considerando la concentrazione di NO_2 hanno permesso di valutare la pericolosità dettata da tale gas: classe 2. La classificazione in questo caso non è comparabile a quella rilevata dalla Carta del Rischio, in quanto sono state escluse delle variabili significative nello studio, quali ad esempio la concentrazione di ioni idrogeno (mg/L) che può essere ricavata durante il verificarsi di un evento piovoso, e attualmente il dato non è disponibile per il periodo di tempo analizzato. Si può però ipotizzare un basso indice di incisività per quanto riguarda l'erosione della Pietra d'Istria indotta dalla formazione dell'acido nitrico.

In merito all'analisi mensile su scala annuale, si è evidenziato un maggior quantitativo di precipitazioni nei mesi di Settembre, Novembre e Aprile. In quest'ultimo mese l'intensità degli eventi è da considerarsi inferiore, si sono rilevati mediamente 77,44 mm di precipitazioni per un numero di eventi pari ad una media di 8,07. Al mese di Settembre è stata attribuita una bassa intensità (116,44 mm per 5,76 eventi medi), mentre al mese di Novembre è stata attribuita una media intensità in quanto sono stati rilevati 89,63 mm di precipitazione per un numero di eventi medi pari a 8,38.

Si può dunque ipotizzare che, se in un futuro, si volesse valutare l'impatto dall'acqua sul materiale roccioso, lo studio dovrà essere avviato nei mesi estivi per poi procedere stimando il degrado nella stagione invernale.

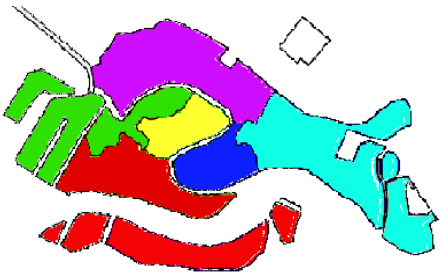
Per quanto riguarda il vento, la sua direzione prevalente risulta indicativamente essere quella tendente a nord-est e la città lagunare risulta generalmente sempre soggetta a tale fattore ambientale. Rapportando la direzione al numero di giorni di assenza di vento, è possibile ipotizzare che le superfici siano quasi costantemente soggette alla deposizione di aerosol marino, il quale si forma continuamente, e soggette all'erosione fisica. Inoltre la direzione permette di ipotizzare che l'inquinamento atmosferico rintracciabile nel centro storico possa risultare minore in quanto il vento potrebbe tendenzialmente veicolarlo verso l'entroterra.

3) Proposta per la valutazione della vulnerabilità della Pietra d'Istria a Venezia

In questa sezione dell'elaborato verranno presentate le analisi condotte sulla Pietra d'Istria volte a verificare il degrado della superficie e conoscerne la composizione applicando tecniche d'indagine non invasive e invasive comunemente utilizzate per la caratterizzazione di superfici architettoniche. Inoltre verrà proposto lostudio della morfologia delle superfici tramite tecnica a calco e elaborazione di profilometrie per individuare la vulnerabilità del materiale lapideo esposto all'ambiente esterno e lagunare Verranno analizzati i calchi svolti sulle superfici di alcuni edifici di proprietà dell'Università Ca' Foscari. A questa tipologia di indagine verrà dedicato un intero sottocapitolo, così da mostrare tutti i passaggi svolti per conseguire tale scopo.

3.1) Gli edifici caso di studio

Gli edifici caso di studio scelti sono Ca' Foscari, Ca' Dolfin, Ca' Bembo, Ca' Bottaccin. Gli edifici indagati sono stati selezionati perché rappresentativi dello schema strutturale e costruttivo veneziano, perché presentano superfici in pietra d'Istria e perché la loro struttura permette di poter analizzare e confrontare due differenti tipologie di esposizione del materiale lapideo: verso il canale o corte interna - giardino. Sono ubicati tutti nel sestiere di Dorsoduro, il più ampio dei sei quartieri della città di Venezia, la vicinanza spaziale degli edifici dovrebbe garantire una certa omogeneità dell'ambiente circostante gli edifici, nonostante si possano presentare condizioni locali di vento o aerosol marino.
Sono tutti edifici di proprietà dell'Università Ca' Foscari, in seguito ad acquisizione od donazione dalle precedenti famiglie patrizie proprietarie.



Legenda dei Sestieri			
	Dorsoduro		Cannaregio
	San Polo		San marco
	Santa Croce		Castello

Figura 1 Mappa dei sestieri di Venezia

Lo schema strutturale degli edifici patrizi veneziani è molto particolare e venne

mantenuto e reiterato nei secoli seppur gli stili architettonici mutarono. In linea generale tutti i palazzi presentano due ingressi: uno volto verso la terra e uno verso il canale, il quale costituiva l'ingresso principale. Da esso, generalmente, si accede ad un androne, ovvero un atrio molto esteso, il quale attraversa l'edificio per tutta la sua profondità, segnandone così l'asse centrale. In origine l'androne, chiamato anche *portego*, veniva adibito al carico e scarico delle merci, non solo a scopo residenziale ma anche volto ad una vera e propria attività commerciale[1].

Ai lati dell'androne vi sono delle stanze, anticamente adibite ai magazzini e alla conservazione delle mercanzie. Su uno dei lati maggiori dell'androne, circa al centro di esso, sono presenti delle scalinate, più o meno sfarzose a seconda del potere della famiglia proprietaria, le quali conducono al piano superiore.[2]

L'assetto del piano superiore mantiene la struttura del piano terra,e talvolta, lungo l'asse centrale è possibile ritrovare un'altra stanza. Quest'ultima inizialmente aperta sui due lati opposti del palazzo, possedeva la funzione di *galleria*; era spesso arredata con un mobilio poco sfarzoso e confortevole, il quale invece veniva posto nelle sale laterali adibite a soggiorno, in cui vi erano anche i camini per il riscaldamento nella stagione invernale.

Le stanze laterali presentano una disposizione simmetrica ai magazzini del piano inferiore e presentano delle finestre e dei piccoli balconi, detti *pergoli*, volti verso l'esterno.[3]

Sul retro dell'edificio è presente un cortile in cui vi era il secondo ingresso dell'edificio. Il giardino non faceva propriamente parte della planimetria dell'edificio[4] e per questo solitamente veniva delimitato tramite delle semplici recinzioni. Ai cortili non veniva mai dedicata un'area estesa, in quanto gli immobili venivano eretti su delle palafitte e non terreni, ed essendo un'operazione complicata e costosa, molto spesso per risparmiare sulla costruzione di almeno un muro portante esterno, si tendeva ad erigere palazzi uno a ridosso dell'altro.[5]

3.1.1 Cà' Foscari[6]

L'edifico Cà Foscari, attualmente è la sede centrale dell'omonima università ed ospita numerosi uffici. Il palazzo è risalente al 1400, è ubicato in Calle Larga Foscari, nel sestiere di Dorsoduro (*Fig.2*), ed è in stile gotico veneziano. La facciata principale è rivolta verso l'ampia curva del Canal Grande[7] (*Fig.3*).

---

[1] R. J. Goy, *Venice an architectural guide*,The British Library, Pechino, 2010
[2] Le scale interne vennero introdotte nel XV secolo per ragione di economia di spazio, inizialmente venivano poste all'esterno
[3] G. Mazzariol, A. Trivellato, *Venetian palace*, Ed. Evergreen, Padova, 1998
[4] Solo nel periodo barocco i giardini iniziarono ad essere inseriti all'interno della planimetria dell'edificio
[5] G. Mazzariol, *I palazzi del Canal Grande*, Istituto Geografico De Agostini, Novare, 1981
[6] Immagini provenienti da www.unive.it e google maps
[7] Op. Cit. G. Mazzariol

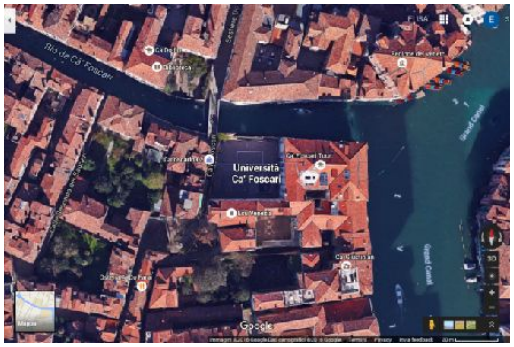


Figura 2 Ortofoto Cà Foscari

Figura 3 Facciata fronte canale, Cà Foscari

Figura 4 Facciata fronte Giardino-Corte, Cà Foscari

Figura 5 Aula Baratto, Cà Foscari

Anticamente al posto dell'attuale edificio sorgeva la così detta *Casa delle Due Torri*, inizialmente di proprietà di Gianfrancesco Gonzaga, principe di Mantova e vice-capitano dell'esercito della Serenissima, e successivamente appartenuto a Francesco Sforza, duca di Milano. Nel 1452 l'edificio venne messo all'asta e venne acquistato dal doge Francesco Foscari, che successivamente decise di abbatterlo e fece erigere la costruzione attuale, che doveva imporsi per maestosità ed eleganza. L'edificio divenne il simbolo del prestigio della famiglia Foscari.[8] Nel XX secolo vennero svolti due importanti interventi di restauro ad opera dell'architetto veneziano Carlo Scarpa. Nel 1936 vennero svolti degli interventi nell'androne, rinnovando il collegamento visivo tra ingresso dell'edificio verso il cortile e canale, nel salone del primo piano e all'attuale aula magna (*Aula Baratto*[9]).

L'ultimo intervento di restauro è stato svolto tra il 2004 e 2006, il quale non ha interessato esclusivamente Cà Foscari, ma anche Cà Giustinian dei Vescovi (edificio adiacente alla sede centrale che ne divenne parte integrante nel 1942). Durante l'intervento vennero create delle connessioni interne tra i due edifici e vennero svolti sia interventi di carattere statico che di pulitura[10] e consolidamento delle superfici in Pietra

[8] Giannantonio Paladini, *Profilo Storico dell'Ateneo*, edizioni Università Ca' Foscari, Venezia, 1996.
[9] G.M. Pilo, M. De Rossi, D. Alessandri, F. Zuanier, *Cà Foscari: storia e restauro del palazzo dell' Università di Venezia*, Ed. Marsilio, 2009
[10] Informazione pervenuta verbalmente dall'Arc. Peltrera, Ufficio Manutenzione Edifici Cà Foscari

d'Istria esterne.[11]

3.1.2 Cà Dolfin[6]

Figura 6 Ortofoto Cà Dolfin

Figura 7 Facciata fronte canale, Cà Dolfin

Figura 8 Giardino Cà Dolfin

Figura 9 Aula Magna Silvio Trentin, Cà Dolfin

Il palazzo Cà Dolfin è ubicato in Calle Larga Cà Foscari (*Fig. 6*), ed attualmente ospita uffici. La facciata principale, risulta essere quella volta verso il canale (*Fig.7*), come accade generalmente per tutti gli edifici patrizi. Essa risulta integralmente ricoperta da lastre ed ornamenti in Pietra d'Istria, mentre per quanto riguarda la facciata volta verso il giardino-corte (*Fig.8*) presenta tale materiale solo come cornice lungo le finestre. La facciata in prossimità del giardino, è l'attuale ingresso da cui e possibile accedere all'edificio via terra. All'interno dell'edificio, al primo piano, vi è l'attuale Aula Magna Silvio Trentin (*Fig.9*). Essa è un'ampia sala del 1500, presenta soffitti e pareti impreziositi da affreschi di scuola tiepolosca, medaglioni con figure allegoriche, lampadari di Murano e numerose specchiere. In passato all'interno di questa sala vi erano una decina di tele raffiguranti tematiche storiche eseguite da Giambattista Tiepolo, attualmente esposte al museo Hermitage a San Pietroburgo.[12]

---

[11] A. A. V. V., *La sede storica dell'Università Cà Foscari: risanamento e riutilizzo*, Atti del convegno del 22 Novembre 1997, Venezia

[12] http://www.unive.it/media/allegato/Fondazione-Ca-Foscari/spazi/Scheda_CaDolfin_Aula-Magna-Silvio-Trentin.pdf

3.1.3 Cà Bembo[6]

Il *palazzo Bembo*, denominato anche *Cà Bembo o Palazzo Marcello-Sangiotofetti o Barbarigo,* è un edificio del 1500 ed è ubicato in Calle Tofetti, nel sestiere di Dorsoduro, nella città di Venezia (*Fig. 10*).

Figura 10 Ortofoto, Cà Bembo

Figura 11 Facciata fronte canale, Cà Bembo

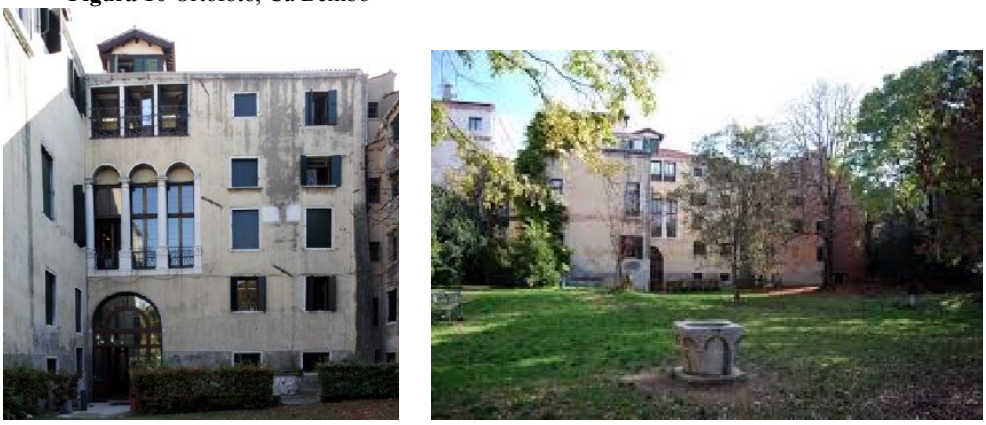


Figura 12 Facciata fronte giardino-corte e vera da pozzo, Cà Bembo

In epoca medioevale, nell'area in cui attualmente è ubicato il palazzo vi era un complesso abitativo riferibile al ramo dei *Barbarigo de Osso Duro*, da cui deriva il nome del sestiere di *Dorsoduro*. I Barbarigo erano una famiglia appartenete al patriziato veneziano, la quale vantava nel suo albero genealogico numerose cariche dogali, ed era proprietaria di numerose abitazioni lungo il canale di San Trovaso[13]. Intorno al 1465, le proprietà della famiglia vennero spartite tra i figli: Francesco detto *il ricco* Barbarigo e Girolamo Barbarigo, il quale divenne il proprietario dell'area attualmente occupata dall'edificio Cà Bembo. Attualmente all'interno del palazzo come testimonianza della proprietà di Girolamo Barbarigo è rimasta solo una *vera da pozzo*[14]*,* presente nell'ampio giardino sul retro dell'edificio (*Fig.12*), risalente agli ultimi decenni del secolo XV, la quale presenta

[13] Vi sono documentati che testimoniano l'atto di suddivisione e proprietà risalente al 1374

[14] La *vera di un pozzo* è la balaustra di protezione chiusa attorno al foro di un pozzo. Viene realizzata per impedire cadute accidentali e per comodità di uso del pozzo stesso, costituendo un appoggio durante la fase di calatura del secchio con o senza l'ausilio di una carrucola, e il suo eventuale recupero. Col tempo e con l'evolversi del gusto architettonico, la vera è divenuta un elemento decorativo indispensabile che impreziosisce e costituisce in molti casi il fulcro dell'impostazione architettonica di cortili, piazze, chiostri, e palazzi nobiliari così come di abitazioni popolari, in città importanti che in piccoli centri periferici.

scolpiti degli emblemi araldici della famiglia, la cui manifattura è attribuibile alle maestranze operanti nella bottega di Antonio Rizzo.[15] In epoca successiva, intorno al 1618 a seguito della morte di Pietro Barbarigo , il quale non possedeva eredi, il palazzo dopo complesso giro di pretese ereditarie, divenne proprietà alla famiglia Marcello-Sangiotofetti, da cui deriva il nome della *calle Tofetti*. I Sangiotofetti, famiglia di origine cremasca iscritta al patriziato veneziano nel 1649, era conosciuta in laguna come la famiglia proprietaria di edifici detti *case fatte per soldo.* Quando questa famiglia divenne la legittima proprietaria di Cà Bembo promosse la riorganizzazione e la decorazione degli interni del palazzo affidandoli al pittore padovano Costantino Cedini.Le superfici in Pietra d'Istria, risultano essere presenti su entrambe le facciate, ma costituiscono per lo più le balconate e le colonne che scandiscono la ritmicità delle finestre sormontata da archi a tutto sesto (*Fig. 11 e 12*). Attualmente l'edificio è di proprietà dell'Università Cà Foscari ed è adibita a sede didattica del Dipartimento di Lingue.

3.1.4 Cà Bottacin[6]

Figura 13 Ortofoto Cà Bottacin

Figura 15 Facciata volta verso giardino-corte, Cà Bottacin

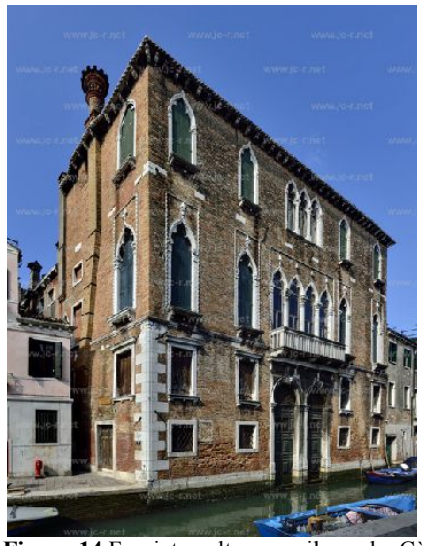


Figura 14 Facciata volta verso il canale, Cà Bottacin

Cà Bottacin, è un edificio ubicato nel sestiere di Dorsoduro, in Calle Crosera, da cui è possibile accede al palazzo via terra (*Fig.13*). La facciata dell'edificio è rivolta verso il Rio della Frescada (*Fig. 14*). All'ingresso è presente una piccola corte con una balconata (*Fig.15*). Com'è possibile individuare nelle *Fig. 14 e 15*, le superfici in Pietra d'Istria in Palazzo Bottacin risultano essere di carattere ornamentale. E' possibile individuarle come fregio lungo il perimetro delle finestre e come materiale costituente la balconata, sia sul canale che giardino-corte interna.

Attualmente l'edificio è sede del Dipartimento di Scienze Giuridiche.

[15] G. Mazzariol, A. Trivellato, *Venetian palace*, Ed. Evergreen, Padova, 1998

3.2) Metodologia di studio della Pietra d'Istria esposta all'ambiente esterno e lagunare

Per poter stimare lo stato di conservazione della Pietra d'Istria presente come superficie lapidea ornamentale degli edifici precedentemente descritti, si è proceduto indagando le superfici attraverso l'applicazione di tecniche analitiche non invasive, quali documentazione fotografica. Terminata questa fase si è proceduto campionando i depositi superficiali presenti in *aree esposte e non esposte al dilavamento* a seconda *dell'orientamento verso il canale o verso il giardino e corte interna*. I campioni sono stati inizialmente sottoposti ad analisi in microscopia ottica per una valutazione morfologia, e poi indagati a fine qualitativo sfruttando le tecniche FT-IR in ATR e XRF. Inoltre, sono stati svolti dei calchi delle superfici al fine di valutare la morfologia del materiale e valutare se l'esposizione verso il canale o corte e giardino potessero provocare differente degrado. I calchi sono stati digitalizzati applicando diversi free software e successivamente rielaborati applicando i principi della profilometria che hanno permesso di estrapolare numerosi dati. Per descrivere dettagliatamente questa fase di analisi, le si dedicherà il capitolo *Cap.4.3.*

3.2.1)Osservazione delle superfici in situ

Le superfici sono state oggetto di analisi mediante osservazione visiva corredata da documentazione fotografica eseguita con macchina Nikon 40D. Inoltre, l'utilizzo del microscopio ottico digitale a contatto Dino-Lite AM4113 ha permesso l' osservazione delle superfici lapidee, dei relativi depositi e composti. Questo strumento permette di catturare immagini in luce visibile e UV su porzione limitate di superficie, per le superficie degli edifici indagate si sono sfruttati gli ingrandimenti a 54x e 125x.

3.2.2) Campionamento e tecniche d'analisi dei composti e dei depositi superficiali presenti sui supporti lapidei

Al fine di caratterizzare in termini qualitativi i composti e i depositi superficiali presenti si è deciso di campionare delle piccole aree in punti poco visibili delle superfici sia esposte al dilavamento diretto da parte dell'acqua che in aree riparate.

I siti di prelievo sono stati individuati su superfici rivolte sia verso il canale che verso il giardino o corte interna, inoltre sono stati tutti prelevati in prossimità delle logge poste al primo piano, così da rendere maggiormente confrontabili i dati tra loro.

Per il campionamento è stato utilizzando un bisturi a lama fissa, il quale ha permesso di grattare delicatamente il supporto asportando solo il materiale di interesse in quantità

limitata e sufficiente per svolgere le analisi successive. I campioni sono stati analizzati con il Microscopio ottico Olympus SZX16 con lente Olympus SDF Plato 1x PF Japan in laboratorio con il fine di ottenere informazioni morfologiche. Gli ingrandimenti sfruttati sono stati 0.7x, 1.6x, 3.5x, 6,3x e 11.5x, i quali sono stati applicati a seconda della tipologia di campione in analisi.

Per ottenere informazioni in merito alla composizione dei campioni, dunque informazioni qualitative, si è deciso di svolgere le analisi sfruttando la spettrometria FT-IR in ATR[16], ovvero la *spettrometria infrarossa in riflettenza attenuata*.

Le analisi sono state condotte sfruttando lo spettrofotometro Nicolet Nexus 670, su cui è stato montato il supporto per le analisi in ATR, il quale presenta un cristallo di diamante avente un area d'indagine per campione pari a 0,75 mm^2 e una profondità di circa 1μm. Gli spettri sono stati registrati tra i 4000 e 400 cm^{-1}effettuando 32 scansioni ad una risoluzione pari a 4 cm^{-1}.L'elaborazione degli spettri è stata eseguita sfruttando il software Omnic della Thermo Nicolet.[17] Di seguito riportiamo una tabella di alcuni assorbimenti tipici di gruppi funzionali di composti tipicamente presenti nella Pietra d'Istria (carbonato di calcio, silicati, a volte patine di ossalati) le lunghezze d'onda in cui ricadono alcuni Gruppi funzionali rintracciabili all'interno di depositi presenti sulle superfici in Pietra d'Istria esposte in ambiente esterno a Venezia:[18]

Tabella 1 Tabella Riassuntiva dei gruppi funzionali rintracciabili negòi spettri FT-IR in ATR

	Gruppi Funzionali (cm^{-1})			
	OH^-	**CO_3^{2-}**	**SO_4^{2-}**	**$C_2O_4^{2-}$**
Stretch	3800, 3200	≈1400	1620, 1120	1650
Bend	1700-1600	≈870 ≈700	670 - 600	1000 1300 780

L'analisi spettrofotometrica XRF (*X-ray fluorescence spectroscopy* o *X-ray fluorescence)* è una tecnica non distruttiva e permette di rintracciare all'interno dei campioni i suoi elementi costituenti, attraverso lo studio della radiazione di fluorescenza X. Lo strumento utilizzato per svolgere questa tipologia di analisi è lo Spettrofotometro Artax200 della Bruker, la radiazione è generata da un anodo a Molibdeno, con tensione anodica pari a 30 Kv, corrente a 1300 μA e con tempistiche di misura pari a 120 secondi.

---

[16] Attenuated Total Reflectance

[17] C. Coury, A.M. Dillner, *A method to quantify organic groups and inorganic compounds in ambient aerosols using attenuated reflectance FTIR spectroscopy and multivariate chemiometric thecniques*, Atmospheric Environment,2008, pagg. 5923-5932

[18] P. Maravelaki, E. Zendri, G. Biscontin, G. Repaci, *Indagini sulle superfici in Pietra d'Istria a Venezia*, Le pietre nell'architettura: struttura e superfici, Bressanone ,1991, 911-921
Graziella Rosselli, *La spettroscopia infrarossa in scienze della conservazione*,pdf., 2008

3.2.3) Calchi della Pietra d'Istria con gomma siliconica GSP-400 N

Per poter stimare l'effetto sinergico degradante dei fattori ambientali descritti nel *Cap.1.4* sulle superfici lapidee in Pietra d'Istria degli edifici caso di studio, in questa tesi si propone un'analisi del profilo delle superfici architettoniche con la *tecnica del calco*. Tale tecnica è stata scelta e sviluppata in quanto permette di ottenere informazioni dettagliate in scala 1:1 sul profilo spaziale della superficie indagata e da questa di stimarne lo stato di conservazione. Le informazioni contenute nei calchi delle superfici sono state estrapolate mediante digitalizzazione ed analisi degli stessi sfruttando i softwares *Imagej*, *Gimp* e *Web Plot Digitizer*.

Figura 16 Gomma siliconica GSP-400N

I calchi vengono effettuati utilizzando la gomma siliconica GSP-400 N® dell'Azienda Prochima. Questa gomma siliconica è bicomponente e vulcanizza per reazione di poliaddizione a medio indurimento. E' stata selezionata perché oltre ad avere un alto grado di sensibilità per la riproduzione di particolari, può essere impiegata anche su superfici inamovibili verticali, non necessita di un distaccante, ed non presenta effetti di ritiro o di peeling delle superfici avrebbe che avrebbero potuto alterare l'andamento reale e risultare invasive per il materiale. I due componenti del sistema in *Fig.16*,presentano simile lavorabilità in pasta, un peso specifico di 1,5 g/cm^3 ad una temperatura di 23°C e un cono di penetrazione di 220 µm. Il Pot-life alla temperatura di 23°C è di 20 minuti, mentre l' indurimento (ad una temperatura di 30°C) inizia dopo circa 45 minuti.[19] La modalità d'utilizzo del prodotto prevede il rapporto in volume 1/1 delle due componenti : 1 parte di A e 1 parte di B, le quali devono essere amalgamate fino ad ottenere un composto di colorazione gialla omogenea (*Fig.17)*.

Figura 17 Amalgama della componente a e B della gomma siliconica GSP-400N

La pasta viene stesa sulla superficie con l'ausilio di una spatola cercando di fornire una pressione costante in modo da ricoprire l'intera area selezionata e in modo da riprodurre

[19] Per conoscere le ulteriori caratteristiche del materiale, consultare la scheda tecnica in appendice IV

tutti i particolari, senza lasciare vuoti né bolle d'aria all'interno (*Fig.18*). Successivamente si è cercato di omogeneizzare lo strato e renderlo di spessore costante. La gomma siliconica è stata posizionata su differenti aree precedentemente individuate tramite analisi con microscopio ottico a contatto Dino-lite, analisi visiva e tattile sulle superfici esposte verso il giardino o corte interna e canale. Alcune delle superfici analizzate presentavano dislivelli tra aree esposte al dilavamento e aree riparate.
Dopo circa 8 ore dal posizionamento della gomma GSP- 400 N, dunque al termine del processo di catalisi completo del prodotto, i calchi sono stati rimossi dalla superficie. Il prodotto non interagendo con la superficie è stato rimosso facilmente, sollevando leggermente una parte del calco e procedendo tirando leggermente la gomma. Non si evidenziano particolari effetti di peeling delle superfici.

Figura 18 Applicazione della gomma siliconica GSP-400N

Figura 19 Rimozione della gomma siliconica GSP-400N

3.2.4) Rielaborazione di scansioni dai calchi eseguiti

I calchi vengono catalogati e poi acquisiti tramite scansione ad una risoluzione di 600 Dpi con calchi sono stati scansionati con scanner HP Photosmart C7280 All-in-One a 600 Dpi: le dimensioni in pixel misurano il numero di pixel complessivo lungo la larghezza e l'altezza di un'immagine; invece il livello di dettaglio di un'immagine si misura in pixel per pollice (Dpi) e maggiore è il numero di pixel per pollice, maggiore è la risoluzione[20].Le scansioni sono state analizzate con il software open source[21] *ImageJ. Si*

[20] https://helpx.adobe.com/it/photoshop/using/image-size-resolution.html

tratta di un software Java per la elaborazione ed analisi di immagini in particolare in campo biologico realizzato dal gruppo di ricerca coordinato da Wayne Rasband, ricercatore del *National Institute of Mental Health* che ha sede a Bethesda nel Maryland (USA)[22].

Questo software consente di visualizzare, modificare, analizzare immagini a 8, 16 e 32 bit nei formati più diffusi (jpeg, tiff, ecc.). Inoltre consente di calcolare valori, statistiche e misurazioni sui pixel a partire da selezioni definite dall'utente, dette *region of interest* (ROI), e permette trasformazioni geometriche quali *flipping*, *scaling*, *rotation* oltre alle classiche operazioni di *editing* di immagini.[23]

ImageJ è stato applicato per poter studiare l'andamento superficiale dei calchi. In questa fase sono state applicate la funzione di *scaling*, la modifica d'*immagine in 8 bit*, e la sua successiva *inversione* volta ad ottenere il "positivo", cioè la superficie rilevata dal calco, così da poter eseguire poi l'analisi superficiale sfruttando la *profondità di colore* ed ottenendo grafici la relativi alla scala di grigio della superficie. Questa fase di analisi è stata condotta per poter valutare differenze rugosità qualitative di aspetto tra superfici esposte e non esposte a dilavamento. Inoltre, poiché i calchi sono stati acquisiti con identica modalità di scansione e sono di colore omogeneo, le zone più profonde risultano di colore più scuro e quelle più superficiali di colore più chiaro. Quindi le variazioni nella scala di grigi possono fornire informazioni circa la tridimensionalità del calco.

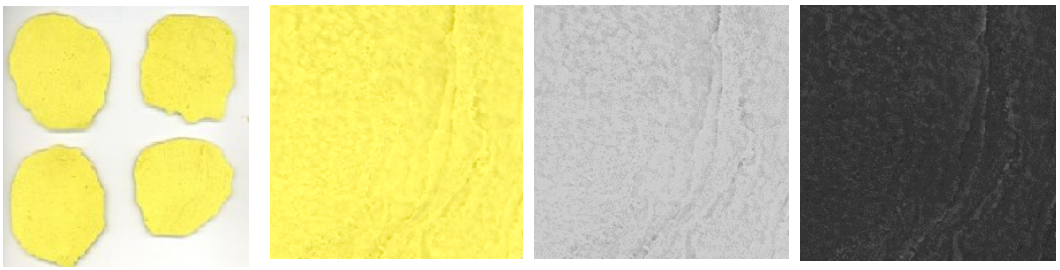


Figura 20 Scansione dei calchi, Crop, Conversione in 8 bit, Immagine 8 Bit invert

Le immagini scansionate vengono importate in ImageJ e scalarizzate. La funzione di *scaling* è estremamente rilevante in quanto permette la calibrazione: permette di definire una scala spaziale dell'immagine attiva in modo che si possa rapportare la dimensione

---

[21] Il software è di pubblico dominio e i suoi utilizzatori godono delle quattro libertà definite da Richard Stallman nel 1986, vale a dire:

- eseguire il programma per qualsiasi scopo;
- studiare il funzionamento del programma e modificarlo, se ciò risulta utile allo scopo;
- distribuire copie del programma e aiutare i nuovi utilizzatori ad usarlo;
- rendere pubbliche le migliorie o le nuove funzionalità aggiunte in modo che tutta la comunità possa beneficiarne.

[22] https://imagej.nih.gov/ij/features.html

[23] http://www.di.uniba.it/~ig/TextureAnalysis/InfGrafica.html

reale rilevata, in questo caso del calco, alla dimensione in pixel così che le informazioni che verranno poi estrapolate saranno poi espresse in millimetri reali.

Il passaggio successivo ha previsto l'individuazione dell'area di maggior interesse presente nel calco. E' stata applicata la funzione *crop* che ha permesso di ritagliare in scala l'area, la quale successivamente è stata convertita in 8 bit. Quando un'immagine viene convertita in 8 bit, significa che tutti i colori in essa presenti verranno tramutati in scala di grigio: si lavorerà non più sulla gamma di colore ma sulla *profondità di colore* o *profondità di bit.* La *profondità di bit,* quindi, determina la quantità di informazioni sul colore disponibili per ciascun pixel di un'immagine[24].

Essendo l'immagine del calco il "*negativo*" della superficie indagata, si è proceduto applicando la funzione *invert*. Questa funzione permette di invertire i valori di *profondità di bit*, ovvero i pixel che nell'*immagine a 8-bit* riportavano informazioni inerenti al bianco, quindi alle superfici in rilievo, ora verranno convertire in nero, e così verrà eseguito anche per gli altri pixel aventi informazioni intermedie: ad ogni tonalità di colore corrisponderà il suo "*inverso*". In questo modo è come se si potesse analizzare la superficie su cui è stato eseguito il calco, quindi il "*positivo*" di quest'ultimo.

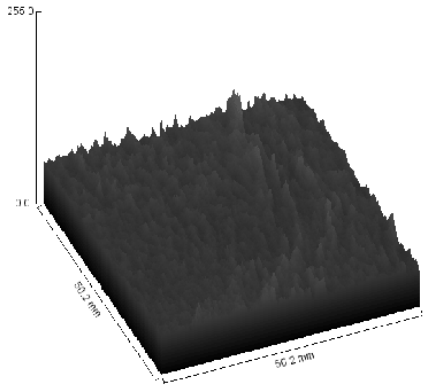


Figura 22 Surface Plot

A seguito di questo passaggio si è proceduto sfruttando la funzione *surface plot (Fig.22)*. Essa permette di visualizzare un grafico tridimensionale delle intensità dei pixel in un'immagine a toni di grigio o a pseudo colori.[25] Da questa tipologie di immagine si può visualizzare l'andamento delle superfici dell'area su cui è stato svolto il calco, ma non misurare direttamente la profondità reale di un certo picco o valle della superficie.

In prospettiva futura, potrebbe essere ulteriormente investigata la correlazione tra la scala di grigi individuata e la terza dimensione spaziale della superficie mediante acquisizione di tali sezioni con profilometro laser, essendo i calchi facilmente trasportabili in laboratorio rispetto allo studio in situ con profilometro della superficie architettonica.

[24] Maggiore è il numero bit di informazioni per pixel, maggiore è il numero di colori disponibili e più precisa è la rappresentazione dei colori. Ad esempio, un'immagine con una profondità di 1 bit può avere due valori: bianco e nero. Un'immagine con una profondità in bit pari a 8 avrà 2^8, ovvero 256, valori possibili. Le immagini in scala di grigio con una profondità di 8 bit hanno 256 valori di grigio possibili

[25] http://svg.dmi.unict.it/iplab/imagej/downloads/relazione.pdf

Inoltre se fosse possibile ottenere una matrice dati rappresentante l'intera superficie, si potrebbero ottenere informazioni maggiormente dettagliate in merito all'andamento della superficie indagata.
Una metodologia simile può essere applicata anche alle immagini della superficie acquisite tramite Dino-Lite o macchina fotografica per evidenziare possibili variazioni di colore utilizzando la terza dimensione.

3.2.5) *Sezionamento dei calchi e loro rielaborazione profilometrica*

Terminate la fase di analisi tramite la funzione *surface plot* del software *Image*J, i calchi sono stati sezionati. Dalle sezioni inchiostrate si sono ottenuti dei timbri di diversi profili di superficie, poi scansionati a 600 Dpi e rielaborati sfruttando il software *Gimp*, il quale ha permesso di ottenere i profili dettagliati del calco e dell'andamento della pietra.
La fase si sezionamento è stata eseguita valutando le informazioni ottenute tramite le analisi precedentemente condotte con il software ImageJ. Ciò ha permesso di individuare la direzione da seguire per poter ottenere maggiori informazioni nella fase di rielaborazione delle sezioni.

Figura 23 Un calco prima del sezionamento

Figura 24 Calco sezionato e i profili ottenuti tramite timbratura

I calchi sono stati tagliati con un bisturi a lama mobile n°10, la quale è stata cambiata ogni 10 sezioni, così da garantire la massima precisione di taglio. La distanza adottata tra una sezione e l'altra è 1 cm.
A seguito della fase di sezionamento e catalogazione, è stata svolta anche la fase di rilievo delle sezione applicando la tecnica del timbro. Ogni sezione di calco è stata inchiostrata su un cuscinetto per timbri con pressione costante. Il passaggio successivo ha previsto il posizionamento della sezione su un supporto rigido e regolare così da garantire una buona ortogonalità con il foglio e l'applicazione uniforme di pressione. Le immagini dei timbri sono state acquisite tramite scansione a 600 Dpi.
Questa tecnica ha dimostrato un'elevata sensibilità e restituisce l'andamento dei profili dettagliatamente.

Il software utilizzato per poter rielaborare le scansioni delle sezioni dei calchi è *Gimp*.

Gimp è un programma libero, e si basa sugli stessi principi del software ImageJ, che permette di ottimizzare e rielaborare immagini. Questo software deriva dal progetto *Gnu*, nato nel 1983, e il suo nome è l'acronimo di *Gnu Image Manipulation Program*[26]. E' adatto ad una grande varietà di differenti elaborazioni di immagini, incluso il fotoritocco e la conversione in differenti formati.

Gimp è stato applicato per la rielaborazione dei profili dei calchi sfruttando le funzioni: *ritaglia*, *scala immagine*, *rotazione arbitraria*, *luminosità e contrasto*, *filtro* per il *rilevamento dei contorni*. Poi si è proceduto creando un *livello nuovo* d'immagine per ottenere solo l'andamento del calco e della superficie delineato dal timbro, successivamente sono stati applicati gli *strumenti di selezione fuzzy*, *riempimento di colore*.

Figura 25 Profilo di un calco

Dalla scansione a 600 Dpi, applicando lo *strumento ritaglia*, è stato possibile selezionare un'area rettangolare che ha rimosso tutto ciò che non risultava essere compreso all'interno dei bordi. In questo modo sono state ricavate, come appare in *Fig. 25*, le sezione di ogni calco e si e proceduto rielaborandole una ad una.

La fase successiva ha previsto l'applicazione della funzione *scala immagine*. Questo comando permette la scalatura in millimetri dell'intera immagine: si è rapportata la grandezza fisica reale dell'immagine in *mm* al *numero di pixel*.

Il rilievo della sezione, essendo stato condotto a mano, non sempre ha reso possibile un orientamento spaziale perfettamente orizzontale, per questo motivo in alcuni casi è stata applicata la funzione *rotazione arbitraria.* Questa funzione permette la rotazione dell'immagine ad un angolo specifico desiderato. Per essere certi di aver ruotato l'immagine correttamente è stato sfruttata anche la funzione *righello*, la quale permette di tracciare delle linee guida temporanee sull'immagine.

Ultimate queste modifiche iniziali, si è proceduto rielaborando l'immagine a fine analitico per ottenere dati inerenti l'andamento della superficie lapidea da cui derivavano i calchi.

[26] La prima versione del programma è stata scritta da Peter Mattis e Spencer Kimball, e successivamente è stata integrata ed espansa da numerosi altri sviluppatori. Attualmente le integrazioni e lo sviluppo del software sono gestite da Sven Neumann, Mitch Natterer e altri programmatori facenti parte del Gimp-Team
http://gimp.linux.it/www/meta/gimp-it.pdf

Figura 26 Profilo immagine 25 con luminostità a -110 e contrasto + 127

La sezione è stata modificata alterando la sua *luminosità e contrasto*. Questa funzione permette di regolare a seconda delle necessità queste due caratteristiche dell'immagine, che nel nostro caso hanno previsto l'impostazione della luminosità a -110 e del contrasto a +127. Questo passaggio è stato necessario per l'applicazione della funzione successiva atta allo studio dei profili: *rilevamento contorni*.

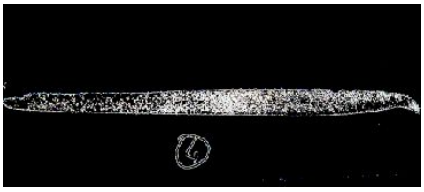


Figura 27 Applicazione della funzione rilevamento contorni alla figura 26

La funzione *rilevamento contorni* è un filtro che serve ad individuare dei confini tra le aree di colore differente e dunque permette di individuare i profili di un oggetto con elevata sensibilità[27].

Questa tipologia di filtro si basa su metodi di calcolo di gradienti e restituisce le linee di bordo[28]. Nella *Fig. 27* vengono rappresentati i principi generali della funzione. La prima linea rappresenta la variazione dell'intensità di colore (*Fig.28.1*): sulla sua sinistra vi è una variazione graduale di colore che non è un margine, mentre sulla sua destra l'andamento della curva risulta maggiormente ripido il che significa che vi è una variazione di colore tra le aree. Calcolando il gradiente, cioè la velocità di variazione del colore del bordo, si ottiene la sua derivata prima, cioè la *Fig. 28.2*. Per innescare la rilevazione del bordo il gradiente deve superare un valore di soglia, il bordo esatto verrà rintracciato in corrispondenza del massimo della curva, che varia a seconda del bordo. In molti casi la linea di soglia risulta essere al di sotto del massimo della curva e il bordo rilevato risulta essere di spessore maggiore.[29] Per sopperire a questa problematica, e per avere un contorno migliore, il filtro *rilevamento contorni* sfrutta la derivata seconda *(Fig.28.3),* in cui il massimo della curva corrisponde allo zero ed è chiaramente identificabile, e i contorni della figura selezionata risulteranno sottili e aventi dimensione di un pixel. Bisogna fare attenzione però che tale rielaborazione dell'immagine sfruttando la derivata seconda, può restituire parecchi valori pari a 0 dovuti a piccole oscillazione di colore i quali possono essere tradotti in falsi bordi. Per questo motivo si applica una

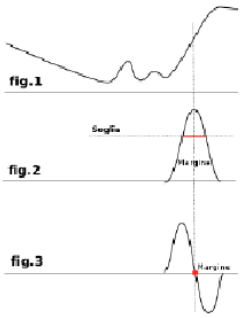


Figura 28 Rappresentazione grafica dei principi della funzione rilevamento contorni

[27] http://verytech.smartworld.it/come-applicare-leffetto-contorni-alle-immagini-con-gimp-128067.html
[28] http://www.html.it/pag/53832/rilevamento-contorni/
[29] Manuale per l'utente, *GNO Image Manipulation Program*, 8 Agosto 2014

leggera sfumatura dell'immagine prima di applicare questa tipologia di filtro, così facendo si attenuano le piccole oscillazioni di colore e di conseguenza si previene il rilevamento di contorni inesistenti o indesiderati.

I filtri per il *rilevamento contorni* presenti in Gimp sono plurimi, *Differenza di Gaussiane, LaPlance, Sobel*. In questo elaborato si è utilizzata la funzione *Sobel* la quale si basa sui principi precedentemente descritti, comuni anche per le altre due funzioni, ma inoltre essa permetteva di ottenere una qualità di rilevamento margini speculare a quello dell'immagine originale, senza doverle apportare particolari modifiche. Il rilevamento dei limiti dell'immagine è stata svolto selezionando la funzione *macchia*, che prevede, da parte del rilevatore, una generazione di pixel temporanei adiacenti a quelli rilevati per i calcoli di rilevamento dei contorni dell'immagine[30]. La funzione *macchia* è quella che in letteratura viene maggiormente consigliata[31].

Il passaggio successivo ha previsto la creazione di un *nuovo livello* di lavoro. Per poter analizzare i contorni della figura rilevati applicando il *rilevamento contorni* (*livello contorni*), è stato creato un livello adibito a tale scopo: *livello calco*. Sul *livello contorni* è stato applicando lo strumento *selezione fuzzy.* Tale strumento è stato progettato per selezionare aree del livello attivo in base alla somiglianze dei colori. La funzione *fuzzy* (nota anche come *bacchetta magica*) permette di selezionare aree interne ad un contorno o il contorno stesso (applicando la funzione di *selezione inversa)* la cui sensibilità (*soglia*) viene impostata dall'utente. Per quanto concerne il nostro studio, la bacchetta magica non ha previsto l'impostazione di una sensibilità costante, ma si e preferito verificare di volta in volta la capacità descrittiva dello strumento così da ottenere la massima descrizione del contorno; ciò è stato possibile perchè l'immagine indagata presentava unicamente due colori (1bit), caratteristica che permette un'elevata prestazione e sensibilità di tale funzione.

Individuata la selezione del calco, è stato attivato l'apposito livello su cui si è proceduta l'elaborazione dell'immagine.

Figura 29 Profilo della pietra (rosso) profilo del calco (nero)

La selezione raffigurante il profilo del calco è stata colorata di nero, mentre la selezione speculare rappresentante l'andamento della Pietra d'Istria è stata colorata di rosso sfruttando lo strumento *riempimento di colore* , il quale riempie una

[30] https://docs.gimp.org/it/plug-in-edge.html
[31] http://www.istitutomajorana.it/forum/Thread-RISOLTO-GIMP-estrazione-profilo-alare-da-foto

selezione attiva con il colore selezionato.

Le immagini cosi rielaborate hanno permesso di visionare rapidamente l'andamento della superficie lapidea indagata in un determinato punto della superficie.

Stima della lunghezza del profilo sfruttando il software Imagej

L'immagine ottenuta tramite rielaborazione con il software *Gimp* è stata successivamente analizzata con il software *Imagej*. La prima fase ha previsto nuovamente il settaggio della scala, sfruttando per rapportare la dimensione in pixel agli effettivi millimetri reali.

Successivamente per poter ottenere informazioni n merito al *perimetro del profilo totale* dell'andamento superficiale rinvenuto tramite sezionamento, l'immagine è stata, in primo luogo, convertita in 8 bit (funzione presente nel menù nella voce *Image* selezionando l'item *Type*) così da generare un'immagine in scala di grigio.

A seguito di tale operazione si è proceduto applicando l'item *analyze particles* (presente nella voce *Analyze* del menù), funzione che permette di misurare le immagini, fornendo numerose e differenti informazioni quali area, angolo, deviazione standard, perimetro ecc.

In questa fase di analisi, volendo ottenere informazioni in merito alla lunghezza del profilo descrittivo della superficie della pietra lapidea indagata, che successivamente servirà per stimare la *rugosità* (*Cap. 3.4*) , si è sfrutta l'informazione inerente al *perimetro*. Essendo a conoscenza della lunghezza del calco in mm (*a*) , sfruttando l'item *Measure,* sono state ricavate le lunghezze dei due lati laterali (*b* e *c*). A seguito della somma tra *a*+*b*+*c* , tramite calcolo sottrattivo dal perimetro, si è ottenuta la lunghezza del profilo (*Lo*) per tutte le immagini:

Figura 30 Conversione in 8 Bit di fig. 29

Figura 31 Conversione a 1 Bit della fig. 30

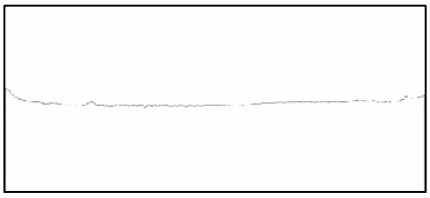


Figura32 Analyze particle della Fig. 31

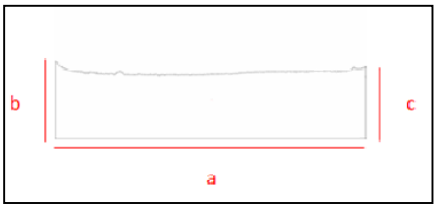


Figura 33 Individuazione dei lati misurabili applicando l'item Measure

Calco	N° sezione	Collocazione	Tipologia superficie	Perimetro (mm)	b (mm)	a (mm)	c (mm)	a+b+c (mm)	Lo (mm)
CF_3	4	Canale	Dilavato	196,989	18,37	74	17,19	109,56	87,429

Tabella 2 Data rappresentativa dei dati ottenuti tramite Analyze Particle

Ottenimento delle coordinate x e y del profilo con il software Web Plot Digitizer

A seguito della stima di *Lo,* si è proceduto alla digitalizzazione dell'immagine ottenuta con il software *Web Plot Digitizer*.

In *Gimp*, in questa fase sono stati inseriti nell'immagine dei riferimenti che facilitassero l'inserimento costante e parallelo degli assi cartesiani *x* e *y,* richiesti da software *Web Plot Digitizer* per ottenere le coordinate spaziali del profilo, mediante la *selezione rettangolare* presente nel *pannello strumenti* del software. Si è proceduto generando una sezione rettangolare centrale all'immagine, impostando un'altezza fissa costante per tutti i profili pari a 12,50 mm e avente lunghezza pari a quella del calco su cui si stava operando (individuata nella *Fig.33* con la lettera *a*). Terminata questa fase, si è proceduto sfruttando il free software *Web Plot Digitizer,* anch'esso, come Gimp, ideato da *GNU General Public License* e lanciato in rete nel 2011.

Web Plot Digitizer è stato creato per estrarre dati numerici con elevata precisione da trame, immagini e mappe[32], esso è un'alternativa ai molti software esistenti, i quali solitamente funzionano solo su alcuni sistemi operativi, sono a pagamento, presentano numerose difficoltà e limiti di utilizzo ed inoltre permettono molto spesso solo di rielaborare immagine con trame 2D x e y[33]. Pur essendo un programma open source, esso risulta molto sfruttato e citato in numerosi articoli scientifici[34] per l'elevata sensibilità, facilità d'utilizzo e per le numerose prestazioni analitiche che permette di svolgere.

Per ottenere, dunque, le coordinate x e y del profilo della superficie indagata tramite i calchi, l'immagine rielaborata precedentemente in Gimp è stata caricata online sfruttando la funzione *Load Image,* la quale permette il passaggio del file (in formato JPG, JPEG, PNG, BMP e GIF) , dal disco rigido del computer all'applicazione.

Al termine del caricamento è necessario specificare la tipologia di grafico ed assi. Questo passaggio è necessario al software per mappare correttamente i pixel dell'immagine al corrispondente valore dei dati costituenti l'immagine stessa. Essendo il profilo basato su coordinate cartesiane a due dimensioni, la tipologia selezionata e quella *2D (x-y) Plot.* Il passaggio successivo prevede la *calibrazione degli assi*, la quale è resa possibile solo dopo l'apertura sistematica da parte del programma di una finestra pop-up la quale al suo interno presenta le istruzioni da seguire, ovvero posizionare 4 layer ruster circolari: 2 sull'ascissa e 2 sull'ordinata. Non essendo presenti dei righelli che permettessero si

[32] http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/

[33] Esso è stato sviluppato utilizzando il codice di programmazione HTML 5, il quale consente di utilizzare l'applicazione all'interno del browser web, e dunque non viene richiesta alcuna installazione sul disco rigido del computer dell'utente e permette di caricare l'immagine da analizzare direttamente online

[34] http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/userManual.pdf

posizionare in modo accurato e parallelo questi layer ruster, l'immagine è stata precedentemente rielaborata in Gimp, come precedentemente descritto.

Dopo aver posizionato *X1-X2* e *Y1-Y2*, apparirà un'ulteriore finestre pop-up in cui verrà chiesto di attribuire dei valori ai punti individuati nell'immagine, nel caso dei profili:

Ultimata questa fase, il programma poi chiederà di individuare un minimo di 4 punti sul profilo da mappare, così da individuare la curva. Successivamente si seleziona la modalità di *scansione*: *automatica* o *manuale*. In *modalità automatica*, utilizzata per i profili studiati, è possibile impostare ed eseguire un algoritmo di estrazione che può differenziare facilmente i punti dei dati e lo sfondo dell'immagine[35], A processo ultimato, il programma restituisce le coordinate x e y del profilo in file CSV basandosi sui punti degli assi impostati, cosi da poterli poi rielaborare con altri programmi come Excell o Origin.

Figura 34 Inserimento sezione per individuazione assi cartesiani

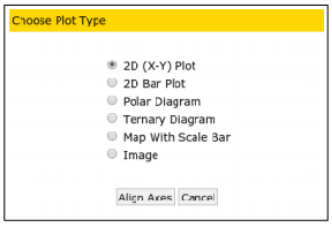


Figura 35 Selezione della tipologia di assi

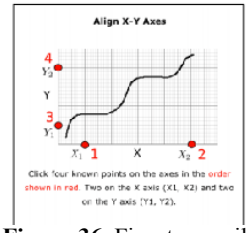


Figura 36 Finestra per il posizionamento dei layers ruster

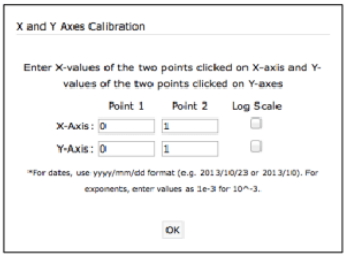


Figura 37 Pop up di calibrazione assi

Tabella 3 parametri di calibrazione adottati

$x_1 = 0$	x_2= lunghezza in mm del calco
$y_1 = 0$	y_2= 12,5 mm

3.2.6.) Rugosità superficiale e rielaborazione dei dati ottenuti dai profili dei calchi

Le coordinate ottenute tramite l'applicazione del programma *Web Plot Digitizer* e i dati ottenuti tramite *ImageJ*, sono stati rielaborati sfruttando il programma *Origin* e applicando alcuni principi della profilometria con il fine di ottenere informazioni in merito allo stato di conservazione della superficie lapidea indagata.

[35] Per questo motivo nella fase di rielaborazione dell'immagine in Gimp il colore adottato per le selezioni estranee all'area d'analisi è il blu.

La rugosità

Molto spesso le superfici degli oggetti reali risultano lisce, ma in realtà presentano irregolarità microgeometriche, le quali possono essere *aperiodiche* oppure *periodiche* cioè possono ripetersi con regolarità.

Nel primo caso, quando vengono riscontrate su un materiale lapideo esposto ad ambiente esterno, possono essere ricondotte a degrado sia di origine antropica che naturale oppure essere irregolarità legate alla disomogeneità del materiale stesso; nel secondo caso invece, se è possibile riscontrare un orientamento e/o passo, le irregolarità possono essere ricondotte con buona probabilità ai processi di lavorazione del materiale con l'ausilio di utensili[36].

La tipologia di finitura superficiale di un manufatto influisce molto sulla sua conservazione[37]. Le superfici lapidee possono risultare maggiormente sensibili all'usura, presentare una minore resistenza meccanica e un aspetto estetico completamente differente rispetto a quello originale.

Tramite analisi macroscopica, condotta sfruttando la sensibilità visiva le superfici possono apparire più regolari rispetto a come sono in realtà. Sfruttando il tatto, la percezione cambia, ma per ottenere informazioni in merito alla criticità delle superfici lapidee aventi valore storico-artistico, è necessario svolgere delle analisi oggettive e scientifiche, misurando e analizzando dei parametri specifici, come ad esempio la *rugosità*.

La *rugosità* o talvolta *scabrosità* è l'indice che esprime l'insieme delle irregolarità superficiali, le quali possono ripetersi con un passo relativamente piccolo e possono essere ricondotte a differenti processi tra cui il degrado e la lavorazione del materiale[38].

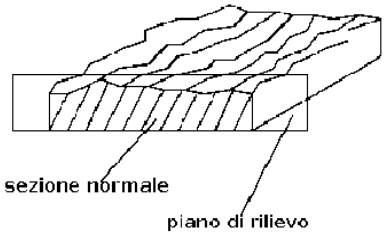


Figura 39 Schema rappresentativo della sezione normale e del piano di rilievo

Per stimare le irregolarità superficiali si procede immaginando di sezionare la superficie da indagare con un piano, definito *piano di rilievo*. Questo piano deve risultare ortogonale alla *superficie nominale* e la deve sezionare, generando così una *sezione normale*.

La *superficie nominale*, detta anche *ideale* o *geometrica*, è la superficie teorica delimitata dalle dimensioni dell'oggetto.

---

[36] E. Chirone, S. Tornincasa, *Disegno tecnico industriale*, Ed. Il Capitello
[37] G. G. Amoroso, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea Editrice
[38] http://www.treccani.it/enciclopedia/rugosita/

La generazione della *sezione normale*, porta all'individuazione del *profilo reale* cioè la linea risultante dall'intersezione dell'oggetto, quindi della *superficie reale*, con il *piano di rilievo*. Il *profilo reale* è caratterizzato da un andamento più o meno regolare con una successione di creste e valli di piccola e/o grande ampiezza.
Nel caso in cui lo stesso processo fosse applicato invece ad una superficie liscia, priva di irregolarità, il profilo che si genera viene definito come *profilo geometrico*.

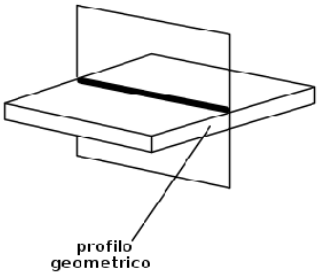


Figura 41 Schema di individuazione del profilo geometrico

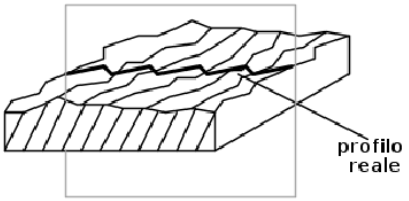


Figura 40 Schema dell'individuazione del profilo reale

Solitamente la stima della *rugosità* viene stimata sfruttando uno specifico strumento, il *rugosimentro*[39] *o profilometro laser*.
In questa tesi i dati sono stati estrapolati dalle immagini rielaborate con *Gimp* inerenti alle sezioni dei calchi applicando i medesimi algoritmi sfruttati dal *rugosi metro*, *permettendo un'analisi accurata ma veloce e a basso costo dei profili senza campionamento invasivo delle superfici o trasporto di strumentazione delicata e ingombrante in situ.*
Per poter definire la rugosità di un oggetto dunque serve conoscere il *profilo reale*, nel caso di questo studio ottenuto tramite la procedura descritta nel *Cap.3.3.3,* ed è indispensabile conoscere la sua *lunghezza di base (L)*, la quale non deve risultare influenzabile dalle irregolarità di tipo macrogeometrico e deve presentare l'estensione di qualche millimetro. In questo studio, si è deciso di assegnare come *L* la lunghezza del calco rilevata durante la fase di timbratura la quale rispetta le caratteristiche di indipendenza e di lunghezza.

---

[39] Il *rugosimetro*, detto anche *profilografo* o *profilometro*, è un apparecchio volto a misurare la rugosità delle superfici lavorate. L'esplorazione della superficie in questione avviene grazie ad una piccola asta metallica, alla cui estremità è montato un microtastatore di diamante, generalmente di forma conica, il cui vertice è raccordato con raggio uguale a 5 μm. La puntina esploratrice è guidata da un elemento in carburo di tungsteno, detto pattino, il quale poggia e scorre sulla superficie in questione in modo tale da fornire un riferimento efficiente per la misurazione della rugosità.
I movimento della punta del tastatore provocano una variazione di induttanza in un apposito circuito e quindi della relativa corrente: questa variazione, che viene amplificata e valutata in modo opportuno, viene trasmessa ad un registratore grafico o ad un display digitale che fornisce il valore della rugosità media Ra della superficie.
I modelli più perfezionati sono collegati ad un personal computer in modo tale che sia possibile visualizzare la ricostruzione assonometrica della superficie rilevata.

Conoscendo le coordinate del profilo, ottenute tramite il software *Web Plot Digitizer*, e il valor della lunghezza del profilo caratterizzato dalla fenomeno di rugosità (*Lo* ricavato dai dati ottenuti dall' *analyze particles*) è possibile definire un retta parallela al *profilo teorico* la quale deve essere posizionata in modo tale che la somma dei picchi massimi e minimi (*valli*) caratteristici del andamento del profilo, risulti la medesima. In questo modo viene definita la *linea centrale* detta *anche di compenso o media*. Per poterla definire in modo preciso si individua la retta che presenta il minimo valore della somma dei quadrati delle distanze da essa : *linea di tendenza (x)*, calcolata nel nostro caso con il programma *Origin 9.0.*

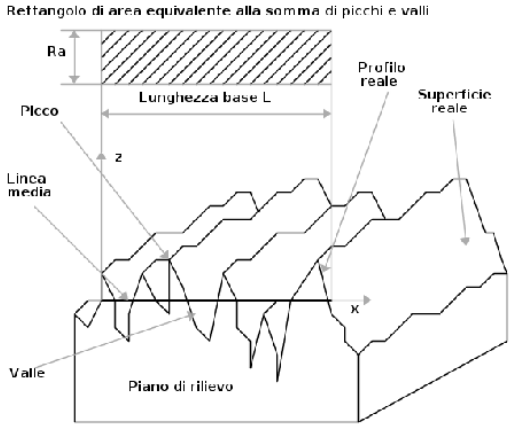


Figura 42 schema rappresentativo dei parametri Ra, L, x

Una volta individuata tale linea, si è proceduto impostandola come asse delle ascisse di un riferimento ortogonale, come rintracciato in bibliografia[40], in cui i punti del profilo divengono ordinate, e dunque la condizione precedente può essere espressa come somma algebrica delle ordinate del tratto di misura aventi valore nullo.

La fase successiva ha previsto la stima del parametro *Ra, Roughness Arithmetical average*, cioè la rugosità media. *Ra* dunque viene espresso considerando le aree comprese tra il profilo reale e la linea media equivalenti a rettangoli di base *dx* aventi altezza espressa in μm[41] delle ordinate $y_1, y_2, y_3, \ldots y_n$ rispetto alla linea media.

Dunque ogni rettangolo presenterà un area pari a *ydx*. Se si considerano, quindi, i valori assoluti delle deviazioni di *y* in relazionealla somma assoluta delle aree individuate dai rettangoli , *Ra* può essere espressa dall'integrale:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx$$

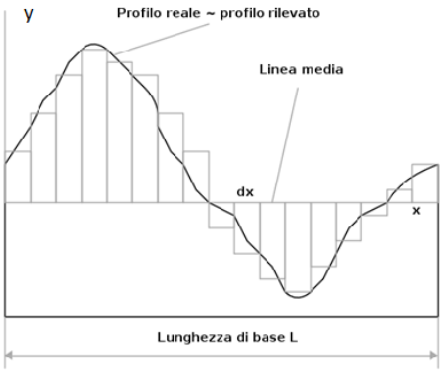


Figura 43 Schema rappresentativo di Ra

Questa integrale rappresenta l'area di un rettangolo avente base *L* e altezza pari ad *Ra (Fig. 43).* Solitamente il parametro *Ra* viene definito sfruttando il rugosimetro, il quale

[40] M. W. Sayers, S. M. Karamihas, *The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles*, The regent of the University of Michigan, 1998

[41] Talvolta, i dati di origine americana esprimo tale valore in micro pollici (1 μinch = 0,025 μm)

imposta una lunghezza generalmente maggiore rispetto a quella di base, tale lunghezza viene definita *lunghezza d'esplorazione.* La *rugosità media* viene espressa tramite la stima del valore medio delle misure su diverse lunghezze di base *L*, prese consecutivamente lungo il profilo. Nei casi di studio presenti in questo elaborato, la lunghezza *L* dei profili non è costante e per questo motivo, si è deciso di stimare *Ra* sfruttando le *L* reali e disponibili.

Ogni calco è stato sezionato per un numero di volte che oscilla tra i 5 e 8 profili, per questo motivo si è ritenuto fosse utile stimare un valore di *Ra medio* con eventuale *deviazione standard*, oltre ad evidenziare il valore di *Ra maggiore* calcolato come definito in bibliografia[42].

Essendo *Ra* la stima della rugosità media sfruttando le aree assolute sottese al profilo in rapporto alla linea media, si è deciso di indagare anche la rugosità (*Lr*) sfruttando il rapporto tra la lunghezza di base del calco (*L*) e la lunghezza del profilo (*Lo*):

$$Lr = Lo / L$$

Come avvenuto per *Ra*, si e deciso di stimare il valore medio di *Lr* delle sezioni di ogni calco, considerando anche la deviazione standard.

Figura 44 Schema rappresentativo di Rmax

Terminata questa fase di *analisi della rugosità*, si è deciso di stimare ulteriori parametri che potessero fornire informazioni in merito allo stato conservativo della superficie lapidea degli edifici indagati.

Si è proceduto stimando il valore dei *picchi massimi* e della *valli* minime presenti nel profilo per stimare successivamente il loro scarto *Rmax.* L'individuazione del valore di *Rmax* permette di stimare la distanza tra due linee parallele rispetto alla linea media tangente al picco massimo (Y_{pmax}) e al picco minimo (Y_{vmin}), quindi si può così stimare l'irregolarità massima presente in un profilo:

$$Rmax = (Y_{pmax}) - (Y_{vmin}) \text{ oppure } Rmax = |Y_{pmax}| + |Y_{vmin}|$$

Rmax è stato stimato sfruttando le funzioni del programma di rielaborazione dati *Origin 9.0.*Un ulteriore parametro che è stato considerato è R^2 della linea di tendenza. Questo parametro permette di ottenere informazioni in merito alla dispersione dei punti del profilo la rispetto alla linea di tendenza.

[42] M. W. Sayers, S. M. Karamihas, *The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles*, The regent of the University of Michigan, 1998

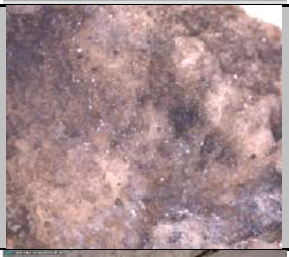
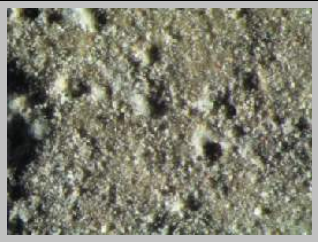
[43]immagini provenienti da hpp//:www.electroyou.it

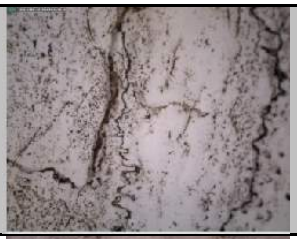
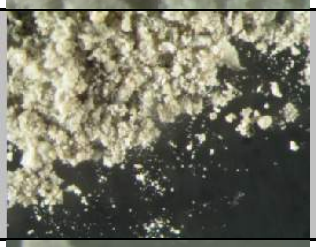
3.3) Risultati e discussione circa lo stato di conservazione delle superfici in pietra d'Istria dei casi di studio

3.3.1) Osservazione delle superfici con microscopia digitale e ottica

Le superfici in Pietra d'Istria degli edifici casi di studio, soggette al fenomeno di dilavamento (riportate in *Tab.3* con la lettera D) e soggette al fenomeno di deposizione (ND) , volte verso il canale e verso il giardino o corte interna, sono state indagate preliminarmente sfruttando il microscopio Dino-Lite. In prossimità di tali aree è stato successivamente svolto il campionamento, ed il materiale ottenuto è stato indagato attraverso del osservazione con microscopio ottico.

Edificio	Tipologia	Collocazione	Canale		
			Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	Campione
Cà Foscari	D	Aula Baratto 6° colonna parapetto			CF-3
	ND	Aula Baratto Parapetto orizzontale centrale			CF-2
	Cristalli	Aula Baratto Parapetto orizzontale centrale			CF-4
Cà Dolfin	D	Aula Magna 2° stipite esterno dx			DOL-6-bis
	ND	Aula Magna stipite centrale interno dx			DOL-1

Edificio	Tipologia	Collocazione	Canale		
			Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	Campione
Cà Bottacin	D	Balcone 2° colonna sx			BOT-8
	ND	Balcone Sottosquadro parapetto 2° colonna			BOT-9
Cà Bembo	D	Balcone Stipite sx destra esterno			CABE-1
	ND	Balcone Stipite sx destra interno			CABE-2
	Cristalli	Balcone Parapetto centrale superiore			CABE-3

Edificio	Tipologia	Collocazione	Giardino o corte interna		
			Dino-Lite (54x-124x)	Mic.Ottico (3.5x- 11.5x)	Campione
Cà Foscari	D	1° piano Balcone colonna sx			CF-9
	ND	1° piano Balcone Colonna dx			CF-8
Cà Dolfin	D	Spigolo balcone Verso parete			DOL-8
	ND	Spigolo balcone Verso parete			DOL-7
Cà Bottacin	D	1° piano Finestra destra			BOT-2
	ND	1° piano Finestra destra			BOT-11

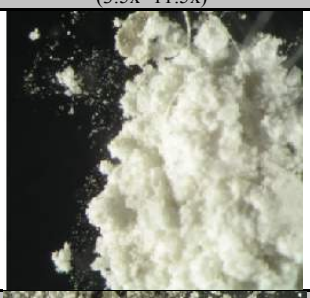
Edificio	Tipologia	Collocazione	Giardino o corte interna		
			Dino-Lite (54x-124x)	Mic.Ottico (3.5x- 11.5x)	Campione
Cà Bembo	D	1° piano Balcone colonna sx			CABE-4
	ND	1°piano balcone colonna dx			CABE-5

Tabella 3 Analisi delle superfici degli edifici caso di studio con Dino-Lite e MO

Dalle immagini acquisite in situ tramite Dino-Lite (ad ingrandimenti pari a 54x e 124x) le superfici rivolte verso il canale e giardino o corte soggette al_dilavamento presentano una *superficie levigata* (*CABE-4, BOT-8*), talvolta *spugnosa* (*BOT-8, CF-9, DOL-8*) riconducibili alla processo erosivo del materiale, (si presume vi siano particelle di $CaCO_3$ da verificare tramite analisi FT-IR in ATR) indotta dal processo erosivo e di trasporto dell'acqua e del vento. Il processo erosivo inoltre ha *accentuato i piani di sedimentazione* caratteristici della Pietra d'Istria, come è possibile osservare nelle immagini riferite a *CABE-1 CABE-4 DOL-6*. Il *prelievo dei campioni* dalla superficie è risultato piuttosto *semplice* in quanto il materiale non risultava particolarmente pietra coeso ed adeso .

I campioni raccolti dalle aree dilavate ed indagati con l'ausilio del microscopio ottico in laboratorio (ad ingrandimenti pari a 3,5x e 11,5x) si presentano *pulverulenti*, a *grana estremamente fina* (*CABE-3, CF-9, DOL-8, BOT-2*) e tendono a *compattarsi* (*BOT-2, CF-9, CABE-1*). Inoltre, all'interno dei campioni si rintracciano *particelle riflettenti* (*BOT-2, CF-9, CABE-1*) riconducibili probabilmente alla presenza di microcristalli di calcite (da confermare tramite analisi FT-IR in ATR) o Sali solubili depositati dall'aerosol marino. La colorazione di tutti i campioni è *biancastra*, talvolta leggermente tendente all'*avorio*.

Per quanto concerne le aree soggette al fenomeno di deposizione del particolato atmosferico, la *morfologia della superficie* si *discosta* molto *a seconda dell'esposizione* della pietra *verso il canale o giardino-corte*. Le superfici rivolte verso il canale presentano un *deposito superficiale ben adeso alla superficie* (*BOT-9, DOL-1*), infatti durante la fase di *campionamento* si è riscontrata una *leggera difficoltà* di prelievo. I campioni presentano una *grana disomogenea* (*DOL-1, CABE-2*) a tratti *fina* (*CF-2*), e una

colorazione grigiastra che può essere ricondotta alla presenza di cristalli di gesso come prodotto di degrado della calcite, i quali possono facilitare l'inclusione di particolato all'interno della crosta (ipotesi da confermare tramite analisi FT-IR in ATR e XRF). Per quanto concerne le superfici lapidee orientate vero il giardino-corte esse presentano un deposito avente una *morfologia meno omogenea e compatt*a rispetto ai casi descritti precedentemente (*CF-8, BOT-11, CABE-5, DOL-7*), anche durante la fase di *prelievo* si è riscontrata una *minor difficoltà*. I campioni analizzati con il microscopio ottico presentano una *grana disomogenea* (*DOL-7, BOT-11, CABE-5*), solo nel caso di *CF-8* risulta estremamente *fina* (si ipotizza che ciò sia riconducibile ai recenti restauri svolti sull'edificio, per cui la consistenza del deposito e la sua quantità risulta minore). La *colorazione* dei campioni risulta anche in questo caso *grigiastra*, e si ipotizza anche in questi casi la presenza del gesso e particolato atmosferico.

Durante l'analisi superficiale condotta con Dino-Lite sulle superfici in Pietra d'Istria esposta verso il canale è stata riscontrata *la presenza di cristalli all'interno dei piani di sedimentazione* del materiale. I cristalli sono stati rintracciati sia in aree soggette al dilavamento (*CABE-3*) che in aree soggette al fenomeno di deposizione (*CF-4*); si ipotizza essere *composti da calcite* (da confermare tramite analisi FT-IR in ATR e XRF).

3.3.2) Analisi dei composti e dei depositi superficiali presenti sui supporti lapidei degli edifici caso di studio: FT-IR in ATR e XRF

Nelle fasi di osservazione delle superfici e dei campioni, sono state avanzate delle ipotesi da validare tramite analisi analitiche specifiche: FT-IR in ATR e XRF.

Durante la fase di ricerca bibliografica, sono stati individuati i possibili gruppi funzionali presenti all'interno dei depositi e composti frutto dei processi degradativi della Pietra d'Istria a Venezia [1],riscontrabili attraverso indagini FT-IR in ATRe riportati in *Tab.4*:

Lunghezze d'onda (cm^{-1})	**Gruppi Funzionali**			
	OH^-	**CO_3^{2-}**	**SO_4^{2-}**	**$C_2O_4^{2-}$**
Stretch	3800 3200	≈1400	1620 1120	1650
Bend	1700-1600	≈870 ≈700	670 - 600	1000 1300 780

Tabella 4 Lunghezza d'onda caratteristiche dei gruppi funzionali presenti nei campioni

[1] M. Sgobbi, E.Zendri, F.C.Izzo, G.Biscontin *La prevenzione del degrado a Venezia nel XIX-XX secolo: studio delle superfici di Ca' Rezzonico*; Scienza e Beni culturali XXVI, 2010

I campioni analizzati sono i medesimi riportati nelle tabelle del *Cap.3.4.1.*, essi sono stati poi indagati a seconda della tipologia e di esposizione.

- Campioni provenienti da superfici rivolte verso il canale e giardino-corte soggette al dilavamento degli edifici caso di studio

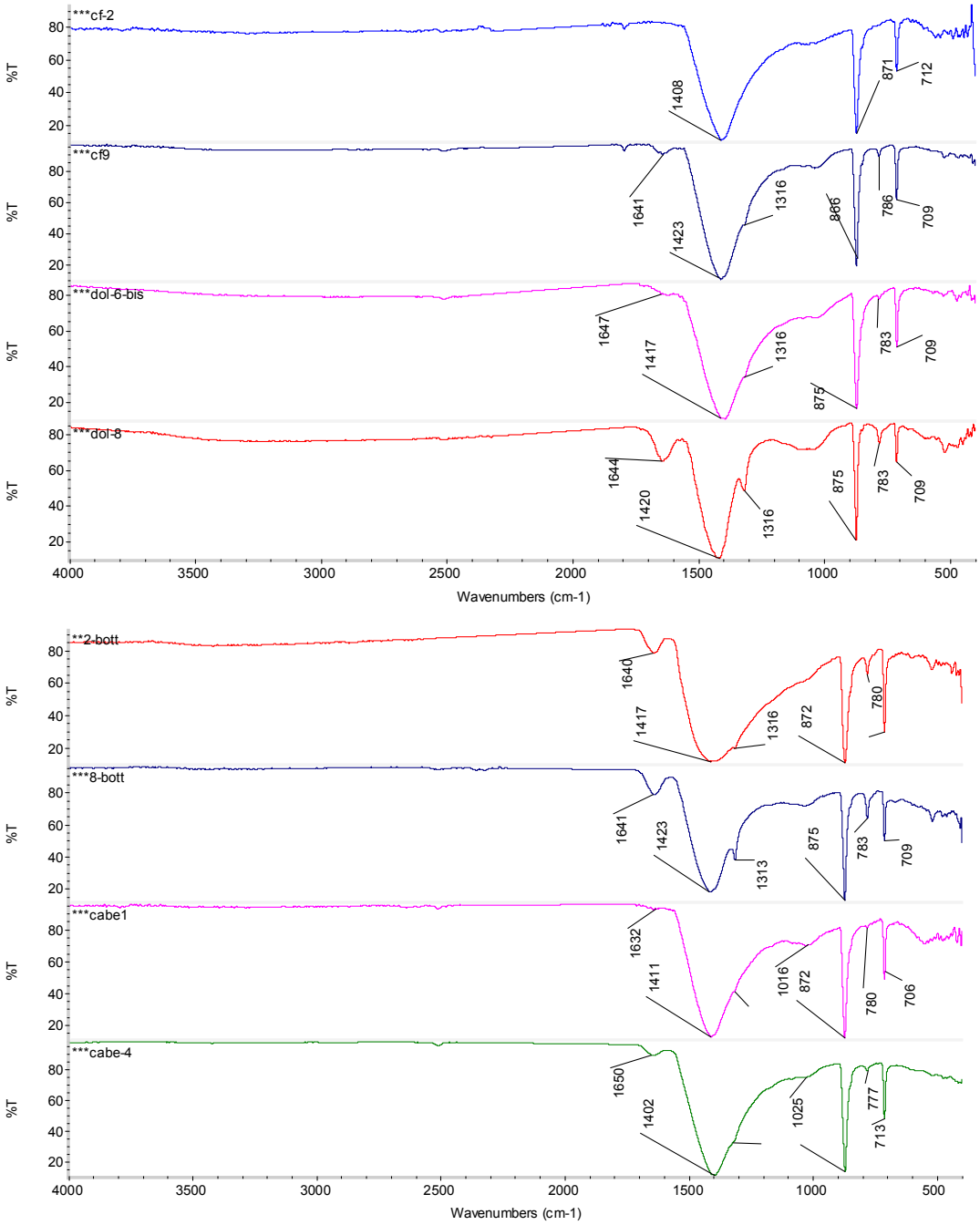


Figura 45 Campioni di superfici soggette al dilavamento**: I)** Canale **II)** Giardino-corte

Gli spettri FT-IR dei campioni provenienti da superfici esposte al fenomeno di dilavamento, poste verso il canale che verso il giardino-corte interna, presentano il medesimo andamento, e dunque composizione. Infatti in tutti campioni analizzati (*CF-2 CF-9, DOL-6-BIS DOL-8, BOT-2 BOT-8, CABE-1 CABE-4*) presentano tutti i caratteristici assorbimenti del composto inorganico $CaCO_3$ riconducibile alla matrice carbonatica di cui e composta la Pietra d'Istria. Si rintracciano dei forti assorbimenti a numeri d'onda di ≈1400 cm^{-1} riconducibili allo stretching e a ≈870 cm^{-1} e ≈700 cm^{-1} al bending del gruppo funzionale CO_3^{2-}.

Inoltre in tutti i campioni, fuorchè in *CF-2*, sono stati rintracciati picchi minori che potrebbero essere ricondotti alla presenza di CaC_2O_4, in quanto si rilevano picchi a numero d'onda di ≈1650 cm^{-1} e ≈1330 cm^{-1} riconducibili allo stretching e a ≈780 cm^{-1} al bending del gruppo funzionale $C_2O_4^{2-}$; a ≈1324 e ≈780 cm^{-1} si registrano picchi riconducibili alla presenza di wewhellite, che potrebbero essere legati allo stiramento del legame C = O. Si sospetta che l'assenza degli ossalati all'interno del campione *CF-2* sia riconducibile al restauro condotto nel 2005 il quale ha previsto un intervento di pulitura molto profondo della superficie, ed inoltre essendo fortemente esposta al dilavamento e vento (essendo la superficie rivolta verso il canale) si sospetta che i Sali possano essere stati rimossi per effetto erosivo.

Durante l'analisi ottica dei campioni, ora analizzati con FT-IR in ATR, era stata avanzata l'ipotesi della presenza di cristalli di calcite o Sali all'interno dei campioni. Con la tecnica applicata non si può escludere con certezza l'assenza di Sali solubili di origine marina non visibili in FT-IR, I Sali inorganici semplici (*ad esempio*: NaCl o KBr) risultano essere composti da un catione (Na^+ , K^+) e un anione (Cl^-, Br^-) e vengono classificati come *composti anionici semplici*, in quanto privi di un gruppo funzionale. Questi composti non presentano dunque picchi di assorbanza o riflettenza nel medio IR ma in quello lontano[2].

- Campioni provenienti da superfici rivolte verso il canale e giardino-corte soggette alla deposizione del particolato atmosferico degli edifici caso di studio

Gli spettri dei campioni provenienti da aree non soggette al dilavamento ed esposte verso il canale e giardino-corte interna, non presentano evidenti differenze composizionali (*CF-3 CF-8, DOL-1 DOL-7, BOT-9 BOT-11, CABE-2 CABE-5*). Come per le aree soggette a dilavamento si riscontra la presenza di $CaCO_3$ legato alla matrice della pietra: forti

[2] Graziella Rosselli, *La spettroscopia infrarossa in scienze della conservazione*,pdf., 2008

assorbimenti a numeri d'onda di ≈1400 cm^{-1} riconducibili allo stretching e a ≈870 cm^{-1} e ≈700 cm^{-1} al bending del gruppo funzionale CO_3^{2-}.

Inoltre, si rintraccia anche la possibile presenza di CaC_2O_4 all'interno di tutti i campioni: si rilevano picchi a numero d'onda di ≈1650 cm^{-1}e riconducibili allo stretching e a ≈1000 cm^{-1} e 780 cm^{-1} al bending del gruppo funzionale $C_2O_4^{2}$; anche in questi spettri si riscontra la presenza di wewhellite.

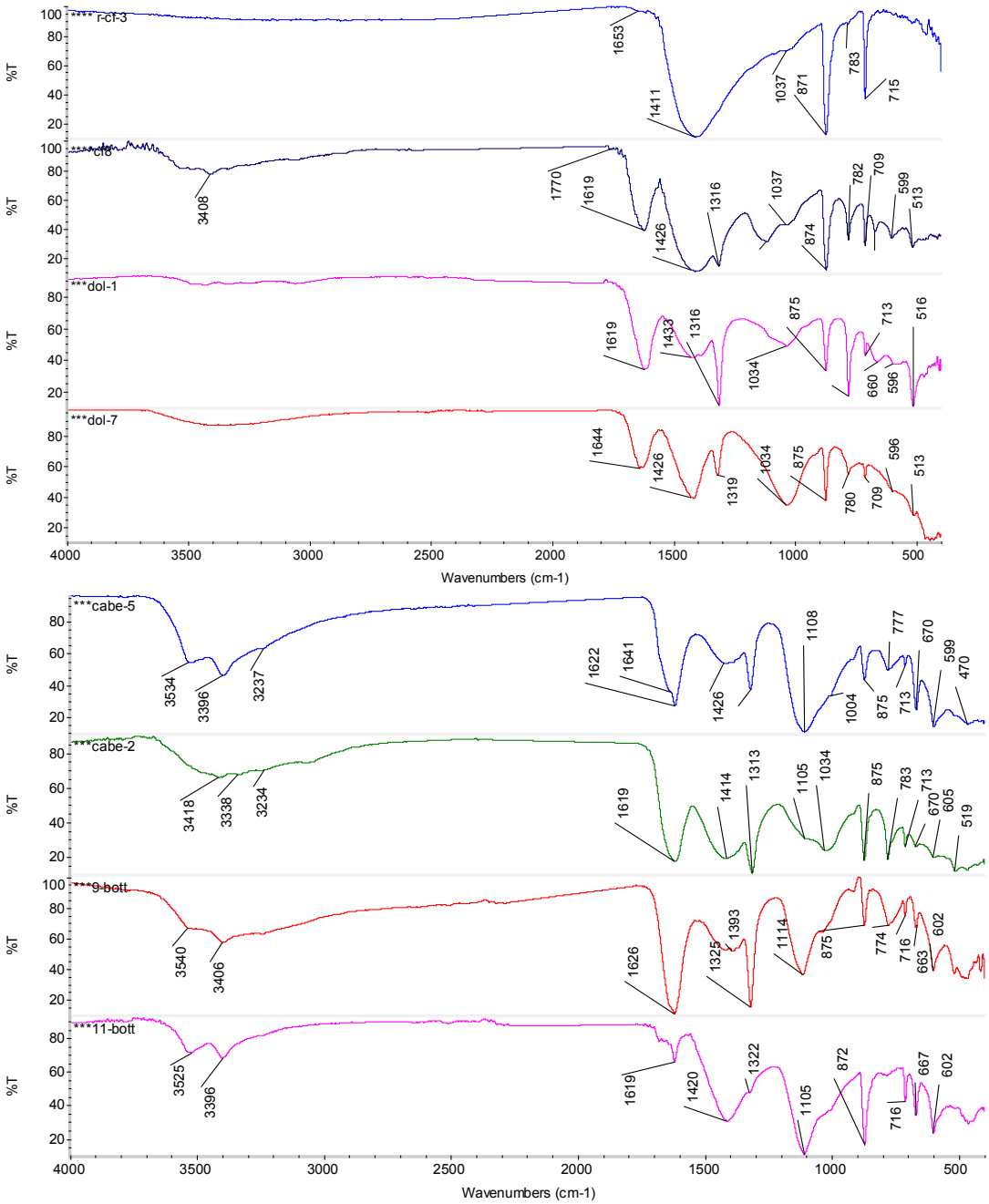


Figura 46 Campioni di superfici non dilavate**: I)** Canale **II)** Giardino-corte

All'interno dei campioni *CF-8, BOT-9, BOT-11, CABE-2, CABE-5* si è rintracciata la presenza di bande di vibrazione tipiche del Solfato di Calcio ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$): a ≈ 3400 cm^{-1} si rileva una banda riconducibile allo stretching e un picco a ≈1750 cm^{-1} riconducibile a bending del gruppo OH^- il quale riconduce alla presenza di acqua; per quanto concerne i picchi del gruppo funzionale SO_4^{2-} si registrano quelli riferibili allo stretching del gruppo a ≈1620 cm^{-1} ≈1100 cm^{-1} e al bending a ≈670 cm^{-1} e ≈600 cm^{-1}. Il gesso deriva dalla trasformazione della calcite, componente principale della matrice carbonatica della Pietra d'Istria, a causa della presenza di ossidi di zolfo. In presenza di ossalati e gesso è difficoltoso riuscire ad attribuire con certezza il picco che cade a circa 1650 cm^{-1} e 1620 cm^{-1} i possono sovrapporsi.

In *CF-3, DOL-1 e DOL-7* invece, sono stati registrati picchi molto simili a quelli rintracciati nei campioni soggetti al dilavamento: si rilevano infatti picchi riconducibili alla presenza di molecole contenenti i gruppi funzionali CO_3^{2-} e $C_2O_4^{2-}$. Per quanto concerne i campioni inerenti a Cà Dolfin (rispetto a *CF-3*) , l'analisi ha permesso di evidenziala delle leggere bande a circa 3400 cm^{-1} e i picchi riconducibili alla presenza del gruppo funzionale SO_4^{2-}, quindi si ipotizza la presenza di gesso.

Edificio	Dilavato				Non dilavato			
	Campioni Canale	Composti	Campioni Giardino-corte	Composti	Campioni Canale	Composti	Campioni Giardino-corte	Composti
Cà Foscari	CF-2	$CaCO_3$ CaC_2O_4	CF-9	$CaCO_3$ CaC_2O_4	CF-3	$CaCO_3$ CaC_2O_4	CF-8	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Cà Dolfin	DOL-6-BIS	$CaCO_3$ CaC_2O_4	DOL-8	$CaCO_3$ CaC_2O_4	DOL-1	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	DOL-7	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Cà Bottacin	BOT-8	$CaCO_3$ CaC_2O_4	BOT-2	$CaCO_3$ CaC_2O_4	BOT-9	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	BOT-11	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Cà Bembo	CABE-1	$CaCO_3$ CaC_2O_4	CABE-4	$CaCO_3$ CaC_2O_4	CABE-2	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	CABE-5	$CaCO_3$ CaC_2O_4 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Analizzando a carattere generale gli spettri di tutti i campioni, non si osservano picchi relativi alla presenza di catene organiche (ad. Es. stretching $-CH_2$ $-CH_3$ 2900-2800 cm^{-1}), forse depositi di tipo organico risultano minoritari o inframezzati alla matrice inorganica dominante. Non sono stati riscontrati assorbimenti di composti organici o inorganici riconducibili a trattamenti superficiali protettivi, informazione molto rilevante nel caso dell'edifici Cà Foscari il quale è stato soggetto ad un restauro in tempo recente,

comprendente anche l'applicazione di protettivi a base di resine acrilico-siliconiche, le quali forse già rimosse o coperte da ulteriore deposito.

I risultati dell'analisi FT-IR in ATR permetto di affermare, dunque, che la composizione dei campioni provenienti da aree dilavate e aree soggette a deposizione risulta essere conforme a quelle rintracciate in bibliografia.

Per ottenere informazioni in merito alla presenza di elementi pesanti nel particolato atmosferico presente nella matrice dei campprelevati da area di deposizione verrà svolta l'analisi XRF.

-Campioni dei cristalli provenienti da aree soggette a dilavamento e deposizione del particolato atmosferico ricolte verso il canale

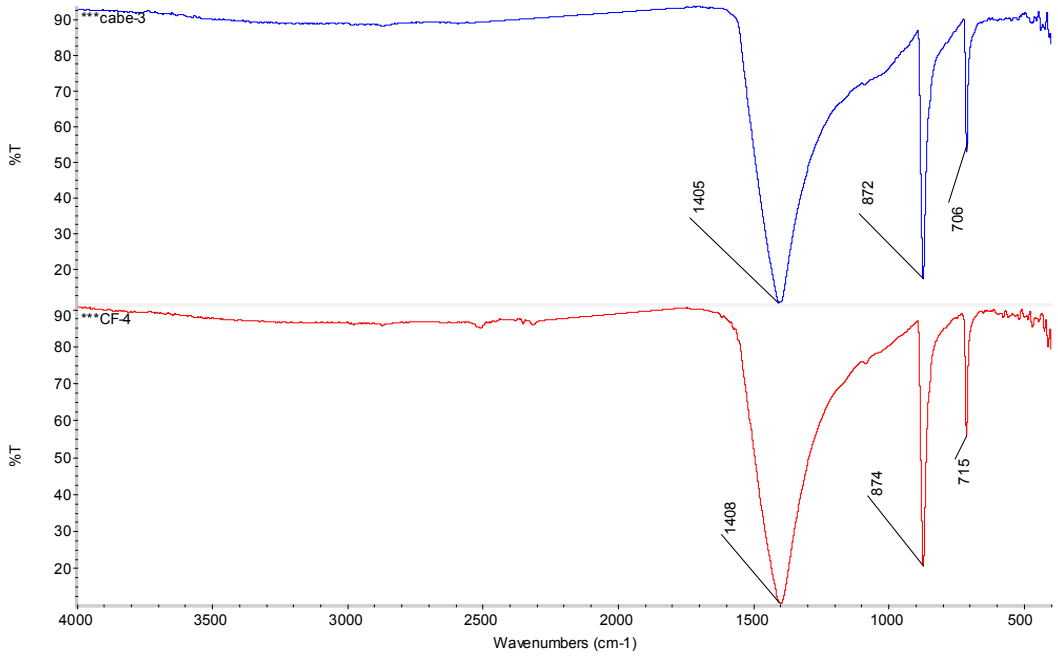


Figura 47 Campioni di cristalli provenienti da aree dilavate CABE-3 e non dilavate CF-4

Gli spettri FT-IR in ATR inerenti ai campioni *CABE-3 e CF-4*, rappresentanti i cristalli rintracciati sulle superfici rivolte verso il canale, presentano i caratteristici assorbimenti del composto inorganico $CaCO_3$: si rintracciano dei forti assorbimenti a numeri d'onda di ≈1400 cm^{-1} riconducibili allo stretching e a ≈870 cm^{-1} e ≈700 cm^{-1} al bending del gruppo funzionale CO_3^{2-}. Viene confermata dunque l'ipotesi avanzata durante l'analisi condotta con MO e Dino-Lite, ed essendo stato riscontrato del particolato atmosferico lungo il perimetro dei cristalli del campione *CF-4*, verrà svolta l'analisi con XRF per conoscerne la composizione elementare. Non si esclude la presenza di deposizioni di Sali non rilevabili tramite spettroscopia FT-IR.

-Analisi XRF dei campioni dei depositi superficiali

Ultimate le analisi FT-IR in ATR si è proceduto svolgendo ulteriori analisi su alcuni campioni non soggetti al fenomeno di dilavamento, così da poter conoscere parzialmente la composizione elementare del particolato atmosferico presente sulle superfici.

Campione	Orientamento	Parametri	Elementi								
			K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	Pb/S
DOL-1	Canale	Energy(keV)	3,31	3,69	-	5,90	6,41	8,64	14,17	4,47	10,55
		Net (cps)	7,94	934,01	-	2,23	142,73	15,88	2,50	1,83	246,03
		σ(err)	0,48	2,82	-	0,47	1,20	0,76	0,72	0,28	1,62
BOT-11	Giardino-Corte	Energy(keV)	-	3,69	4,51	-	6,41	8,64	14,17	-	10,55
		Net (cps)	-	461,63	1,37	-	102,96	14,52	11,22	-	121,93
		σ(err)	-	1,98	0,29	-	1,03	0,72	0,81	-	1,24
CABE-5	Giardino-Corte	Energy(keV)	3,31	3,69	4,51	-	6,41	8,64	14,17	-	10,55
		Net (cps)	3,88	542,88	1,12	-	51,58	4,51	8,12	-	20,38
		σ(err)	0,38	2,15	0,29	-	0,81	0,66	0,78	-	0,82
CF-5	Canale	Energy(keV)	3,31	3,69	-	5,90	6,41	8,64	14,17	-	10,55
		Net (cps)	6,26	1004,06	-	4,72	24,31	5,85	3,31	-	2,12
		σ(err)	0,46	2,92	-	0,46	0,65	0,64	0,70	-	0,70

Tabella 4 Elementi rintracciati all'interno dei campioni non soggetti a dilavamento e provenienti da superfici esposte verso il canale o giardino-corte degli edifici caso di studio

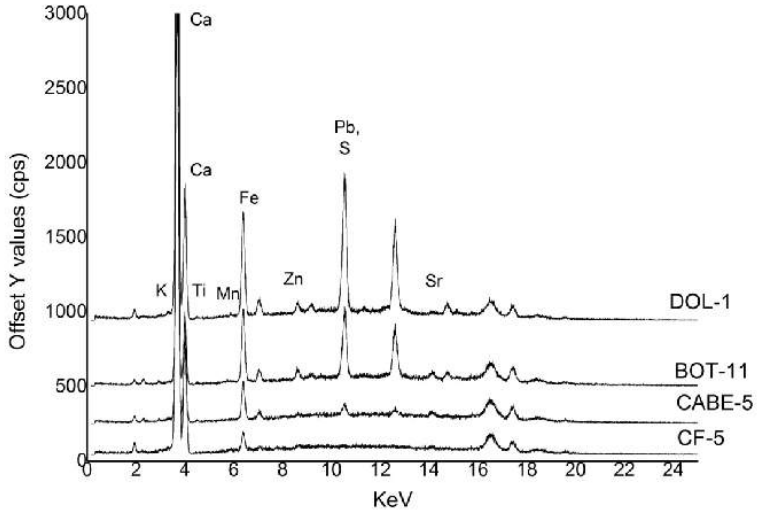


Figura 48 Analisi elementare dei campioni non soggetti a dilavamento tramite XRF

Le analisi condotte sui campioni provenienti da superfici rivolte verso il canale (*DOL-1, CF-5*) e volte verso il giardino-corte (*BOTT-11, CABE-5*) hanno permesso di riscontrare delle similitudini di composizione elementare. Infatti in tutti i campioni è possibile riscontrare la presenza di Ca a 3,69 KeV , avente picchi molto intensi e dovuto alla matrice carbonatica della Pietra d'Istria. Si distingue per intensità *CF-5*, il quale presenta il picco più intenso di quest'elemento, il che è riconducibile anche alla natura del campione stesso (cristallo prelevato all'interno dei piani di sedimentazione della pietra), infatti già tramite analisi FT-IR in ATR era stato identificato come composto di calcite pressoché pura.

Si rintraccia la presenza di K (3,31 KeV) riconducibile alla presenza di depositi salini dovuti all'aerosol marino (si ipotizza dunque la presenza di KCl) e la presenza di vari metalli quali: Pb o S (10,55 KeV) , Ti (4,51 KeV), Mn (5,90 KeV), Fe (6,41 KeV), Zn (8,64 KeV) e Sr (14,17 KeV).

La presenza di Potassio è stata registrata nei campioni *DOL-1*, *CF-5* e *CABE-5*. Valutando dunque l'orientamento delle superfici e l'intensità dei picchi è possibile affermare che i campioni provenienti dalle facciate rivolte verso il canale risultano maggiormente soggette al fenomeno di deposizione dell'aerosol marino generato sia dal vento che dalla rottura delle bolle d'aria sulle creste delle onde del mare, mentre per quanto riguarda il campione provenite dalla superficie rivolta verso il giardino (*CABE-5*), si può affermare che l'edificio risulta soggetto ad un circolo di aria ricca di Sali. Per quanto concerne il campione proveniente da Cà Bottacin esposto nelle medesime condizioni di quello derivante da Cà Bembo non contiene al suo interno questo elemento e dunque è possibile affermare che la superficie risulti riparata e meno soggetta al fenomeno di deposizione di aerosol marino.

I metalli pesanti rintracciati, invece, possono essere ricondotti tutti ai processi di combustione di carburanti per la locomozione di mezzi a motore. Essendo Venezia una città in prossimità del mare si ritiene che tali metalli siano da ricondurre ai transiti navali, compresi vaporetti e grandi navi. La presenza di elementi leggeri quali il silicio, non viene rilevata dalla analisi micro-XRF condotta, che ha permesso minima invasività e ottimi risultati anche avendo a disposizione piccole quantità di campione. Infatti questa tecnica permette di analizzare elementi che presentano un peso atomico superiore a 55, dunque il C avente un peso atomico ≈ 12 non viene rintracciato.

Per poter individuare la presenza di particelle carboniose dovute a combustibili fossili sarebbe opportuna una ulteriore indagine mediante SEM-EDX o XRPD.

Elementi come Ferro, Zinco, Stronzio, Piombo e/o Zolfo sono stati rintracciati su tutte le superfici, mentre Titanio, Manganese e Bario sono in alcuni campioni.

Il Ti è stato rintracciato nei campioni proveniente dalla superfici rivolte verso il giardino (*BOT-11* e *CABE-5*), con picchi aventi intensità molto similare, le quali probabilmente risultano esposte a circoli d'aria che favoriscono la deposizione, ma non la rimozione, del particolato (si sospetta non siano soggetti a raffiche di vento), come invece può accadere nelle superfici rivolte verso il canale. Il Mn invece è stato rintracciato nei campioni provenienti dalle superfici rivolte verso il canale (*DOL-1* e *CF-5*). Per quanto riguarda il Ba, invece, esso è stato rintracciato esclusivamente nel campione *DOL-1*.

Va evidenziato che il Pb e S presentano picchi a KeV simile, dunque non è possibile distinguerli con certezza, ma vista l'intensità e la tipologia della superficie in cui essi

sono stati riscontrati e le precedenti analisi FT-IR si può ipotizzare la presenza di entrambi gli elementi. La presenza di Zolfo è da ritenersi valida per i campioni *DOL-1* e *CABE-5* in quanto tramite analisi FT-IR in ATR è stata evidenziata la presenza di gesso all'interno del campione. Si presume che la tipologia di colorazione dei depositi sia da ricondurre alla presenza di composti di C, ma non è da escludere anche la possibile presenza di Solfuri metallici. Infatti in presenza di H_2SO_4, il cui processo di formazione è stato descritto nel *Cap.1.4*, i metalli pesanti possono generare dei solfuri avente colorazione nera che non sono stati rintracciati tramite analisi FT-IR in ATR nei campioni analizzati, o per concentrazioni di tali composti troppo basse o per mancanza di composti. Nonostante si tratti di un'analisi semiquantitativa le percentuali riscontrata indicano che *la composizione e la quantità degli elementi formanti il particolato atmosferico non necessariamente sono correlati esclusivamente all'esposizione, ma anche alle correnti d'aria*. Infatti si riscontra la presenza di K nei campioni *DOL-1, CABE-5 e CF-5* riconducibile alla deposizione di Sali solubili sulla superficie da parte dell'aerosol marino, il quale è veicolato dalla presenza e dall'orientamento del vento. Per quanto concerne la presenza dei metalli pesanti essi risultano presenti quasi in tutti i campioni, con intensità differenti, e sono riconducibili all'esposizione della superficie e ai circoli d'aria a cui la superficie è soggetta. Si può dunque ipotizzare che la facciata di Cà Dolfin posta verso il canale e la facciata di Cà Bottacin posta verso il giardino si trovino in aree soggette ad una circolazione del vento la cui velocità ed intensità favorisce la deposizione del particolato, mentre la facciata volta verso il canale di Cà Foscari ed il giardino di Cà Bembo risultino soggette a maggior flusso d'aria il che permette il verificarsi parziale del fenomeno. Inoltre le facciate rivolte verso il canale risultano maggiormente soggette alla deposizione di Sali a causa della presenza dell'aerosol marino, mentre le facciate rivolte verso il giardino risultano più protette. Inoltre è possibile individuare un maggior accumulo di metalli pesanti sulle superfici esposte verso il canale, il che è da ritenersi ricollegabile al traffico navale e ad un maggior circolo d'aria ricca di particolato rispetto alle superfici orientate verso il giardino. Dall'analisi di questi dati è possibile anche ipotizzare che il giardino-corte di Cà Bottacin risulta maggiormente riparato dalla deposizione di Sali solubili rispetto a quello di Cà Bembo, ma maggiormente soggetto alla deposizione di particolato. La facciata rivolta verso il canale di Cà Foscari risulta soggetta ad un minor accumulo di sali solubili rispetto a quella di Cà Dolfin esposta alle medesime condizioni a causa della presenza ed intensità del vento che probabilmente è maggiore, a cui dunque consegue anche un minor accumulo di particolato.

3.3.3) Analisi dei calchi: Image Processing e Profilometria

Ultimate le analisi inerenti all'individuazione dei composti e dei depositi presenti sulle superfici degli edifici indagati, si è proceduto analizzando i calchi delle medesime aree.
I calchi sono stati catalogati per edificio, tipologia di esposizione indagata (canale o giardino-corte) e superficie (D:dilavata ND:non dilavata MD-MND: metà dilavate metà non dilavata). Le scansioni dei calchi sono state indagate preliminarmente tramite image processing sfruttando la funzione Surface Plot del software ImageJ e poi sono stati sezionati per procedere con le analisi profilometriche come indicato nel *Cap.3.3.2*.

Edifici	Esposizione	Calco	Tipologia	Sezioni
Ca' Foscari	Canale	CF-1	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CF-2	ND	1,2,3,4,5,6,7,8
		CF-3	D	1,2,3,4,5,6,7,8,9
		CF-4	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7,8
		CF-8	ND	1,2,3,4,5,6,7
		CF-9	D	1,2,3,4,5,6,7,8
		CF-10	D	1,2,3,4,5,6,7
	Giardino/Corte interna	CF-5	D	1,2,3,4,5,6
		CF-6	ND	1,2,3,4
		CF-7	ND	1,2,3,4,5,6,7,8
Cà Dolfin	Canale	CDOL-11	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CDOL-12	D	1,2,3,4,5,6,7,8
		CDOL-14	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CDOL-15	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7,8
	Giardino/Corte interna	CDOL-13	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7,8
Ca' Bottacin	Canale	CBOT-21	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
	Giardino/Corte interna	CBOT-16	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CBOT-17	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6
		CBOT-18	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6
		CBOT-19	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CBOT-20	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7,8
Ca' Bembo	Canale	CABE-25	D	1,2,3,4,5,6,7
		CABE-26	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CABE-27	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
		CABE-28	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6,7
	Giardino/Corte interna	CABE-22	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6
		CABE-23	D	1,2,3,4,5,6,7
		CABE-24	M-D M-ND	1,2,3,4,5,6

Tabella 5 tabella riassuntiva dei calchi e delle sezioni ottenute a distanza di 1 cm

Le informazioni ottenute da queste metodologie di indagine sono molto numerose. I dati sono stati tutti rielaborati e verranno discussi; tuttavia per agevolare la lettura, verranno inclusi all'interno di questa sezione le immagini rielaborate tramite surface plots inerenti ai calchi più significativi e rappresentativi *CF-9, CF-8, CF-5, CF-7, DOL-12, DOL-11, DOL-13, BOT-21, BOT-16, CABE-26, CABE-22, CABE-25e CABE-23*, i restanti verranno riportati in *Appendice*. I dati numerici, invece, verranno riportati per tutte le sezioni di ogni calco (riportate in *Tab.5*) all'interno di questo capitolo.

3.3.4) Surface Plot

I grafici raffiguranti le superfici indagate tramite i calchi permettono di evidenziare la morfologia superficiale, dunque lo stato di conservazione della Pietra d'Istria, a seconda della sua esposizione e a seconda del fenomeno a cui e soggetta: dilavamento e deposizione. Queste immagini però permettono solo di valutare lo stato della superficie tramite scala di grigi, dunque per ottenere informazioni dettagliate e certe verranno correlate ai valori numerici ottenuti tramite analisi profilometrica.

- Cà Foscari

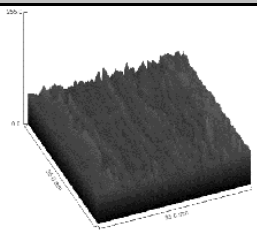
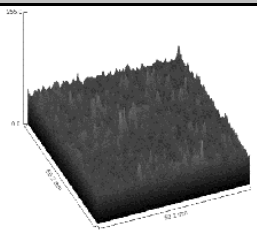
Superficie verso il Canale		
Edificio	**Dilavata**	**Non dilavata**
	CF-10	CF-8
Cà Foscari		
		

Tabella 6 Surface plot calchi CF-10 e CF-8

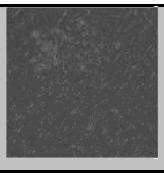
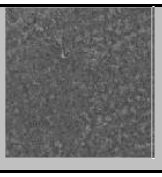
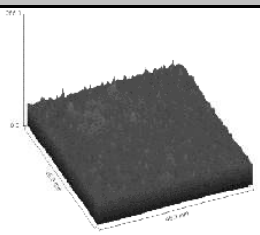
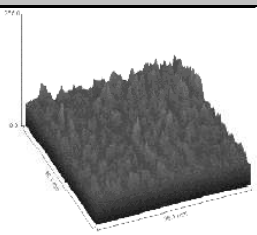
Superficie verso il Giardino-Corte		
	Dilavata	**Non dilavata**
	CF-5	CF-7
Cà Foscari		
		

Tabella 7 Surface plot calchi CF-5 e CF-7

Per quanto concerne *Palazzo Foscari*, la Pietra d'Istria orientata verso il canale presenta una superficie dilavata (*CF-10*). Il surface plot permette di evidenziare la presenza di numerose increspature superficiali riconducibili alla presenza di altrettanti piani di sedimentazione della Pietra d'Istria, la quale in questo caso risulta di qualità scarsa. Nel grafico non si rintraccia l'andamento della lavorazione superficiale, la quale o non era presente o è stata completamente erosa dall'acqua, dal vento o a causa di un intervento di pulitura invasivo eseguito durante il restauro. Diversamente, invece, nel surface plot inerente al calco *CF-8* essendo un area non soggetta a dilavamento, bensì a deposizione, è ancora possibile rintracciare l'andamento della lavorazione superficiale, la quale presenta un andamento periodico di increspature, riconducibile alla tecnica della *bocciardatura*[3]. I dislivelli che si rintracciano, dunque, possono essere collegati a tale tipologia di lavorazione e ad un leggero deposito di particolato atmosferico.
L'image Processing della Pietra d'Istria orientata invece vero il Giardino-Corte, ha permesso di evidenziare su entrambi i calchi esposti ad dilavamento (*CF-5*) e a deposizione (*CF-7*) la presenza periodica di increspature superficiali, riconducibili alla *bocciardatura* o al trattamento di *sabbiatura* svolto durante il restauro. Nel caso di *CF-7* risulta maggiormente apprezzabile rispetto a *CF-5*; quest'ultimo presenta una superficie piuttosto levigata, infatti anche i toni di grigio con cui è restituita l'immagine risultano pressoché omogenei. Per quanto riguarda invece *CF-7*, la superficie risulta restituita da più toni di grigio il che è sintomo di dislivelli piuttosto accentuati sulla superficie, probabilmente enfatizzati dalla presenza dei depositi superficiali e dalla formazione di composti di degrado (come rintracciato tramite tecnica FT-IR in ATR).

-Cà Dolfin

La rielaborazione delle scansione dei calchi inerenti alle superfici lapidee di Cà Dolfin orientate verso il Giardino-corte e canale, permettono di evidenziare in tutti i tre casi proposti (*DOL-12, DOL-11, DOL-13*) la bocciardatura superficiale. Nel caso di *DOL-12*, area soggetta al fenomeno di dilavamento e orientata verso il canale, come nel caso di *CF-10,* ma con dislivelli di minor entità, è possibile rilevare i piani di sedimentazione della pietra. Essendo i piani di sedimentazione numero presenti in minor numero all'interno della porzione di superficie indagata e avendo minor profondità, è possibile ipotizzare che la qualità di materiale utilizzata risulti di maggior qualità rispetto a quella

[3] La bocciardatura è una lavorazione superficiale di elementi lapidei da lasciare a vista, che crea una superficie leggermente corrugata, conferendo un aspetto simile al materiale naturale. Le texture dalla superficie "rustica", ottenute dalla bocciardatura, sono da sempre apprezzate per le sue valenze chiaroscurali, ed anche perché rendono l'aspetto del manufatto esteticamente più durevole, visto che sulla superficie bocciardata non sono rilevabili successivi piccoli distacchi e sfogliature. Oggi si usa molto spesso per rivestimenti e pavimentazioni esterne grazie alle caratteristiche antiscivolo che caratterizzano questa finitura.

impiegata per l'area indagata a Cà Foscari. Il surface plot inerente l'area non soggetta a dilavamento e orientata verso il canale (*DOL-11*) presenta la texture caratteristica della bocciardatura enfatizzata probabilmente dalla presenza di deposito superficiale localizzato. Per quanto riguarda invece il grafico raffigurante parte della superficie in Pietra d'Istria volta verso il giardino soggetta sia a dilavamento che a deposizione (*DOL-13*), si individua un dislivello netto tra le differenti tipologie di superficie: è possibile rintracciare la via preferenziale di ruscellamento dell'acqua e l'effetto che ciò provoca alla texture della lavorazione superficiale, infatti essa risulta erosa e meno netta, rispetto alla parte soggetta a deposizione.

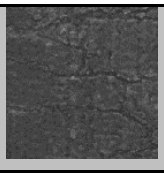
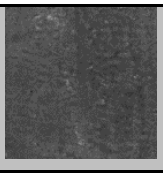
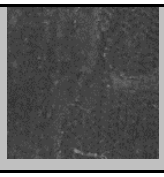
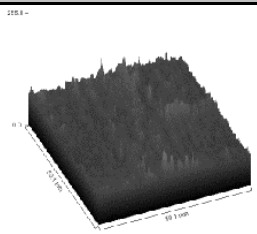
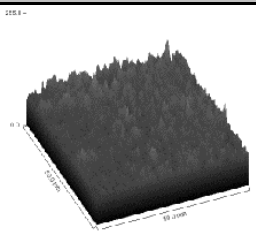
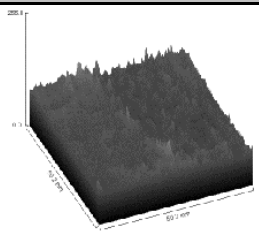
Edificio	**Superficie verso il Canale**		**Superficie verso il Giardino-Corte**
	Dilavata	**Non dilavata**	**Metà Dilavata Metà Non dilavata**
	DOL-12	DOL-11	DOL-13
Cà Dolfin			
			

Tabella 8 Surface plot calchi DOL-11, DOL-12 e DOL-13

- Cà Bottacin

Le immagini inerenti ai calchi provenienti dalla superfici di Cà Bottacin presentano un andamento superficiale ben distinto a seconda dell'esposizione verso il canale o verso il giardino. Nel caso del surface plot inerente al calco *BOT-21*, la porzione di superficie indagata presenta una parte soggetta al dilavamento e una a deposizione. In entrambe le aree soggette a dilavamento non è più facilmente rintracciabile la texture di finitura superficiale (il calco BOT-21 risulta molto similare al caso di *CF-10*) . Si rintraccia un dislivello netto tra le due aree soggette alle differenti tipologie di degrado, rielaborato dal programma attraverso una cresta molto chiara. Anche il grafico raffigurante la superficie indagata dal calco *BOT-16*, riporta informazioni in merito ad un'area soggetta sia al fenomeno di dilavamento che a deposizione. Esso permette di apprezzare le vie preferenziali di ruscellamento dell'acqua, la quale ha abraso la superficie riducendo

l'effetto della finitura superficiale, ancora invece molto evidente nell'area soggetta a deposizione. Tra le due aree è possibile apprezzare un discreto dislivello.

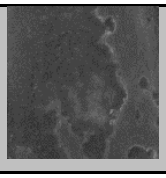
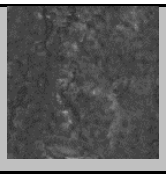
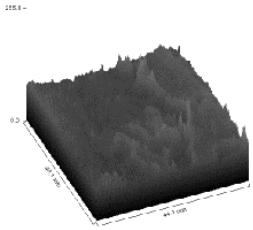
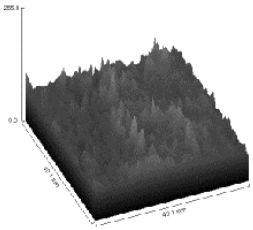
Edificio	**Superficie verso il Canale**	**Superficie verso il Giardino-Corte**
	Metà Dilavata **Metà Non dilavata**	**Metà Dilavata** **Metà Non dilavata**
	BOT-21	BOT-16
Cà Bottacin		
		

Tabella 9 Surface plot calchi BOT-21 e BOT-16

-Cà Bembo

Analizzando i surface plot inerenti ai calchi *CABE-26* e *CABE-22* è rintracciabile su entrambe le superfici analizzate, siano esse esposte verso il canale che giardino-corte, la trama periodica della finitura superficiale. L'area soggetta a dilavamento in *CABE-26* presenta una via preferenziale e risulta estremamente levigata rispetto alla restante area ad essa prossima. Nel grafico raffigurante *CABE-22*, invece la superficie soggetta al dilavamento (parte destra dell'immagine) risulta poco marcata rispetto ai casi precedentemente analizzati, il che può essere ricondotto ad un esposizione meno favorevole a tale effetto.

I calchi *CABE-25* e *CABE-23* vengono analizzati in quanto permettono di confrontare direttamente due superfici soggette al dilavamento orientate verso il canale e verso il giardino-corte. Come già evidenziato nei casi precedenti, il fenomeno di dilavamento leviga la superficie eliminando completamente o riducendo lo spessore della finitura superficiale. In questi casi proposti, entrambi presentano ancora la traccia della bocciardatura, ma l'intensità dei dislivelli è molto differente.

E' dunque possibile avanzare l'ipotesi che l'effetto dilavante dell'acqua sulle superfici esposte verso il canale risultino maggiormente intaccate da questa tipologia di degrado rispetto a quelle poste verso il giardino-corte. Il fenomeno erosivo può essere ricondotto oltre che all'acqua anche alla presenza del vento che si imbatte con maggiore forza sulla superfici rivolte verso il canale. A seguito di questa affermazione, dunque, consegue che le aree volte verso il giardino soggette al dilavamento risultano meno erose e maggiormente soggette al fenomeno di deposizione del particolato, quindi la finitura superficiale risulterà ancora ben distinguibile.

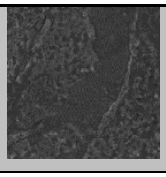
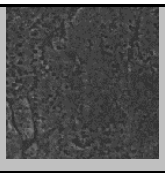
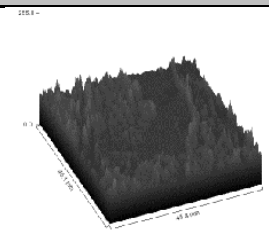
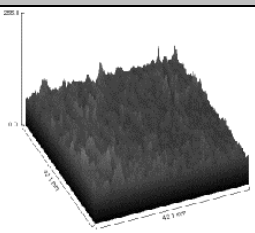
Edificio	**Superficie verso il Canale**	**Superficie verso il Giardino-Corte**
	Metà Dilavata **Metà Non dilavata**	**Metà Dilavata** **Metà Non dilavata**
	CABE-26	CABE-22
Cà Bembo		
		

Tabella 10 Surface plot calchi CABE-26 e CABE-22

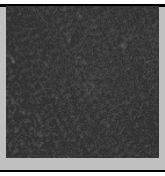
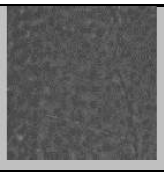
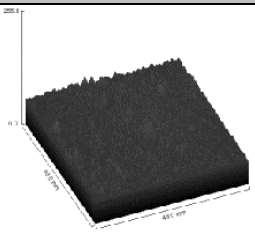
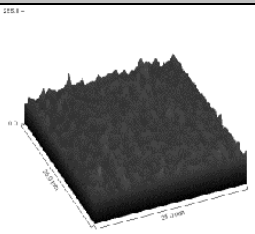
Edificio	**Superficie verso il Canale**	**Superficie verso il Giardino-Corte**
	Dilavata	**Dilavata**
	CABE-25	CABE-23
Cà Bembo		
		

Tabella11 Surface plot calchi CABE-25 e CABE-23

3.3.5) Analisi delle sezioni: stima della Rugosità (Lr)

Nelle tabelle seguenti invece riporteremo i valori della *Lr medio* calcolato per ogni sezione di ogni calco analizzato con la relativa deviazione standard per ogni edificio sia delle superfici rivolte verso il canale che verso il giardino-corte.

Essendo a conoscenza che *Lr* è il rapporto tra L_0, (cioè la *lunghezza del profilo sviluppato* ottenuta tramite l'applicazione della funzione *analyze particles*), e *L* (cioè *la lunghezza base del calco*) è possibile stimare a seconda del valore numerico ottenuto quale sia il profilo che risulta caratterizzato da un maggior numero di increspature e picchi: caratterizzato da una maggior rugosità.

Sulla base di ciò, dunque, è stato individuato un rapporto tra *Lr* e il *degrado* della superficie tenendo in considerazione la presenza dell'effetto del dilavamento e della deposizione del particolato atmosferico, il cui schema è riportato nella *Tab.12*:

Rapporto tra Lr e Degrado		
	Valori Lr medi	**Degrado (D)**
Aree soggette al dilavamento	< 1,20	> > D
	> 1,21	< D
Aree soggette alla deposizione del particolato	< 1,20	> > D
	> 1,21	< D

Tabella 12 Rapporti tra Lr e Degrado

Sfruttando la *Tab.12*, dunque, vengono stimate l'entità di degrado in rapporto ai valori di *Lr medi totali* ottenuti tramite il sezionamento di tutti i calchi. Tale tabella però ha solo scopo indicativo, infatti possono presentarsi dei casi anomali i quali non permettono di applicare tale metodologia di valutazione a tutte le analisi profilometriche, ed inoltre bisogna tenere in considerazione che le superfici in pietra degli edifici storici non sono quasi mai completamente lisce, ma bensì presentano una finitura superficiale. Per ovviare a tale problematica ogni *Lr medio* verrà confrontato al *surface plot* svolto per ogni calco, così da individuare eventuali anomalie, riscontrabili con *valori di Lr medi* molto elevati in aree dilavate o molto bassi in aree soggette a deposizione ed in presenza di aree metà dilavate e metà non soggette a tale fenomeno così da garantire un'analisi corretta.

Si può dunque affermare in termini estremamente generici che un'area soggetta a dilavamento se presenta *Lr < 1,12* presenterà *maggior degrado* in quanto la finitura superficiale risulterà parzialmente o completamente erosa dall'acqua e dal vento dunque la lunghezza di L_0 *risulterà minore*; mentre in presenza di *Lr > 1,21* il *degrado* verrà *ritenuto minore* in quanto sarà possibile riscontrare la trama superficiale della

bocciardatura, quindi l'impatto erosivo sarà minore come sarà minore anche l'esposizione ai fattori ambientali che inducono tale tipologia di degrado. Medesimo approccio può essere applicato in merito alle aree soggette alla deposizione del particolato atmosferico. A valori di $Lr < 1,12$ risulteranno correlati alla presenza di *maggior degrado*, in quanto il particolato atmosferico tende a formare uno strato di deposito compatto più o meno spesso che può limitare la lettura della bocciardatura rilevabile sulla superficie e dunque la lunghezza di L_0 *risulterà minore;* nel caso in cui invece il valore di Lr *risulti* $> 1,21$ l'entità di *degrado* potrà essere considerata *minore* perché L_0 *risulterà di lunghezza maggiore* a causa della lettura della trama della finitura superficiale e dunque la presenza di deposito sarà minore e/o meno omogeneo sulla superficie.
Inoltre analizzando l'errore (σ) correlato al calcolo di Lr per ogni sezione permette di valutare quanto la superficie possa variare ad intervalli di 1 cm all'interno del medesimo calco.

- ***Valori di Lr inerenti alle sezioni dei calchi svolti su superfici in Pietra d'Istria rivolti verso il canale***

Edificio	Calco	Tipologia	Lr medio canale	σ
Cà foscari	CF-1	M-D M-ND	1,21	0,07
	CF-2	ND	1,16	0,07
	CF-3	D	1,19	1,16
	CF-4	M-D M-ND	1,17	0,04
	CF-8	ND	1,17	0,05
	CF-9	D	1,21	0,27
	CF-10	D	1,28	0,04
Cà Dolfin	CDOL-11	M-D M-ND	1,24	0,08
	CDOL-12	D	1,31	0,05
	CDOL-14	M-D M-ND	1,21	0,05
	CDOL-15	M-D M-ND	1,21	0,05
Cà Bottacin	CBOT-21	M-D M-ND	1,23	0,07
Cà Bembo	CABE-25	D	1,17	0,05
	CABE-26	M-D M-ND	1,31	0,08
	CABE-27	M-D M-ND	1,29	0,06
	CABE-28	M-D M-ND	1,25	0,04

Tabella 13 Valori Lr medi per calchi svolti sulle superfici rivolte verso il canale

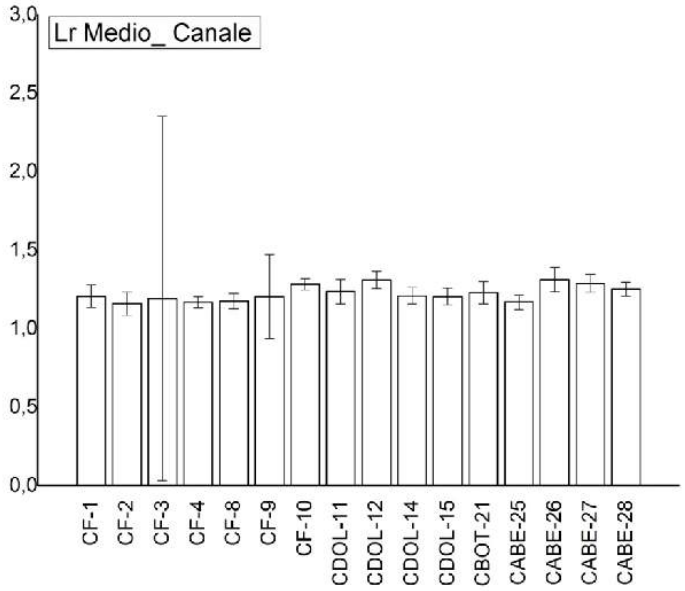


Figura 48 Valori Lr medi per calchi svolti sulle superfici rivolte verso il canale

- Cà Foscari

Analizzando i *valori di Lr medi* riscontrati per tipologia di superficie indagata, si evidenzia un andamento pressoché costante tra le superfici dilavate (*CF-3* e *CF-9* ≈ 1,20) si discosta molto invece il valore inerente a *CF-10*. Analizzando il surface plot, si evince che il *valore di Lr medio* risulta differente a causa della presenza di increspature da ricondurre al rilevamento dei piani di sedimentazione posti in evidenza dall'effetto erosivo dell'acqua. Le superfici indagate, dunque, sono da ritenersi *degradate*.

Per quanto concerne l'analisi di superfici soggette al fenomeno di deposizione (*CF-2* e *CF-8*) esse presentano un *Lr medio* ≈ 1,16. Analizzando i surface plot si evidenzia la mancanza di rugosità caratteristica di queste superfici. Analizzando i dati ottenuti tramite osservazione della superficie non si sospetta la presenza di deposito superficiale ben adeso al supporto (*vedasi Tab.3*) dunque, essendo stato l'edificio restaurato da poco, si presume sia stato condotto un intervento di pulitura invasivo che ha levigato ulteriormente l'area. La superficie in questo caso può essere ritenuta *degradata*, ma probabilmente a causa di fattori antropici più che meteorico-ambientali.

I valori medi di Lr per i calchi *CF-1* e *CF-4* permettono di indagare superfici sia esposte al dilavamento che al fenomeno di deposizione. In linea teorica, se il calco fosse stato svolto permettendo un indagine proporzionata delle due superfici, si dovrebbero ottenere delle informazioni mediate. Analizzando i surface plot si evince che il calco *CF-1* corrisponde ad una superficie pressoché dilavata, la quale presentando un valore di circa 1,20 è da ritenersi *lievemente degradata*, mentre nel caso di *CF-4*, si rintracciano

dislivelli marcati tra le due aree, ma la superficie dilavata risulta maggiore. Anche in questo caso la superficie è da ritenersi *degradata*.

- Cà Dolfin

Per quanto concerne Cà Dolfin, tutti i calchi condotti sulla facciata volta verso il canale di quest'edificio indagano superfici soggette esclusivamente al fenomeno di dilavamento (*DOL-12*) o anche al fenomeno di deposizione contemporaneamente (*DOL-11, DOL-13, DOL-14* e *DOL-15*). Dai valori ottenuti (compresi ≈ 1,20-1,30) e analizzando i surface plot si può affermare che il calco *DOL-12* dell'area soggetta a dilavamento presenta un Lr ≈ 1,31, il cui valore così elevato può essere ricondotto alla presenza di piani di sedimentazione evidenziati dall'erosione a causa dell'acqua più che alla presenza della finitura superficiale, dunque la superficie è da ritenersi *degradata*. Per quanto concerne invece i calchi *DOL-11*, *DOL-13*, *DOL-14* e *DOL-15*, essendo aree rappresentative delle due tipologie di degrado, i valori di Lr oscillano tra 1,20-1,23 e l'analisi dei surface plot permettono di valutare che le superfici indagate risultano di ampiezza pressoché omogenea e dunque il fenomeno di dilavamento risulta bilanciato dalla presenza di una rugosità piuttosto elevata dell'area soggetta a deposizione. In questo caso non è possibile identificare un livello univoco dello stato di conservazione della superficie.

-Cà Bottacin

Sulla facciata volta verso il canale dell'edificio Cà Bottacin è stato eseguito un unico calco su un'area soggetta sia al fenomeno di dilavamento che deposizione (*BOT-21*), in quanto non sono state rintracciate ulteriori aree significative. Dall'analisi del valore medio Lr rapportato al grafico in scala di grigi si evidenzia una rugosità attribuibile alla presenza di depositi. Dunque la superficie è da ritenersi *degradata* (Lr ≈1,22).

-Ca Bembo

I calchi svolti sulla facciata di Cà Bembo rivolta verso il canale, rilevano due tipologie di aree: soggetta esclusivamente al fenomeno di dilavamento o soggetta sia a dilavamento che deposizione. Il primo caso è stato indagato con il calco *CABE-25*, e incrociando il valore di Lr medio pari a circa ≈1,17 con il surface plot è possibile evidenziare che la rugosità registrata è correlabile alla lieve presenza della bocciardatura originale, dunque la pietra è da ritenersi degradata. Nel secondo caso, i calchi *CABE-26*, *CABE-27*, *CABE-28* indagano le aree soggette ad ambedue i fenomeni. Confrontando i grafici in scala di grigio precedentemente svolti è possibile individuare che i valori di Lr medi riscontrati sono riconducibili all'elevata rugosità presente nelle aree soggette a deposizione, ma inoltre va anche evidenziata una leggera rugosità nelle aree soggette al dilavamento. Anche in questo caso, come verificatosi anche per la superficie indagata di Cà Dolfin, non è possibile determinare univocamente se la superficie risulti degradata.

Analizzando i valori di σ si evidenzia che solo il calco CF-3 presenta un errore di 1,16 e dunque presenta variazioni significative della superficie da esso rilevata.

- ***Valori di Lr inerenti alle sezioni dei calchi svolti su superfici in Pietra d'Istria rivolti verso il Giardino-Corte***

Edificio	Calco	Tipologia della superficie	Lr medio giardino-corte	σ
Cà foscari	CF-5	D	1,17	0,06
	CF-6	ND	1,24	0,06
	CF-7	ND	1,28	0,12
Cà Dolfin	CDOL-13	M-D M-ND	1,31	0,08
Cà Bottacin	CBOT-16	M-D M-ND	1,62	0,66
	CBOT-17	M-D M-ND	1,23	0,03
	CBOT-18	M-D M-ND	1,27	0,16
	CBOT-19	M-D M-ND	1,28	0,09
	CBOT-20	M-D M-ND	1,23	0,13
Cà Bembo	CABE-22	M-D M-ND	1,30	0,05
	CABE-23	D	1,14	0,03
	CABE-24	M-D M-ND	1,28	0,04

Tabella 14 Valori Lr medi per calchi svolti sulle superfici rivolte verso il giardino-corte

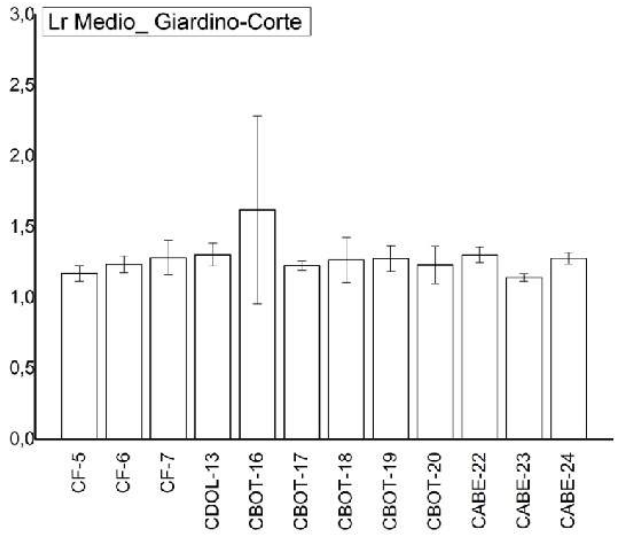


Figura 49 Valori Lr medi per calchi svolti sulle superfici rivolte verso il giardino-corte

-Cà Foscari

Sulla facciata rivolta verso il giardino-corte interna dell'edificio Cà Foscari, sono stati svolti tre calchi: *CF-5*, *CF-6* e *CF-7*. Il primo rileva una superficie soggetta a dilavamento, il cui *Lr medio* risulta ≈ 1,17. Confrontando tale valore con il surface plot si evidenzia che la superficie risulta piuttosto levigata, si registra una lieve rugosità riconducibile o alla presenza di bocciardatura o all'intervento di pulitura, dunque risulta difficoltoso definire se la superficie risulti degradata. I restanti due calchi rilevano

superfici soggette al fenomeno di deposizione, i cui *valori di Lr medi* risultano pari a 1,23 e 1,28. Analizzando l'andamento superficiale del surface plot, si evince che i livelli di rugosità sono riconducibili sia alla presenza della finitura superficiale che ad un lieve deposito di particolato atmosferico (vedasi analisi con Dino-lite) quindi si può affermare che le superfici risultino *pressochè in buono stato di conservazione*.

-Cà Dolfin

Le analisi delle superfici rivolte verso il giardino-corte interna di Cà Dolfin sono state condotte applicando un unico calco, in quanto non sono state rintracciate altre aree rilevanti. Il calco *DOL-13* rileva simultaneamente una porzione di superficie soggetta sia al dilavamento che a deposizione il cui *valore Lr medio* è risultato essere ≈ 1,30. Incrociando tale valore con l'analisi condotta con il surface plot si evidenzia un dislivello netto tra le due aree, ma entrambe presentano una rugosità riconducibile alla finitura tramite bocciardatura, enfatizzata nell'area soggetta a deposizione non omogenea (vedasi *Tab.3*). Si può dunque dichiarare che la superficie risulta in *buono stato di conservazione*.

-Cà Bottacin

Le superfici in Pietra d'Istria presenti nel Giardino-corte interna del Palazzo Bottacin, sono state indagate con numerosi calchi, i quali prevedono l'analisi simultanea di superfici soggette al dilavamento e deposizione. I *valori di Lr medi* riscontrati presentano un range molto ampio compreso tra ≈ 1,62 e 1,22 . Rapportando tali valori a surface plot di ogni calco si evidenzia che per il calco *BOT-16* il livello di Lr così elevato e riconducibile alla tipologia della superficie soggetta a deposizione la quale risulta più ampia: infatti si rintracciano delle increspature e picchi molto elevati, che in relazione alle immagini acquisite con Dino-lite permettono di constatare uno stato di conservazione della pietra non troppo buono seppur la rugosità in tale area risulti maggiore. Si può affermare però, che a differenza di altri edifici Cà Bottacin non è stata recentemente soggetta a restauri e dunque lo stato di conservazione può discostarsi di molto rispetto agli altri edifici. Nei calchi *BOT-17,18,19,20* i livelli di *Lr medi* risultano pressoché molto simili. L'estensione di superficie dilavata risulta minore, rispetto a quella soggetta a deposizione, maggiore. Analizzando i surface plot e le immagini acquisite con Dino-lite si evince che la rugosità è data maggiormente dalla presenza di deposito rispetto alla trama della finitura superficiale. Le aree soggette a dilavamento presentano ancora lievi tracce della bocciardatura originale, ciò fa dedurre che l'effetto dilavante non sia diretto e costante, ma essendo tali aree estremamente in prossimità a quelle soggette a deposizione tale dato non può essere considerato molto rilevante.

Si può dunque dedurre che lo stato di conservazione della Pietra d'Istria presente nel giardino-corte di Cà Bottacin *non sia per niente ottimale*.

-Cà Bembo

Le superfici in pietra di Cà Bembo poste verso il giardino-corte sono state indagate con tre calchi di cui uno rilevante solo un'area soggetta al dilavamento mentre i restanti analizzano superfici miste dunque soggette anche al fenomeno di deposizione. Il primo caso, *CABE-23*, presenta un valore di Lr medio di ≈ 1,14 il quale rapportato al surface plot permette di evidenziare che la rugosità rilevata e riconducibile alla finitura superficiale e dunque l'effetto erosivo dell'acqua, ma non risulta essere estremamente incisivo. Per quanto concerne invece i calchi *CABE-22 e 24*, le superfici presentano un Lr medio di ≈1,29 che correlato all'andamento del grafico in scala di grigi permette di evidenziare che la rugosità è data sia dalla presenza della bocciardatura originale che dalla deposizione del particolato atmosferico il quale non genera però un film omogeneo e a spessore costante. Si può dunque affermare che le superfici di Cà Bembo indagate e volte verso il giardino-corte risultano per quanto possibile, *ben conservate*.

Analizzando i valori di σ si evidenzia che non vi sono variazioni significative della superficie all'interno dei calchi in quanto i valori tendono tutti verso 0.

3.3.6) Analisi delle sezioni: Valutazione dei parametri Ra, Rmax e R^2

I parametri che di seguito verranno analizzati permettono di conoscere l'ampiezza del dislivello tra le valli e i picchi massimi delle superfici indagate (*Rmax*) , di conoscere la il valore della rugosità media sfruttando le aree assolute sottese al profilo in rapporto alla linea media (*Ra*) e quanto i dati che permettono di implementare l'andamento del profilo si discostino dalla linea di fittaggio, ovvero quanto essi risultino distanti da un andamento lineare (R^2).

Analizzando in termini generali gli istogrammi rappresentativi dei valori medi di *Ra* e *Rmax* medi inerenti ai calchi svolti sulle facciate rivolte verso il canale e verso il giardino-corte si evidenzia un andamento molto similare. I valori analizzati presentano scale di misura comparabili, sia Ra che i dati Rmax sono in mm. Analizzando i valori di Rmax medi in concomitanza con quelli di Ra si è individuata una possibile relazione che permette di valutare il degrado delle superfici analizzate dai calchi. Infatti al crescere di Rmax crescerà anche il valore di Ra, dunque maggiore sarà il dislivello tra massimi e minimi presenti nel profilo, maggiore sarà l'area individuata posta in rapporto con *L* e maggiore risulterà il degrado riscontrabile sulle superficie. Anche in questo caso, come

per la valutazione del parametro Lr, per poter garantire una corretta analisi i risultati verranno comparati con le informazioni grafiche riportate all'interno dei surface plots.
Per quanto concerne invece il *coefficente* R^2, permette di conoscere quanto i dati reali osservati possono essere approssimati da un modello lineare. I valori numerici di R^2 possono oscillare in un range compreso tra 1 e 0. Si può dunque ipotizzare che più il valore numerico calcolato presenterà tendenza verso 0 , maggiore sarà la rugosità della superficie (i dati quindi saranno maggiormente dispersi) mentre maggiore sarà la vicinanza ad 1, minore sarà la presenza di irregolarità presenti sulla superficie.

Ra ≈ 0,20 o >	Rmax ≈ 2 o >	Superficie degradata
R^2	≈ 0	> Rugosità della superficie
	≈ 1	< Rugosità della superficie

Tabella 14 Rapporti tra valori Ra, Rmax e R^2 per ottenere informazioni sulle caratteristiche superficiali

Valori di Ra, Rmax e R^2 inerenti alle sezioni dei calchi svolti su superfici in Pietra d'Istria rivolti verso il canale

Edificio	Calco	Tipologia	Ra medio	σ	R_{max} medio	Σ	R^2 medio	σ
Cà Foscari	CF-1	M-D M-ND	0,70	0,21	3,16	0,96	0,21	0,27
	CF-2	ND	0,76	0,23	3,57	1,15	0,28	0,27
	CF-3	D	0,57	0,20	3,27	0,59	0,06	0,08
	CF-4	M-D M-ND	0,37	0,17	2,23	0,87	0,49	0,29
	CF-8	ND	0,21	0,07	1,45	0,48	0,41	0,33
	CF-9	D	0,24	0,06	1,48	0,26	0,53	0,13
	CF-10	D	0,93	0,19	5,44	0,92	0,07	0,07
Cà Dolfin	CDOL-11	M-D M-ND	0,24	0,06	1,83	0,41	0,25	0,21
	CDOL-12	D	0,29	0,07	2,17	0,52	0,38	0,23
	CDOL-14	M-D M-ND	0,16	0,04	1,19	0,37	0,45	0,36
	CDOL-15	M-D M-ND	0,29	0,06	1,68	0,45	0,32	0,26
Cà Bottacin	CBOT-21	M-D M-ND	0,54	0,14	2,86	0,81	0,07	0,08
Cà Bembo	CABE-25	D	0,23	0,06	2,09	0,49	0,42	0,18
	CABE-26	M-D M-ND	0,47	0,10	3,29	0,63	0,10	0,12
	CABE-27	M-D M-ND	0,30	0,07	2,36	0,49	0,23	0,23
	CABE-28	M-D M-ND	0,50	0,18	3,29	1,25	0,15	0,20

Tabella 15 Valori Ra, Rmax e R^2 medi delle superfici rivolte verso il canale

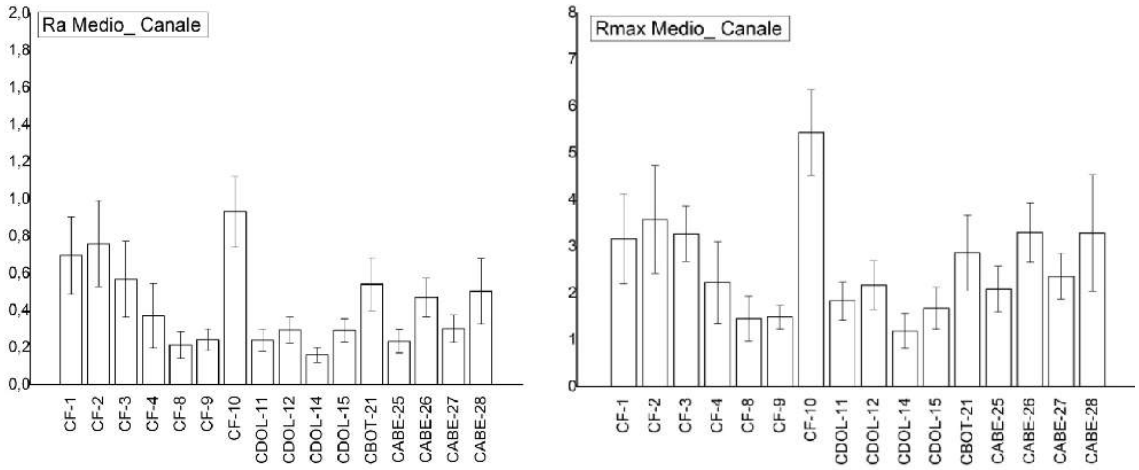


Figura 50 Valori Ra e Rmax medi per calchi svolti sulle superfici rivolte verso il canale

-Cà Foscari

Analizzando dunque i valori medi dei parametri Ra e Rmax in relazione alla *Tab. 14,* si può dunque affermare che le superfici soggette al fenomeno di dilavamento che risultano essere maggiormente degradate sono quelle indagate dai calchi *CF-10* e *CF-3*. Infatti nel primo caso il valore di Ra risulta ≈ 0,93 mentre Rmax ≈ 5,44 (ma con un valore di σ molto elevato, il che sta a significare un'elevata variazione dell'andamento della superficie indagata dal calco), nel secondo Ra ≈ 0,20 e Rmax ≈3,27. Correlando dunque i dati ai surface plots si può dunque affermare che le superfici indagate risultano *degradate*. Per quanto concerne invece il calco *CF-9*, anch'esso svolto su una superficie soggetta a dilavamento, i valori di Rmax e Ra risultano essere molto bassi. Analizzando l'andamento del grafico in scala di grigi si evince che la superficie risulta altamente soggetta al dilavamento e dunque risulta erosa e per questo motivo i dislivelli non risultano marcati. Si può affermare anche in questo caso che la superficie risulti *degradata*.

Per quanto riguarda invece le superfici soggette a deposizione indagate con i calchi *CF-2* e *CF-8*, si rintracciano valori di Ra e Rmax differenti. Nel primo caso il valore di Rmax risulta essere ≈3,57 (con σ molto elevato ≈1,15, il che è riconducibile all'elevata diversità di andamento delle superficie indagata dal calco) e un Ra≈ 0,76; nel secondo caso invece Ra risulta ≈0,21 e Rmax ≈ 1,45. Analizzando gli andamento dei surface plots, in relazione anche alle immagini acquisite con il microscopio Dino-Lite, non si riscontra una rugosità superficiale caratteristica per la presenza di particolato, dunque si ritiene che l'andamento sia correlato alla presenza della bocciardatura o al processo di pulitura svolto durante il restauro. Si suppone quindi che il *degrado* possa essere ricondotto più a cause antropiche che climatiche-ambientali.

I calchi *CF-1* e *CF-4*, invece, indagano superfici soggette sia al fenomeno di dilavamento che di deposizione. Nel calco *CF-1* la superficie che risulta maggiormente indagata è quella soggetta al dilavamento. Il valore di Rmax risulta ≈ 3,16 (anche in questo caso σ rintracciato è molto elevato) e Ra ≈ 0,70. Comparando le analisi condotte con Dino-Lite e tramite il grafico in scala di grigi si può affermare dunque che la superficie risulta per lo più levigata dal ruscellamento dell'acqua e quindi può essere definita *degradata*.
Nel caso del calco *CF-4*, comparando i valori di Rmax ≈ 2,23 e Ra ≈ 0,37, in relazione al surface plot è stato possibile evidenziare che vi siano dei dislivelli marcati tra le aree dilavate e non dilavate dunque, si può affermare che la superficie sia soggetta al *degrado*.

- Cà Dolfin

Il calco *DOL-12* è stato svolto su una superficie esposta all'effetto di dilavamento. Analizzando i valori di Rmax ≈ 2,17 e Ra ≈ 0,29, confrontandoli con il surface plot è stato possibile individuare dei piani di sedimentazioni e le vie preferenziali di ruscellamento dell'acqua dunque la superficie e da ritenersi *degradata.*
Per quanto riguarda invece l'analisi di superfici soggette sia al fenomeno di deposizione di particolato atmosferico che di dilavamento, sono stati svolti i calchi *DOL-11, DOL-14, DOL-15*. In questi calchi le due tipologie di aree indagate risultano essere pressoché proporzionate, ma l'analisi dei valori di Ra e Rmax permette di evidenziare la presenza di *degrado* e di individuare un ordine decrescente del fenomeno: *DOL-11, DOL-15 e DOL 14.*

- Cà Bottacin

Per analizzare lo stato di conservazione delle superfici in Pietra d'Istria rivolte verso il canale del palazzo Bottacin è stato svolto un calco, *BOT-21*, il quale permette di analizzare contemporaneamente gli effetti del dilavamento e della deposizione.
Analizzando i valori di Rmax e Ra (≈ 2,86 e ≈0, 54) in rapporto alle informazioni contenute nel grafico in scala di grigi del calco, è possibile affermare che la superficie risulta *degradata*.

- Cà Bembo

Cà Bembo è stata indagata tramite calchi posti sia su una superficie esposta al solo dilavamento (*CABE-25*) che su superfici esposte contemporaneamente anche al fenomeno di deposizione (*CABE-26, CABE-27 e CABE-28*).
Il calco *CABE-25* rileva l'andamento della superficie soggetta al dilavamento, e analizzando i valori di Ra e Rmax a confronto con il surface plot della superficie è possibile affermare che la superficie risulta erosa e dunque *degradata*.
Per quanto riguarda invece le indaganti condotte su superfici miste, i calchi *CABE-26* e 28 presentano un andamento di Rmax ≈ 3,29 (va sottolineato che nel caso di *CABE-28* vi

è il valore di σ molto elevato) e Ra molto simili: per il primo ≈ 0,47 per il secondo ≈ 0,50. Incrociando le informazioni ottenute tramite il grafico il scala di grigio e i valori dei parametri profilometrici è possibile affermare che la superficie risulti *degradata*. Per quanto riguarda *CABE-27* si rintraccia un Rmax di ≈ 2,36 e un Ra ≈ 0,30, che posto a confronto con il suo surface plot permette di affermare che la superficie sia soggetta a degrado.

Valori di Ra, Rmax e R^2 inerenti alle sezioni dei calchi svolti su superfici in Pietra d'Istria rivolti verso il giardino-corte

Edificio	Calco	Tipologia	Ra medio	σ	R_{max} medio	σ	R^2 medio	σ
Cà foscari	CF-5	D	0,39	0,19	2,21	0,68	0,49	0,20
	CF-6	ND	0,36	0,13	2,17	0,37	0,26	0,23
	CF-7	ND	0,39	0,17	2,21	0,70	0,23	0,15
Cà Dolfin	CDOL-13	M-D M-ND	0,38	0,11	2,54	0,61	0,13	0,10
Cà Bottacin	CBOT-16	M-D M-ND	0,87	0,64	3,92	1,13	0,12	0,16
	CBOT-17	M-D M-ND	0,27	0,05	1,97	0,26	0,18	0,15
	CBOT-18	M-D M-ND	0,59	0,35	3,04	1,49	0,18	0,27
	CBOT-19	M-D M-ND	0,42	0,09	2,61	0,30	0,14	0,17
	CBOT-20	M-D M-ND	0,32	0,16	2,09	0,77	0,32	0,27
Cà Bembo	CABE-22	M-D M-ND	0,26	0,06	2,51	0,64	0,12	0,12
	CABE-23	D	0,25	0,06	1,62	0,34	0,23	0,20
	CABE-24	M-D M-ND	0,24	0,09	2,03	0,41	0,34	0,24

Tabella 16 Valori Ra, Rmax e R^2 medi delle superfici rivolte verso il giardino-corte

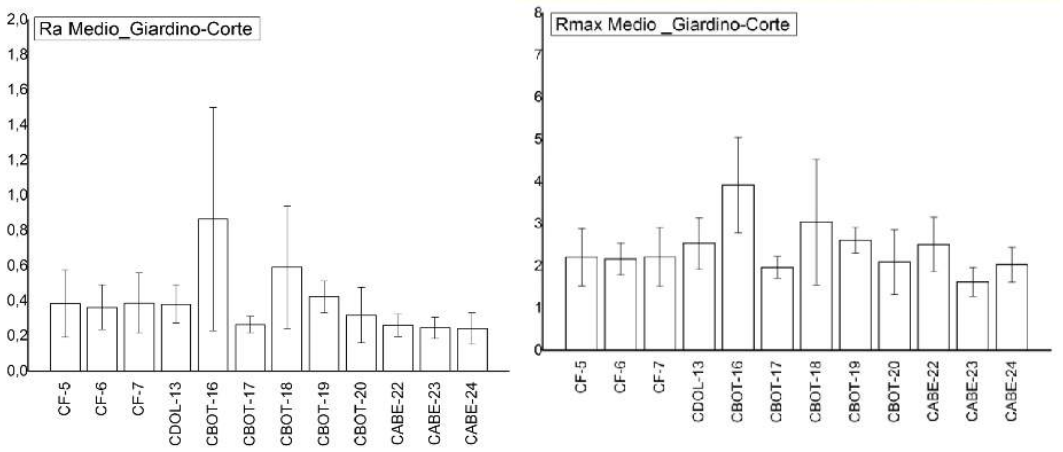


Figura 51 Valori Ra, Rmax e R^2 medi delle superfici rivolte verso il giardino-corte

-Cà Foscari

Le analisi condotte sulle superfici in Pietra d'Istria rivolte verso il giardino-corte del Palazzo Foscari tramite i calchi indagano aree soggette al dilavamento (*CF-5*) e soggette a deposizione (*CF-6 e CF-7*).

Il calco *CF-5* presenta Rmax medi ≈ 2,21 mentre Ra≈ 0,39. Affiancando a questi valori il surface plot della superficie è possibile evidenziare una lieve rugosità riconducibile alla bocciardatura, dunque l'andamento superficiale analizzato è quello di una superficie lavorata e soggetta al fenomeno erosivo. Sulla base di ciò, dunque, è possibile affermare che la superficie risulti *degradata*.

Per quanto concerne i calchi *CF-6 e CF-7* invece, gli andamenti di Ra risultano simili (≈ 0,37) come anche quelli di Rmax (≈ 2,19). Rapportando questi valori ai grafici in scala di grigio, si registra la presenza della finitura superficiale e di un lieve deposito di particolato atmosferico (come individuato tramite analisi condotta con Dino-Lite), dunque la superficie può essere ritenuta in *buono stato*.

-Cà Dolfin

La facciata di Palazzo Dolfin rivolta verso il giardino è stata indagata tramite il calco *DOL-13* il quale analizza un' area di superficie soggetta sia al fenomeno di dilavamento che di deposizione. Analizzando il surface plot del calco, in relazione ai valori di Rmax (≈ 2,54) e Ra (≈0,38) è stato possibile individuare la presenza della bocciardatura, la quale risulta enfatizzata dal dislivello presente tra area dilavata e per la presenza di particolato atmosferico. Sulla base di queste informazioni la superficie è da ritenersi in uno stato *sufficientemente buono*.

-Cà Bottacin

Per analizzare Cà Bottacin sono stati svolti dei calchi comprendenti aree soggette sia al dilavamento che alla deposizione (*BOT-16, BOT-17, BOT-18, BOT-19, BOT-20*).

I calci *BOT-16 e 17* presentano Rmax molto elevati, con volori di σ altrettanto significativi in quanto permettono di valutare quanto la superficie indagata tenda a variare. Analizzando i surface plot di tutti i calchi svolti, i cui valori di Ra risultano compresi nel range tra ≈ 0,30 – ≈ 0,90, e Rmax compresi tra ≈2 - ≈4, sono stati riscontrati numerosi dislivelli il che permette di affermare che le superfici siano *degradate*, e visti i valori fino ad ora individuati (Lr, Ra, Rmax, R^2) si ritiene che tale edificio sia quello che necessiti con *maggior urgenza di un restauro*.

-Cà Bembo

Per quanto concerne l'analisi delle superfici di Palazzo Bembo sono stati svolti calchi si aree soggette al dilavamento (*CABE-23*) e aree soggette sia a tale fenomeno che a quello di deposizione (*CABE-22 e CABE-24*).

Il calco *CABE-23* presenta il valore di Rmax medio di ≈ 1,62 e Ra≈ 0,25. Comparando i dati al surface plot del calco, si è rintracciata la presenza di bocciardatura la quale risulta lievemente erosa dall'acqua, quindi la superficie è da ritenersi *lievemente degradata*.

Nei calchi *CABE-22 e 24* comparando i valori di Ra e Rmax stimati con il surface plot della superficie, è stato possibile individuare la presenza della finitura superficiale, che risulta ben distinguibile nelle aree soggette alla deposizione del particolato e leggermente erosa nella parte esposta al ruscellamento dell'acqua. In linea generale dunque, la superficie si presenta in *buono stato conservativo*.

Per quanto riguarda l'analisi del *coefficiente* R^2, il suo valore per tutti i calchi svolti sugli edifici caso di studio risulta essere tendente a 0, dunque i punti che determinano l'andamento del profilo presentano un trend che si discosta da quello descritto dalla retta di fittaggio, dunque nessuno presenta una superficie tendenzialmente perfettamente liscia.

4.)Conclusioni e Prospettive future

Questa tesi si poneva l'obbiettivo di individuare la vulnerabilità della Pietra d'Istria a Venezia. Il lavoro è stato articolato in modo da poter ottenere delle informazioni dettagliate sullo stato di conservazione attuale del materiale, in relazione all'ambiente e alla tipologia degli effetti riscontrati.
Le caratteristiche dell'ambiente hanno subito delle modifiche nel tempo anche a causa delle attività antropiche. Tramite processi sinergici che si instaurano tra i fattori ambientali e composti inquinanti nel dominio ambientale-aria e i materiali, le cinetiche dei possibili processi degradativi possono risultare velocizzate. La conoscenza dell'incisività dell'ambiente sui beni architettonici in relazione alle teorie descritte nel *Cap.1.1*, rapportate alle informazioni rintracciabili nella Carta del Rischio studiata dall' ISCR, a dati ambientali specifici e alla valutazione della vulnerabilità di superfici di studio ha permesso di individuare lo stato di conservazione delle superfici e di definire dei grado di vulnerabilità. Queste conoscenze servono ad indirizzare anche le possibili tipologie di intervento d'adottare e applicarle tempestivamente secondo le reali necessità conservative. Per questo motivo, tenendo in considerazione i numerosi studi che hanno permesso d'individuare i meccanismi che inducono degrado sulle superfici lapidee esposte in ambiente esterno, si è ritenuto fosse utile considerare gli elementi caratteristici del dominio ambientale-aria come fattori di pericolo, cercando di determinare e quantificare gli effetti che essi possono arrecare ai materiali tramite interazioni sinergiche rappresentative della realtà territoriale indagata.

Si è dunque proceduto valutando i fattori di pericolo e l'eventuale aggressività dell'ambiente considerando il dominio ambientale-aria caratteristico per il comune di Venezia ed in particolare per il centro storico. Sono state sfruttate preliminarmente le Carte del Rischio, sviluppate dell'Istituto Superiore Centrale del Restauro, le quali forniscono informazioni macroscopiche mediate per l'intera municipalità indagata.
L'analisi delle Carte del Rischio su scala comunale e provinciale ha permesso di evidenziare la presenza di diverse classi di pericolosità territoriale. Il comune di Venezia, di cui fa parte anche Mestre, presenta una pericolosità di annerimento appartenente alla classe 4 e di erosione appartenente a classe 2. L'analisi condotta su scala provinciale inerente al rischio ambientale-aria, ha evidenziato che il comune maggiormente soggetto ad esso è quello di Venezia.
La stima delle differenti classi, sia per indici di annerimento che erosione e rischio, sono il risultato della rielaborazione di dati medi per ogni comune analizzato. Si può dunque

ipotizzare che i modelli sviluppati per la creazione del SIT, risultino rappresentativi solo per alcuni comuni a limitata estensione territoriale o molto omogenei al loro interno. Nel caso del comune di Venezia, l'area territoriale che viene indagata presenta caratteristiche geografiche-territoriali e destinazioni d'uso delle diverse aree molto differenti e non comparabili e dunque non rappresentabili da indici mediati sull'intero territorio. Per questo motivo le informazioni ottenute non possono essere considerate effettivamente rappresentative della realtà territoriale indagata. Venezia è una città unica al mondo, ed in quanto tale presenta caratteristiche territoriali, geografiche, ambientali specifiche e assolutamente poco comparabili con quelle riscontrabili in città dell'entroterra, come ad esempio Mestre che seppur faccia parte del medesimo comune presenta una struttura urbana e caratteristiche molto differenti.

Per poter conoscere innanzitutto la pericolosità territoriale, in questa tesi sono stati analizzati i dati ambientali dell' ARPAV Venezia, nel range temporale compreso tra il 2002 e il 2014, inerenti alla [NO_2] e [PM_{10}] : il primo, è stato sfruttato per stimare indicativamente la pericolosità legata all'indice di erosione, il secondo per valutare invece quella legata all'indice di annerimento. Purtroppo però, i dati analizzati non hanno permesso la valutazione della pericolosità specifica del centro storico a causa della mancanza di centraline di rilievo sul territorio lagunare. Nel centro storico di Venezia è presente unicamente una centralina ubicata a Sacca Fisola (Isola della Giudecca) e risulta posta in una posizione poco strategica per il monitoraggio in relazione ad edifici storici, in quanto risente molto dei moti d'aria per presenza del vento e dalle emissioni causate dal passaggio delle grandi navi. Per questi motivi si ritiene che i dati ottenuti siano soggetti a sensibili variazioni.

Per poter ottenere informazioni reali in merito alla qualità dell'aria del centro storico, sarebbe assolutamente necessario ed utile (anche ai fini di valutazione dell'impatto dell'inquinamento sulla salute umana), integrare ed intensificare la rete di centraline così che in un futuro si possano avviare analisi più dettagliate e specifiche le quali risultano attualmente bloccate o limitate alla città di Mestre, in quanto i dati risultano essere una media dei rilevamenti condotti nell'entroterra.

Le analisi della pericolosità territoriale , dunque, sono state condotte in modo costretto sfruttando i dati medi tra Mestre e la centralina di Sacca Fisola. Si evince nei risultati, infatti, che i valori riscontrati risultano essere in linea con quelli dichiarati dalla Carta del Rischio in quanto la tipologia di dati a disposizione è la medesima, quindi rappresentativa maggiormente delle condizioni di pericolosità riguardati l'entroterra pituttosto che il centro storico.

Terminata la fase di analisi della pericolosità territoriale, si è proceduto valutando

la piovosità, dunque le precipitazioni ed il vento.
L'analisi della piovosità ha permesso di individuare sia le annate maggiormente piovose (2008, 2010, 2014 e 2002) che i mesi (Settembre, Ottobre, Novembre e Dicembre) rilevanti per uno studio futuro. Infatti nel caso in cui si volesse valutare l'impatto della pioggia sulle superfici lapidee esposte ad ambiente esterno nella città di Venezia, lo studio dovrebbe essere avviato nei mesi estivi (meno piovosi) per poi procedere nella stagione invernale (Gennaio-Febbraio).
E' seguita poi la valutazione del fattore vento, il quale presentando una direzione pressoché costante e tendente verso Nord-Est, ha permesso di ipotizzare che la concentrazione degli inquinanti atmosferici del centro storico potesse risultare inferiore perché tendenzialmente essi vengono veicolati verso Mestre. Inoltre la presenza del vento ha permesso di considerare la formazione dell'aerosol marino ed individuare delle relazione con i dati analitici condotti su campioni provenienti dalle differenti superfici lapidee degli edifici. Tramite indagini XRF infatti, è stata riscontrata la presenza di K, elemento presente sotto forma di KCl nell'acqua marina. Tramite la relazione vento, aerosol marino e K, è stato possibile ipotizzare quali edifici risultassero soggetti a circoli di aria e alla deposizione di Sali sulle superfici. E' stato dunque ipotizzato che le superfici poste verso il canale risultano maggiormente soggette a fenomeno di deposizione di Sali da parte dell'aerosol marino trasportato dal vento, ed inoltre se l'area in cui è eretto l'edificio risulta essere soggetta a circoli d'aria locali, e la locazione del giardino risulta favorevole, anche la Pietra d'Istria presente nella facciata posteriore dell'edificio può risultare soggetta al medesimo fenomeno, seppur in modo inferiore (come Cà Bembo). Nel caso in cui invece, il giardino-corte interna risulti protetto e quindi soggetto a minor fenomeni ventosi, come Cà Bottacin, non si rintraccia la presenza di elementi riconducibili a sali. Tale ipotesi andrebbero comprovate, svolgendo analisi EDX, così da verificare l'effettiva presenza di Cl o ulteriori elementi sulla superficie riconducibili alla composizione dei sali di origine marina.

La tecnica analitica FT-IR in ATR è servita per poter conoscere la composizione dei campioni provenienti dalle superfici soggette al dilavamento o deposizione degli edifici caso di studio. I risultati sono conformi al quelli rilevati in bibliografia: si è rintracciata la presenza di $CaCO_3$, CaC_2O_4 e $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.
La tecnica XRF ha permesso di identificare la presenza di metalli pesanti quali: Pb, Zn, Fe, Mn, Ti, Sr . La loro presenza è da ritenersi riconducibile ai processi di combustione di carburanti e attività industriali. Per poter conoscere dettagliatamente la composizione del particolato sarebbero opportuno svolgere analisi con microsonda EDX e XRPD.

Terminate le fasi analitiche conoscitive e qualitative delle superfici, si è

proceduto analizzando le aree dilavate e quelle soggette a deposizione, studiandone i dislivelli apprezzabili sia con Microscopio ottico a contatto Dino-Lite, tramite documentazione fotografica e sensibilità tattile. Quest'ultima ha permesso l'individuazione preliminare delle aree da indagare tramite calco, in quanto ha permesso di rilevare tramite contatto cutaneo la presenza di un dislivello superficiali,che sfruttando esclusivamente la sensibilità oculare non sarebbe stato possibile individuare, e successivamente indagare con microscopio ottico a contatto Dino-Lite.

L'andamento delle superfici è stato indagato tramite calchi svolti con Gomma siliconica GSP-400N, la quale presentava caratteristiche di sensibilità e applicazione ottimali per il caso. I calchi poi sono stati studiati tramite processing image, sfruttando free software, quali ImageJ, Gimp e Web Plot Digitizer da cui sono stati estrapolati i dati profilometrici.

L'analisi dei dati profilometrici e la rielaborazione grafica previa immagini (*surface plots*) ha permesso di affermare che il fenomeno erosivo/corrosivo indotto dall'acqua e dal vento sulle superfici esposte al dilavamento e rivolte verso il canale risulta maggiormente aggressivo e dunque maggiormente apprezzabile, rispetto a quello riscontrato nelle aree soggette al medesimo fenomeno ma orientate verso il giardino-corte. Ciò è stato ricondotto ad una maggiore esposizione delle superfici: non essendoci altri palazzi costruiti in prossimità della facciata la traiettoria del vento e della pioggia non risulta schermata e tanto meno limitata, come invece può accadere nel caso dei giardini-corti. Il manifestarsi di un evento piovoso in concomitanza con il vento intensifica l'effetto erosivo e l'aggressività dei due fattori ambientali nei confronti della pietra.

La presenza del vento, per quanto riguarda le superfici rivolte verso il canale, limita la deposizione del particolato atmosferico il quale invece viene maggiormente riscontrato sulle superfici rivolte verso il giardino-corte. Ciò si verifica perché i giardini-corti, come già precedentemente detto per quanto riguarda la deposizione di Sali, risultano soggetti a minor circoli d'aria. Queste affermazioni sono comprovate anche dai dati ottenuti tramite processing image, dalla colorazione dei campioni prelevati , dalle analisi delle superfici con microscopio Dino-Lite e dai dati profilometrici.

I dati profilometrici e i surface plots hanno permesso di evidenziare la presenza della finitura superficiale, *bocciardatura*, la quale può favorire la deposizione del particolato.

Esposizione	Tipologia della superficie	Tipologia di degrado	Cause del degrado
Canale	Dilavata	> erosione	> esposizione a pioggia e vento
	Non Dilavata	< deposizione	
Giardino	Dilavata	< erosione	< esposizione a pioggia e vento
	Non Dilavata	> deposizione	

Tabella 1 Rapporto tra superfici, esposizione, tipologie e cause di degrado

La rielaborazione dei dati profilometrici posti a confronto con i surface plots dei calchi, hanno permesso di stimare lo stato di conservazione delle superfici. Si è evidenziato che tutte le superfici verso il canale risultano, seppur a differenti livelli, degradate; mentre quelle esposte verso il giardino, salvo qualche caso eccezionale e riconducibile alla mancanza di restauri in epoca moderna, risultano ben conservati. Queste affermazioni sono però da ritenersi valide solo per i casi di studio presi in esame e per il sestiere analizzato. Per poter estendere queste considerazioni anche ad altri edifici ubicati in sestieri differenti da quello di Dorsoduro, bisognerebbe analizzarne le superfici applicando la medesima metodologia di studio, svolta per Cà Foscari, Cà Dolfin, Cà Bottacin e Cà Bembo. L'estensione di questo studio ad altri sestieri e edifici permetterebbe di identificare se le tipologie ed intensità di degrado fino ad ora riscontrate risultano essere le medesime per tutta Venezia, o in caso contrario, si potrebbero individuare quale quartieri risultino maggiormente aggrediti dall'ambiente rispetto agli altri.

Per poter affermare ciò dunque, si dovranno sfruttare i parametri Lr, Ra, Rmax e R^2 ed i surface plots di tutti i calchi. I singoli parametri e coefficienti però non permettono di poter affermare quanto detto fino ad ora. Infatti, anche durante questo studio si sono verificati dei casi, come per i calchi *DOL-11,14,15* e *CABE-26,27 e 28*, in cui l'analisi solo di Lr non permetteva la stima dello stato di conservazione. Solo incrociando tutti i dati ottenuti è stato possibile sbloccarne la relativa classificazione.

Lr	**< 1,12**	**Superficie soggetta a degrado >**
	> 1,21	**Superficie soggetta a degrado <**
Ra	**≈ 0,20 o >**	**Superficie degradata**
Rmax	**≈ 2 o >**	**Superficie degradata**
R^2	**0**	**> Rugosità e dispersione**
	1	**< Rugosità e deispersione**

Tabella 2 Rapporto tra i valori di Lr, Ra, Rmax e R^2 utili per la valutazione dello stato di conservazione della superficie

Sulla base dei dati e della *Tab.2* è stata generata una classificazione dello stato di conservazione delle superfici:

Stato delle superfici	Simbolo
Buono	+++
Discreto	++
Sufficiente	+
Insufficiente	-
Gravemente insufficiente	- -

Tabella 3 Stato di conservazione delle superfici e simbolo rappresentativo

Rielaborando i dati e comparandoli con le *Tab. 2 e 3* dunque è possibile affermare che:

Edificio	Esposizione	Stato delle superfici
Cà Foscari	**Canale**	+
	Giardino	+
Cà Dolfin	**Canale**	- -
	Giardino	+
Cà Bottacin	**Canale**	- -
	Giardino	- -
Cà Bembo	**Canale**	-
	Giardino	+

Tabella 4 Classificazione dello stato di conservazione delle superfici degli edifici caso di studio a seconda dell'esposizione

Sulla base delle informazioni ottenute e riportate in *Tab.4*, si evidenzia che Palazzo Foscari, nonostante sia stato restaurato recentemente, si presenta in uno stato di conservazione *sufficiente*. Probabilmente è ubicato in un'area in cui l'aggressività ambientale risulta maggiore, o l' intervento di pulitura svolto durante il restauro ha reso le superfici più sensibili, o semplicemente non essendo stata riscontrata la presenza di protettivo tramite analisi FT-IR in ATR, la pietra risulta priva di un film difensivo e dunque si è avviato il processo degradante naturale.

Analizzando i dati riportati in *Tab.4* è possibile individuare quali siano gli edifici che necessitano di un intervento di restauro o di manutenzione e l'effettivo grado d'urgenza. Si evince dunque che le superfici di Cà Bottacin risultino essere quelle maggiormente degradate, e vista la gravità, il palazzo necessiterebbe di un intervento di restauro impellente. Per quanto riguarda Cà Dolfin, invece, si evidenzia la necessità di un restauro per la facciata volta verso il canale con urgenza, mentre per quanto riguarda le superfici volte verso il giardino-corte è consigliabile un intervento di manutenzione. Palazzo Bembo richiede un intervento di restauro,non di estrema urgenza, per quanto concerne le

superfici rivolte verso il canale, mentre si ritiene che per le superfici in prossimità del giardino-corte sia sufficiente un intervento di manutenzione.

Oltre a stimare lo stato di conservazione, la rielaborazione dei dati profilometrici ha permesso di ipotizzare un possibile andamento della finitura superficiale originale non degradata. Si può dunque ipotizzare che i valori rintracciabili dell'andamento della bocciardatura originale siano i seguenti:

Bocciardatura originale	**Ra ≈ 0,40**
	Rmax ≈ 2,50
	Lr ≈ 1,30

Tabella 5 Valori ipotetici relativi a Ra, Rmax e Lr di una bocciardatura non degradata

Questi valori andrebbero però comprovati tramite ricerca bibliografica e studio in laboratorio. Bisognerebbe individuare la tecnica di bocciardatura eseguita dalle maestranze veneziane nei periodi in cui gli edifici sono stati costruiti e gli eventuali attrezzi, così da poterla riproporre ex-novo su un campione in Pietra d'Istria, il quale successivamente, tramite il medesimo processo analitico con cui è stato condotto questo studio, ottenere i parametri effettivi e certi. In questo modo si otterrebbe un valore "bianco", un andamento standard da poter confrontare con i dati ottenuti dagli edifici caso di studio e semplificare molto il processo di valutazione dello stato di conservazione.

Concludendo, quindi, la tecnica di studio adottata, oltre a presentare costi di esecuzione ed indagine ridotti, ha permesso di:

- valutare l'interazione tra la Pietra d'Istria e l'ambiente,
- valutare lo stato di conservazione delle superfici.

La valutazione dello stato di conservazione permette di individuare quali edifici necessitino di restauro o manutenzione, e quindi anche una migliore gestione dei limitati fondi per la conservazione dei beni culturali. Se la valutazione dello stato di conservazione fosse eseguita periodicamente, si potrebbero ridurre notevolmente il numero di interventi di restauro, maggiormente costosi, aumentando così la possibilità di svolgere maggiori interventi di manutenzione, a costo inferiore, permetterebbero di conservare e tutelare un maggior numero di beni.

Procedendo in tale direzione, si andrebbe ad adempire i principi presenti sia nella *Teoria del Restauro* di Cesare Brandi che la *teoria della conservazione programmata* proposta da Giovanni Urbani, garantendo una maggior durata e fruibilità delle opere, riducendo il rischio di perdita e permettendo allo stato italiano di valorizzare e vantare maggiormente la ricchezza storica, culturale e artistica presente sul suolo nazionale.

Bibliografia e sitografia

M. Sgobbi, E.Zendri, F.C.Izzo, G.Biscontin *La prevenzione del degrado a Venezia nel XIX-XX secolo: studio delle superfici di Ca' Rezzonico*; Scienza e Beni culturali XXVI, 2010

Marco Vitruvio Pollione, *De architectura*, libro VII

P.Rossi Manaresi, *Stone Protection From Antiquity to the beginning of the industrial revolution*, Science and Technology for Cultural Heritage, n°2, 1993, pp.149-159

John Ruskin*, Le sette lampade dell'architettura*, Jaca Book, Milano 1982

Grodecki, Eugéne Viollet Le Duc, *Encyclopaedia Universalis,Vol.16*, Parigi, 1974 pp.850-852

Conferenza Internazionale degli Architetti, *Carta del restauro d'Atene*, Atene, 1931, Punto VI

Cesare Brandi, *Teoria del restauro*, Torino, Ed. Piccola Biblioteca Einaudi, 2000

Carta di Venezia, Venezia, 1964, art.6-14

G. Urbani, *Problemi di conservazione*, Compositori, Bologna 1973

Giovanni Urbani, *Quale cultura della conservazione per maturare la scienza della durabilità del patrimonio dei territori storici*?, a cura di P. Segala, R. Boschi, C. Minelli, Nardini Editore, Firenze 2013

Giovanni Urbani, *Intorno al restauro*, a cura di Bruno Zanardi, Milano, Ed. Biblioteca d'arte Skira, 2000, pag.104

Angela M. Ferroni, Carlo Cacace, *Carta del rischio: la vulnerabilità archeologica*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali e Istituto Centrale per il Restauro, Roma

L. Mucchi, *La carta del rischio*, Materiale Didattico, Università di Firenze, Dipartimento di Ingegneria

M. Acierno, C. Cacace, A. M. Giovagnoli; *La carta del Rischio: un approccio possibile alla manutenzione programmata. Il caso di Ancona*, Strutture e materiali. Problemi di conservazione, Nuova serie, anno III (2014), 5-6, Roma, pagg. 81-82

B.Bonanni, C. Cacace, A. Giovagnoli, R. Gaddi; *Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto*, ICR e APAT, 2004

Iscr- Ispra,*Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma*, Roma, Settembre 2011, pag. 7

P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli, *I risultati dello studio sperimentale APAT-ICR per la valutazione del danno dei beni storico-artistici esposti all'aperto*, Rapporto APAT e ICR, 2006, pp. 63-74

Iscr- Ispra,*Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma*, Roma, Settembre 2011, pag.

Multiasses, *Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage*, report 2005

Dlgs 155 del 13 Agosto 2010

D. De la Fuente, J.M. Vega, F. Viejo, I. Dìaz, M. Morcillo, *Mapping air pollution effects on atmospheric degradation of cultural heritage*, Journal of Cultural Heritage, 2012

M.Z. Jacobson, *Atmospheric pollution: history, science and religion*, Cambrige University, 2002

J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci, *The effects on air pollution on Cultural heritage*, Ed. Springer, 2009

G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation: atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection*, Elsevier, Amsterdam, 1983

G. Amoroso, M. Camaiti, *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea, Firenze, 2002

V. Fassina, *Environmental pollution in relation to stone decay* , in Air pollution and Conservation, ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 133-170, 1988

G. Berti, C. Galassi, A. Faustini, F. Forastiere, *Inquinamento atmosferico e salute: sorveglianza epidemiologica e interventi di prevenzione*, Epidemiol Prev, 2009, pp. 1-144

F. Liguori, Tesi specialistica in Scienze ambientali, *Inquinamento di atmosfere urbane. Interpretazione dei dati e nowcasting con reti*, Dipartimento di Scienze ambientali, Venezia 2006.

P.Bonanni, R. Daffinà, R. Gaddi, V. Silli, M. Cirillo, C. Cacace, A. Giovagnoli, *I risultati dello studio sperimentale APAT-ICR per la valutazione del danno dei beni storico-artistici esposti all'aperto*, Rapporto APAT e ICR, 2006, pp. 63-74

M.C. Facchini, S. Decesaris, M. Mircea, F.Cavalli, S. Fuzzi, *Chemical effects on cloud activation with special emphasis on the effect of carbonaceous aerosol from biomass burning*, EGS-AGU Joint Assembly, Nice 2003, France

A.Marconi, *Materiale particellare aerodisperso: definizioni, effetti sanitari, misura e sintesi dele indagini ambientali effettuate a Roma.* Laboratorio di Igiene Ambientale, Istituto Superiore della Sanità, Roma. Ann. ISt. Super. Sanità, 2003, pp. 329-342

V. Ariola, A. D'Alessandro, F. Lucareli, G. Marcazzan, F. Mazzei, S. Nava, I. Garcia-Orellana, P.Prati, G. Valli, R. Vecchi, A. Zucchiati, *Elemental characterization of PM10, PM2,5 and PM1 in the town of Genoa (Italy),* Chemosfere, 2006 62, pp. 226-232

M.Martuzzi, F. Mitis, I. Iavarone, M. Serinelli, *Health impact of PM10 and ozone in 13 Italian cities*, World Health Organization, Copenhagen, 2002, Denmark.

World Health Organization, *Air quality guidelines for parti culate matter, ozone, nitrose dioxide and sulfur dioxide*, Geneva, 2005, Switzerland,

F.Raes, R. Van Dingenen, E. Vignati, J. Wilson, J. Putaud, J. Seinfeld, P. Adams, *Formation and cycling of aerosol in the global troposphere*, Atomospheric Environment, 2000, 34, pp 4215-4240

W.F. Rogge, M.A. Mazurek, L.M. Hildemann, G.R. Cass, B.R.T. Simoneit, *Quantification of urban organic aerosols at a molecular level: identification, abundance and seasonal variation*, Atmospheric Environment, 1993, 27, pp. 1309-1330

P. Lenschow, H.J. Abraham, K. Kutzner, M. Lutz, J.D. Preub, W. Reichenbacher, *Some ideas about the sources of PM10.* Atmospheric Environment, 2001, 35, pp. 23-33

B. Lauby-Secretan, D. Loomis, Y. Grosse, F. El Ghissassi, V. Bouvard, L. Benbrahim-Tallaa, N. Guha, Robert Baan, Heidi Mattock, Kurt Straif,*Carcinogenicity of polychlorinated biphenyls and polybrominated biphenyls*, in The Lancet Oncology, vol. 14, nº 4, aprile 2013, pp. 287-288

T. Secco, F. Pellizzato, A. Sfriso, B. Pavoni, *The changing state of contamination in the Lagoon of Venice. Part 1: organic pollutants*, Chemosphere, 2005, 58, pp. 279-290

A. Gambaro, M. Radaelli, R. Piazza, A.M. Stortini, D. Contini, F. Belosi, R. Zangrando, P. Cescon*, Organic micropollutants in wet and dry deposition in the Venice lagoon, Chemosphere*, 2009, 76, pp. 1017-1022

G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation : atmospheric pollution, clearing, consolidation and protection*, Elsevier, Amsterdam, 1983;

J. Watt, R. Hamilton, R. Lefèvre, A. Ionesci, *The effects ot air pollution on Cultural heritage*, Ed. Springer, 2009

F. Prodi, F. Belosi, S. Ferrari, G. Santachiara, P. Masia, L. Di Matteo, *Aerosol Characterization in the Venice Lagoon*, Scientific Research and Safeguarding of Venice, Research Programme 2004-2006, Volume V, 2005, p.171

H.D. Van der Gon, M. Magdalen Jozwicka, E. Hendricks, M. Mhtenkeni Gondwe, M. Schaap, *Mineral dust as a component of Particulate Matter, Netherlands Research Program on Particulate Matter*, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2010,

C. Colombi, S. Angius, V. Gianelle, M. Lazzarini, *Particulate Matter concentration, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system*, Atmospheric Environment, 2013

F. Luccarelli, P.A. Mando, S. Nava, P. Prati, A. Zucchiatti, *Elemental composition of urban aerosol collected in Florence, Italy*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 161-163, 2000,pp. 819-824

T. M. Holsen, *Measurement of dry deposition and air-water excanghe of polycyclic aromatic hydrocarbons with the water sampler*, Environmental Science Technologies, 1999, 33, pp. 426-434;

C. Leifu, P. Shaolin, L.Jingang, H. Qianqian, *Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou*, China, Lournal of Environmental Sciences, 2012, 24, pp. 632-639

P. Gasparoli, *Le superfici esterne degli edifici*, Alinea, Firenze, 2003

A.J. Hutchinson, J. B. Johnson, G. E. Thompson, G. C. Wood, P.W. Sage, M. J. Cooke, *Stone degradation due to wet deposition of pollutants*, Corrosion Science, 1993, pp. 1881-1889

R. Alaimo, S. Deganello, L. Di Franco, G. Montana, *Caratteristiche composizionali del particolato atmosferico e chimichismo delle acque di precipitazione nell'area urbana di Palermo*, in: Atti del I Simposio int. La conservazione dei monumenti nel bacino Mediterraneo: influenza dell'ambiente costiero e dello spray marino sulla pietra calcarea e sul marmo, Bari, 7-10 Giugno 1989, Italia, pp. 369-377

K.Torfs, R. Van Griken, *Chemical relations between atmospheric aerosol, deposition and stone decay layers on historic buildings at the maditerranean coast*, Atmospheric Enviroment, 15, 2179-2192, 1997

S.Riato, *Interazioni chimico-fisiche di manufatti lapidei con l'ambiente e studio di trattamenti conservativi*, Tesi di dottorato T00420, Università Cà Foscari, 2004-2006

F. Zezza, F. Macrì, *Marine aerosol and stone dacay*, The science of the total Enviroment, 167, 123-143, 1995

F.Raes, V. Dingenen, E. Vignati, J. Wilson, J. Putaud, J. Seinfeld, P. Adams, *Formation and cycling of aerosol in the glogal troposphere*, Atmospheric Enviroment, 34, 4215-4240, 2000

R. Cohen-Adad, Chr. Balarew, S. Tepavitcharova, *Sea-water solubility phase diagram, Application to an extractive process*, Pure Applied Chemestry, 74, 10, 1811-1821, 2002

Ridley Chester, *Introduction to marine chemistry*, London, New York Academic Press, 60-133, 1971

A.G. Nord, A. Svardh, K. Tronner, *Air pollution levels reflected in deposits on building stone, Atmospheric Environment*, 1994, 28, pp. 2615-2622

K. Torfs , R. Van Grieken, *Chemical relation between atmospheric aerosols, deposition and stone decay on historic buildings at the Mediterranean coast*, Atmospheric Environment, 1997, 31, pp. 2179-2192

Enciclopedia Treccani, voce: *pioggia*

Enciclopedia Treccani, voce: *pluviometria*

UNESCO, *Rapporto su Venezia*, Ed. scientifiche e tecniche Mondadori, Milano,1969 *Normal 1/88*

L. Campanella, A. Casoli, M. P. Colombini, R. Marini Bettolo, M. Matteini, L. M. Migneco, A. Montenero, L. Nodari, C. Piccioli, M. Plossi Zappalà, G. Portalone, U. Russo, M. P. Sammartino, *Chimica per l'arte*, Ed. Zanichelli,Roma, 2007

G. Amoroso, C. Felix, *Les produits de traitements de la pierre de taille et la lutte contre l'irriversibilité des processus d'alteration*, Matèriaux et Technique, SIRPE Paris, 3 Mars 1978, 7-8 Juin-juillet 1978, 9-10 Septembre-Octobre 1978, 11-12 Novembre- Dècembre 1978

N. Fiorentin, *La pietra d'Istria a Venezia: atti del seminario di studio*, Venezia, 3 Ottobre 2003, Regione del Veneto, Sommacampagna, ed. Cierre, Verona, 2006

M. Simunic Bursic, D. Alijinovic, D. Orsulic, Kirmenjak- *The stone on which Venice was built*, Geophysical Research Abstracts 7, 10520, 2005

G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation : atmospheric pollution, clearing, consolidation and protection*, Elsevier, Amsterdam, 1983

S.Oden,*The acidification of air and its consequences in the natural environment*, Ecology Committee Bulletin N°1, Stockholm 1968

A. Wexler, *Humidity and moisture*, Reinhold, New York, 1965

G. Rocchi*, Istruzioni di restauro dei beni architettonici e ambientali*, Hoepli, Milano 1994

G. Zabbia, C. Sabbioni, G. Gobbi, *Weathering layers on stone monuments in marine localities of Northern and Central Italy*, La Conservazione dei Monumenti nel Bacino del Mediterraneo, Bari 1989, pagg. 79-82

P. Maravelaki, E. Zendri, G. Biscontin, G. Repaci, *Indagini sulle superfici in Pietra d'Istria a Venezia, Le pietre nell'architettura: struttura e superfici*, Bressanone ,1991, 911-921

J. Weber, *Salt-induced deterioration of romanesque wall painting in the Church of St. Georgen, Styria*, Austria: a case study aiming a better understanding of the behaviour of salt systems in ancient walls, International workshop on conservation of cultural surfaces: stone and wall covering, Venice, 2000, Elsevier

ISPRA,ISCR, *Calcolo del rischio territoriale e del rischio individuale per i beni di interesse storico-artistico a Torino*, Rapporti 88/2009, ISPRA, Roma

R. J. Goy, *Venice an architectural guide*,The British Library, Pechino, 2010

G. Mazzariol, A. Trivellato, *Venetian palace*, Ed. Evergreen, Padova, 1998

G. Mazzariol*, I palazzi del Canal Grande*, Istituto Geografico De Agostini, Novare, 1981

Giannantonio Paladini, *Profilo Storico dell'Ateneo*, edizioni Università Ca' Foscari, Venezia, 1996.

G.M. Pilo, M. De Rossi, D. Alessandri, F. Zuanier, *Cà Foscari: storia e restauro del palazzo dell' Università di Venezia*, Ed. Marsilio, 2009

A. A. V. V., *La sede storica dell'Università Cà Foscari: risanamento e riutilizzo*, Atti del convegno del 22 Novembre 1997, Venezia

C. Coury, A.M. Dillner, *A method to quantify organic groups and inorganic compounds in ambient aerosols using attenuated reflectance FTIR spectroscopy and multivariate chemiometric thecniques*, Atmospheric Environment,2008, pagg. 5923-5932

Graziella Rosselli, *La spettroscopia infrarossa in scienze della conservazione*,pdf., 2008

Manuale per l'utente, *GNO Image Manipulation Program*, 8 Agosto 2014

E. Chirone, S. Tornincasa, *Disegno tecnico industriale*, Ed. Il Capitello

M. W. Sayers, S. M. Karamihas, *The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles*, The regent of the University of Michigan, 1998

http://www.icr.beniculturali.it/documenti/allegati/Lectio%20magistralis%20su%20Giovanni%20Urbani%20-%20profilo.pdf

www.isprambiente.gov.it/files/aria/inquinamento-degrado.pdf

http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/emissioni-di-inquinanti/emissioni-di - inquinanti/?searchterm=inquinanti%20atmosferici

http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0012/9110/E88700.pdf

http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500099003.pdf

http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/qualita-dellaria/approfondimenti/inquinamento atmosferico-in-ambito-portuale-approfondimenti

http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/file-e-allegati/portiaria/Stima%20Grandi%20Navi.pdf

http://www.unive.it/media/allegato/Fondazione-Ca-Foscari/spazi/Scheda_CaDolfin_Aula-Magna-Silvio-Trentin.pdf

https://helpx.adobe.com/it/photoshop/using/image-size-resolution.html

https://imagej.nih.gov/ij/features.html

http://www.di.uniba.it/~ig/TextureAnalysis/InfGrafica.html

http://svg.dmi.unict.it/iplab/imagej/downloads/relazione.pdf

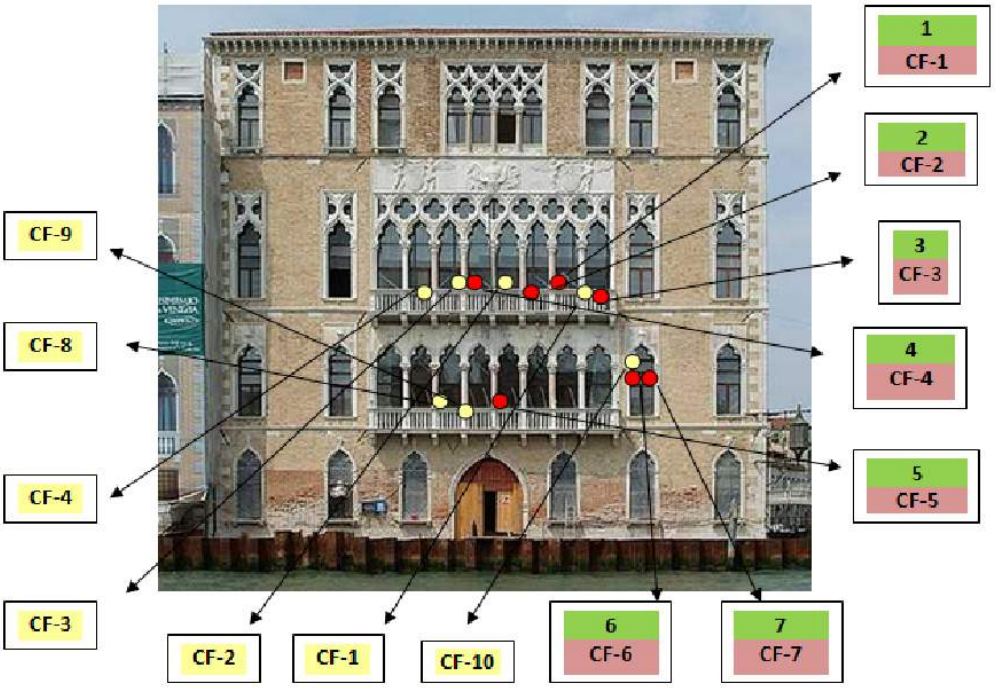
http://gimp.linux.it/www/meta/gimp-it.pdf

http://verytech.smartworld.it/come-applicare-leffetto-contorni-alle-immagini-con-gimp-128067.html

http://www.html.it/pag/53832/rilevamento-contorni/

https://docs.gimp.org/it/plug-in-edge.html
http://www.istitutomajorana.it/forum/Thread-RISOLTO-GIMP-estrazione-profilo-alare-da-foto
http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/
http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/userManual.pdf
http://www.regione.molise.it/web/grm/sis.nsf/9eca41c1e8bced26c1256caf0010cc9a/115c5dc3c177b2d8c12573fa00249832?OpenDocument
http://www.es-it.com/projects/carta-del-rischio-dei-beni-culturali-della-regione-sicilia
http://jacopo-russo.it/MAE_testi_ITA/A07_Terremoto_testo_ITA.txt
http://www.uni.net/aec/riskmap/italian.htm
http://venezia.gis.beniculturali.it/
http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/43496
www.marche.beniculturali.it/getFile.php?id=50
http://lenst.det.unifi.it/~mucchi/DOCS/LETT/INFCULT/La%20carta%20del%20rischio.pdf
http://www.regione.sicilia.it/beniculturali/Dirbenicult/info/por/202/AzioneB.htm
http://conservation-science.unibo.it/article/viewFile/571/552
http://www.academia.edu/5159900/La_Carta_del_rischio_del_patrimonio_culturale_normalizzazione_delle_tipologie_degli_edifici_nella_banca_dati_del_Sistema_informativo_territoriale
http://icr.intersistemi.it/guida/inizio_frame.html
http://www.beniculturali.it/mibac/multimedia/UfficioStudi/documents/1308218675300_Not_39_pg_73-76.pdf
https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2010_253_8833.pdf
http://www.icr.beniculturali.it/documenti/allegati/Lectio%20magistralis%20su%20Giovanni%20Urbani%20-%20profilo.pdf
www.iccd.beniculturali.it/getFile.php?id=3676
http://www.arpa.emr.it/motap/ravenna/RELAZI8.HTM
http://www.treccani.it/enciclopedia/rugosita/

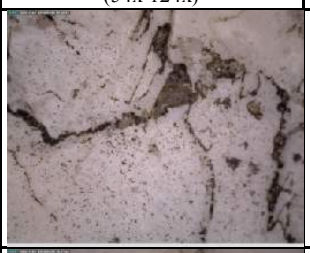
APPENDICE I: Mappatura e analisi degli edifici caso di studio
Cà Foscari



Legenda	
	Dino-Lite
	Campionamento
	Calco

- Dino-Lite e Microscopio ottico

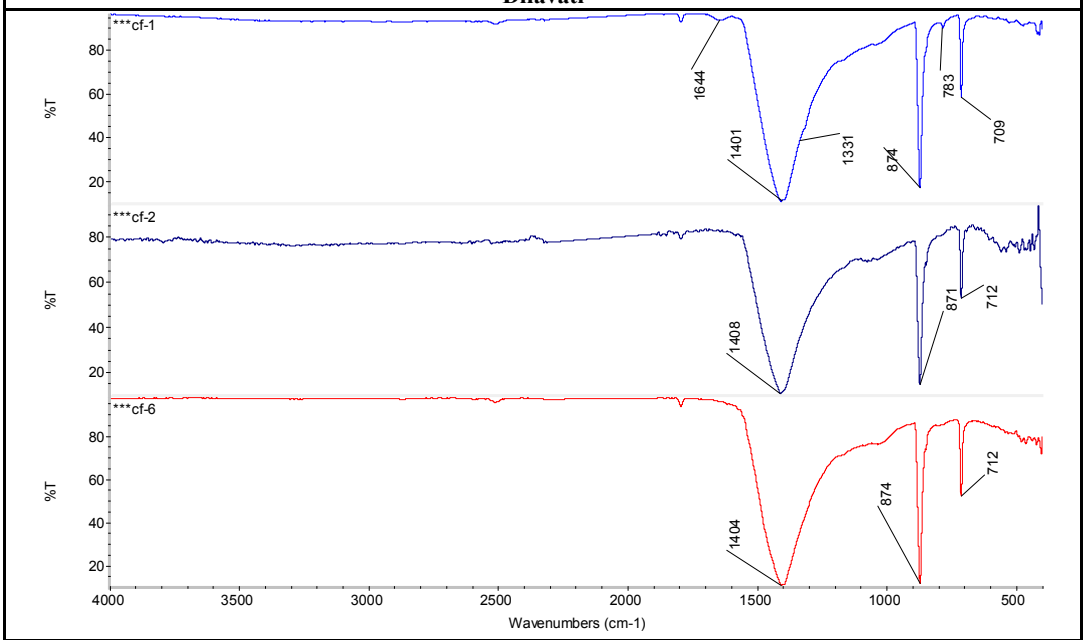
Tipologia	Collocazione	Canale		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Dino-Lite Campione**
D	Aula Baratto Parapetto verticale			1 CF-1
D	Rettorato Parapetto			5 CF-5
D	Rettorato Fregio sx			6 CF-6
D	Rettorato Fregio dx			7 CF-7

Tipologia	Collocazione	Giardino-Corte		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Campione**
ND	Colonna dx 1°piano			8 CF-8
D	Colonna sx 1° Piano			9 CF-9

- FT-IR in ATR

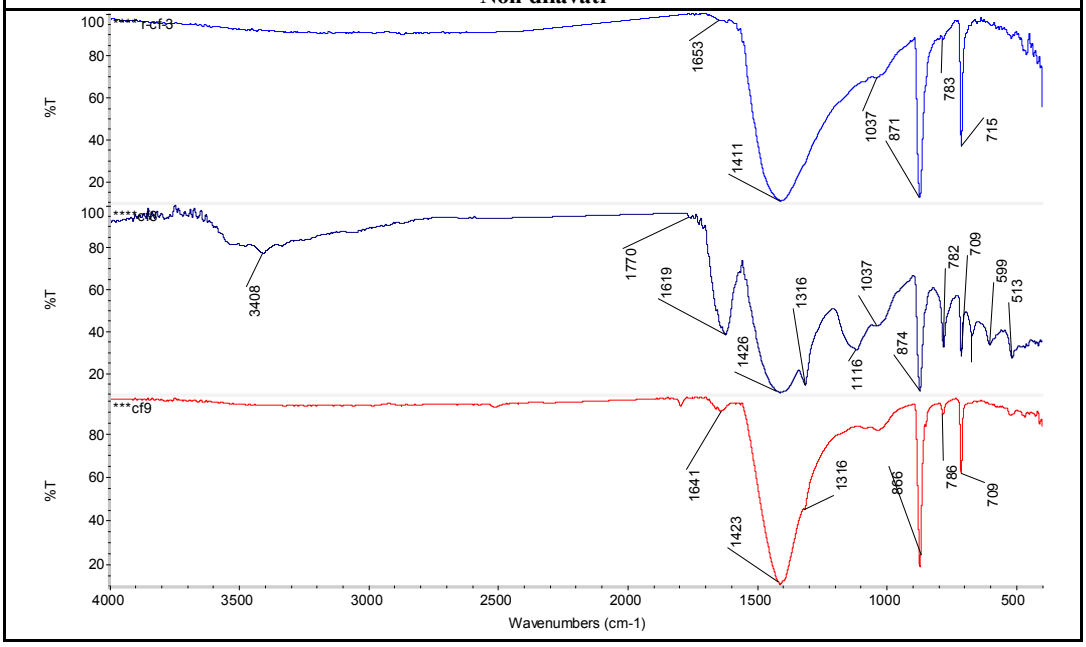
Cà Foscari

Dilavati



Cà Foscari

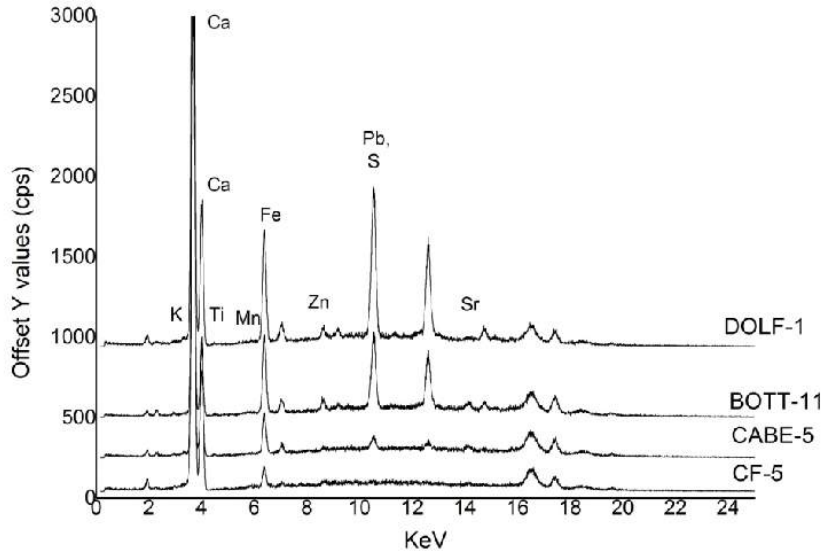
Non dilavati



Lunghezze d'onda (cm^{-1})	Gruppi Funzionali			
	OH^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	$C_2O_4^{2-}$
Stretch	≈3800 ≈3200	≈1400	≈1620 ≈1120	≈1650
Bend	≈1700-≈1600	≈870 ≈700	≈670 - 600	≈1000 ≈1300 ≈780

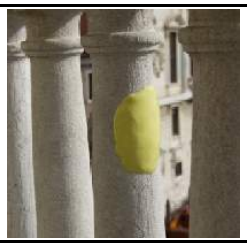
- XRF

Cà Foscari



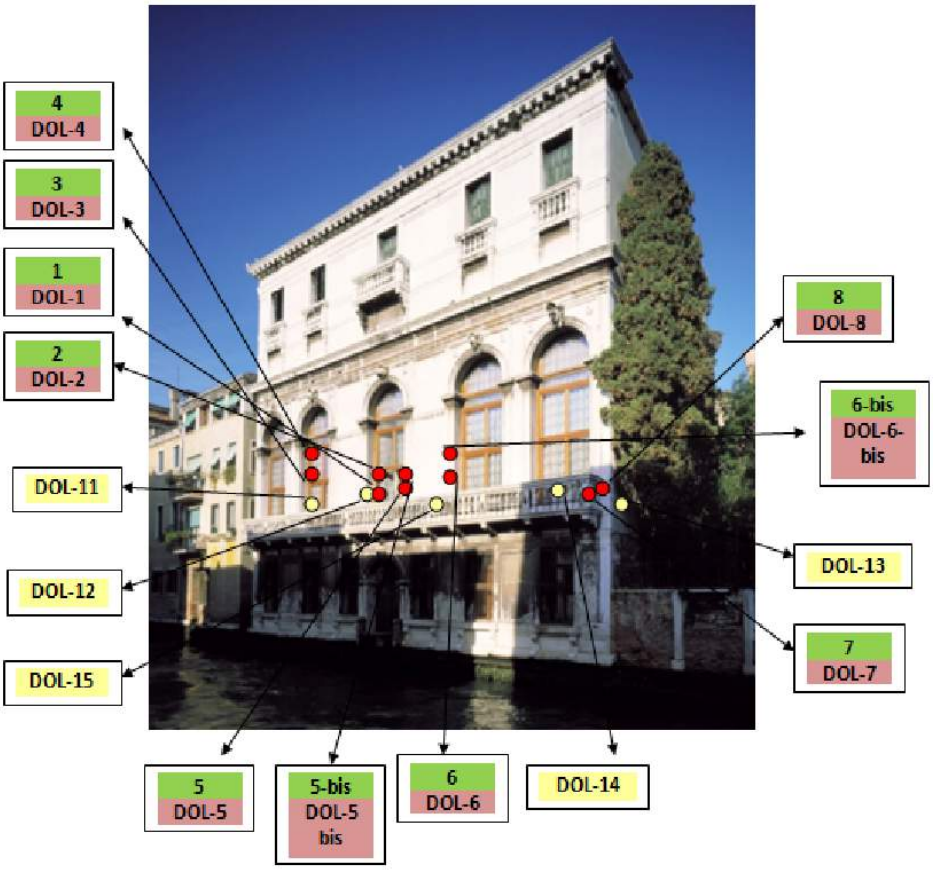
Campione	Orientamento	Parametri	Elementi								
			K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	Pb/S
CF-5	Canale	Energy(keV)	3,31	3,69	-	5,90	6,41	8,64	14,17	-	10,55
		Net (cps)	6,26	1004,06	-	4,72	24,31	5,85	3,31	-	2,12
		σ(err)	0,46	2,92	-	0,46	0,65	0,64	0,70	-	0,70

-Calchi

Tipologia	Collocazione	Ca Foscari	
			N°calco
M-D M-ND	Aula Baratto Colonnina C		CF-1
ND	Aula Baratto Colonnina C		CF-2
D	Aula Baratto Colonnina C		CF-3
M-D M-ND	Aula Baratto Colonnina C		CF-4
D	Colonna G		CF-5
ND	Colonna G		CF-6

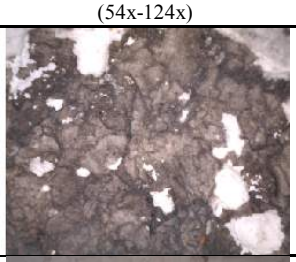
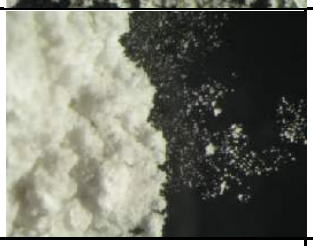
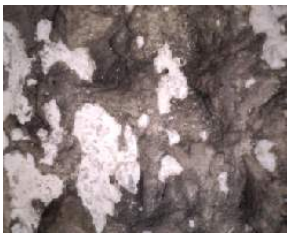
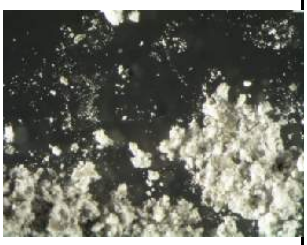
Tipologia	Collocazione	Ca Foscari	
			N°calco
ND	Colonna sopra		CF-7
ND	Rettorsto Balcone		CF-8
D	Rettorato Fronte Balcone		CF-9
D	Rettorato Fregio Sx		CF-10

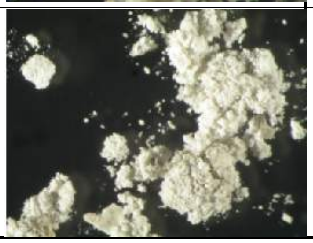
Cà Dolfin

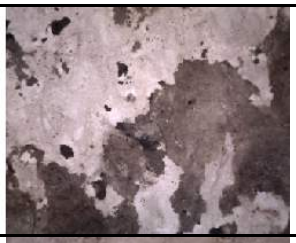


Legenda	
	Dino-Lite
	Campionamento
	Calco

- Dino-Lite e Microscopio ottico

Tipologia	**Collocazione**	**Canale**		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Dino-Lite Campione**
ND	Balcone Finestra centrale stipite dx interno			DOL-1
D				2 DOL-2
ND	Balcone 2° finestra stipite dx interno			3 DOL-3
D				4 DOL-4
D	Finestra centrale stipite esterno			5 DOL-5
ND				5-bis DOL-5-bis

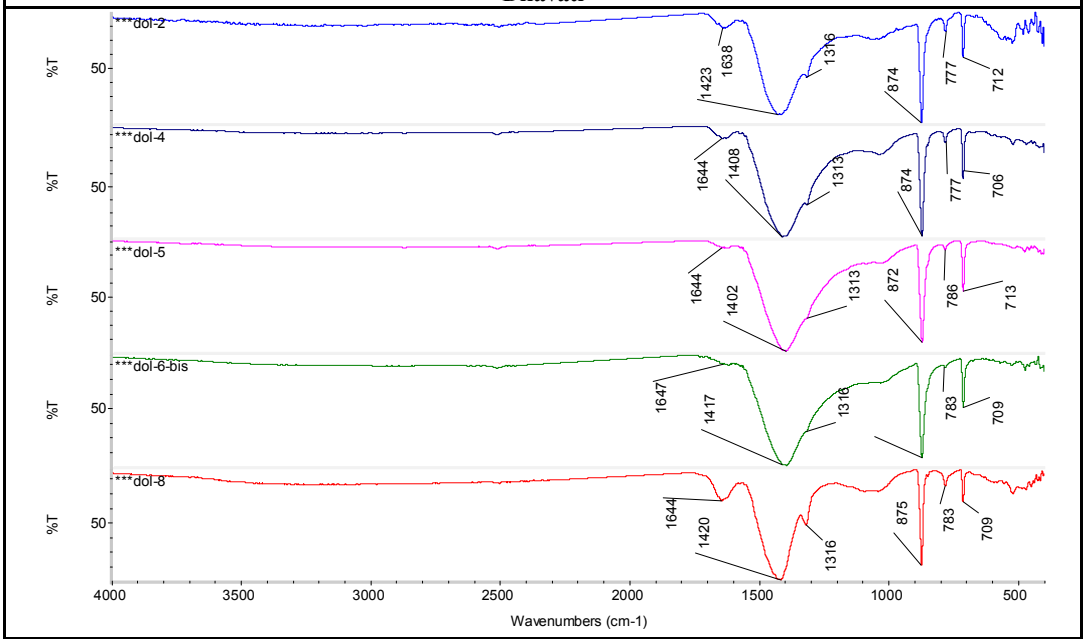
Tipologia	Collocazione	Canale		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Dino-Lite Campione**
ND	Balcone 2° finestra Stipite destro esterno			6 DOL-6
D				6-BIS DOL-6-bis

Tipologia	Collocazione	Giardino-Corte		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Dino-lite Campione**
ND	Balcone Colonnetta angolo			7 DOL-7
D				8 DOL-8

- FT-IR in ATR

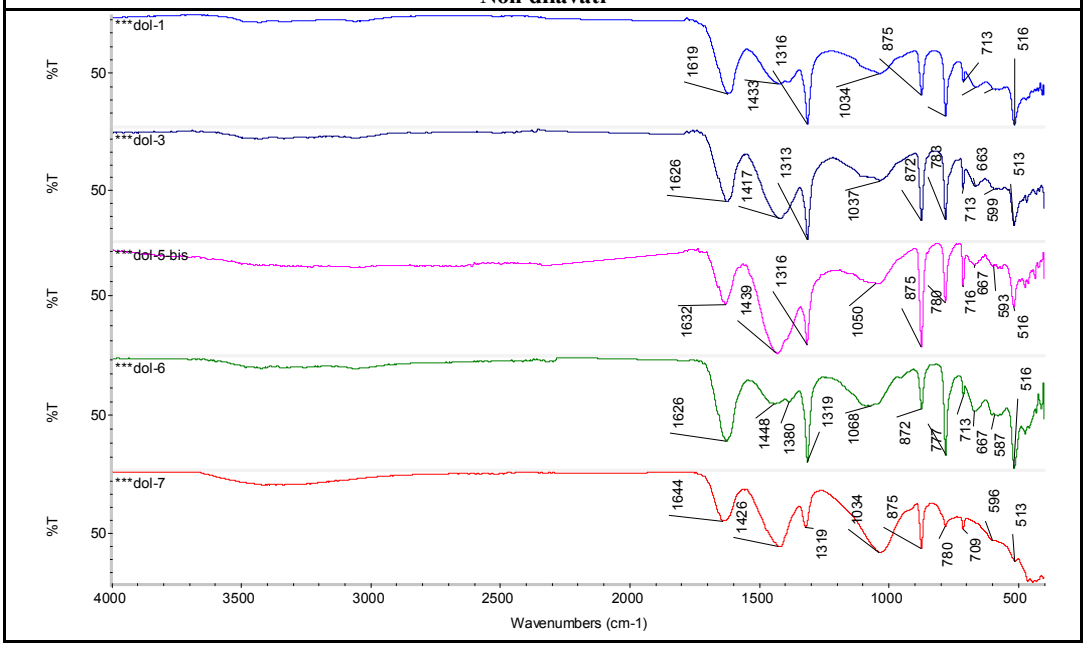
Cà Dolfin

Dilavati



Cà Dolfin

Non dilavati

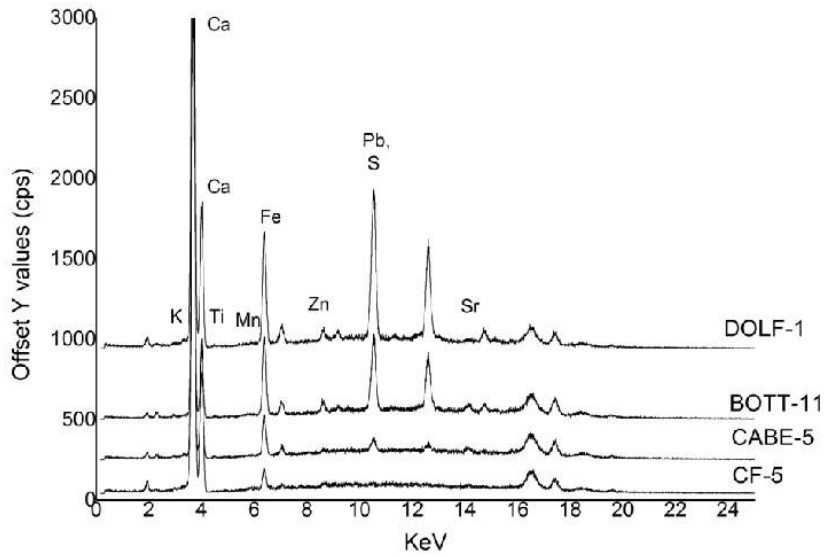


Lunghezze d'onda (cm^{-1})	Gruppi Funzionali			
	OH^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	$C_2O_4^{2-}$
Stretch	≈3800 ≈3200	≈1400	≈1620 ≈1120	≈1650

Bend	≈1700-≈1600	≈870 ≈700	≈670 - 600	≈1000 ≈1300 ≈780

- XRF

Cà Dolfin

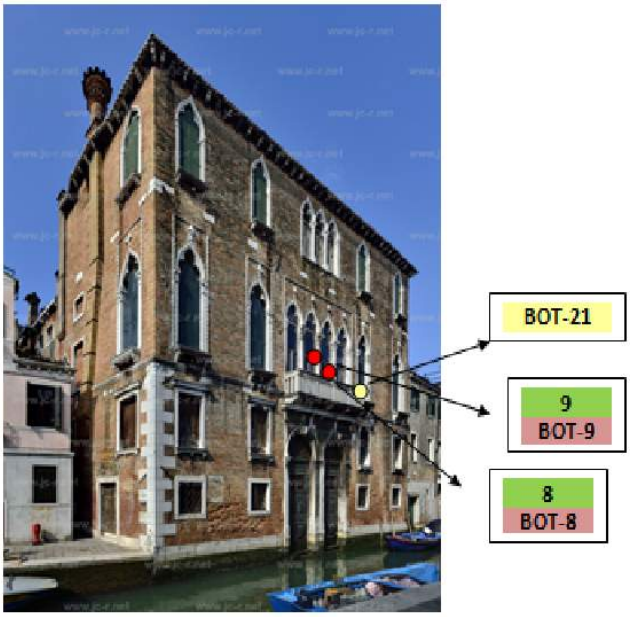


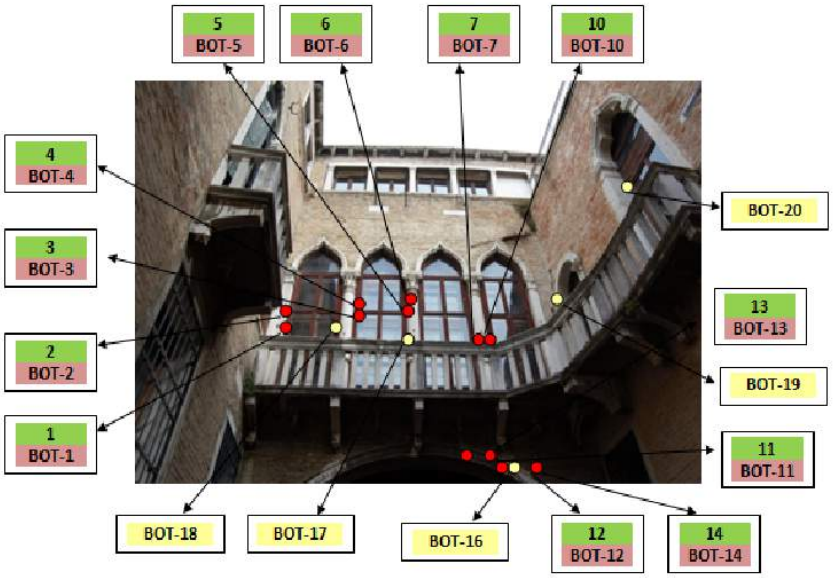
Campione	Orientamento	Parametri	Elementi								
			K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	Pb/S
DOL-1	Canale	Energy(keV)	3,31	3,69	-	5,90	6,41	8,64	14,17	4,47	10,55
		Net (cps)	7,94	934,01	-	2,23	142,73	15,88	2,50	1,83	246,03
		σ(err)	0,48	2,82	-	0,47	1,20	0,76	0,72	0,28	1,62

-Calchi

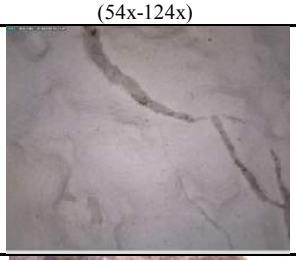
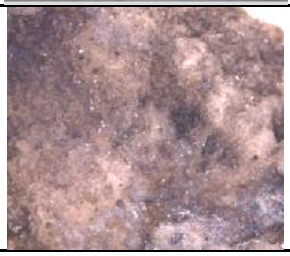
Tipologia	Collocazione	Cà Dolfin	
			N°calco
M-D M-ND	Canale Balcone 2° finestra		DOL-11
M-D M-ND	Canale Balcone finestra centrale		DOL-12
M-D M-ND	Giardino Balcone Sottosquadro		DOL-13
M-D M-ND	Canale Balcone Colonna angolare		DOL-14
M-D M-ND	Canale Balcone Fronte		DOL-15

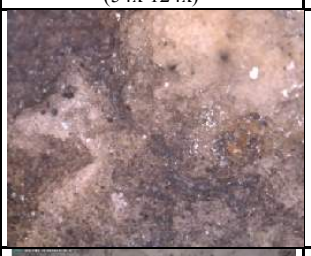
Cà Bottacin





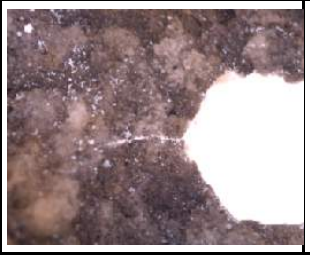
Legenda	
	Dino-Lite
	Campionamento
	Calco

Tipologia	Collocazione	Canale		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	Campione
D	Balcone 2° colonna sx			8 BOT-8
ND	Balcone Sottosquadro parapetto 2° colonna			9 BOT-9

Tipologia	Collocazione	Giardino-Corte		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	Dino-Lite Campione
ND	2° Piano Balcone 2° finestra Stipite destro			1 BOT-1
D	1° piano Finestra destra			2 BOT-2
ND	2° Piano Balcone 2° finestra Stipite sinistro interno			3 BOT-3

D				4 BOT-4

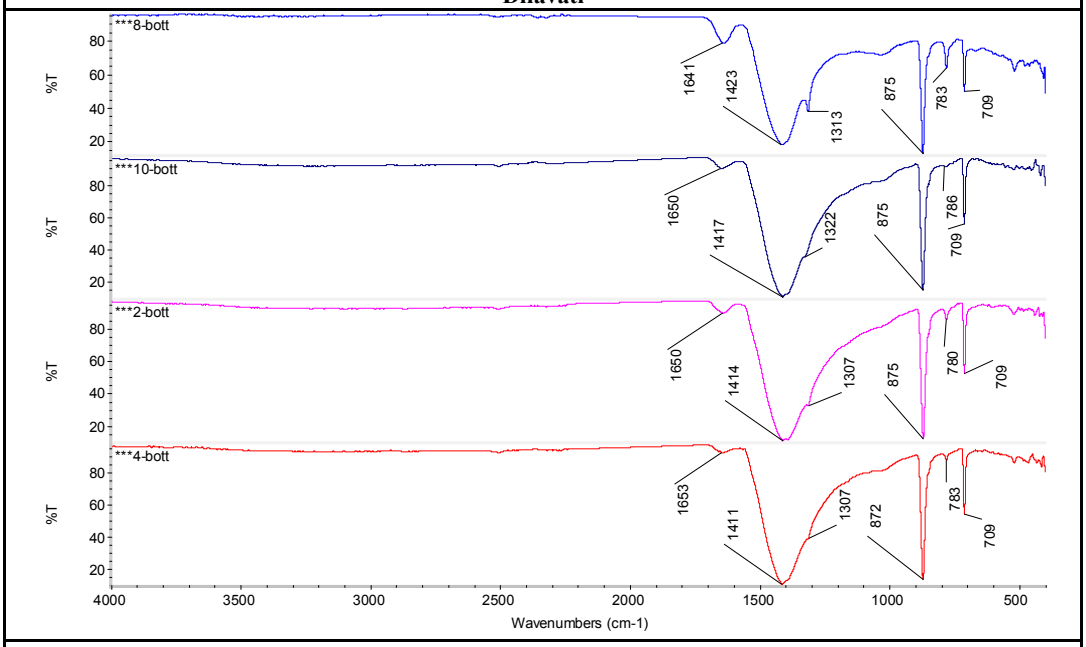
Tipologia	**Collocazione**	**Giardino-Corte**		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Dino-Lite Campione**
ND	2° Piano Balcone 2° finestra Stipite sinistro esterno			5 BOT-5
D				6 BOT-6
ND	Balcone Loggetta 2° colonna			7 BOT-7
ND	1° piano Finestra destra			10 BOT-10
ND	Ingresso arco			11 BOT-11

D	Ingresso Arco Finestra dx			12 BOT-12
ND	Ingresso Arco Finestra dx			13 BOT-13

- FT-IR in ATR

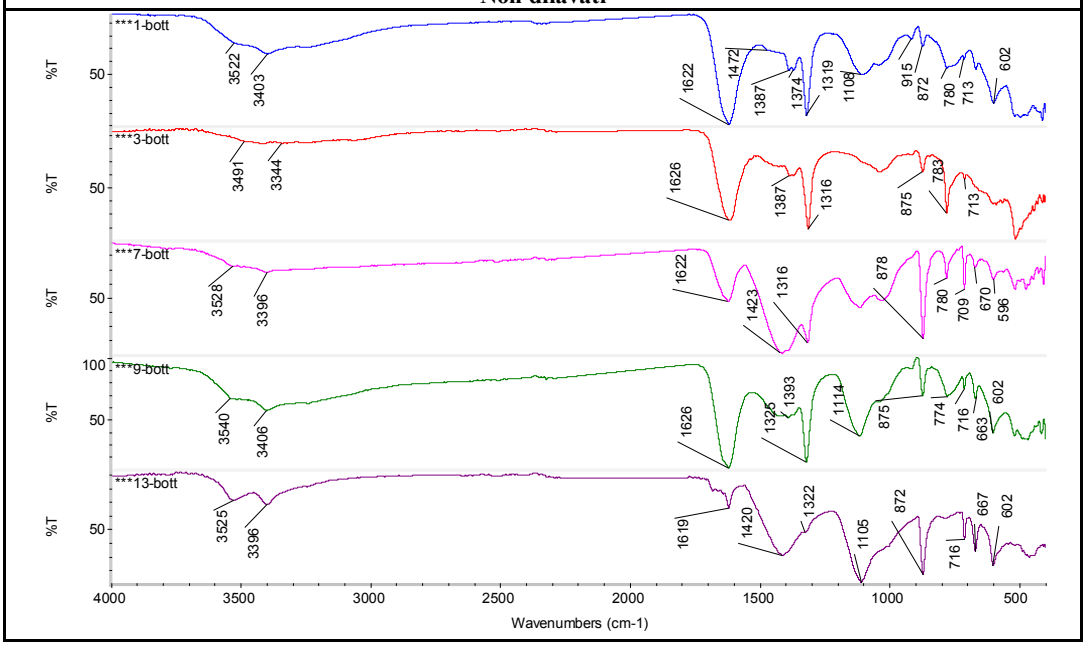
Cà Bottacin

Dilavati



Cà Bottacin

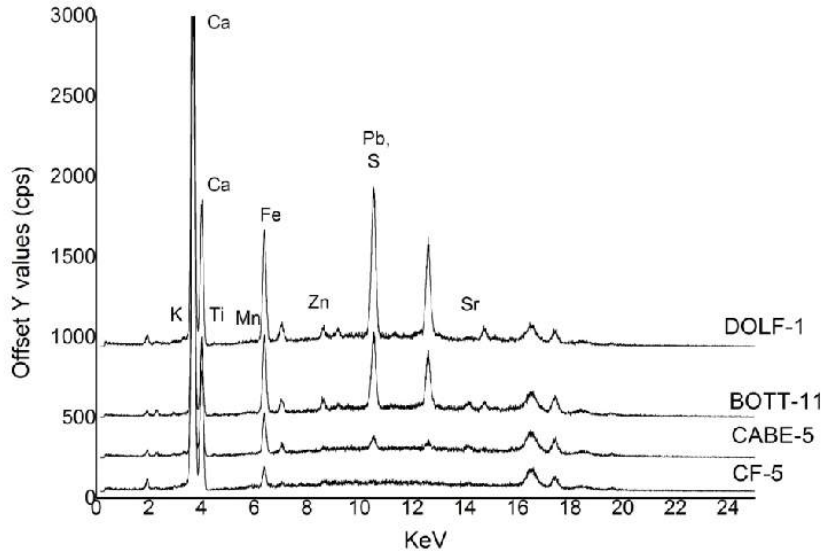
Non dilavati



Lunghezze d'onda (cm^{-1})	Gruppi Funzionali			
	OH^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	$C_2O_4^{2-}$
Stretch	≈3800 ≈3200	≈1400	≈1620 ≈1120	≈1650
Bend	≈1700-≈1600	≈870 ≈700	≈670 - 600	≈1000 ≈1300 ≈780

- XRF

Cà Bottacin



Campione	Orientamento	Parametri	Elementi								
			K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	Pb/S
BOT-11	Giardino-Corte	Energy(keV)	-	3,69	4,51	-	6,41	8,64	14,17	-	10,55
		Net (cps)	-	461,63	1,37	-	102,96	14,52	11,22	-	121,93
		σ(err)	-	1,98	0,29	-	1,03	0,72	0,81	-	1,24

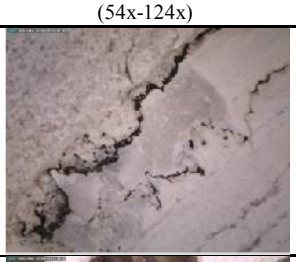
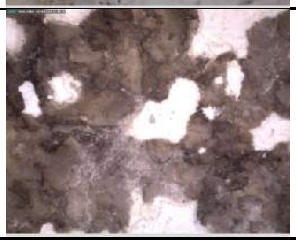
-Calchi

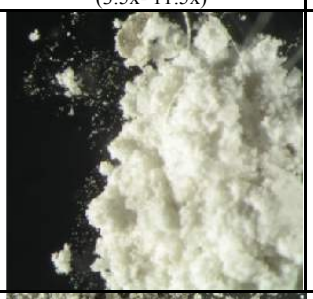
Tipologia	Collocazione	Cà Bottacin	
			N°calco
M-D M-ND	Ingresso Arco		BOT-16
M-D M-ND	Ingresso 2°Piano Colonna		BOT-17
M-D M-ND	Ingresso 2°Piano Colonna		BOT-18
M-D M-ND	Ingresso 2° finestra 2° Piano		BOT-19
M-D M-ND	Ingresso 1° finestra 2° Piano		BOT-20
M-D M-ND	Canale Balcone Fregio		BOT-21

Cà Bembo

Legenda	
	Dino-Lite
	Campionamento
	Calco

- Dino-Lite e Microscopio ottico

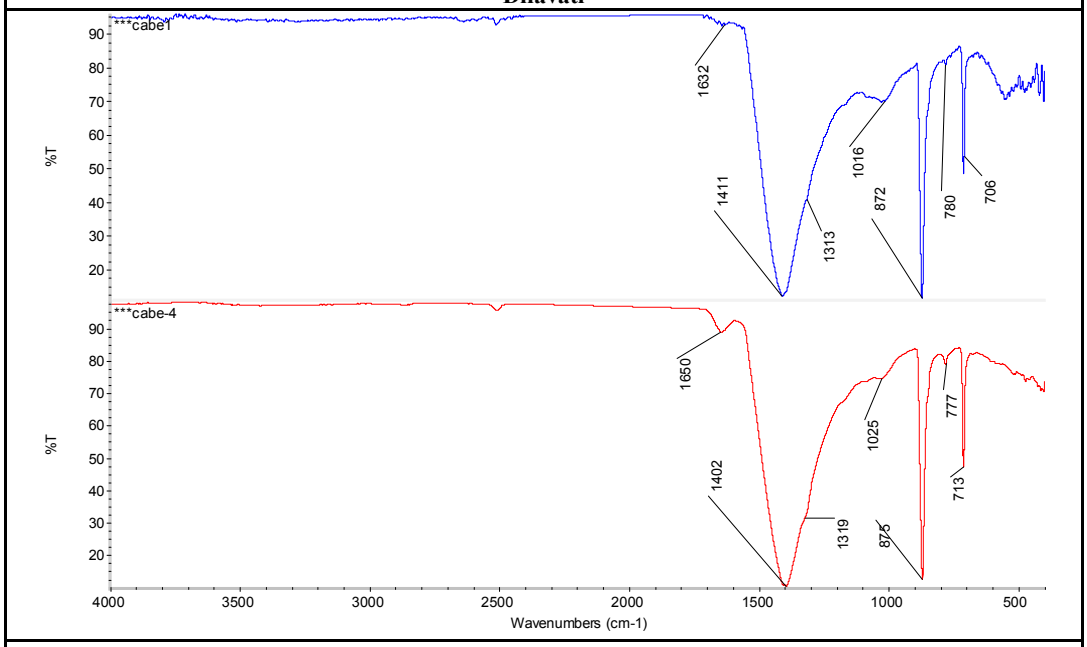
Tipologia	Collocazione	Canale		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Dino-Lite Campione**
D	Balcone Stipite sx destra esterno			1 CABE-1
ND	Balcone Stipite sx destra interno			2 CABE-2
Cristalli	Balcone Parapetto centrale superiore			3 CABE-3

Tipologia	Collocazione	Giardino-Corte		
		Dino-Lite (54x-124x)	Mic. Ottico (3.5x- 11.5x)	**Campione**
D	1° piano Balcone colonna sx			4 CABE-4
ND	1°piano balcone colonna dx			5 CABE-5

- FT-IR in ATR

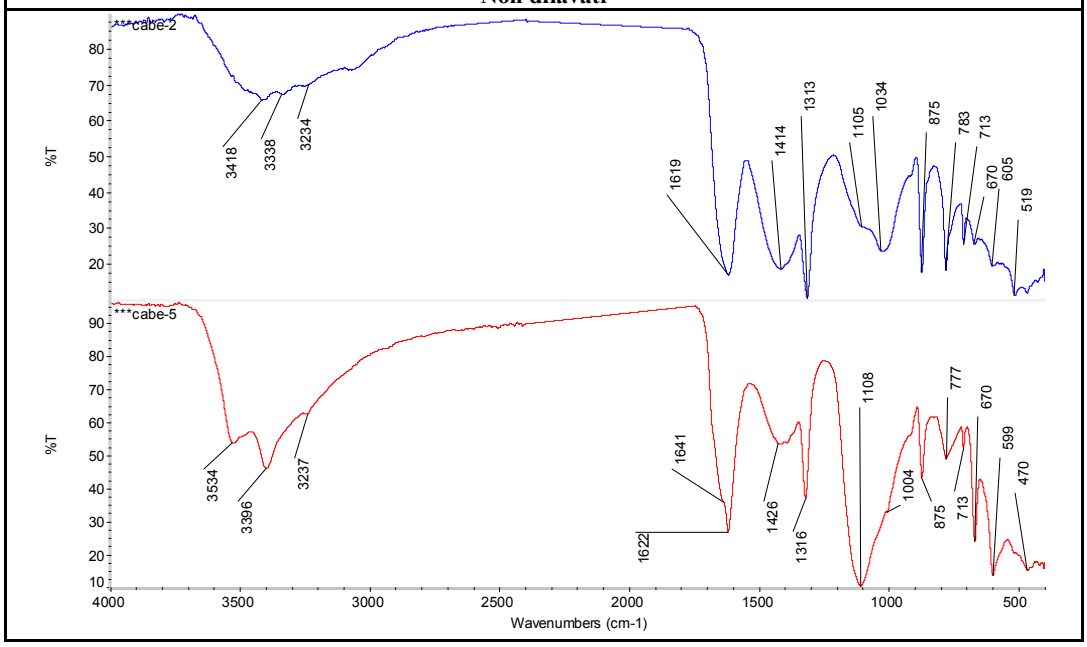
Cà Bembo

Dilavati



Cà Bembo

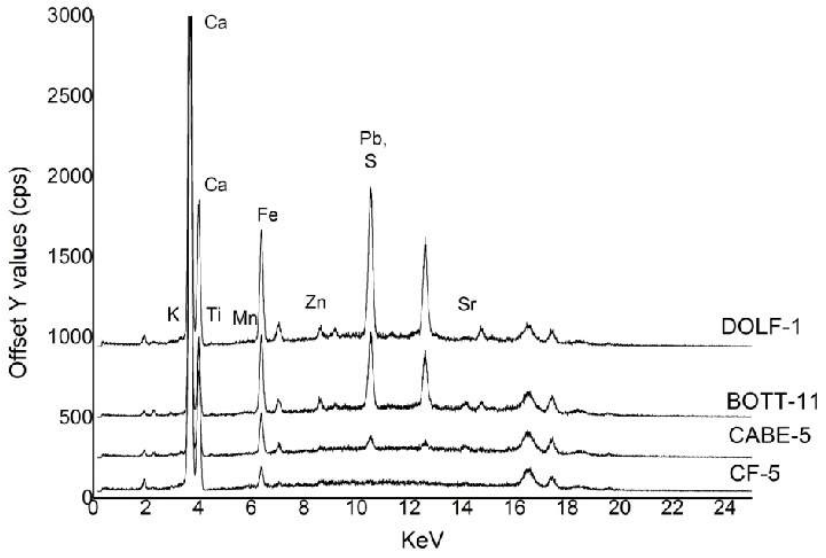
Non dilavati



Lunghezze d'onda (cm^{-1})	Gruppi Funzionali			
	OH^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	$C_2O_4^{2-}$
Stretch	≈3800 ≈3200	≈1400	≈1620 ≈1120	≈1650
Bend	≈1700-≈1600	≈870 ≈700	≈670 - 600	≈1000 ≈1300 ≈780

- XRF

Cà Bembo



Campione	Orientamento	Parametri	Elementi								
			K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	Pb/S
CABE-5	Giardino-Corte	Energy(keV)	3,31	3,69	4,51	-	6,41	8,64	14,17	-	10,55
		Net (cps)	3,88	542,88	1,12	-	51,58	4,51	8,12	-	20,38
		σ(err)	0,38	2,15	0,29	-	0,81	0,66	0,78	-	0,82

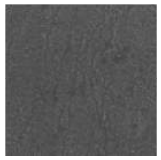
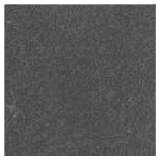
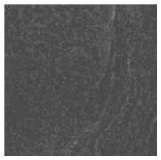
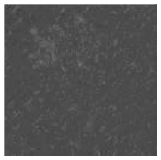
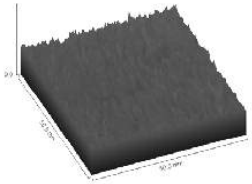
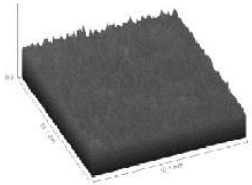
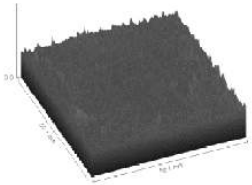
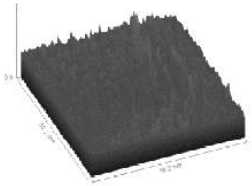
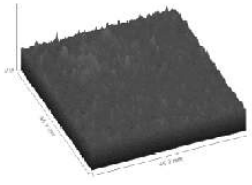
-Calchi

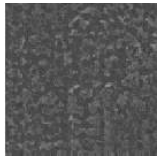
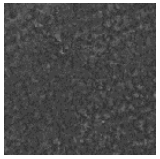
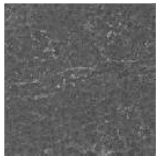
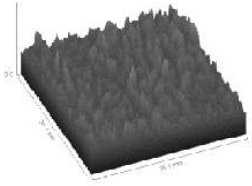
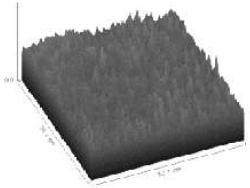
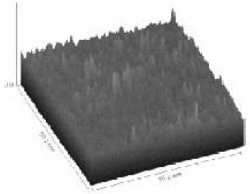
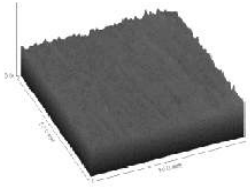
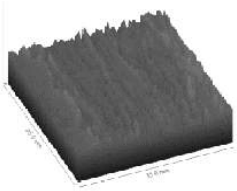
Tipologia	Collocazione	Ca Bembo	
			N°calco
M-D M-ND	Giardino Colonna sx		CABE-22
D	Giardino Colonna dx		CABE-23
M-D M-ND	Giardino Colonna sx		CABE-24
D	Canale Colonna		CABE-25
M-D M-ND	Canale Stipite In alto		CABE-26
M-D M-ND	Canale Stipite basso		CABE-27
M-D M-ND	Canale Colonna		CABE-28

APPENDICE II: Surface Plots

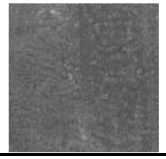
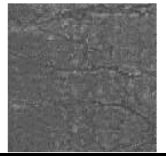
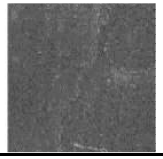
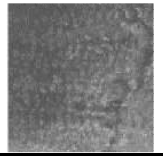
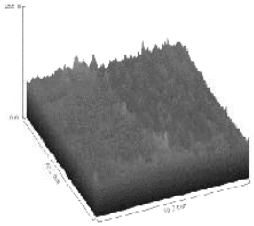
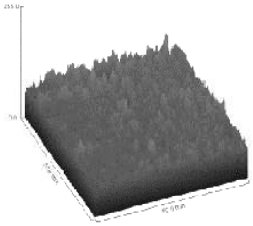
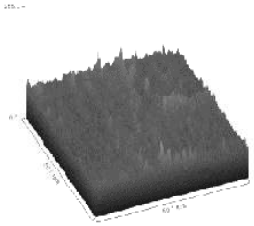
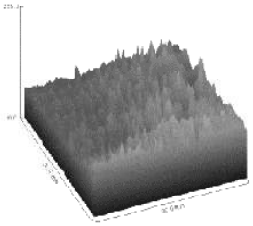
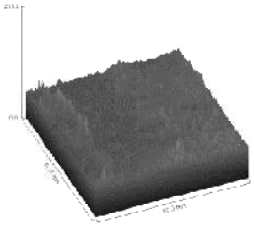
C: Superficie orientata verso il canale G:superficie orientata verso il giardino-corte D:superficie dilavata ND:superficie soggetta a deposizione M-D M-ND: superficie metà soggetta a dilavamento e metà soggetta a deposizione

Cà Foscari

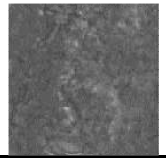
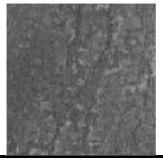
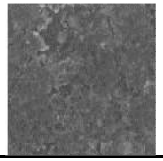
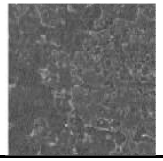
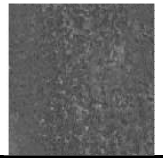
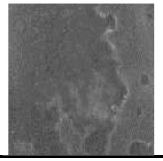
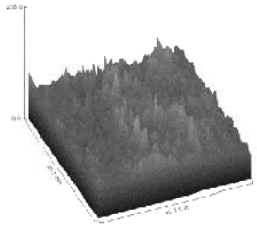
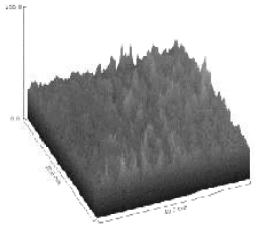
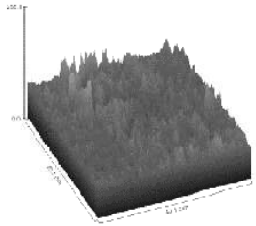
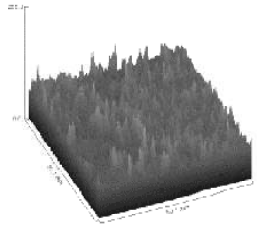
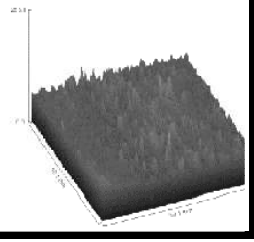
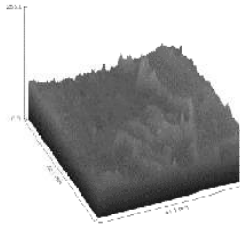
CF-1		**CF-2**		**CF-3**		**CF-4**		**CF-5**	
C	M-D M-ND	C	ND	C	D	C	M-D M-ND	G	D
									
									

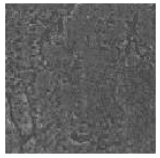
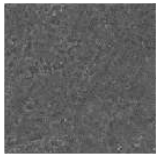
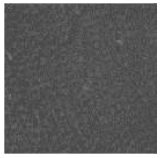
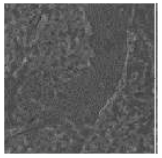
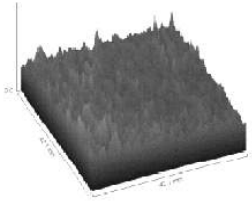
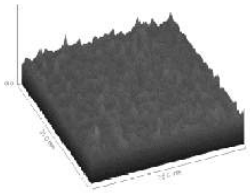
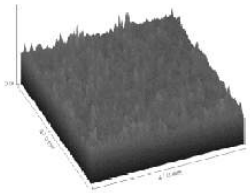
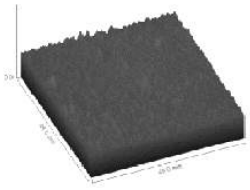
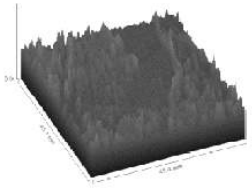
CF-6		**CF-7**		**CF-8**		**CF-9**		**CF-10**	
G	ND	G	ND	C	ND	C	D	C	D
									
									

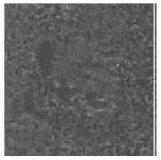
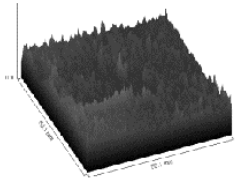
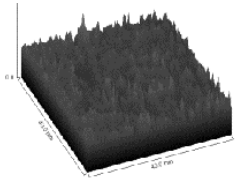
Cà Dolfin

DOL-11		DOL-12		DOL-13		DOL-14		DOL-15	
C	M-N M-ND	C	D	G	M-N M-ND	C	M-D M-ND	C	M-D M-ND
									
									

Cà Bottacin

BOT-16		BOT-17		BOT-18		BOT-19		BOT-20		BOT-21	
G	M-D M-ND	G	M-D M-ND	G	M-D M-ND	G	M-D M-ND	G	M-D M-ND	C	M-D M-ND
											
											

Cà Bembo									
CABE-22		**CABE-23**		**CABE-24**		**CABE-25**		**CABE-26**	
G	M-D M-ND	G	D	G	M-N M-ND	C	D	C	M-N M-ND
									
									

CABE-27		**CABE-28**	
C	M-N M-ND	C	M-N M-ND
			
			

APPENDICE III: Dati profilo metrici

A:area compresa tra il profilo e la linea media, L:lunghezza di base, L_0: lunghezza del profilo rugoso, Lr: Rugosità, Ra: rugosità media (in grigio valore Ra massimo raggiunto per il calco analizzato), Rmax: irregolarità massima tra picchi e valli, R^2: coefficiente di dispersione

Cà Foscari										
Orientamento	**Calco**	**Tipologia**	**N° sezione**	**A**	**L**	**L_0**	**Lr**	**R^2**	**Ra**	**Rmax**
C	**CF-1**	M-D M-ND	1	24,54	55	71,49	1,30	0,01	0,45	2,29
			2	38,94	70	92,47	1,32	0,08	0,56	2,44
			3	46,57	78	91,15	1,17	0,59	0,60	2,32
			4	80,58	83	95,39	1,15	0,61	0,97	3,95
			5	52,88	81	97,23	1,20	0,16	0,65	2,69
			6	47,85	74	85,35	1,15	0,01	0,65	3,65
			7	69,67	70	80,92	1,16	0,00	1,00	4,75
C	**CF-2**	ND	1	18,40	54	66,59	1,23	0,83	0,34	1,57
			2	56,89	67	79,21	1,18	0,21	0,85	3,38
			3	48,13	70	80,18	1,15	0,33	0,69	3,75
			4	55,92	69	79,58	1,15	0,00	0,81	3,88
			5	55,28	74	82,98	1,12	0,14	0,75	3,31
			6	71,24	77	88,24	1,15	0,14	0,93	4,27
			7	80,54	72	82,48	1,15	0,09	1,12	5,59
			8	39,96	67	77,19	1,15	0,51	0,60	2,83
C	**CF-3**	D	1	41,06	47	58,11	1,24	0,01	0,87	3,10
			2	27,65	54	62,95	1,17	0,00	0,51	4,06
			3	35,12	63	71,72	1,14	0,06	0,56	3,38
			4	25,42	74	87,43	1,18	0,06	0,34	3,49
			5	36,29	78	96,77	1,24	0,14	0,47	2,72
			6	56,89	77	94,54	1,23	0,23	0,74	4,06
			7	47,49	77	96,08	1,25	0,00	0,62	3,31
C	**CF-4**	M-D M-ND	8	15,62	65	75,44	1,16	0,07	0,24	2,20
			9	41,06	54	61,60	1,14	0,01	0,76	3,10
			1	19,25	57	70,42	1,24	0,17	0,34	2,44
			2	22,67	62	72,78	1,17	0,35	0,37	2,57
			3	29,72	76	86,16	1,13	0,56	0,39	2,26
			4	14,71	81	95,53	1,18	0,78	0,18	1,13
			5	43,33	77	92,17	1,20	0,51	0,56	2,98
			6	44,59	70	79,32	1,13	0,06	0,64	3,37
			7	22,10	59	67,03	1,14	0,56	0,37	2,31
			8	4,88	42	48,33	1,15	0,91	0,12	0,78
G	**CF-5**	D	1	25,01	56	66,90	1,19	0,55	0,45	2,69
			2	43,82	62	74,52	1,20	0,16	0,71	3,27
			3	24,48	66	74,70	1,13	0,52	0,37	1,89
			4	17,37	66	82,45	1,25	0,52	0,26	2,00
			5	22,79	58	63,47	1,09	0,43	0,39	2,06
			6	5,70	43	49,74	1,16	0,77	0,13	1,33

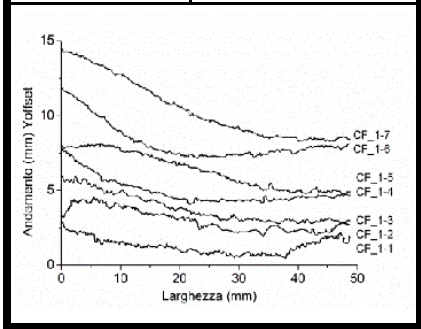
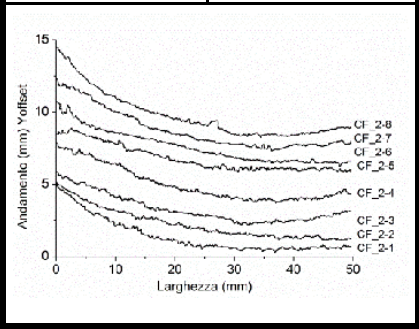
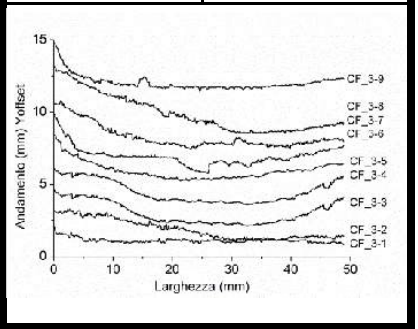
Cà Foscari										
Orientamento	**Calco**	**Tipologia**	**N° sezione**	**A**	**L**	**L_0**	**Lr**	**R^2**	**Ra**	**Rmax**
G	**CF-6**	ND	1	17,73	42	49,40	1,18	0,21	0,42	2,03
			2	17,26	55	70,68	1,29	0,59	0,31	2,24
			3	12,41	58	69,33	1,20	0,06	0,21	1,76
			4	28,28	56	72,30	1,29	0,18	0,50	2,64
G	**CF-7**	ND	1	8,69	34	42,72	1,26	0,32	0,26	2,16
			2	22,84	54	78,20	1,45	0,12	0,42	1,92
			3	14,81	68	83,64	1,23	0,28	0,22	1,42
			4	21,95	79	96,47	1,22	0,33	0,28	1,69
			5	21,24	78	91,28	1,17	0,46	0,27	1,68
			6	39,30	75	98,87	1,32	0,23	0,52	3,32
			7	27,45	65	96,11	1,48	0,10	0,42	2,35
			8	36,75	51	58,35	1,14	0,00	0,72	3,16
C	**CF-8**	ND	1	12,33	46	53,98	1,17	0,49	0,27	1,36
			2	5,77	57	68,95	1,21	0,96	0,10	0,85
			3	14,43	62	70,06	1,13	0,66	0,23	1,55
			4	19,74	65	82,26	1,27	0,00	0,30	2,17
			5	16,20	63	71,54	1,14	0,16	0,26	1,98
			6	8,98	57	64,67	1,13	0,43	0,16	1,21
			7	7,96	47	55,27	1,18	0,19	0,17	1,05
C	**CF-9**	D	1	8,75	42	46,60	1,11	0,69	0,21	1,73
			2	16,06	59	65,42	1,11	0,48	0,27	1,38
			3	17,86	65	70,87	1,09	0,42	0,27	1,73
			4	17,16	68	75,49	1,11	0,68	0,25	1,49
			5	23,23	70	77,38	1,11	0,38	0,33	1,57
			6	15,34	67	75,43	1,13	0,38	0,23	1,22
			7	7,27	56	62,98	1,12	0,63	0,13	1,04
			8	8,80	38	70,96	1,87	0,56	0,23	1,72
C	**CF-10**	D	1	28,63	43	57,36	1,33	0,03	0,67	4,34
			2	31,66	44	56,19	1,28	0,09	0,72	4,49
			3	43,86	43	54,42	1,27	0,04	1,02	5,88
			4	53,27	45	56,68	1,26	0,00	1,18	6,96
			5	49,76	45	55,26	1,23	0,20	1,11	5,05
			6	38,36	44	57,70	1,31	0,01	0,87	5,36
			7	46,76	49	63,82	1,30	0,14	0,95	5,97

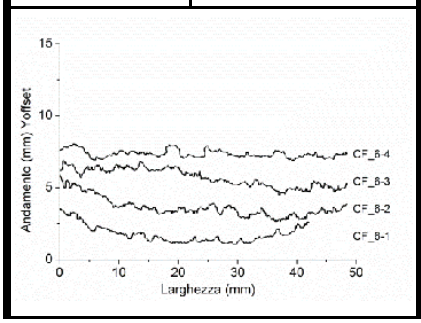
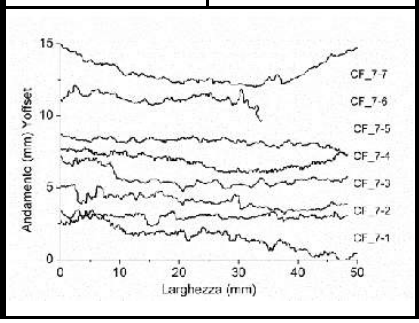
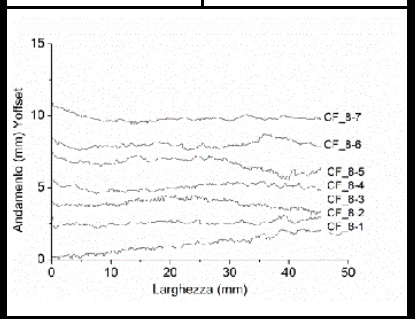
Cà Dolfin										
Orientamento	**Calco**	**Tipologia**	**N° sezione**	**A**	**L**	**L_0**	**Lr**	**R^2**	**Ra**	**Rmax**
C	**DOL-11**	M-D M-ND	1	20,53	71	82,48	1,16	0,34	0,29	2,44
			2	19,81	80	102,87	1,29	0,02	0,25	2,01
			3	9,76	86	98,38	1,14	0,47	0,11	1,15
			4	22,45	86	114,48	1,33	0,29	0,26	1,94
			5	21,80	83	95,89	1,16	0,53	0,26	1,51
			6	23,45	83	106,09	1,28	0,03	0,28	1,86
			7	15,33	68	87,72	1,29	0,08	0,23	1,93
C	**DOL-12**	M-D M-ND	1	14,70	51	63,94	1,25	0,40	0,29	2,88
			2	21,10	67	88,85	1,33	0,30	0,31	2,23
			3	34,18	76	100,30	1,32	0,07	0,45	2,34
			4	19,20	81	98,51	1,22	0,43	0,24	1,38
			5	21,27	82	107,44	1,31	0,60	0,26	2,34
			6	22,47	79	103,85	1,31	0,44	0,28	1,70
			7	16,04	71	99,16	1,40	0,73	0,23	1,73
			8	17,96	62	83,43	1,35	0,06	0,29	2,75
G	**DOL-13**	M-D M-ND	1	23,16	62	85,54	1,38	0,26	0,37	2,10
			2	32,59	74	107,78	1,46	0,13	0,44	1,89
			3	33,53	77	104,28	1,35	0,02	0,44	3,28
			4	26,55	76	96,46	1,27	0,11	0,35	3,54
			5	27,16	79	97,37	1,23	0,07	0,34	1,92
			6	13,83	72	90,74	1,26	0,28	0,19	2,33
			7	26,83	76	95,17	1,25	0,17	0,35	2,56
			8	38,29	67	82,98	1,24	0,02	0,57	2,68
C	**DOL-14**	M-D M-ND	1	9,04	55	71,10	1,29	0,72	0,16	1,20
			2	10,61	63	78,08	1,24	0,78	0,17	1,12
			3	10,36	69	79,37	1,15	0,08	0,15	0,96
			4	8,47	71	88,14	1,24	0,01	0,12	0,88
			5	9,72	68	82,34	1,21	0,12	0,14	1,28
			6	16,60	68	79,68	1,17	0,55	0,24	1,95
			7	8,93	67	77,84	1,16	0,86	0,13	0,93
C	**DOL-15**	M-D M-ND	1	15,87	61	73,83	1,21	0,85	0,26	2,52
			2	17,67	72	83,64	1,16	0,43	0,25	1,19
			3	21,76	76	88,98	1,17	0,33	0,29	1,45
			4	31,79	79	93,32	1,18	0,01	0,40	1,75
			5	20,90	76	93,53	1,23	0,05	0,27	1,80
			6	15,96	74	85,59	1,16	0,30	0,22	1,08
			7	24,80	67	80,91	1,21	0,24	0,37	1,89
			8	17,25	61	80,65	1,32	0,33	0,28	1,74

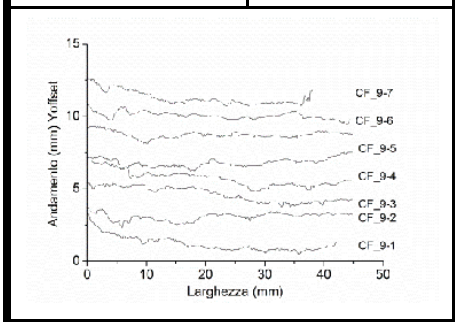
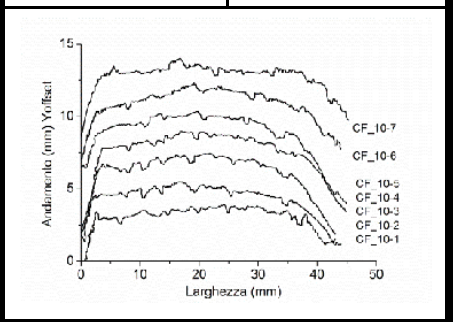
Cà Bottacin										
Orientamento	**Calco**	**Tipologia**	**N° sezione**	**A**	**L**	**L_0**	**Lr**	**R^2**	**Ra**	**Rmax**
G	**BOT-16**	M-D M-ND	1	75,56	35,00	44,34	1,27	0,05	2,16	4,78
			2	23,97	55,00	68,29	1,24	0,00	0,44	3,40
			3	37,03	76,00	127,61	1,68	0,28	0,49	4,68
			4	33,89	67,00	90,47	1,35	0,42	0,51	4,88
			5	29,99	37,00	114,08	3,08	0,02	0,81	2,56
			6	29,57	66,00	80,92	1,23	0,04	0,45	2,34
			7	75,26	62,00	93,43	1,51	0,05	1,21	4,81
G	**BOT-17**	M-D M-ND	1	12,11	43,00	54,34	1,26	0,07	0,28	1,78
			2	13,51	54,00	64,78	1,20	0,42	0,25	2,03
			3	14,07	59,00	71,00	1,20	0,20	0,24	2,00
			4	13,34	61,00	77,40	1,27	0,08	0,22	1,60
			5	19,37	55,00	65,85	1,20	0,27	0,35	2,38
			6	9,73	39,00	47,79	1,23	0,01	0,25	2,00
G	**BOT-18**	M-D M-ND	1	10,36	37,00	58,72	1,59	0,02	0,28	1,73
			2	29,82	51,00	60,86	1,19	0,18	0,58	4,07
			3	43,90	60,00	76,12	1,27	0,06	0,73	3,37
			4	62,94	58,00	68,65	1,18	0,08	1,09	4,81
			5	36,74	49,00	58,66	1,20	0,00	0,75	3,46
			6	3,79	32,00	37,71	1,18	0,71	0,12	0,82
G	**BOT-19**	M-D M-ND	1	16,16	39,00	49,11	1,26	0,11	0,41	2,28
			2	19,49	59,00	73,49	1,25	0,03	0,33	2,15
			3	28,07	70,00	88,33	1,26	0,02	0,40	2,76
			4	41,57	73,00	91,89	1,26	0,03	0,57	2,77
			5	36,24	70,00	83,03	1,19	0,30	0,52	2,83
			6	25,41	73,00	92,08	1,26	0,02	0,35	2,53
			7	20,21	53,00	78,07	1,47	0,45	0,38	2,97
G	**BOT-20**	M-D M-ND	1	7,08	35,00	42,14	1,20	0,03	0,20	1,19
			2	8,00	52,00	60,60	1,17	0,73	0,15	1,23
			3	16,21	60,00	70,04	1,17	0,44	0,27	1,81
			4	15,59	65,00	75,09	1,16	0,57	0,24	1,61
			5	30,83	67,00	82,29	1,23	0,38	0,46	2,24
			6	16,81	66,00	76,78	1,16	0,31	0,25	3,30
			7	40,69	64,00	78,38	1,22	0,00	0,64	2,89
			8	10,64	32,00	49,65	1,55	0,06	0,33	2,48
C	**BOT-21**	M-D M-ND	1	33,13	47,00	56,54	1,20	0,20	0,70	4,42
			2	29,85	57,00	69,62	1,22	0,00	0,52	2,71
			3	29,92	60,00	83,11	1,39	0,02	0,50	3,11
			4	30,53	59,00	70,23	1,19	0,01	0,52	2,08
			5	37,96	58,00	71,60	1,23	0,02	0,65	2,58
			6	28,60	46,00	55,04	1,20	0,16	0,62	3,09
			7	8,54	32,00	37,63	1,18	0,05	0,27	2,04

Cà Bembo										
Orientamento	**Calco**	**Tipologia**	**N° sezione**	**A**	**L**	**L_0**	**Lr**	**R^2**	**Ra**	**Rmax**
G	**CABE-22**	M-D M-ND	1	11,29	38	53,02	1,40	0,01	0,30	1,75
			2	11,07	55	74,00	1,35	0,00	0,20	2,92
			3	12,24	65	82,80	1,27	0,31	0,19	2,21
			4	16,04	68	83,82	1,23	0,18	0,24	1,98
			5	23,74	65	82,34	1,27	0,23	0,37	3,47
			6	17,21	57	73,94	1,30	0,08	0,30	3,08
			7	8,08	35	45,87	1,31	0,02	0,23	2,17
G	**CABE-23**	D	1	7,46	32	35,40	1,11	0,11	0,23	1,51
			2	7,22	37	42,11	1,14	0,05	0,20	1,24
			3	8,15	41	46,59	1,14	0,53	0,20	1,24
			4	12,39	41	46,00	1,12	0,04	0,30	1,99
			5	14,38	40	45,78	1,14	0,14	0,36	2,13
			6	6,50	30	35,23	1,17	0,36	0,22	1,65
			7	5,33	24	28,39	1,18	0,41	0,22	1,58
G	**CABE-24**	M-D M-ND	1	5,07	31	39,35	1,27	0,00	0,16	1,68
			2	15,81	57	75,17	1,32	0,18	0,28	2,84
			3	8,94	63	79,99	1,27	0,13	0,14	2,14
			4	14,00	67	85,42	1,27	0,48	0,21	1,60
			5	16,29	68	86,46	1,27	0,47	0,24	2,05
			6	13,23	53	64,43	1,22	0,68	0,25	1,81
			7	14,62	35	46,88	1,34	0,45	0,42	2,10
C	**CABE-25**	D	1	6,26	37	44,45	1,20	0,42	0,17	1,24
			2	9,04	55	69,17	1,26	0,41	0,16	1,78
			3	19,45	69	80,16	1,16	0,24	0,28	2,32
			4	21,03	74	86,03	1,16	0,38	0,28	2,68
			5	16,57	71	81,04	1,14	0,60	0,23	2,50
			6	12,39	67	74,93	1,12	0,68	0,18	1,91
			7	13,07	41	46,80	1,14	0,19	0,32	2,17
C	**CABE-26**	M-D M-ND	1	15,33	45	65,37	1,45	0,26	0,34	2,29
			2	26,84	59	79,20	1,34	0,02	0,45	3,62
			3	35,00	64	83,60	1,31	0,00	0,55	4,01
			4	37,54	60	75,62	1,26	0,23	0,63	3,77
			5	27,14	58	73,73	1,27	0,04	0,47	3,14
			6	18,31	48	59,43	1,24	0,04	0,38	2,93

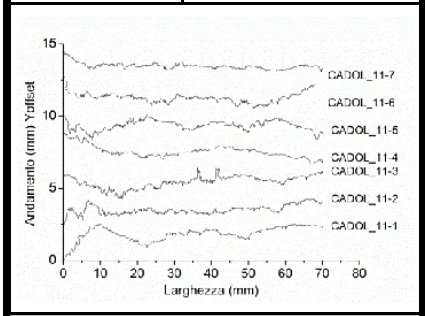
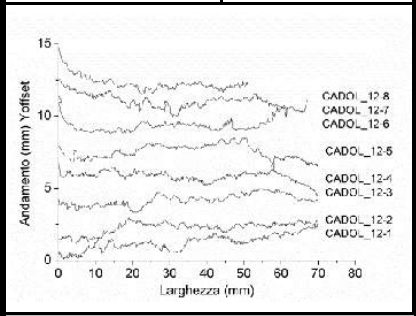
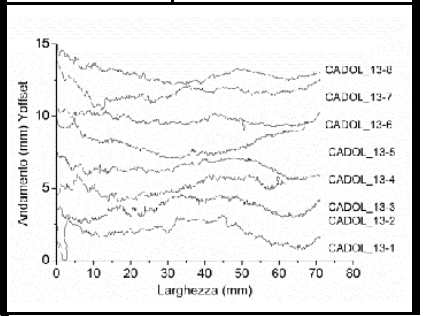
Cà Foscari

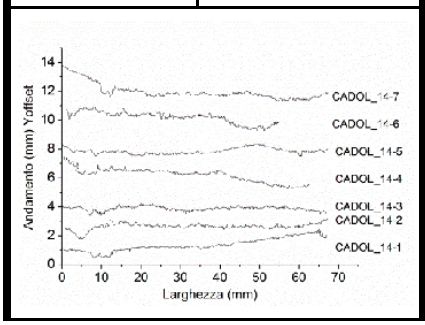
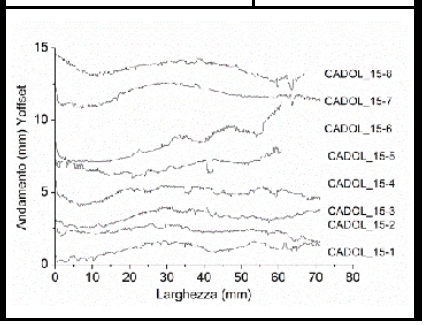
CF-1		CF-2		CF-3	
C	M-D M-ND	C	ND	C	D
					

CF-6		CF-7		CF-8	
G	ND	G	ND	C	ND
					

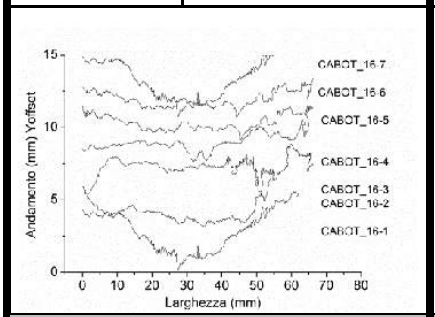
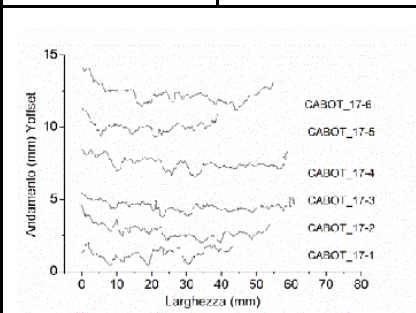
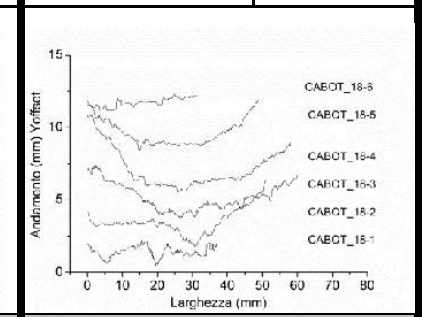
CF-9		CF-10	
C	M-D M-ND	C	ND
			

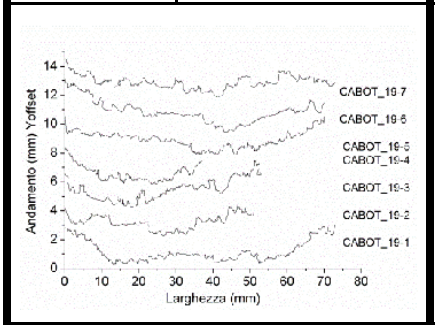
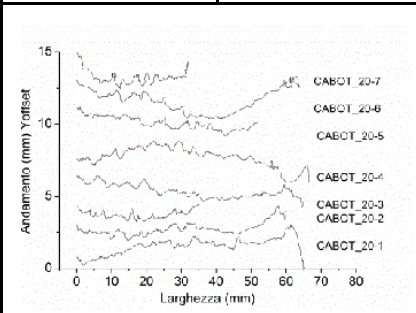
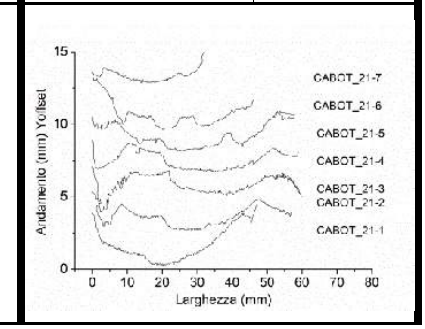
Cà Dolfin

DOL-11		DOL-12		DOL-13	
C	M-N M-ND	C	D	G	M-N M-ND
					

DOL-14		DOL-15	
C	M-D M-ND	C	M-D M-ND
			

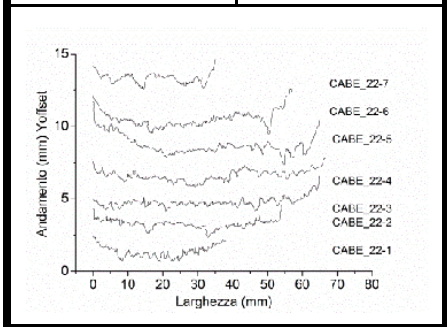
Cà Bottacin

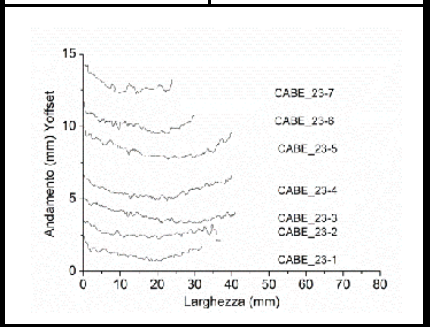
BOT-16		BOT-17		BOT-18	
G	M-D M-ND	G	M-D M-ND	G	M-D M-ND
					

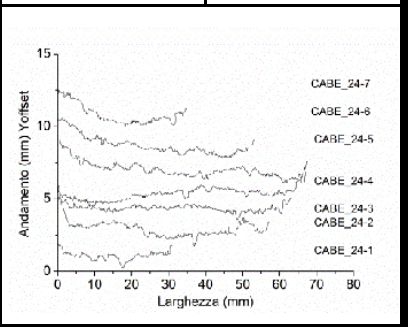
BOT-19		BOT-20		BOT-21	
G	M-D M-ND	G	M-D M-ND	C	M-D M-ND
					

Cà Bembo

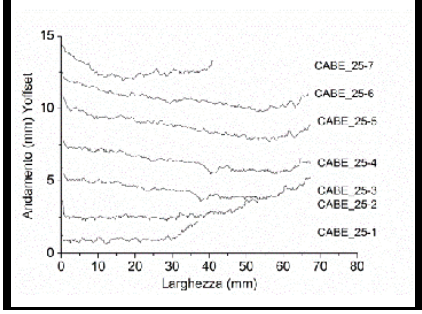
CABE-22		CABE-23		CABE-24	
G	M-D M-ND	G	D	G	M-N M-ND

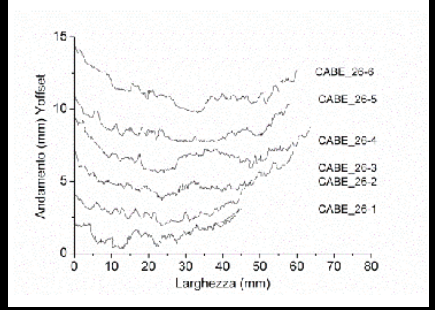


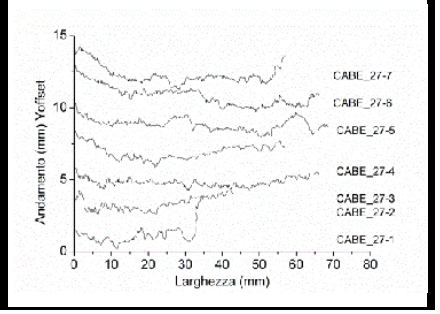




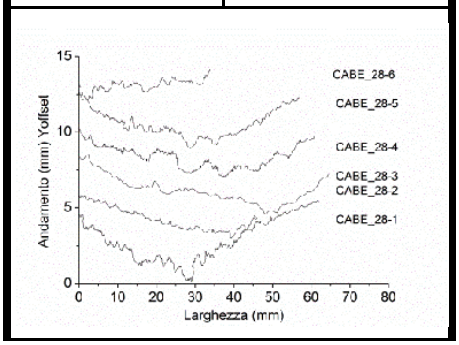
CABE-25		CABE-26		CABE-27	
C	D	C	M-N M-ND	C	M-N M-ND







CABE-28	
C	M-N M-ND



APPENDICE IV: Scheda Tecnica Gomma Siliconica in Pasta GSP-400 N

Questa bicomponente che vulcanizza per reazione di poliaddizione a medio indurimento, è adatta a realizzare stampi di medio-grandi dimensioni o particolari inamovibili in verticale. Ne risulta un vulcanizzato di media durezza e bassa elasticità. Si applica direttamente sul modello da riprodurre, con una leggera pressione, fino a penetrare in tutti i dettagli ricoprendolo interamente con uno strato uniforme. I due componenti sono di diverso colore per favorire un corretto amalgama dei due. La miscela risultante può essere applicata con le mani nude senza particolari accorgimenti: non è pericolosa e non si attacca.

Vantaggi:

- retrazione lineare pressoché inesistente; - nessun rilascio di sostanze tossiche prima, durante e dopo l'uso; - buone proprietà meccaniche - notevole fedeltà di riproduzione; - facilità di distacco delle copie.

Rapporto d'impiego:

100 parti in volume di COMPONENTE A / 100 parti in volume di COMPONENTE B.

Caratteristiche dei componenti :

COMPONENTE A COMPONENTE B COLORE Bianco Giallo ASPETTO Pasta Pasta PESO SPECIFICO (gr/cm3, 23°C) 1,5 1,5 PENETRAZIONE CONO (0,1 mm) 220 220

Caratteristiche della miscela

Colore: giallo chiaro. Pot-life a 23°C: 20 minuti. Tempo di indurimento a 30°C: 45 minuti.

Caratteristiche dopo reticolazione

Durezza Shore A, 10 min. (ASTM D 2240/C): 20 punti. (campione h = 6 mm) Durezza Shore A, 24 ore (ASTM D 2240/C): 25 punti. (campione h = 6 mm) Allungamento a rottura: 150% Resistenza a trazione (MPa, ASTM): 1,55±0,3 Resistenza a lacerazione (kN/m, ASTM): 6,8±1,0

Modalità d'uso

Prelevare dai contenitori volumi uguali e amalgamarle con le dita fino ad ottenere una pasta di colore giallo uniforme. Distendere la pasta premendo con le dita fino a ricoprire tutta la parte da riprodurre, avendo cura di non lasciare vuoti né bolle d'aria. Visto il tempo di lavorabilità limitato, è necessario preparare quindi piccole quantità alla volta per evitare l'indurimento prima di una corretta applicazione. Non occorrono distaccanti. **ATTENZIONE**: la reazione di reticolazione della GSP-400 N (reazione per poliaddizione) può essere inibita dai seguenti prodotti: - sali di metalli pesanti; - ammine; - Zolfo; - Indurenti di resine epossidiche.

Avvertenze per un corretto utilizzo

La gomma siliconica GSP-400 N è del tipo per addizione. Queste gomme, contrariamente a quelle per condensazione, richiedono particolari attenzioni in quanto non tollerano alcune sostanze che ne inibiscono la catalisi. In primo luogo mai usare attrezzi e contenitori stati usati con le normali gomme per condensazione: i due tipi sono assolutamente incompatibili ed il minimo contatto è capace di impedire la catalisi.

Bisogna inoltre fare attenzione che i master che si utilizzano come modello non contengano anche in minima traccia di gomme e catalizzatori del tipo per condensazione, tutti i prodotti che contengono anche minime tracce di zolfo e derivati (es: PVC), colle polineopreniche, resina, stucchi e mastici a base poliestere, plastiline a base non cerosa e stucco da vetro, PVC, stagno e metalli pesanti, ammine e gomma naturali e sintetiche. Quindi se il modello da utilizzare contiene queste sostanze o è realizzato con uno di questi materiali, è necessario ricoprirlo con in velo di cera di carnauba per isolare il master dalla gomma.

Confezioni

1, 5, 10, 50 Kg

Stoccaggio

24 mesi a T comprese tra -5°C e +30°C negli imballaggi originari.

Avvertenze

Non usare a temperature inferiori a 8-10°C. Rispettare le indicazioni di contatto con determinati materiali.

Consigli per l'uso in sicurezza

Per maggiori informazioni di sicurezza, leggere attentamente la scheda di sicurezza dei componenti.

PROCHIMA S.r.l. Via G. Agnelli, 6 61030 Calcinelli di Saltara (PU) tel 0721.897635 - fax 0721.899655