



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI DI PROVINI CON SISTEMI DI VISIONE
IPERSPETTRALE E MULTISPETTRALE PER LA
CARATTERIZZAZIONE DI CONTAMINANTI CHE
DEGRADANO COSTRUZIONI IN CEMENTO**

**ANALYSIS OF SPECIMENS WITH HYPERSPECTRAL AND MULTISPECTRAL
VISION SYSTEMS FOR THE CHARACTERIZATION OF CONTAMINANTS THAT
DEGRADE CONCRETE CONSTRUCTIONS**

Relatore:

Prof. **MARTARELLI MILENA**

Tesi di Laurea di:

GABELLINI GIACOMO

A.A. 2022 / 2023

Sommario

PREFAZIONE	3
1. INTRODUZIONE	4
1.1. IMAGING IPERSPETTRALE	4
1.2. TECNOLOGIA IPERSPETTRALE APPLICATA A MATERIALE DA COSTRUZIONE.....	5
1.3. CRITICITÀ DEI SISTEMI IPERSPETTRALI.....	9
2. MATERIALI E METODI.....	10
2.1. CONTAMINAZIONE PROVINI.....	13
2.2. TELECAMERA IPERSPETTRALE	14
2.3. PROCEDURA DI ANALISI PROVINI.....	15
3. RISULTATI	21
4. CONCLUSIONI.....	24
BIBLIOGRAFIA.....	25

PREFAZIONE

Di seguito verrà analizzato il comportamento di provini a sezione quadrata, ottenuti dal taglio di campioni caratterizzati da diverse composizioni di malte, attraverso sega circolare, immersi in agenti contaminanti o sottoposti a cicli di gelo e disgelo. Di tali provini sono state analizzate le proprietà fisiche tramite impronta spettrale al variare delle condizioni a cui sono stati sottoposti.

In particolare, dopo aver descritto lo stato dell'arte inerente all'assorbimento e alla riflettanza spettrale dei cementi ed una volta nota la firma spettrale delle tipologie diverse di cementi, è stato progettato un setup sperimentale costituito da una telecamera iperspettrale e un sistema di illuminazione per l'acquisizione della riflettanza dei campioni di cemento che avevi a disposizione.

Successivamente una parte di essi viene sottoposta ad un ciclo di gelo e disgelo nella camera climatica. L'altra parte dei provini viene immersa, sempre per un periodo di 20 giorni, in varie soluzioni acquose contenenti agenti contaminanti.

Al termine dei cicli i provini vengono rianalizzati con la telecamera iperspettrale per valutare le differenze con i provini di riferimento (non contaminati), in particolare con l'aiuto di un software saranno visualizzati i dati e i risultati ottenuti dalle acquisizioni con la telecamera in funzione della lunghezza d'onda e della riflettanza.

1. INTRODUZIONE

1.1. IMAGING IPERSPETTRALE

La spettroscopia NIR è una delle tecniche di analisi iperspettrale più utilizzate. Vengono acquisite informazioni riguardo la luce riflessa o quella trasmessa, omettendo di fornire informazioni sulla distribuzione di luce nel campione in esame. In generale, il maggiore o minore grado di riflessione della luce identifica un materiale trasparente o opaco. Grazie alla tecnologia iperspettrale si ottengono dati contenenti varie immagini formate da pixel vettoriali a diverse lunghezze d'onda. Il cubo di dati o iper-cubo fornisce informazioni spaziali bidimensionali spettrali, cioè in relazione alle diverse lunghezze d'onda, per numero di righe e colonne¹. L'imaging iperspettrale può essere usato per diverse applicazioni, essendo un metodo non distruttivo di analisi che può essere effettuato a più lunghezze d'onda. In genere questo sistema di misura comprende range spettrali che vanno dal vicino ultravioletto al vicino infrarosso, comprendendo quindi la fascia del visibile.

Grazie all'utilizzo di tecnologie di acquisizione con immagini iperspettrali è possibile rilevare dei difetti nei materiali², nello studio svolto sono state valutate le proprietà di riflettanza spettrale di vari cementi per dare loro una classificazione. Nel caso studio in esame in questo documento, è stata effettuata la misura della riflettanza utilizzando la tecnologia di visione iperspettrale. Sono state valutate le firme spettrali di provini diversi in cemento, oltre a quelli di riferimento, quelli contenenti vari aggregati tra cui particelle di grafite, fibra di carbonio riciclata e biochar al loro interno.

1.2 TECNOLOGIA IPERSPETTRALE APPLICATA A MATERIALE DA COSTRUZIONE

Sono già presenti ricerche con imaging iperspettrale sul cemento che hanno mostrato le differenze del tipo di stagionatura e dell'età del calcestruzzo. Analizzando provini di diversa polimerizzazione con il metodo k-means clustering sono stati ottenuti dati che evidenziano la capacità di assorbimento di ogni provino sempre nella gamma dell'infrarosso: una scarsa stagionatura è determinata dalla minore differenza di riflettanza tra due stati del campione. All'inizio della stagionatura, i provini presentano un minore assorbimento nello spettro rispetto a quelli alla fine del processo.³ I provini adottati per questa prova hanno circa un anno di età, questo vuol dire che la stagionatura è completa, ma l'immersione in agenti contaminanti con successiva asciugatura a temperatura ambiente potrebbe portare a variazioni della firma spettrale identificando una maggiore riflettanza.

Agli inizi degli anni 2000, sono state fatte ricerche in merito allo stato di degrado delle lastre in cemento-amianto (AC) utilizzando immagini iperspettrali. Correlando una curva di regressione di laboratorio alla profondità di banda calcolata, è stato possibile calcolare lo stato di degrado dei tetti AC. Le immagini ottenute hanno mostrato la percentuale di fibre di amianto suddivise nei seguenti range: fino a 8,8%, dall'8,8% a 10% e superiore al 10%. La pendenza e la direzione di un tetto rispetto al sole, però, influenza le immagini che possono fornire meno informazioni sulla superficie relative al grado di luminosità. Pertanto, questo metodo può essere efficace nelle zone ad alta densità di tetti in AC, dai quali estrarre informazioni legate alla salute ambientale.⁴

Uno studio per rilevare l'invecchiamento dei marciapiedi urbani con immagini iperspettrali ha mostrato diversi valori di riflettanza tra quelli vecchi e quelli nuovi. In particolare, la riflettanza nei marciapiedi più vecchi è minore in seguito all'accumulo di sporco, polvere e alla ossidazione del calcestruzzo, inoltre, il carbonato di calcio garantisce migliori caratteristiche di assorbimento nella banda infrarossa all'interno dello spettro elettromagnetico (SWIR).⁵ Prima della analisi, i provini sono rimasti in laboratorio per circa un anno, quindi non soggetti agli agenti atmosferici, ma soggetti a variazioni di temperatura tra inverno e estate, a umidità non controllata e a formazione di polvere sulla superficie. Questo potrebbe avere provocato un inizio dell'invecchiamento dei provini generando una riduzione di riflettanza indesiderata.

Utilizzando la tecnologia di imaging iperspettrale (HSI) tra i 1000nm e i 1700nm è stato possibile rilevare la presenza di malta negli aggregati riciclati, questo rende la qualità di un nuovo calcestruzzo inferiore. I dati sono stati elaborati con mappe di micro-fluorescenza a raggi X (micro-RXF), analisi delle componenti principali (PCA) e analisi parziale dei minimi quadrati (PLS-DA). I campioni analizzati con micro-RXF hanno rilevato silicio e ferro come aggregati, mentre il calcio ha determinato la presenza di malta. Gli spettri di riflettanza hanno rilevato attorno ai 1400nm un assorbimento elevato dovuto alla vibrazione da allungamento dell'OH nell'acqua. Questo metodo di analisi potrebbe essere utilizzato negli impianti di riciclaggio per garantire un miglior controllo della qualità dei componenti.⁶ Dai risultati della prova potremmo rilevare degli spettri con valori di riflettanza che risentono della presenza di malta che va a ricoprire gli aggregati.

Da recenti studi è emerso che i vari aggregati, presenti all'interno della malta, influenzano il comportamento dei provini nei cicli di gelo-disgelo e durante l'immersione nelle soluzioni contaminanti. In particolare, è stato provato che il biochar, un materiale carbonioso

ricco di sistemi aromatici e minerali ottenuto per degradazione termica (pirolisi), altera le caratteristiche del calcestruzzo, una volta inserito al suo interno, sostituendolo parzialmente al cemento e la soluzione finale è più resistente alla flessione. Esistono diverse tipologie di biochar che si possono inserire nel cemento. Mentre, a seguito dei cicli di gelo-disgelo è stato possibile constatare che la durabilità del calcestruzzo viene largamente influenzata, generando cedimenti strutturali e un grande dispendio di energia. Essendo ricco di carbonio, il biochar, ha un'elevata stabilità chimica che riduce il deterioramento del cemento causato dalle reazioni delle diverse miscele presenti al suo interno. Si può inoltre affermare che il calcestruzzo biochar ha un fabbisogno di acqua di consistenza maggiore e un tempo di settaggio minore. Le proprietà allo stato fresco, le proprietà meccaniche e la resistenza al gelo-disgelo sono state esplorate per il calcestruzzo con lo 0%–30% di sostituzione del biochar. Il fabbisogno di acqua di consistenza normale è aumentato e il tempo di presa è diminuito in sostituzione del biochar al cemento, e ciò è attribuito alla struttura idrofila e porosa del biochar.⁷ A seconda della percentuale di biochar presente nella malta, lo spettro potrebbe subire delle variazioni dal punto di vista della riflettanza. Il cemento biochar tende ad assorbire molta acqua e a variare la sua massa in seguito ai cicli gelo-disgelo, questo potrebbe testimoniare un incremento della riflettanza per questi provini.

La resistenza a compressione, la reologia e la microstruttura del materiale vengono migliorate incorporando ossido di grafene (GO) e ossido di grafene ridotto (rGO) all'interno della pasta di cemento. Per ovviare al problema delle emissioni di anidride carbonica durante la produzione di cemento, alcuni ricercatori hanno svolto una analisi sull'utilizzo di nanomateriali all'interno del cemento per migliorarne le proprietà chimico-fisiche.⁸ Le soluzioni usate sono gli strati di grafene con spessore 3-100 nm chiamati GNP, nanotubi di carbonio CNT, nano-fibre di carbonio CNF. Essendo idrofobe, le scaglie di

grafene (GNP) in soluzione acquosa coagulano, in particolare nel composto cementizio indurito aumentano l'omogeneità e la compattezza. Inoltre, si è notato un miglioramento delle proprietà piezoelettriche e dielettriche con l'aggiunta di CNT/CNF e GNP.⁹ La percentuale di GNP all'interno dei provini utilizzati è minima; pertanto, lo spettro non dovrebbe subire notevoli variazioni.

Per ottenere un calcestruzzo più leggero e ad alta resistenza, il rinforzo con fibre di carbonio riciclate (RCF) è una alternativa alla classica fibra di acciaio. Queste miscele di calcestruzzo sono adatte anche per applicazioni strutturali, risultati confermati dallo studio attraverso la combinazione di microscopi elettronici a scansione (SEM, EDS) e microscopia a raggi x(WAXS). Tuttavia, per le miscele leggere, ultralegere strutturali e ad alta resistenza, il flusso di calcestruzzo è influenzato negativamente dall'aggiunta di RCF. Il motivo è dovuto principalmente al diametro delle fibre di carbonio (6,7 μ m) più piccolo rispetto a quello delle fibre di acciaio (200 μ m), aumentando così la superficie delle fibre bagnate dall'acqua permettendogli di aggrovigliarsi maggiormente. Pertanto, per queste miscele leggere le fibre possono disperdersi in un minor volume rendendo così il flusso della miscela trascurabile. Bisognerebbe quindi, basarsi sul volume del materiale cementizio anziché sul volume totale per il contenuto delle fibre della miscela.¹⁰ Essendo, il carbonio, un materiale abbastanza riflettente ci si può aspettare dall'analisi dei provini RCF di ottenere un valore della riflettanza maggiore nello spettro rispetto agli altri cementi.

1.3 CRITICITÀ DEI SISTEMI IPERSPETTRALI

Nello studio in esame sono stati considerati i dati inerenti alle lunghezze d'onda in relazione alla riflettanza, in uno spettro elettromagnetico che comprende il range del visibile e del vicino infrarosso. L'utilizzo della camera iperspettrale (VNIR) sta prendendo sempre più piede in molte applicazioni, ma ci sono ancora fattori critici che la rendono una tecnologia poco versatile. La necessità di un'illuminazione naturale o artificiale con lampade a incandescenza evitando luci al neon per il rischio di riflettanza indesiderata degli oggetti che potrebbero generare delle ombre, la camera richiede una struttura portante per garantire la stabilità durante le acquisizioni, perché essendo molto sensibile, anche un minimo movimento del sensore influenza il risultato. Risulta difficile il mantenimento del range ottimale di temperatura di utilizzo senza un opportuno sistema di raffreddamento, perché durante il funzionamento, la camera tende a scaldarsi e a superare la temperatura limite oltre la quale potrebbero generarsi risultati errati.

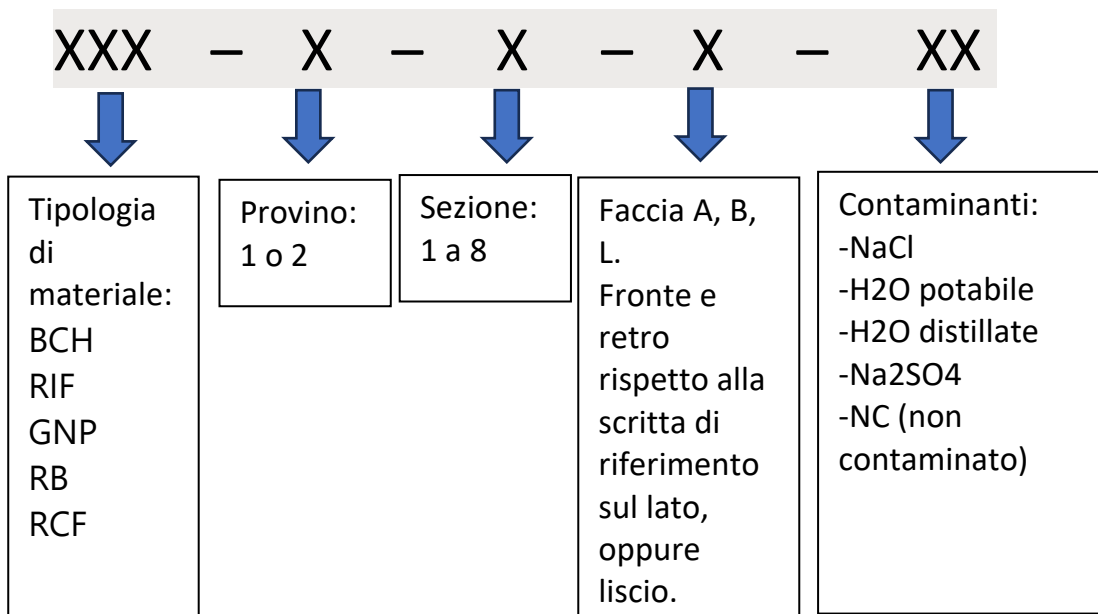
2. MATERIALI E METODI

I provini in materiale cementizio studiati in questo lavoro sono composti da 5 diversi tipi di aggregati:

- RIF: malta generica di riferimento miscelata con sabbia.
- RCF: cemento con l'aggiunta di fibra di carbonio riciclata.
- BCH: biochar nel cemento, un carbone vegetale che aumenta la durata e limita l'utilizzo di carbonio.
- GNP: nano particelle di grafite all'interno della struttura cementizia che migliorano la resistenza a flessione.
- RB: RCF+BCH, è un insieme di biochar e fibra di carbonio riciclata nella malta.

Di seguito, come riportato in Tabella 1, vengono elencati il numero totale di provini ed i rispettivi contaminanti assegnati ad ognuno. Due provini di ogni tipo sono stati suddivisi in 8 sezioni quadrate tramite sega circolare, ottenendo due facce lisce e 8 con gli aggregati per ogni provino, per un totale di 28 facce. Inoltre, sono stati analizzati provini più grandi contenenti dei pioli metallici ottenuti sempre dal taglio tramite sega. Di questi ultimi non sono presenti facce lisce, ma solo due provini per tipo. Il numero totale di facce dei provini analizzate è di 150. I numeri blu della Tabella 1 indicano le facce lisce dei provini contaminati, quelli verdi le facce degli aggregati, mentre quelli rossi rappresentano le facce dei provini con i pioli. La denominazione dei provini viene effettuata tenendo conto della tipologia di provino, creando la codifica illustrata di seguito:

▪ Nomenclatura provini sezionati



Ad esempio, come in Figura 1: BCH_1_6_B_NC indica un provino con biochar come aggregato, facente parte del primo gruppo di provini tagliati, girato al contrario rispetto la scritta di riferimento ed ancora non contaminato.

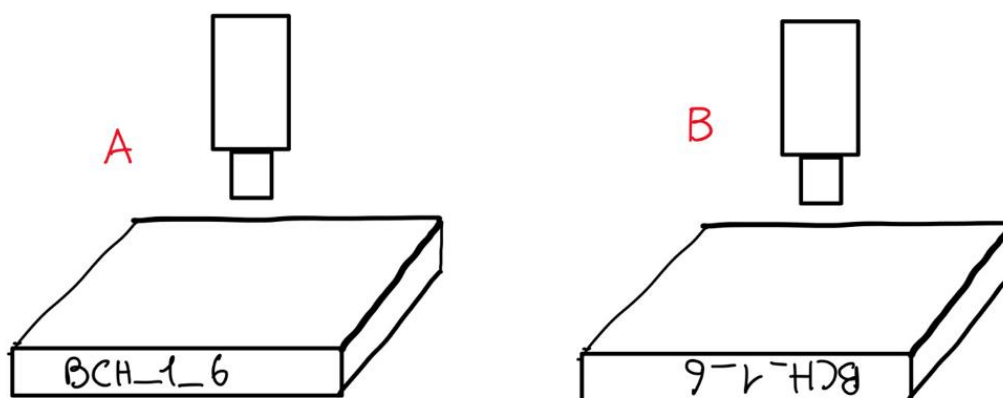
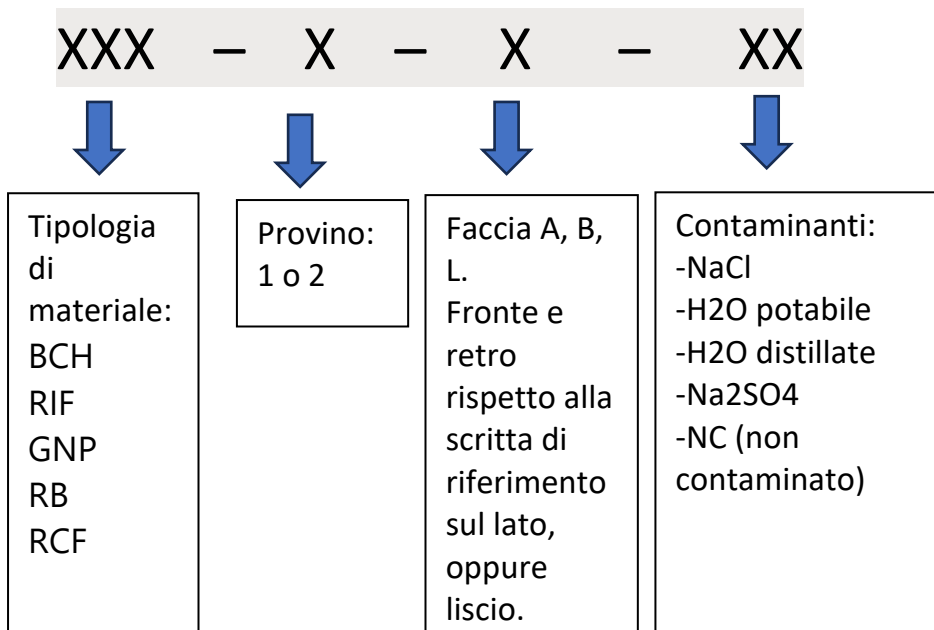


FIGURA 1 ESEMPIO DI ACQUISIZIONE CON TELECAMERA IPERSPETTRALE.

- Nomenclatura provini con metallo (pioli all'interno)



PROVINI				CONTAMINANTI				
TIPO	N LISCI	N AGGREGATI	N PIOLI	NaCl	H2O potabile	H2O distillata	Na2SO4	GELO DISGELO
REF	4	24	2	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	4, 2
RCF	4	24	2	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	4, 2
BCH	4	24	2	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	4, 2
BCH+RCF	4	24	2	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	4, 2
GNP	4	24	2	1, 5	1, 5	1, 5	1, 5	4, 2

TABELLA 1 SUDDIVISIONE PROVINI.

2.1 CONTAMINAZIONE PROVINI

La contaminazione dei provini è avvenuta tramite immersione in determinate soluzioni:

- Acqua potabile (H₂O)
- Acqua distillata
- Cloruro di sodio (NaCl)
- Solfati di sodio (Na₂SO₄)

Finito il periodo di contaminazione di 20 giorni, i provini sono stati messi ad asciugare a temperatura ambiente per 4 giorni ed infine sono stati analizzati. La Tabella 2 PROVINI CONTAMINATI. Tabella 2 ci mostra i provini analizzati:

H ₂ O POTABILE	H ₂ O DISTILLATA	NaCl	Na ₂ SO ₄
1_4	2_1	1_1	2_4
1_5	2_2	1_2	2_5
1_8	2_3	1_3	2_8

TABELLA 2 PROVINI CONTAMINATI.

Alcuni provini, come in Tabella 3, invece, sono stati sottoposti ad un ciclo di gelo/disgelo all'interno di una camera climatica per circa tre giorni totali.

TEMPERATURA DI INIZIO (°)	TEMPERATURA DI FINE (°)	TEMPO IMPIEGATO (h)	PROVINI PER GELO/DISGELO
ambiente	4.4		1_6
4.4	-17.8	2.3	1_7
-17.8	4.4	3.5	1

TABELLA 3 CICLI GELO-DISGELO

2.2 TELECAMERA IPERSPETTRALE

Per questa analisi è stata usata una telecamera iperspettrale che permette di misurare la riflettanza spettrale in maniera non distruttiva dei materiali in esame.

La telecamera iperspettrale è un dispositivo ottico che permette di acquisire immagini in diverse bande dello spettro elettromagnetico. Ciò consente di ottenere un'immagine scattata ad ogni lunghezza d'onda e uno spettro caratteristico di ogni pixel dell'immagine.

Il modello della telecamera utilizzata è la 4250 VNIR di HinaLea, di seguito alcune caratteristiche principali del sensore:

DIMENSIONE	197.7mm (7.78") x 81mm (3.19") x 78mm (3.07")
PESO	1.25kg
TENSIONE IN INGRESSO	110 VAC at 60Hz/ 220 VAC at 50Hz
TEMPERATURA DI LAVORO	20°±5°C
RISOLUZIONE SENSORE SPAZIALE	2.3MP
RANGE SPETTRALE	400-1000nm
BANDE SPETTRALI	300 nominali
RISOLUZIONE SPETTRALE	4 nm
ILLUMINAZIONE	4 lampade a incandescenza

TABELLA 4 CARATTERISTICA TELECAMERA IPERSPETTRALE.

2.3 PROCEDURA DI ANALISI PROVINI

Di seguito viene esplicitata la procedura di analisi dei provini e la catena di misura.

I. Preparazione banco di acquisizione.

Il tavolo da lavoro viene pulito e sistemato in modo tale da avere solo le cose necessarie alla procedura, la camera iperspettrale è installata su un'impalcatura che la tiene ferma a sua volta fissata su un piano liscio di colore nero, per evitare riflessioni, nel quale è possibile appoggiare gli oggetti in esame. Sulla camera è stato installato un sistema di raffreddamento per mantenere la temperatura nel range ottimale di esercizio ($20^{\circ}\pm 5^{\circ}$). Tre moduli Peltier sono stati collegati alla camera, provvisti di ventole e scambiatori di calore in alluminio, per garantire lo scambio termico. I circuiti Peltier sono montati su una struttura realizzata con materiale isolante in modo da contenere la camera e lasciando libera solo l'estremità con l'obiettivo e vengono gestiti da un regolatore per celle di Peltier collegato ad una termocoppia in contatto col corpo esterno della camera. La temperatura di utilizzo con questo sistema di raffreddamento è stata tra i $23^{\circ}\div 24^{\circ}\text{C}$.

Vengono accese le lampade a incandescenza, posizionate in questo caso in diagonale in modo da avere una distribuzione luminosa omogenea. Infine, viene acceso il pc e collegato alla camera iperspettrale.

II. Calibrazione

Prima di effettuare le acquisizioni la camera necessita di una calibrazione del nero ottenuta mantenendo il tappo del sensore ottico in posizione, ed una calibrazione del bianco collocando un target bianco sul piano di appoggio come in Figura 2. Prima della calibrazione del bianco la camera viene opportunamente messa a fuoco, inoltre, quando viene rilevata dal sensore un'eccessiva riflettanza del provino si effettua una auto-esposizione.

III. Acquisizione

Vengono acquisite le immagini dalla camera, azionata dal pc, tramite software dedicato (TrueScope). Il tempo di acquisizione per ogni faccia del provino è all'incirca 3-4 min.

IV. Salvataggio dati

I dati iperspettrali sotto forma di ipercubo spettrale sono salvati in riflettanza e non in intensità. La regione interessata di ogni immagine viene definita selezionando la superficie in cemento, evitando i bordi esterni del provino e/o fori evidenti, per ottenere risultati coerenti tra i diversi provini.

V. Processamento

L'elaborazione dei dati ottenuti viene effettuata tramite software Python, algoritmi appositamente sviluppati per tale applicazione permettono di visualizzare le caratteristiche dei diversi provini. In Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 è presente una caratterizzazione dei 5 tipi di provino con diversi contaminanti, nello specifico, sono stati mediati tutti gli aggregati di un unico provino differenziandoli per tipologia di contaminazione e messi a confronto.

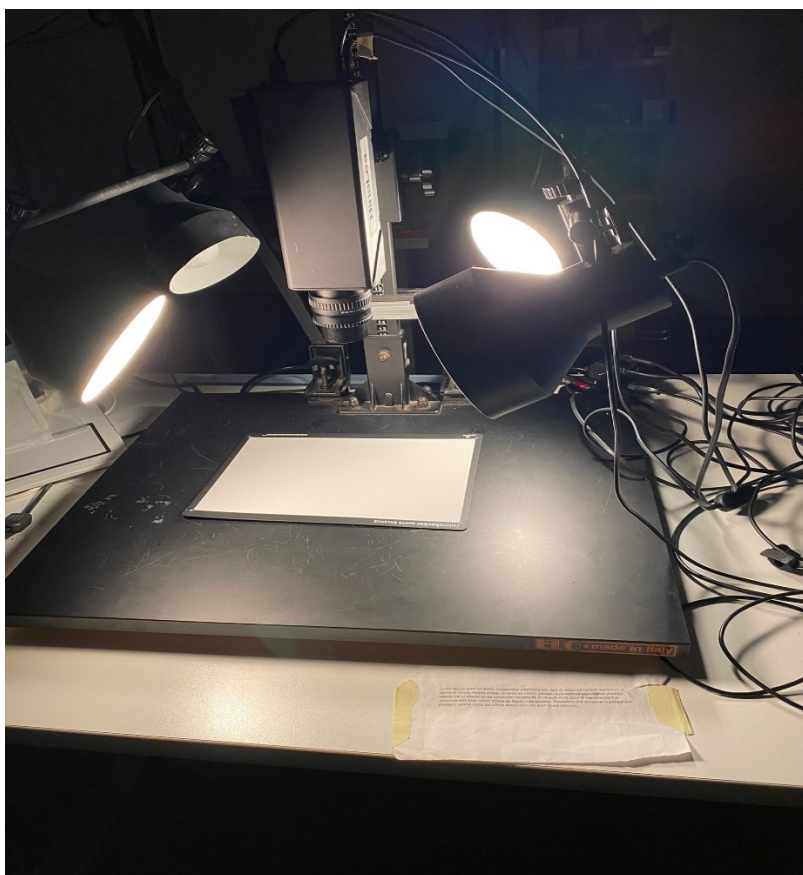


FIGURA 2 CALIBRAZIONE CAMERA IPERSPETTRALE

L'acquisizione dei provini si è svolta con una temperatura e illuminazione controllata, il posizionamento dei campioni è avvenuto con guanti per evitare ulteriori contaminazioni indesiderate. Di seguito verrà mostrato il confronto lisci-aggregati dei provini della stessa composizione: i provini illustrati in Figura 3 presentano un andamento coerente fra loro sul dato di riflettanza a meno di un offset meno evidente dopo la contaminazione dei sali solfati. Nei provini GNP in Figura 4 l'acqua distillata modifica maggiormente la riflettanza oltre ai solfati soprattutto per quelli lisci. Anche nella Figura 5 l'andamento si mantiene simile ai provini non contaminati fuorché quelli contaminati dai solfati intorno ai 400nm. Una rapida salita di riflettanza caratterizza l'effetto dei solfati di sodio nei provini RCF a basse lunghezze d'onda (450nm).

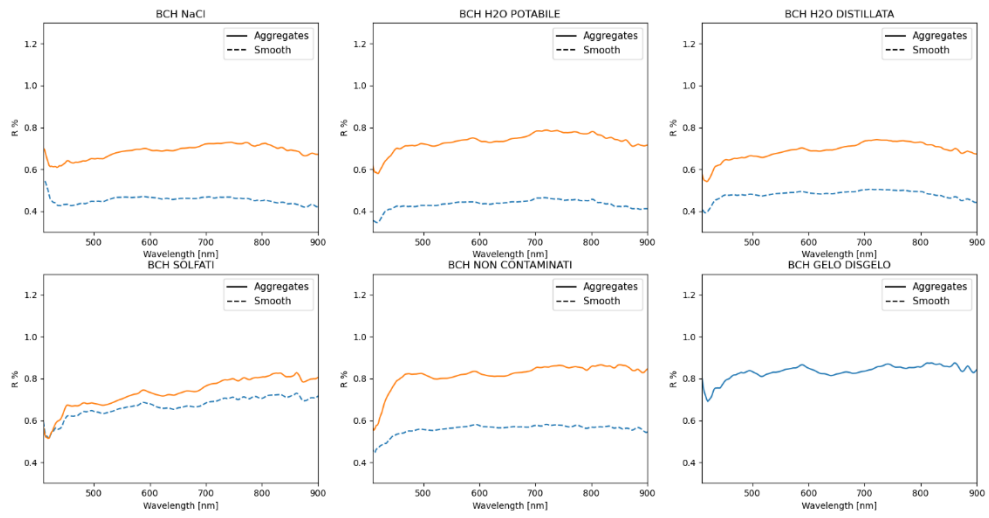


FIGURA 3 CONFRONTO DEI PROVINI BCH TRA LISCI E AGGREGATI

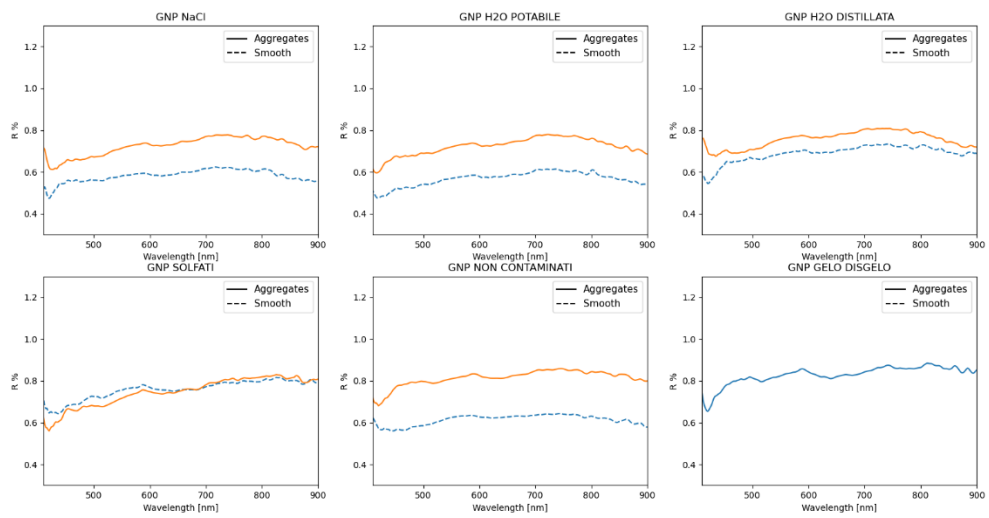


FIGURA 4 CONFRONTO DEI PROVINI GNP TRA LISCI E AGGREGATI

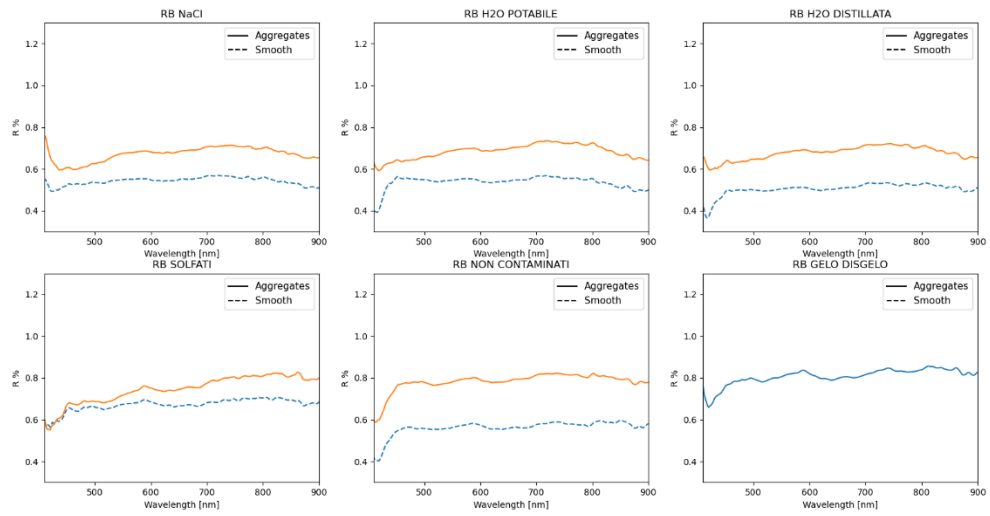


FIGURA 5 CONFRONTO DEI PROVINI RB TRA LISCI E AGGREGATI

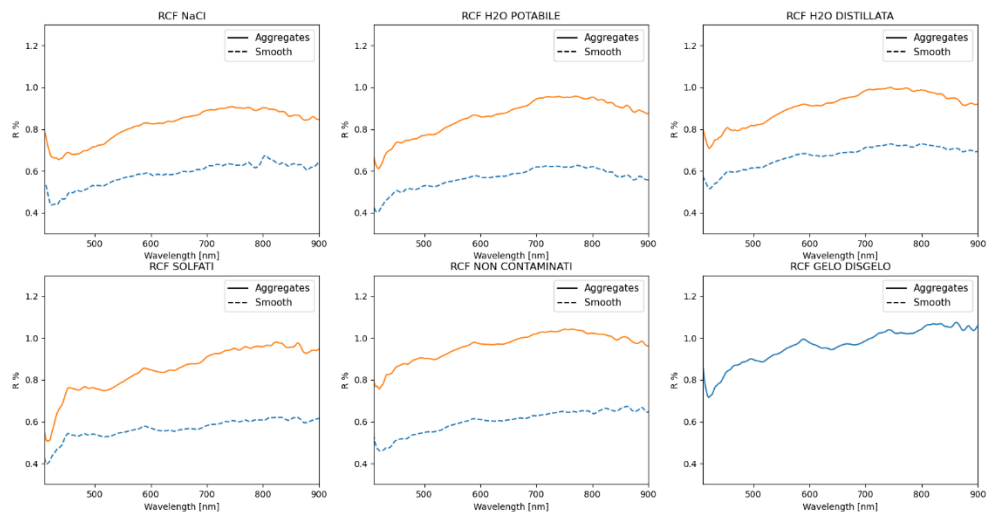


FIGURA 6 CONFRONTO DEI PROVINI RCF TRA LISCI E AGGREGATI

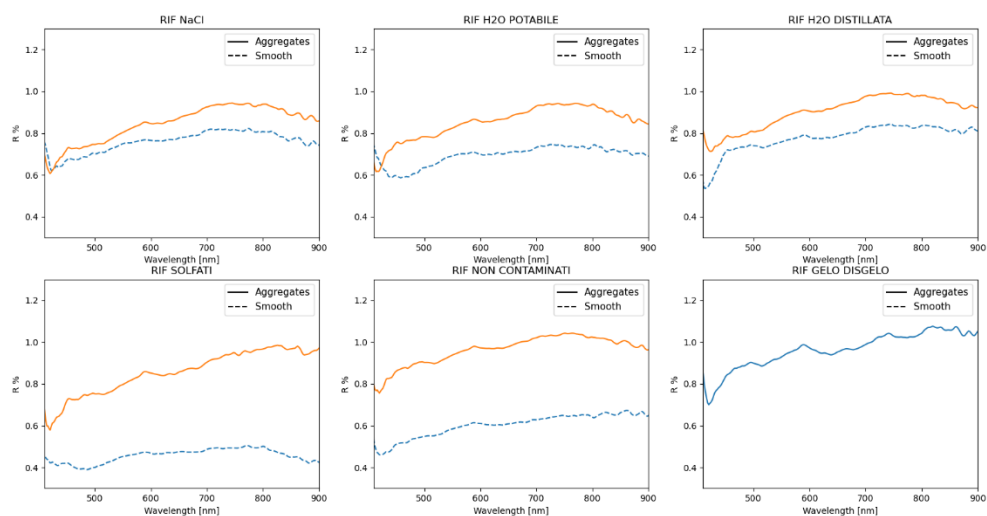


FIGURA 7 CONFRONTO DEI PROVINI RIF TRA LISCI E AGGREGATI

La Figura 7 è quella che mostra le maggiori differenze per effetto dei contaminanti, in particolare i cloruri e l'acqua potabile e distillata ravvicinano la riflettanza tra provini lisci e aggregati, mentre i solfati ampliano questa differenza.

Dalle figure precedenti è possibile notare che il comportamento dei provini lisci è molto diverso da quello degli aggregati, questa fonte di incertezza dimostra che effettuando una media sui provini le differenze diminuiscono. La curva degli aggregati è stata ottenuta mediando quella di 5 provini per contaminante, quella del liscio fa riferimento ad un unico provino. La differenza è accentuata dal fatto che la faccia con gli aggregati tende a riflettere maggiormente la luce a causa dei materiali compositi, visibili anche a occhio nudo, al suo interno.

3 RISULTATI

Come è stato possibile visualizzare in precedenza in MATERIALI E METODI, in Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 nei provini con aggregati si notano meno differenze in quanto gli aggregati sono sorgenti di rumore e quindi di incertezza. Pertanto nell'analisi dei risultati sono stati analizzati solo i provini lisci. Tra le analisi effettuate quella di Figura 8 mostra l'effetto dei vari contaminanti sui diversi tipi di provini lisci. Partendo dai provini non contaminati notiamo una maggiore pendenza fino a 500nm dei BCH rispetto ai provini RB che rimangono più piatti. Inoltre, l'RCF presenta una pendenza molto accentuata fino ai 600nm per poi appiattirsi fino alla fine del range. Una discesa con rapida risalita di riflettanza è visibile nella curva RCF contaminata da cloruro di sodio a 800nm, la linearità di RB e BCH viene mantenuta tranne per l'effetto dei solfati.

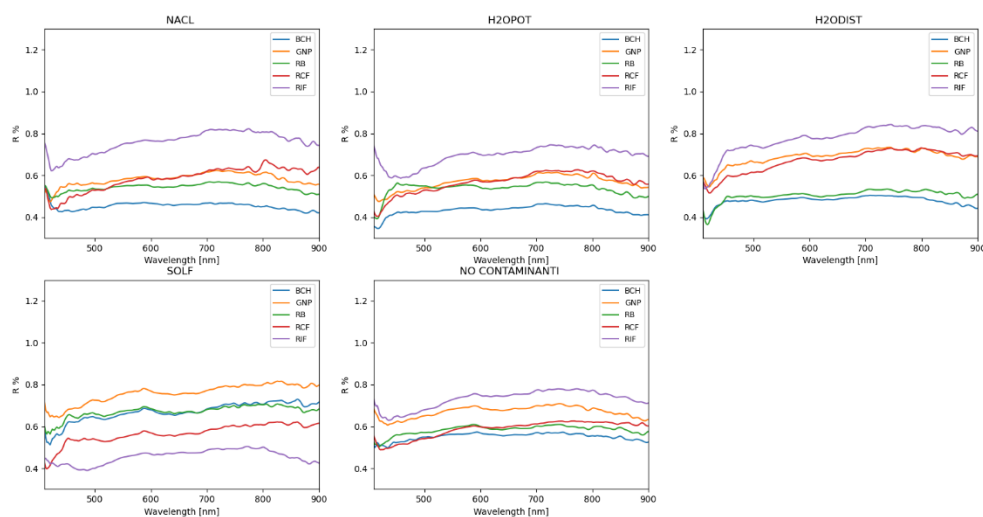


FIGURA 8 CONFRONTO DEI PROVINI LISCI ANALIZZATI A PARITA' DI CONTAMINANTI.

Il confronto di ogni tipo di provino liscio per ogni contaminante è rappresentato in Figura 9, anche in questo caso si valuta la ripetibilità della misurazione. Possiamo dedurre che l'effetto del solfato di sodio rende variabile la riflettanza del provino, per esempio, nei RIF viene smorzata fino allo 0,4% di riflettanza nelle gole a 500nm e 880nm, nei RCF la acquisizione presenta una leggera caduta di riflettanza attorno ai 700nm, mentre in tutti gli altri provini la riflettanza aumenta. L'andamento dei BCH e degli RB contaminati da acqua potabile è pressochè lineare, mentre negli altri provini sono presenti creste e gole soprattutto ad alte lunghezze d'onda. L'acqua distillata rende le misurazioni più comparabili con qualche rapida salita a circa 450nm.

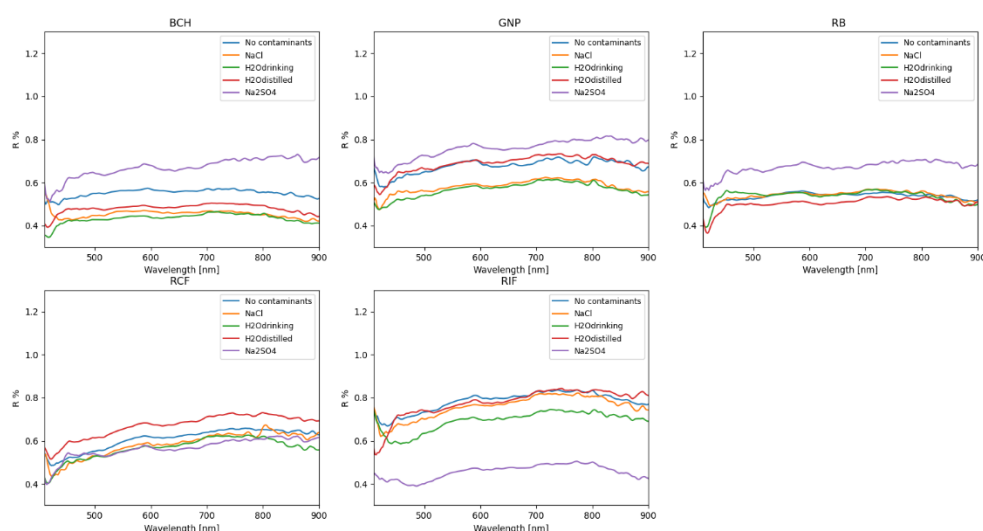


FIGURA 9 CONFRONTO DEI PROVINI LISCI ANALIZZATI A PARITA' DI PROVINO.

La contaminazione tramite agenti dannosi per il cemento da costruzione non ha evidenziato particolari lunghezze d'onda caratteristiche nel range del sensore, ma ci ha permesso tramite l'impronta spettrale individuata di valutare come reagiscono i vari provini. In particolare, in Figura 8 nel grafico dei solfati riusciamo

meglio ad individuare un andamento comune nonostante la differenza di composizione dei materiali, inoltre, i provini RIF nei solfati presentano una minore riflettanza con pendenza discendente a partire dai 800nm rispetto agli altri contaminanti.

4 CONCLUSIONI

In questa analisi attraverso imaging iperspettrale è stato valutato il comportamento di 150 provini di sezione quadrata ottenuti dalla miscelazione di malte con cinque specie diverse di aggregati, alcuni sottoposti ad un ciclo gelo/disgelo, altri immersi in 4 soluzioni contaminanti differenti.

Dalla caratterizzazione di questi provini è emerso che è più semplice notare differenze dal confronto a parità di contaminanti nei provini lisci, mentre a parità di contaminanti le curve sono più comparabili.

In definitiva, l'utilizzo del sensore iperspettrale può essere utile per differenziare il cemento da costruzione, ma deve essere anche accompagnato da uno studio più specifico sulla resistenza a trazione, compressione delle fibre per verificare la compatibilità su una reale struttura.

BIBLIOGRAFIA

1. ElMasry, G. & Sun, D. W. Principles of Hyperspectral Imaging Technology. in *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control* 3–43 (Elsevier, 2010). doi:10.1016/B978-0-12-374753-2.10001-2.
2. *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus*. (Springer International Publishing, 2023). doi:10.1007/978-3-031-18326-3.
3. Ptacek, L., Strauss, A., Hinterstoisser, B. & Zitek, A. Curing assessment of concrete with hyperspectral imaging. *Materials* **14**, (2021).
4. Bassani, C. *et al.* Deterioration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analyzing hyperspectral data. *Remote Sens Environ* **109**, 361–378 (2007).
5. Kotthaus, S., Smith, T. E. L., Wooster, M. J. & Grimmond, C. S. B. Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **94**, 194–212 (2014).
6. Bonifazi, G., Palmieri, R. & Serranti, S. Evaluation of attached mortar on recycled concrete aggregates by hyperspectral imaging. *Constr Build Mater* **169**, 835–842 (2018).
7. Jia, Y., Li, H., He, X., Li, P. & Wang, Z. Effect of biochar from municipal solid waste on mechanical and freeze–thaw properties of concrete. *Constr Build Mater* **368**, (2023).
8. Hulagabali, M. M., Vesmawala, G. R. & Patil, Y. D. Synthesis, characterization, and application of graphene oxide and reduced graphene oxide and its influence on rheology, microstructure, and mechanical strength of cement paste. *Journal of Building Engineering* **71**, (2023).
9. Rehman, S. K. U., Kumarova, S., Memon, S. A., Javed, M. F. & Jameel, M. A review of microscale, rheological, mechanical, thermoelectrical and piezoresistive properties of graphene based cement composite. *Nanomaterials* vol. 10 1–42 Preprint at <https://doi.org/10.3390/nano10102076> (2020).
10. Patchen, A. *et al.* Lower Carbon Footprint Concrete Using Recycled Carbon Fiber for Targeted Strength and Insulation. *Materials* **16**, (2023).

