

PROGETTO DI RICERCA

– SIMBA –

SETTORE BIOEDILIZIA

STUDI E SPERIMENTAZIONI

PREMESSA

L'obiettivo principale di questa ricerca è stato l'approfondimento di alcuni problemi legali legati al risanamento degli intonaci e delle murature, derivanti dall'azione dell'acqua.

Sono state verificate anche azioni riguardanti l'inquinamento "indoor" degli edifici, dovute all'azione di prodotti, trattamenti, elementi tossici volatili, presenti all'interno degli stessi.

La sperimentazione si è avvalsa dell'impiego di materiali ecocompatibili, come componenti principali da impiegarsi in alternativa a prodotti normalmente usati, per risolvere le problematiche in questione.

Tutte le operazioni eseguite hanno monitorato le varie fasi degli interventi, sia dal punto di vista chimico-analitico che fisico, descrivendone le procedure e le tecniche applicate, i materiali usati.

La prima parte di questo lavoro ha cercato di descrivere i concetti e i criteri basilari che regolano la "Bioedilizia", e come questa abbia preso piede nel nostro Paese.

L'azione ha evidenziato i cambiamenti rispetto al passato, riguardante gli interventi legati al risanamento in senso lato degli edifici, secondo le moderne visioni di uno sviluppo "sostenibile".

Successivamente, dopo aver introdotto da un punto di vista descrittivo le diverse azioni degradanti dell'acqua, nei confronti di una muratura "campione", si è passati alla sperimentazione vera e propria, effettuando presso i laboratori della ditta Leochimica le analisi e i test di cessione di campioni di materiale, prelevati durante e dopo i trattamenti eseguiti in cantiere.

Capitolo 1

Cenni sulla Bioedilizia

STORIA E DEFINIZIONE

Bioedilizia (o Architettura ecologica) è una delle risposte al sempre più difficile rapporto uomo-ambiente. Essa nasce con l'intento di creare un rapporto equilibrato con l'ambiente, che sia pensata per le necessità dell'uomo e che sia capace di soddisfare i bisogni delle attuali generazioni, che vengono sempre più messe in pericolo dall'uso indiscriminato delle risorse non rigenerabili e dal continuo e crescente inquinamento.

Il termine "Architettura Bio-ecologica" nasce dalla fusione dei termini Architettura (arte di costruire), Bio (attinente alla vita), Eco (in equilibrio con l'ambiente), Logica (intelligente, razionale). E' una definizione che in Italia è stata introdotta dall'Associazione Nazionale Architettura Bioecologica (ANAB). In questo contesto il suffisso Bio si riferisce, in modo molto ampio, alla auspicata presenza di "vita" in un'architettura, ormai ritenuta per diversi aspetti e da diversi punti di vista e soprattutto in Italia, sempre più morente. Quindi un'Architettura fatta per la vita, che sia in grado di creare case e città nel rispetto delle persone e dell'ambiente.

Con Architettura bioecologica o Bioedilizia non si deve intendere un settore specialistico dell'edilizia (o peggio una moda), ma una rilettura, una sorta di rifondazione dell'Architettura stessa che ha origine da un vasto campo di ricerche fortemente interdisciplinari e interconnesse.

Oggi le attività umane sono caratterizzate da una crescente dipendenza dagli spazi chiusi: nelle aree ad economia avanzata l'uomo passa mediamente il 90% della propria vita in casa, in ufficio, a scuola, in fabbrica ecc... La casa ha sempre avuto, e a maggior ragione ha assunto oggi, un peso estremamente rilevante tra i bisogni primari dell'uomo ed in questo senso è ovvio che la sua qualità, insieme a quella di pochi altri elementi come l'aria e il cibo, è in grado di modificare radicalmente la qualità della vita umana. D'altra parte l'attività edilizia, per il suo enorme peso produttivo, è inevitabilmente uno dei settori industriali a più alto impatto ambientale per gli effetti dell'inarrestabile consumo di territorio, per l'altissimo consumo energetico e per le emissioni in atmosfera ad esso connesse, per il sempre più diffuso utilizzo di materiali di origine petrolchimica che, oltre a rendere l'aria che respiriamo tra le mura domestiche più inquinata di quella già pessima che respiriamo fuori, determina gravi problemi di inquinamento ambientale durante tutto il loro ciclo di vita.

Un ulteriore problema risiede nello spreco e nell'utilizzo irrazionale delle fonti energetiche; le nostre abitudini devono adeguarsi a considerare l'energia un bene non inesauribile ed inoltre che la sua produzione, con i metodi attuali, comporta un grave inquinamento ambientale.

Alcuni dati possono farci capire la necessità di un'Architettura bioecologica:

- Il 45% dell'energia prodotta in Europa viene utilizzata nel settore edilizio.
- Il 50% dell'inquinamento atmosferico in Europa è prodotto dal settore edilizio.
- Il 50% delle risorse sottratte alla natura sono destinate all'industria edilizia.
- Il 50% dei rifiuti prodotti annualmente in Europa proviene dal settore edilizio.

Nel nostro paese si è cominciato a parlare di Architettura bioecologica solo una decina d'anni fa, con anni di ritardo purtroppo rispetto agli altri paesi europei, in particolare del Nord Europa. Il ritardo ha inciso sulla formazione di professionisti e di conseguenza anche sul numero di realizzazioni. Altri paesi invece possono oggi vantare numerose esperienze concrete specialmente nel settore produttivo, introducendo nei cantieri materiali maggiormente ecologici.

In Italia nasce, grazie al contributo di alcuni architetti, l'ANAB, prima associazione del settore ad essere costituita nel nostro paese. Le competenze che tale associazione è in grado di esprimere ne fanno il soggetto più credibile e aggiornato tra quanti oggi operano in questo settore grazie anche alle collaborazioni con importanti istituti europei. ANAB è inoltre socio fondatore di ECOHB Global Network Ecobiology, forum internazionale di associazioni che operano nel campo dell'architettura Bioecologica. L'associazione, attraverso corsi, convegni, mostre, pubblicazioni scientifiche, attività di certificazione dei materiali, riviste ("Notizie ANAB", "L'Architettura Naturale") si occupa di promuovere una nuova etica del costruire e dell'abitare come risposta allo stato di progressivo degrado e distruzione dell'ambiente che ci ospita.

Principali tappe dello sviluppo mondiale

- 1972 Conferenza di Stoccolma sull'ambiente umano da cui nasce la United Nations Environmental Programme (UNEP) che introduce il concetto di ECOSVILUPPO.
- 1980 Saggio dell' International Union for Conservation of Nature: compare per la prima volta il concetto di SVILUPPO SOSTENIBILE.
- 1987 Rapporto della World Commission on Environmental and Development, noto come *rapporto Brundtland* che definisce il CONCETTO DI SVILUPPO ECOSOSTENIBILE.
- 1992 Conferenza "Earth summit" di Rio de Janeiro delle nazioni unite sull' Ambiente e lo sviluppo.
- 1997 Conferenza di Kyoto per la riduzione dell'emissione dei gas serra entro l'anno 2010.
- 2002 Conferenza sull'ambiente di Johannesburg.

I MATERIALI DELL'ARCHITETTURA BIOECOLOGICA

La scelta dei materiali riveste un ruolo fondamentale in Architettura: ha effetti sull'ambiente naturale, sull'ambiente interno degli edifici, sulla salute e sulla sicurezza degli occupanti. La scelta di un materiale dipende da molteplici fattori (tipo di applicazione, impatto ambientale, costo...) e comunque deve tenere conto dei danni che può provocare in ogni fase del suo ciclo di vita: produzione, messa in opera, vita utile e manutenzione, demolizione e smaltimento.

I tipici materiali utilizzati in Bioedilizia, oltre a questi requisiti, devono possedere altre caratteristiche: devono essere atossici, devono provenire da fonti rinnovabili e devono essere riciclabili. I migliori da questo punto di vista sono quelli naturali, definiti "verdi" per il loro modesto impatto ambientale. Pannelli in fibra di legno che utilizzano collanti poliuretanici per evitare emissioni di formaldeide, isolamenti in canapa o cellulosa sono degli esempi di applicazione di tali materiali nell'edilizia.

La compatibilità ambientale di un edificio va verificata non solo in base al consumo dei materiali impiegati, ma in funzione della quantità di energia contenuta, da intendersi sia in termini di consumo energetico di ogni singolo materiale in fase di estrazione, produzione, trasporto, utilizzo nel momento della costruzione, riciclaggio e smaltimento, sia di energia consumata per riscaldare, condizionare e illuminare. E' evidente che più alto è il contenuto energetico di un materiale, minore è la sua compatibilità ambientale.

Principi di valutazione della sostenibilità ambientale dei materiali

- impatto ambientale dei materiali, in tutte le sue fasi di vita.
- rinnovabilità delle materie prime inserite nel processo produttivo.
- consumo energetico.
- durata dei materiali.
- riciclabilità.
- smaltibilità.

L'attività edilizia deve essere, quindi, monitorata in tutti i suoi passaggi, attraverso un controllo delle ricadute sull'ambiente in fase di costruzione, ristrutturazione, demolizione, riciclo e smaltimento, preferendo quei materiali che garantiscono minore spreco di risorse (aria, acqua, suolo, foreste, ecc.) ed energia, anche e soprattutto in relazione alle condizioni climatiche determinate dal contesto.

Operativamente significa selezionare materiali di lunga durata e facilmente mantenibili, ottenuti da materie prime rinnovabili e disponibili localmente, la cui lavorazione produca il minor numero di scarti e garantisca l'assenza di emissioni nocive e inquinanti; si dovrebbero utilizzare materiali riciclabili e prodotti provenienti dal riciclaggio, selezionando quelle tecniche costruttive che rendono possibile contemporaneamente l'assemblaggio in elementi edilizi ed il loro smontaggio e riutilizzo.

Ai classici materiali utilizzati in edilizia, come calcestruzzo, acciaio, legno, sono stati affiancati dei materiali, principalmente naturali, con lo scopo di raggiungere gli standard costruttivi sopra citati.

Ne sono un esempio:

- Canapa.
- Olio di lino.
- Cere naturali.
- Fibra di cocco.
- Lana di pecora.

Va ricordato che un materiale con spiccate caratteristiche di bioecologicità e da sempre utilizzato dall'uomo, è sicuramente il legno. Questo infatti è di facile reperibilità e lavorazione, è leggero, presenta ottime caratteristiche meccaniche e soprattutto è atossico. Può essere utilizzato come elemento strutturale, isolante, o semplicemente come decorativo. Viene lavorato per la produzione di pannelli compensati, truciolari, paniforti... Da questo punto di vista però bisogna prestare attenzione all'utilizzo dei collanti, che possono presentare il pericolo dell'emissione di formaldeide, soprattutto se il pannello è utilizzato in ambienti interni.

PRINCIPI BIOCLIMATICI E COMFORT ABITATIVO

L'approccio bioclimatico, applicato principalmente alle abitazioni, basa le scelte relative alla forma dell'edificio, al sito, all'orientamento, e alla definizione spaziale sulla valutazione di alcune caratteristiche del luogo: clima, direzione dei venti dominanti, conformazione del suolo, esposizione solare e vista.

I volumi costruiti devono essere compatti, limitando sia la circolazione interna che la superficie di facciata e, quindi, la dispersione del calore. Raggruppando gli ambienti a seconda delle funzioni si possono ottenere risparmi sia di riscaldamento che di illuminazione.

Insieme alla scelta dei materiali, l'approccio bioclimatico, ha lo scopo di creare una condizione di benessere e di comfort all'interno degli spazi abitativi. L'impatto del settore edilizio non ricade solo sulla natura ma anche sull'uomo: la scelta delle tecnologie costruttive, dei materiali, dei prodotti per il trattamento delle superfici, la ventilazione, il ricambio dell'aria, l'illuminazione, il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, sono fattori in grado di soddisfare la necessità di benessere fisico e psichico degli utenti degli edifici, ma anche la salvaguardia della salute di tutti coloro che sono coinvolti nei processi produttivi, trasformativi e dismissivi dei materiali che costituiscono gli edifici in cui viviamo.

Parametri quali il grado di umidità, la temperatura superficiale delle masse murarie, la velocità, la salubrità dell'aria interna, le condizioni di illuminazione degli ambienti, la diffusione del suolo e la protezione dei rumori molesti, da campi elettromagnetici e gli elementi legati alla percezione tattile e sensoriale, influiscono sulla nostra condizione di benessere.

Il concetto di comfort varia, entro certi limiti, da soggetto a soggetto. La sensazione di caldo o di freddo che proviamo, per esempio, dipende da fattori quali il metabolismo, il vestiario, l'attività che svolgiamo, dall'essere adattati ad un determinato contesto climatico, dall'età e dalla nostra condizione di salute. Le modalità con cui riscaldiamo, raffreschiamo e climatizziamo gli edifici incidono in maniera sostanziale su comfort e benessere, ma non di meno incide la scelta di materiali che abbiano adeguati comportamenti igroscopici, buone temperature superficiali, capacità di coibenza e di accumulazione del calore, diffusione e traspirabilità, assorbimento e la scelta di

soluzioni tecniche che risolvano i problemi legati a ponti termici, o all'eccessiva esposizione delle murature a fonti di calore.

La qualità dell'aria degli ambienti confinati è un altro dei fattori che definiscono il grado di benessere: gli effetti delle cattive condizioni dell'aria possono essere solamente sgradevoli, ma possono produrre anche effetti deleteri alla salute umana. L'inquinamento indoor è stato riconosciuto come causa di varie patologie quali sonnolenze, mal di testa, nausea, fino ad arrivare anche a forme molto gravi di asma e neoplasie. Le cause sono molteplici: la cattiva ventilazione degli ambienti e la loro sigillatura, l'uso di barriere al vapore e di isolanti sintetici, la riduzione delle superfici finestrate con serramenti stagni. A questi fattori si devono aggiungere le emissioni di sostanze nocive e tossiche prodotte da materiali edili, dall'arredo e dagli essiccanti delle vernici (Composti Organici Volatili), i gas nocivi generati dalla cottura dei cibi e dal funzionamento delle caldaie, le fibre liberate dagli arredi, gli acari della polvere, il gas radioattivo liberato dai materiali da costruzione, dal suolo e dalle acque di falda e i prodotti del metabolismo. Principali agenti inquinanti sono: radon, formaldeide, contaminanti biologici, umidità, funghi e muffe, batteri, fibre minerali, gas prodotti dalla cottura e dalla combustione, polvere, pollini, idrocarburi policiclici, elettromagnetismo, cloro.

Un ultimo fattore da tenere in considerazione per il comfort è sicuramente l'illuminazione. Quella naturale all'interno degli ambienti confinati deve garantire il benessere visivo ed è dipendente da fattori quali le caratteristiche fotometriche dei materiali, i colori e il trattamento delle superfici. In rapporto alle differenti esigenze si devono prendere in considerazione materiali in grado di riflettere la luce incidente come quelli specchianti o diffondenti oppure in grado di trasmettere la luce come quelli trasparenti, che oltre a permettere il passaggio della luce permettono anche la visibilità, e quelli traslucidi. Da questo punto di vista si parla soprattutto di ottimizzazione del guadagno solare che consiste nell'utilizzare il solare passivo per il riscaldamento, riducendo così la dipendenza degli edifici da impianti costosi.

Nella seguente tabella vengono riportati i criteri di scelta dei materiali e delle tecnologie costruttive valutando l'aspetto relativo alle materie prime, al risparmio energetico e al comfort abitativo.

RISORSE	ENERGIA	COMFORT
Utilizzo di materiali riciclabili. Raccolta differenziata dei rifiuti. Contenimento del consumo di acqua potabile. Recupero delle acque meteoriche e grigie.	Contenimento dei consumi energetici dell'edificio. Sfruttamento e controllo del soleggiamento estivo e invernale. Ventilazione naturale. Controllo dell'inerzia termica.	Valutazione della temperatura superficiale dei materiali. Predisporre ricambi d'aria. Verificare emissioni nocive dei materiali. Isolamento acustico a rumori nocivi. Controllo di campi elettromagnetici.

CALCE E INTONACI NELLA BIOEDILIZIA

La calce appartiene al gruppo dei materiali base della bioedilizia. Possiede infatti ottime qualità biologiche, diffusa reperibilità, basso contenuto energetico in fase produttiva. Viene usata come legante per malte e intonaci, garantendo ottime doti di traspirabilità alle murature.

In questo contesto la scelta di un particolare intonaco e della tecnica di messa in opera, devono considerare i tre parametri appena considerati (risorse, energia, comfort). In un edificio l'intonaco influenza molto l'aspetto energetico e termico, dato che regola gli scambi di umidità con l'aria interna. Come si vedrà in seguito il principale nemico degli intonaci è l'umidità, che sia di risalita dal sottosuolo o di condensa, crea comunque gravi danni alle murature, provocando dispersioni termiche indesiderate e diminuzione del comfort. Un fattore da tenere in considerazione è la traspirabilità dell'intonaco nei confronti del vapore acqueo; a questo proposito si utilizzano in bioedilizia degli intonaci "macroporosi" che hanno lo scopo, grazie alla loro conformazione, di far evaporare l'acqua all'interno delle murature, evitando indesiderate migrazioni di sali verso l'esterno. Per quanto riguarda l'inquinamento indoor un pericolo è rappresentato dalle muffe e dai funghi che vengono a formarsi sulle pareti, in seguito all'umidità presente nell'intonaco. Va sottolineato tuttavia che anche i rimedi contro l'umidità di risalita o di condensa, come per esempio iniezioni di resine silaniche o siliconiche, possono rappresentare un agente inquinante dell'aria interna, in quanto, dopo la loro applicazione presentano emissioni di monomeri residui in atmosfera.

Alla luce di queste considerazioni si osserva che rispettando gli standard di costruzione bioecologici, nella scelta e nella messa in opera degli intonaci, è possibile garantire il risparmio energetico e la salubrità degli ambienti abitativi. Nei prossimi capitoli vedremo quali sono i danni apportati dall'umidità nelle murature e i metodi per limitare tali danni.

Capitolo 2

*Il problema dell'umidità
negli intonaci a base di calce*

INTONACO E UMIDITA'

(Cenni storici)

Si può definire intonaco un materiale da costruzione costituito da leganti a base di calce, più eventuali additivi e inerti; la sua applicazione su una parete, in mattoni o pietre, può avvenire con svariate tecniche, e ha principalmente un valore protettivo ed estetico.

La manifattura della calce ha origine antichissime, il primo villaggio con case costituite da pareti rivestite di calce, risale a circa 14-15 mila anni fa, in epoca Natufiana (Palestina e dintorni). Gli storici affermano che la conoscenza dei processi di decarbonatazione, idratazione, e ricarbonatazione per assimilazione di CO_2 , era già largamente diffusa ed uniformata quando vennero costruiti i primi forni verticali da calce, cioè circa 2000 anni prima della venuta di Cristo, in Mesopotamia.

Si può altrettanto affermare che la presenza di umidità, il più grande nemico degli intonaci, è stato un problema che ha sempre interessato l'uomo. Vi sono molte testimonianze, a seconda del periodo storico, che riportano svariate tecniche di protezione dall'umidità.

In Italia questo problema si è sentito in maniera rilevante attorno al XV secolo, quando gli intonaci assumono una funzione prevalentemente decorativa. E' in questo periodo che appaiono per la prima volta informazioni esplicite sul modo di realizzare intonaci in presenza di umidità, per opera di autori come il Palladio ed il Vasari.

I progressi ottenuti nel settore della scienza dei materiali hanno permesso, dall'inizio di questo secolo, l'ottenimento di malte per intonaco con sempre migliori proprietà. Si è sviluppata una coscienza circa i comportamenti indotti da particolari leganti e l'uso di nuovi additivi.

Tuttavia non va dimenticato che affianco ai materiali da utilizzare si deve considerare anche la loro tecnica di applicazione; materiali e tecniche devono essere considerati univocamente per contrastare l'umidità. Le tecniche del passato fanno parte di una cultura costruttiva che ormai non possediamo più, ma se rilette ed analizzate ci permettono di comprendere la complessità che ha sempre caratterizzato questo elemento, sia in termini di materiali che di tecniche, e di osservare la grande accuratezza costruttiva richiesta nel corso dei secoli dove presente il "grande nemico": l'umidità.

I materiali

E' importante dedicare uno spazio ai materiali che costituiscono un intonaco. Gli attuali intonaci sono costituiti dalla miscelazione di diversi tipi di calce unitamente all'aggiunta di inerti ed additivi, a seconda delle caratteristiche che devono possedere.

I materiali utilizzati per gli intonaci rientrano nella categoria dei ceramici, materiali che per definizione sono inorganici formati dalla combinazione di elementi metallici e non-metallici. In essi predominano legami ionici e covalenti, e gli elementi che si riscontrano spesso al loro interno sono Alluminio (Al), Silicio (Si), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Ossigeno (O), Carbonio (C) e Azoto (N).

Oltre ai cementi, nei ceramici, sono inclusi anche il vetro, le argille e gli ossidi puri. Questi materiali si ottengono tramite opportuni riscaldamenti ad alta temperatura.

Per gli intonaci i materiali che si possono usare principalmente sono:

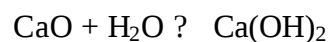
- Calci aeree.
- Calci idrauliche.
- Cementi.
- Inerti.
- Additivi.

Le calci aeree

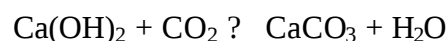
Le calci aeree erano il legante principalmente utilizzato fino alla metà del '600. Si preparano riscaldando a 900 – 1000°C in appositi forni da calce, pietre calcaree prelevate da fiumi monti o cave. Dopo circa 20 ore le pietre si trasformano in ossido di calcio perdendo acqua sottoforma di vapore e producendo CO₂



Quello che si ottiene è un agglomerato di zolle bianche e fragili chiamate calce viva. A contatto con l'acqua la calce viva forma idrossido di calcio detto calce spenta.



Appena si applica il materiale sulla parete si hanno i fenomeni di presa e indurimento. La presa si protrae per tutto il tempo che il materiale impiega per perdere l'acqua che è servita per l'impasto, ed è quindi un processo molto breve. L'indurimento invece è più lungo nel tempo e consiste nella reazione di carbonatazione:



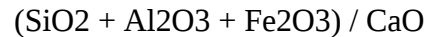
In questo modo si ritorna alla stessa materia di cui era costituita la pietra utilizzata per la cottura.

Le calci idrauliche

A differenza delle precedenti queste sono in grado di indurire anche in presenza di acqua. Esse si ottengono dalla cacinazione di calcari argillosi (detti calcari marnosi) che contengono una quantità d'argilla variabile tra le 6 e le 20 parti su cento. Per riscaldamento dell'argilla si ottiene ossido di calcio (CaO), mentre per riscaldamento dell'argilla si ottiene silice (SiO₂), allumina (Al₂O₃) e Fe₂O₃. Ad elevate temperature questi ossidi si combinano con l'ossido di calcio per dare silicato bicalcico (Ca₂SiO₄) e alluminato monocalcico (CaAl₂O₃), che sono in grado di indurire in acqua. Il grado di idraulicità è espresso dal rapporto:

argilla / ossido di calcio

ovvero



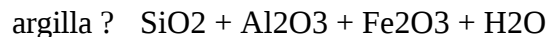
Il grado di idraulicità aumenta all'aumentare del contenuto di argilla e all'aumentare della temperatura di cottura.

I cementi

Nel 1824 nasce il cemento Portland grazie a Joseph Aspdin. Grazie alle sue proprietà si è diffuso rapidamente in questo secolo nella produzione degli intonaci. Dal punto di vista chimico risulta una miscela costituita da:

- 75% CaCO_3 .
- 25% Argilla (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO).

Durante il processo di cottura, a 500°C circa l'argilla si scinde nei suoi ossidi con la formazione di acqua:



Mentre a 900°C il carbonato di calcio subisce la reazione:



A circa $1300 - 1450^\circ\text{C}$ iniziano le reazioni tra gli ossidi delle due precedenti reazioni. I composti che si formano sono:

- Alluminato tricalcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ scritto anche $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) indicato con la sigla C3A.
- Ferro-alluminato tetracalcico ($\text{Ca}_4\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_{10}$ scritto anche $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) indicato con la sigla C4AF.
- Silicato bicalcico (Ca_2SiO_4 scritto anche $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) indicato con la sigla C2S.
- Silicato tricalcico (Ca_3SiO_5 scritto anche $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) indicato con la sigla C3S.

I primi due hanno il compito di formare una matrice liquida a bassa temperatura per facilitare la formazione dei silicati di calcio. Gli ultimi due costituiscono il 75% del prodotto finale e donano resistenza meccanica al cemento indurito. Il prodotto finale che si ottiene dalla cottura è chiamato clinker, il quale viene addizionato con gesso diidrato e ridotto in polvere finissima in un mulino a sfere.

Gli inerti

Al legante ed all'acqua, per la preparazione delle malte da intonaco, si aggiunge un inerte, generalmente sabbia, il quale, oltre ad avere la funzione di impedire eccessivi ritiri durante la presa, facilita il processo di indurimento, a causa della capacità di aumentare la porosità della malta.

Gli additivi

Esistono diversi additivi a seconda del risultato che si vuole raggiungere; esistono infatti acceleranti di presa, adesivanti, anticongelanti, antiritiro, plastificanti, rinforzanti, idrofobizzanti. La maggior parte di questi prodotti è di natura sintetica, come fibre propileniche, resine silaniche, resine acriliche, ecc.

L'ACQUA COME AGENTE DI DEGRADO

I meccanismi con cui l'acqua può degradare una muratura sono principalmente due:

- Meccanismi di degrado fisico.
- Meccanismi di degrado chimico-biologico.

Nella prima categoria vengono descritti i meccanismi e i danni che provocano l'umidità di risalita dal sottosuolo e di condensa. Nella seconda invece sono raggruppate le principali reazioni tra agenti inquinanti (anidride solforosa, anidride carbonica) e intonaco in presenza di umidità, ed infine la crescita di organismi vegetali.

Meccanismi di degrado fisico

Una prima classificazione del tipo di umidità all'interno delle murature si fa in base all'età dell'edificio, e cioè:

- Umidità di invasione, negli edifici vecchi.
- Umidità di costruzione, negli edifici nuovi.

Sebbene arrechino ugualmente danno alla struttura, questi due tipi di umidità hanno comportamenti differenti. In quella di costruzione l'umidità è dovuta all'acqua residua presente nella malta, di conseguenza questa sarà distribuita in maniera uniforme in tutta la struttura ed inoltre è caratterizzata da un periodo transitorio che si esaurisce nel tempo. L'umidità di invasione invece è distribuita irregolarmente e soltanto in alcune parti dell'edificio e non ha periodo transitorio, anzi è stazionaria e tende a progredire nel tempo.

Questo secondo tipo di umidità si classifica in altre due forme:

- *Umidità di risalita*, per ascensione capillare dal sottosuolo.
- *Umidità di condensazione*, dall'aria.

Umidità di risalita

Le murature a diretto contatto con il terreno tendono ad assorbire l'acqua proveniente da falde freatiche o da perdite di tubi sotterranei. Se si osserva la sezione verticale di un muro che ha assorbito acqua dal terreno si può osservare la distribuzione dell'umidità e come questa avanzi nel tempo.

Si può notare che l'acqua sale dalla fondazione per lente avanzate, che presentano un fronte di avanzamento più concentrato verso il centro.

I fattori che favoriscono l'umidità da risalita, sono l'elevata porosità del muro e una grande quantità d'acqua a contatto con le fondazioni. Questo fa sì che questo tipo di umidità si può verificare in ogni periodo dell'anno, in quanto non è legata a condizioni meteorologiche o atmosferiche. Il livello di risalita si aggira sempre intorno ai 2-3 metri e l'impregnazione coinvolge tutto lo spessore della sezione muraria.

La diffusione dell'acqua nei materiali da costruzione, ed in particolare negli intonaci, viene favorita dalla presenza di una rete di canali tra loro interconnessi, di dimensioni variabili per un intonaco, i quali permettono il passaggio e la circolazione di acqua o altri fluidi, e fanno sì che si attuino fenomeni, detti di capillarità, che determinano l'entrata spontanea dell'acqua. Nelle murature la forza di capillarità controbilancia quella di gravità e trattiene normalmente sospese masse di liquido che possono oltrepassare i 300 kg per metro cubo di muro.

Il comportamento capillare

La capillarità è un fenomeno fisico che, in contrasto alla gravità, fa salire dal basso verso l'alto l'acqua nei tubicini di diametro di un capello o meno.

Per spiegare tale fenomeno bisogna introdurre il concetto di tensione superficiale e di bagnabilità di un solido da parte di un liquido.

I fenomeni tipici legati alla tensione superficiale sono quelli della sfericità delle goccioline d'acqua sulla superficie di un vetro. La superficie di un liquido si trova in uno stato tensionato maggiore rispetto alle molecole d'acqua all'interno, e questo stato è tanto maggiore quanto meno affinità esiste tra la fase liquida e la fase subito soprastante. Il lavoro richiesto per incrementare di un'unità l'area della superficie di separazione fra due liquidi immiscibili, oppure fra un solido o un liquido, oppure fra un solido e un gas, è detta *tensione interfacciale*; in maniera più specifica, la tensione interfacciale tra un liquido ed un gas che non si disciolga in esso è chiamata *tensione superficiale di un liquido*. L'unità di misura di tale grandezza nel S.I. è il *Joule al metro quadrato* (J/m^2).

La tensione superficiale dei liquidi dipende dalla loro natura, dalla temperatura e dalla pressione.

Per quanto riguarda la bagnabilità questa viene spiegata osservando le forze di coesione esistenti tra le molecole di liquido, e le forze di adesione tra le molecole del liquido e quelle del solido: se le forze di adesione prevalgono sulle forze di coesione, il liquido *bagna* la superficie del solido; se invece le forze di coesione prevalgono su quelle di adesione, il liquido *non bagna* il solido. In genere:

- Angolo di contatto *maggiore* di 90°: il liquido non bagna il solido.
- Angolo di contatto *minore* di 90°: il liquido bagna il solido.

Fatte queste considerazioni si può dire che la superficie di separazione in un poro capillare, può assumere una superficie concava o convessa. Nel caso dell'acqua verrà a formarsi un menisco concavo con una conseguente variazione di pressione, data dalla legge di Laplace:

$$\Delta P = 2\gamma/r$$

Dove:

γ = tensione superficiale liquido-aria.

r = raggio di curvatura del menisco.

Per ristabilire l'equilibrio il liquido deve salire nel poro capillare (innalzamento capillare), finché la pressione idrostatica della colonna di liquido non compensa tale differenza di pressione. Per una colonna di liquido di altezza h e densità d, la pressione esercitata vale:

$$P = d \cdot g \cdot h$$

All'equilibrio dovrà quindi verificarsi:

$$2\gamma/r = d \cdot g \cdot h$$

E quindi:

$$h = 2\gamma/r \cdot g \cdot d$$

h indica l'altezza massima cui può risalire l'acqua in un materiale poroso-capillare come l'intonaco, per effetto della suzione capillare.

Effetti degradanti dell'umidità di risalita

L'acqua assorbita dal sottosuolo diventa un veicolo per il trasporto di alcuni sali solubili all'interno della muratura. La loro presenza favorisce il fenomeno della capillarità. Questi producono le alterazioni più significative per l'intonaco determinando inizialmente variazioni di aspetto, con il distacco della finitura e la comparsa di efflorescenze poi, con le continue ricristallizzazioni si innesca un processo disgregativo, che porta al distacco dell'intonaco dalla muratura ed alla sua totale distruzione.

La *cristallizzazione salina* è regolata da due fattori concomitanti: la diffusione del vapore acqueo dall'interno, verso lo strato esterno più asciutto, e la migrazione della soluzione salina attraverso la rete porosa. Queste due velocità sono legate dalle seguenti relazioni:

- *Velocità di diffusione del vapore* < *Velocità di migrazione della soluzione*: la cristallizzazione salina avviene sulla superficie esterna (efflorescenza).
- *Velocità di diffusione del vapore* > *Velocità di migrazione della soluzione*: l'equilibrio si crea ad una certa distanza dalla superficie e la cristallizzazione avrà luogo al di sotto di essa (subflorescenza).

I sali sono particolarmente dannosi per la loro igroscopicità, legata ad aumenti di volume in alcuni casi enormi. Quelli che hanno un ruolo fondamentale nei processi di alterazione degli intonaci sono:

- *Solfati*: tra questi, quello che ha la massima attitudine migratoria, è il solfato di magnesio (MgSO_4), data la sua elevata solubilità. Si trovano molto spesso nei materiali da costruzione al loro stato naturale, in quanto costituiscono circa il 6% della crosta terrestre. A temperatura ambiente tali sali, se disciolti, sono in uno stato di continua soluzione e cristallizzazione, con conseguenti variazioni di volume. Tali variazioni sono pericolose in quanto provocano una variazione di tensione interna del materiale, portandolo alla disgregazione.
- *Nitrati*: come per i solfati, i danni apportati da questi sali sono simili (variazioni di volume e di tensione interna). In questo caso però si manifestano in maniera più accentuata, in quanto sono in grado di assorbire grandi quantità d'acqua e di vapore, ed inoltre cristallizzano ad un'umidità atmosferica del 50%.
- *Cloruri*: al loro stato naturale non presentano caratteristiche di igroscopicità, ma le possono acquistare se si combinano con altri sali, in genere i solfati. La loro pericolosità non risiede nei cicli di cristallizzazione come per gli altri, dato che questi cristallizzano intorno ai 25°C e per umidità relative del 30%. Il vero pericolo sta nel fatto che, se acquistano igroscopicità, possono assorbire grandi quantità d'acqua, con una conseguente attivazione di altri sali, oltre che provocare effetti nocivi per le persone.

Protezione dall'umidità di risalita

Bisogna tenere conto che l'acqua aspirata per capillarità viene intrappolata nell'ossatura della muratura e può essere eliminata solo per evaporazione. Di conseguenza i rimedi si basano su intonaci che permettano tale processo, che non ostacolino cioè l'evaporazione dell'acqua dall'interno. Gli intonaci più utilizzati per questo scopo sono quelli *macroporosi*; la loro caratteristica è appunto la permeabilità al vapore, donata dalla loro particolare struttura a pori aperti. Il più delle volte l'utilizzo di sostanze idrofobizzanti fa sì che questi siano anche una barriera per l'acqua proveniente dall'esterno. Nel caso di applicazione negli ambienti interni bisogna valutare attentamente l'aspetto "climatico". Il flusso di umidità proveniente dall'interno delle murature infatti, interessa i locali interni con la formazione di muffe e la possibile insalubrità del locale. In questi casi sarà necessario, qualora non si possa attuare diversamente l'intervento, abbinarlo ad interventi aggiuntivi, come la forte ventilazione del locale, anche con estrattori di umidità. E' consigliato addirittura non porre mobilio sulle pareti intonacate con intonaci macroporosi dall'interno, per il fatto che l'evaporazione porterà alla formazione di muffe sulle zone coperte.

In alternativa agli intonaci esistono altri metodi per proteggersi; anziché promuovere lo smaltimento dell'umidità, si propone un intervento basato sulla realizzazione di un vero e proprio sbarramento orizzontale. Si collocano cioè dei fogli isolanti in laminato plastico che costituiscono una barriera alla risalita dell'acqua. La loro applicazione avviene dopo aver tagliato, con particolari macchine, i muri portanti all'altezza voluta (taglio meccanico). In alcuni casi però non è possibile effettuare questo tipo di intervento, per esempio su muri esterni in sasso o ciottolo o comunque su murature in genere degradate. Si interviene allora con un particolare taglio, denominato taglio chimico, in quanto prevede l'iniezione, con apposita apparecchiatura a pressione, di resine idrofobizzanti (in genere silaniche) in fori precostituiti. Si crea così una barriera idrorepellente che crea un valido ostacolo contro l'umidità di risalita.

Umidità di condensazione

L'umidità di condensazione si deposita come acqua liquida sulla parete interna del muro. La condensazione deriva esclusivamente dal raffreddamento dell'aria ed è legata alle contingenze meteorologiche del momento ed a quelle periodiche stagionali che determinano l'abbassamento di temperatura. Se il muro è omogeneo, per esempio tutto di mattoni e tutto ugualmente freddo, allora l'acqua di condensazione si deposita in maniera uniforme ed omogenea dal soffitto al pavimento.

Si può dire che sia un fenomeno discontinuo dato che può "apparire" e "scompare" a seconda delle condizioni termoigrometriche degli ambienti interni o delle condizioni ambientali degli ambienti esterni.

In un locale questo fenomeno si localizza in corrispondenza della "parete fredda", ovvero della superficie (pareti, soffitto o pavimento) che ha la temperatura più fredda. Questa sottrae calore all'aria portandola vicina allo stato di saturazione, a seconda del ricambio fra locale chiuso ed aria esterna.

Quando si tratta di sola condensazione superficiale l'umidità si manifesta in due modi diversi a seconda della struttura esterna dei corpi: *bagna*, quando la superficie è impermeabile (metallo, marmo, ceramica, vernice) e *macchia*, cioè rende un po' più scuro il tono del colore quando la superficie è assorbente (gesso, intonaco di calce, laterizio).

Il fenomeno per il quale le molecole d'acqua dell'umidità di condensa si fissano alla superficie di una parete, è l'adsorbimento.

L'adsorbimento

È un fenomeno superficiale che si innesca su di un solido o un liquido (adsorbenti), con particolari sostanze (adsorbati). Ogni superficie solida presenta una certa attitudine a interagire con le molecole gassose con cui viene a contatto: questa tendenza è riconducibile al fatto che sulla superficie di ogni solido, anche sul metallo più levigato, esistono sempre zone di attrazione elettrostatica, spigoli, imperfezioni, fratture microscopiche, ecc. La tendenza all'interazione con i gas risulta naturalmente esaltata se il solido si presenta sotto forma porosa in modo da possedere una superficie molto estesa rispetto alla sua massa o al suo volume. Gli intonaci ad esempio, presentano una struttura particolarmente porosa, caratterizzata da elevate superfici interne disponibili.

In generale esistono due fondamentali tipi di adsorbimento classificati a seconda delle forze messe in gioco:

- Adsorbimento fisico.
- Adsorbimento chimico.

Nel primo caso le forze che intervengono fra la superficie e le molecole di gas sono forze di dispersione a breve raggio d'azione, piuttosto deboli, generalmente note con il nome di forze di forze di Wan der Waals. Nel secondo caso invece si creano dei veri e propri legami irreversibili tra superficie e molecola adsorbita. Accanto a questi due tipi di adsorbimento si conoscono anche casi di tipo misto.

Effetti negativi dell'umidità di condensazione

Rispetto a quella di risalita non provoca un vero e proprio degrado, tuttavia è responsabile della diminuzione della resistenza termica e l'aumento della sensibilità al gelo delle murature, senza contare che è una delle cause principali della formazione di organismi vegetali.

Questi problemi si riflettono in maniera pesante sulla salubrità degli ambienti interni. Non per niente le attuali tecniche di bioedilizia considerano attentamente il fattore termoigrometrico negli ambienti chiusi, combinando materiali a tecniche di riscaldamento e depurazione dell'aria. Per fare un esempio si pensi ai piani terreni o ai semi-interrati: in inverno l'umidità presente nei pavimenti (presente come umidità di risalita dal sottosuolo) passa nell'aria e questa, saturandosi, va a depositarsi sulle parti alte delle pareti, sulla volta, sui vetri delle finestre e su tutte le strutture più fredde.

Altri tipi di danni sono di tipo estetico, caratterizzati da macchie ben visibili sull'intonaco. Queste sono in genere di forma tondeggianti o a strisce parallele, che appaiono e scompaiono sempre con la medesima precisa ubicazione. Si attenuano con il tempo secco; ritornano con l'aria umida. Le macchie su muri di tipo tradizionale sono in genere isolate e tondeggianti, e sono da attribuire a diverse cause:

- Presenza di depositi isolati di sali igroscopici.
- Presenza di metalli, pietrame, cemento, od elementi di elevato peso specifico e buona conducibilità termica rispetto alla restante massa muraria.
- Presenza, in muro leggermente umido, di mattoni o pietre isolate.

La macchia di umidità che appare nei giorni piovosi è dovuta nel primo caso alla dissoluzione dei sali igroscopici; nel secondo caso a vera e propria condensazione; nel terzo caso alla maggiore difficoltà di evaporazione che i pezzi cementati presentano rispetto al resto di un muro tutto leggermente umido.

Ad ogni modo le macchie variabili mettono in gioco una quantità d'acqua molto piccola; si tratta perciò di un'umidità più deturpante che dannosa.

Criteri di difesa contro l'umidità di condensazione

Bisogna innanzitutto ridurre la produzione di vapore acqueo quando questo ha origine in locali chiusi ed eliminare (possibilmente) i materiali con una buona conducibilità termica (marmi, cemento, laterizi) e rimediare con resistenze termiche addizionali all'eccessiva dispersione. Come già accennato è fondamentale, a seconda del caso considerato, abbinare intelligentemente tecniche e materiali. La necessità di un forte contenimento dei consumi energetici, legata anche al contenimento delle infiltrazioni d'aria dagli infissi, ha portato infatti ad ingigantire tutti i problemi di errata realizzazione termica delle murature esterne, e a far sviluppare tecnologie specifiche per la soluzione del problema. Sono venuti alla luce i problemi legati a mancanza di isolamento, alla sua applicazione in modo discontinuo, all'applicazione di isolanti con capacità igroscopica e conseguentemente sono stati sviluppati sistemi adeguati a risolvere o contenere il problema.

Prima di scegliere il metodo con cui intervenire è necessario verificare quale sia la struttura muraria di insufficiente tenuta termica che provoca il fenomeno con la sua esagerata dispersione. Tutta la tecnica dei materiali termoisolanti per l'edilizia è basata su di un'attenta inclusione di spazi d'aria, piccoli o grandi. Un notevole progresso è stato dato dai "semipieni", mattoni a foratura verticale, realizzati con speciali argille. Questi sono in grado di reggere carichi elevati ed allo stesso tempo riescono ad offrire una buona resistenza termica. Oltre all'uso di mattoni semipieni per la difesa contro l'umidità da condensa si ricorda anche l'impiego di diversi tipi di pannelli e rivestimenti. Lane minerali di roccia o vetro rivestite in guaina di polietilene, o pannelli di strisce di legno sono quelli più utilizzati.

Uno dei metodi utilizzati, che ha dimostrato anche una certa efficacia, è quello dell'*isolamento esterno a cappotto*. Questo sistema consiste nell'applicare sull'esterno delle murature dei tasselli di pannello isolante di polistirene ad alta densità, sui quali successivamente viene posto un particolare tipo di intonaco. Questo è di solito un intonaco sottile, arricchito con legante organico (prevalentemente è una resina di tipo acrilico o vinilico), che viene applicato in più strati. Il primo strato contiene un collante a base di resina, cariche minerali e cemento; ad esso si incorpora una rete in fibra di vetro che ha lo scopo di assorbire le tensioni a trazione cui è sottoposto l'intonaco. Sopra questo strato si pone un secondo strato di preparazione ed infine l'intonaco di finitura. Il vantaggio di questo sistema sta nel fatto che l'intonaco costituisce un sistema di sbarramento alla penetrazione dell'acqua dall'esterno, cui non si associano grossi problemi di condensa, per il fatto che è applicato su di un isolante già di per se stesso scarsamente permeabile al vapore.

Per quanto riguarda gli intonaci, sono stati messi a punto degli intonaci speciali che, grazie alla presenza di inerti, hanno lo scopo di aumentare la resistenza termica delle murature sulle quali vengono applicati. Proprio per questo fatto tali intonaci sono denominati *termici*. Gli inerti utilizzati sono in genere argille espanse, che ostacolano la propagazione del calore creando delle cavità d'aria, oppure sughero.

Meccanismi di degrado chimico-biologico

I più gravi problemi sono rappresentati dagli inquinanti atmosferici, che vengono portati sulle murature dalla pioggia; la loro presenza, combinata all'acqua, innesca dei processi chimici che portano alla destrutturazione degli intonaci. Gli impianti di riscaldamento e l'avvento sempre più numeroso di mezzi motorizzati, i prodotti inquinanti immessi in atmosfera e nei corsi d'acqua, hanno aumentato notevolmente le cause di degrado, tanto da creare seri problemi per tutti i materiali costituenti la superficie esterna delle murature. Gli inquinanti più pericolosi sono:

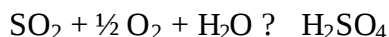
- *Anidride solforosa* (SO₂)
- *Anidride solforica* (SO₃)
- *Anidride carbonica* (CO₂)

Questi, posti in contatto con l'umidità presente nelle murature, diventano acidi particolarmente pericolosi, che a loro volta si combinano con il calcare, formando dei sali. Questi aumentano l'igroscopicità dell'intonaco e lo portano a disgregazione, cristallizzando.

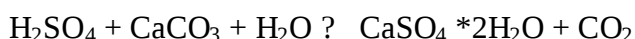
La provenienza degli inquinanti deriva dagli scarichi gassosi immessi in atmosfera, l'incenerimento dei rifiuti, e negli ambienti chiusi dal riscaldamento domestico. Queste fonti infatti sono ricche di zolfo, il quale si combina con l'ossigeno per dare gli inquinanti appena elencati, particolarmente nocivi in presenza di acqua.

Anidride solforosa

Questa è nociva in quanto crea delle erosioni nell'intonaco, o delle macchie nerastre. In contatto con l'acqua forma acido solforico secondo la reazione:



L'acido solforico reagisce, sempre in presenza di acqua, con il carbonato di calcio presente nell'intonaco per formare uno strato gessoso sulla superficie; tale processo si indica con il nome di *solfatazione del CaCO₃*:



Questo strato può essere dilavato dalla pioggia e creare quindi delle evidenti erosioni oppure, nelle zone riparate dalla pioggia, a causa della condensa si forma un film in cui si depositano delle particelle solide. Quando il film evapora si formano le croste nere.

Anidride carbonica

Il deterioramento che provoca la CO₂ è dato dalla *carbonatazione del CaCO₃*:



Il bicarbonato di calcio che si forma è molto più solubile del carbonato di calcio normalmente presente, e quindi è anche più facilmente dilavato ed asportato. La velocità con cui viene dilavato

dipende dalla temperatura ambientale, la porosità del solido, l'estensione della superficie di contatto liquido-solido.

Gli organismi vegetali

Un ulteriore problema viene rappresentato dalla crescita di organismi vegetali o microrganismi. Il loro danno è principalmente di tipo estetico, in quanto non alterano la struttura dell'intonaco. I microrganismi attecchiscono sull'intonaco in presenza di un substrato adeguatamente umido. La loro nascita e sviluppo dipende e varia, al variare dell'umidità e condizione di luce. Esistono specie la cui nascita e sviluppo viene favorita da condizioni di caldo umido e buio, altre specie, il cui sviluppo viene favorito da condizioni opposte. Si può avere a che fare con organismi unicellulari riuniti in colonie, con cellule circondate da una guaina mucillaginosa più o meno spessa, variamente pigmentata, in grado di assorbire acqua e di trattenerla per lungo tempo. Oppure con alghe verdi, le quali hanno cellule sprovviste di guaina gelatinosa e quindi sono poco resistenti a condizioni ambientali intense.

Alcune forme microbiche sono in grado di svilupparsi in assenza di acqua sfruttando la CO₂ dell'aria. E' il caso dei tiobacilli, che creano un tipo di deterioramento denominato *a placche*, dato che le parti alterate si presentano a lamelle sollevate ed in via di scrostamento. Il materiale organico di questi batteri inoltre, combinato con sostanze inquinanti presenti nell'aria, funge da substrato per la crescita di microrganismi vegetali, quali muschi e licheni. Questi possono provocare un deterioramento di tipo meccanico, in quanto possono penetrare nella struttura porosa provocando microfessurazioni.

Capitolo 3

*L'acqua come agente di degrado
(prove sperimentali)*

Introduzione

In questo capitolo verrà messo in luce, da un punto di vista pratico, il ruolo degradante dell'acqua nei confronti degli intonaci a base di cake. La campionatura e la successiva raccolta dei dati è sostanzialmente divisa in due parti: la *prima parte* è consistita nel prelievo di alcuni campioni di muffa. Questo tramite tamponatura, è servito per verificare l'effettiva crescita di microrganismi sulle pareti e dare così una prima idea sul degrado. La *seconda parte* invece, è stata incentrata nell'analisi chimica di un pezzo di intonaco che ha subito l'azione degradante dell'acqua. Sono stati ricavati due campioni: uno dalla parte "integra" dell'intonaco e uno dalla parte degradata, andando poi ad analizzare per ognuno dei due, la quantità di alcuni metalli e anioni di particolare interesse per l'esperimento. Saranno spiegati i metodi e descritte le apparecchiature che hanno permesso la raccolta dei dati. In base a questi saranno fatte delle opportune considerazioni sull'analisi, e quindi sul degrado per opera dell'acqua.

Dopo aver trovato un edificio in evidente stato di degrado, ho prelevato gran parte dei campioni in una delle sue stanze. I campioni raccolti sono in tutto quattro:

- Strato di intonaco e tamponi. Porta d'ingresso stanza. (1)
- Strato di intonaco e tamponi. Porta laterale. (2)
- Tamponi su intonaco privo di strato superficiale. (3)
- Tamponi su parete. (4)

Vengono riportate le foto delle 4 diverse situazioni. Per ogni campione sono stati raccolti due tamponi. Il quarto campione non è stato raccolto nella stanza considerata.



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

Altre foto mettono in evidenza la crescita di muffe e di efflorescenze sulle pareti del locale preso in considerazione:



Analisi microbiologica

Come già detto questa parte è servita come approccio iniziale al problema, anche perché la crescita di microrganismi è il degrado più comune e di più facile individuazione. Molteplici sono le cause che portano alla formazione ed alla proliferazione di questi microrganismi dannosi e sgraditi, che aggrediscono con la medesima tenacia ed intensità le superfici interne ed esterne delle abitazioni. Esaminando i principali fattori che provocano l'insorgenza della muffa, appare chiaro che il denominatore comune, la vera causa di fondo, è da ricercarsi nella presenza di una percentuale più o meno elevata di umidità, dovuta non solo a difetti strutturali delle abitazioni che portano alla presenza di infiltrazioni d'acqua o all'abbassamento del potere isolante delle murature. Le muffe si formano in condizioni anche di umidità minima, assenza di luce e perfetta stasi dell'aria. Non è detto che la loro presenza indichi che un locale sia umido, dato che si possono formare in particolari condizioni anche non stazionarie nel tempo (sbalzi termici, cambi di stagione). Sono tuttavia un segnale evidente che l'umidità ha intaccato pesantemente l'intonaco, e quindi un primo punto di partenza per andare a verificare le condizioni nel substrato.

La raccolta dei campioni è avvenuta scegliendo diverse situazioni: innanzitutto ho individuato un edificio in evidente stato di degrado, e lì ho prelevato alcuni tamponi all'interno di una stanza al piano terra. Ho voluto prelevare in due punti diversi i primi due campioni, dato che presentavano una situazione molto differente riguardo alle condizioni di esposizione alla luce e all'aria. Come si può vedere dalle foto, le muffe sulla muratura della porta laterale sono molto accentuate, segno che questa superficie è più protetta dalla luce e dall'aria. Il terzo campione è stato raccolto per vedere se le macchie nere, riscontrate su un tratto di muratura priva di strato superficiale, fossero effettivamente muffe. Il quarto campione è stato raccolto in un'altra situazione, sulla muratura di un locale chiuso e poco aerato, dove spesso ci sono formazioni di vapore acqueo.

Una volta raccolti, i tamponi sono passati al laboratorio di microbiologia per l'analisi delle muffe. La tecnica utilizzata è stata quella della *coltura su vetrino*.

Tecnica della coltura su vetrino

Con questa tecnica si fanno crescere le muffe tramite incubazione su di un terreno agarizzato. La procedura è la seguente:

- *Sterilizzazione*: si prepara una piastra Petri in vetro, mettendo un filtro di carta bibula sul fondo, un tubicino di vetro piegato a V mediante fiamma del bunsen, tre vetrini coprioggetti, e tre vetrini portaoggetti. Il tutto viene avvolto con carta stagnola e sterilizzato a 121°C per 15 minuti o a 170°C per 2 ore.
- *Preparazione dell'agar*: sul fondo di una Petri versare uno strato di circa 1 mm di Agar Patata Destrosio. La piastra viene chiusa e si fa solidificare l'agar per una notte, a temperatura ambiente. Una volta solidificato l'agar viene tagliato in blocchi quadrati di 1 cm di lato, da posizionare sulla superficie del vetrino portaoggetti sterile.
- *Inoculo*: con questa operazione si trasferisce il microrganismo sul terreno di coltura. In questo caso si è versato, per ogni tampone, 1 ml di soluzione fisiologica in agar per osservare la nascita delle muffe, ed isolare quelle di particolare interesse. Una volta cresciute vengono osservate e quelle da identificare vengono toccate con un'ansa sterile, la quale a sua volta verrà trasportata nei 4 angoli del frammento d'agar, per ogni vetrino. Svoltata questa operazione si posizionano i vetrini portaoggetti e si passa all'incubazione.
- *Incubazione*: si versano 5-10 ml di acqua distillata sul fondo della piastra, dopodiché la piastra viene chiusa e messa in incubazione a 25°C per 5 giorni.
- *Analisi della coltura*: con microscopio a piccolo ingrandimento osservare la maturazione della coltura. Quando questa è matura si preleva uno dei tre vetrini coprioggetti dalla superficie dell'agar, facendo attenzione che il micelio resti attaccato alla superficie inferiore del vetrino. Questo viene posizionato su un nuovo portaoggetti che porta sulla superficie una goccia di blu cotone di lattofenolo; questo serve per creare il contrasto con le strutture ifali. Il secondo vetrino portaoggetti viene trasferito su una goccia d'acqua allo scopo di osservare la colorazione naturale delle ife. Il terzo vetrino viene conservato così da poter prolungare l'incubazione, in caso di insuccesso, per le muffe a lunga crescita.
- *Conservazione*: i margini dei coprioggetti vengono chiusi con paraffina o smalto da unghie, per permettere la conservazione del preparato.

Raccolta dell'intonaco e analisi chimica

Un'attenta osservazione della stanza ha soffermato il mio interesse su due punti in particolare: uno sulla parte superiore della porta d'ingresso della stanza e uno sulla parete laterale in fondo. Queste zone presentavano infatti una colorazione più scura che non si poteva attribuire a cambi di tonalità della finitura superficiale, bensì a diverse cause di degrado. I primi due campioni quindi, oltre ai tamponi con le muffe, comprendono alcuni pezzi d'intonaco, prelevati proprio dal punto in cui sono state individuate queste variazioni.

Si è passati così all'osservazione dei campioni; entrambi presentavano una situazione particolare: la parte più interna aveva un colore grigiastro, tipico dei finimenti cementizi, mentre la parte più esterna, cioè più esposta, presentava una netta differenza. Questa differenza si notava nel colore giallastro. Si è ipotizzato che tale zona avesse subito nel tempo un certo degrado, attribuibile all'umidità e alla crescita di microrganismi. Entrambi i campioni comprendevano diversi frammenti delle zone in esame. Tra i due, il primo comprendeva un frammento in cui tale differenza era molto più evidente. Questo pezzo è stato così preparato levigandolo fino ad ottenere un parallelepipedo delle dimensioni di circa 5cm x 4cm x 1cm. Tramite un pennarello blu si è evidenziata la linea di demarcazione delle due zone, chiamando "B" la parte integra, e "A" la parte degradata. Per l'analisi si sono ottenuti altri due campioni, A' e B' ricavati dalle rispettive facce.



Vista del campione preparato



Separazione delle due zone



Raccolta del campione dalla faccia A



Raccolta del campione dalla faccia B

L'analisi è stata fatta in base ad alcuni criteri che potessero mettere in evidenza il degrado, dovuto all'azione dell'acqua. Si è fatto così riferimento ai sali solubili già presenti nel materiale e cioè il solfato di magnesio (MgSO_4), che è il più solubile, e il solfato di calcio (CaSO_4), che è poco solubile. Si è tenuto conto dei sali che si formano per apporto esterno e che non sono presenti naturalmente nel materiale; in genere sono il nitrato potassico (KNO_3), di sodio (NaNO_3), di calcio ($\text{Ca(NO}_3)_2$) e il cloruro di calcio (CaCl_2). I nitrati derivano dall'uso di fertilizzanti contenenti azoto oppure, in questo caso dall'ossidazione di sostanze organiche (come le muffe). I cloruri invece sono rari e si riscontrano nelle murature di edifici che si trovano in zone costiere, sottoposti all'aria marina. Sono comunque riscontrabili se il materiale da costruzione è stato realizzato con pietra o sabbia proveniente da zone costiere. Per questi motivi sono stati analizzati: calcio, magnesio, potassio, sodio, cloruri, solfati e nitrati. In più due metalli di transizione, il ferro e il manganese, e anche l'alluminio. Sono stati presi in considerazione anche i fluoruri, dato che il fluoro è un elemento che si riscontra spesso nei minerali. Come ultimo dato di raffronto si è calcolata la quantità di calcare totale per i due campioni.

Per l'**analisi dei metalli** si è ricorsi alla *spettroscopia di emissione atomica*. Questa sfrutta l'emissione atomica di onde elettromagnetiche da parte di atomi, eccitati mediante una sorgente di energia termica o elettrica. In base alla misura della lunghezza d'onda emessa si può risalire all'atomo che l'ha emessa, e alla sua concentrazione nel campione. L'energia assorbita per passare dallo stato eccitato e la lunghezza d'onda del fotone emesso sono messi in relazione dalla legge di Planck:

$$E = h \cdot \nu$$

h = costante di Planck = $6,6260755 \cdot 10^{-34}$ Js

ν = frequenza = c/λ = velocità della luce/lunghezza d'onda.

Dato che ogni elemento è caratterizzato da un ben preciso sistema di elettroni distribuiti in precisi livelli energetici, le radiazioni emesse in conseguenza ad un'eccitazione ionica sono caratteristiche per ciascun elemento.

Esistono diverse tecniche di eccitazione:

- Spettroscopia di emissione a fiamma: eccitazione termica.
- Spettroscopia di eccitazione al plasma: eccitazione termica.
- Spettroscopia di emissione a eccitazione elettrotermica: eccitazione elettrotermica.

Quella utilizzata in questo caso è stata utilizzata quella al plasma ed in particolare lo spettrometro ICP (Inductively Coupled Plasma). Esistono infatti diversi modi per ottenere il plasma, in questo caso viene ottenuto innescando la formazione di ioni in un flusso di argon (che funge anche da gas di trasporto) mediante scarica elettrica e accelerando questi ultimi con un campo magnetico oscillante, generato da una bobina di induzione a radiofrequenza. Nella zona di eccitazione-osservazione si possono raggiungere temperature che raggiungono i 6000-7000°K, in seguito al continuo apporto di energia da parte della bobina. Il dispositivo prende il nome di torcia perché il plasma assume visibilmente la forma di una fiammella. I vantaggi offerti dal plasma rispetto agli altri tipi di eccitazione sono:

- Possibilità di raggiungere elevate temperature.

- Ambiente di lavoro inerte.
- Eccellente rapporto segnale/disturbo.

Nell' ICP la soluzione campione viene introdotta nel nebulizzatore da una pompa peristaltica; da qui un flusso di argon trasporta l'aerosol all'interno della torcia e del plasma. Le radiazioni emesse vengono focalizzate su un monocromatore. I monocromatori attuali sono costituiti da un elemento disperdente (un reticolo di riflessione), che ha il compito di scindere in radiazioni monocromatiche la radiazione policromatica uscente dalla torcia. Le radiazioni vengono così raccolte da un rivelatore e tramite un fotodiodo viene elaborato il segnale, successivamente elaborato da un microprocessore.



Vista dell'ICP



Vista della torcia



Microprocessore

Operazioni preliminari

Preparazione dei campioni

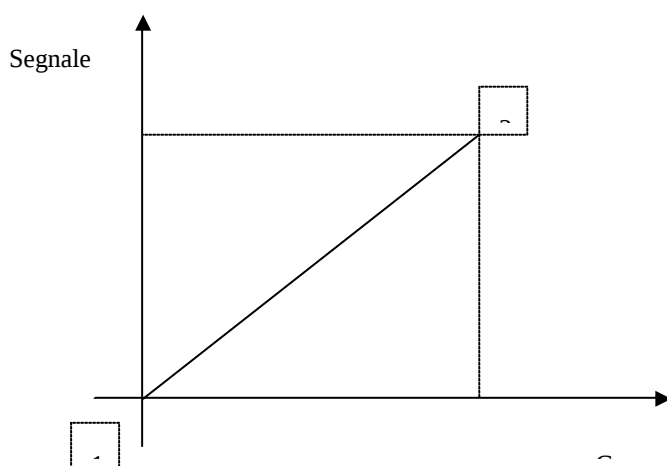
Quantità prelevata di A	Quantità prelevata di B
0,3797 g	0,3342 g

Le quantità di campione prelevate sono state disgregate mediante un processo termico a più stadi di temperature, e successivamente sono state sciolte in 50 ml di acqua ultrapura.

Standardizzazione del metodo

Si crea una retta interpolando due punti di riferimento: il bianco matrice e lo standard di lavoro (STD). Il bianco matrice è una soluzione priva degli elementi che voglio analizzare e serve a dare lo zero della retta, in quanto corrisponde all'assenza di analita nel campione.

Lo standard di lavoro (STD) invece dà il punto della retta corrispondente alla concentrazione degli elementi che voglio analizzare.



1) Bianco matrice.

Per l'**analisi degli anioni** si è ricorsi alla cromatografia a scambio ionico. Questa tecnica sfrutta la diversa affinità delle molecole e degli ioni nei confronti di due fasi diverse. In genere queste sono una fase mobile ed una stazionaria; la separazione dei componenti in una miscela è attribuita alla loro diversa affinità nei confronti di queste due fasi. Più una sostanza è affine alla fase stazionaria, più a lungo viene trattenuta e così il suo scorrimento è rallentato rispetto ad altre sostanze meno affini a tale fase. Nelle interazioni che si verificano tra la sostanza da separare e le due fasi gioca un ruolo fondamentale la polarità delle due sostanze. Le diverse tecniche cromatografiche vengono classificate in base al meccanismo principale di separazione che interviene in ciascuna di esse.

- Cromatografia di adsorbimento.
- Cromatografia di ripartizione.
- Cromatografia a scambio ionico.
- Cromatografia di esclusione.
- Cromatografia di affinità.

Nel nostro caso è stata utilizzata quella a *scambio ionico*; questa tecnica prevede l'utilizzo di una resina a scambio ionico come fase stazionaria. Questa è costituita da macromolecole con siti attivi ionizzati, i cui controioni possono essere scambiati con altri, aventi stessa carica, eluiti con la fase mobile. Lo scambio può avvenire o meno a seconda dell'affinità degli ioni presenti nella fase mobile con i siti attivi della fase stazionaria.

Per l'analisi sono state preparate due miscele, rispettivamente per il campione A e il campione B, miscelando 1g di ogni campione in 50cc di acqua ultrapura.

La fase stazionaria viene impaccata in una colonna, mentre la miscela da separare viene depositata in testa alla colonna, su uno strato molto sottile. Dopo il caricamento della colonna si aggiunge in modo continuo la fase mobile (detta eluente) che, scorrendo attraverso la fase stazionaria, trascina con sé i diversi componenti della miscela, secondo la diversa affinità di ciascuno verso le due fasi (mobile e stazionaria); le sostanze più affini alla fase stazionaria sono trattene di più e quindi il loro trascinarsi risulta più lento. Lungo la colonna si formano così delle bande. L'eluente in uscita dalla colonna viene raccolto in frazioni di volume noto (per es. 10 ml). Al termine della separazione cromatografica i recipienti di raccolta contengono quantità diverse di ciascuna sostanza eluita; queste possono essere determinate per via gravimetrica (dopo evaporazione del solvente) oppure misurandone una proprietà fisica come l'assorbimento del colore.

La separazione cromatografica si conclude con la registrazione del cromatogramma, ovvero del tracciato che descrive l'andamento del segnale del rivelatore in funzione del tempo, a partire dall'istante in cui la miscela viene introdotta nella colonna ($t = 0$). L'eluente viene scelto in modo da non fornire alcuna risposta perciò quando attraverso il rivelatore passa soltanto l'eluente, si ottiene una linea di base che può essere considerata come lo "zero". Il tracciato completo che si ottiene per ogni sostanza eluita è detto picco cromatografico.



Cromatografo utilizzato nell'esperimento

Come ultimo dato di raffronto per i due campioni si è rilevata la quantità di ***calcare totale***. Questo dato è stato raccolto facendo reagire 1g di campione con 5ml di HCl, sviluppando la seguente reazione acido-base:



In base alla quantità di CO₂ sviluppata nella reazione è stato possibile calcolare la percentuale di CaCO₃ in ogni campione. La reazione è stata condotta in un recipiente di vetro collegato con un tubo di plastica ad un contenitore graduato contenente acqua. La formazione di CO₂ manda in pressione il contenuto d'acqua nel recipiente, facendone quindi abbassare il livello. A reazione ultimata si è controllato il livello d'acqua sul contenitore, andando così a leggere direttamente la percentuale di calcare nel campione.

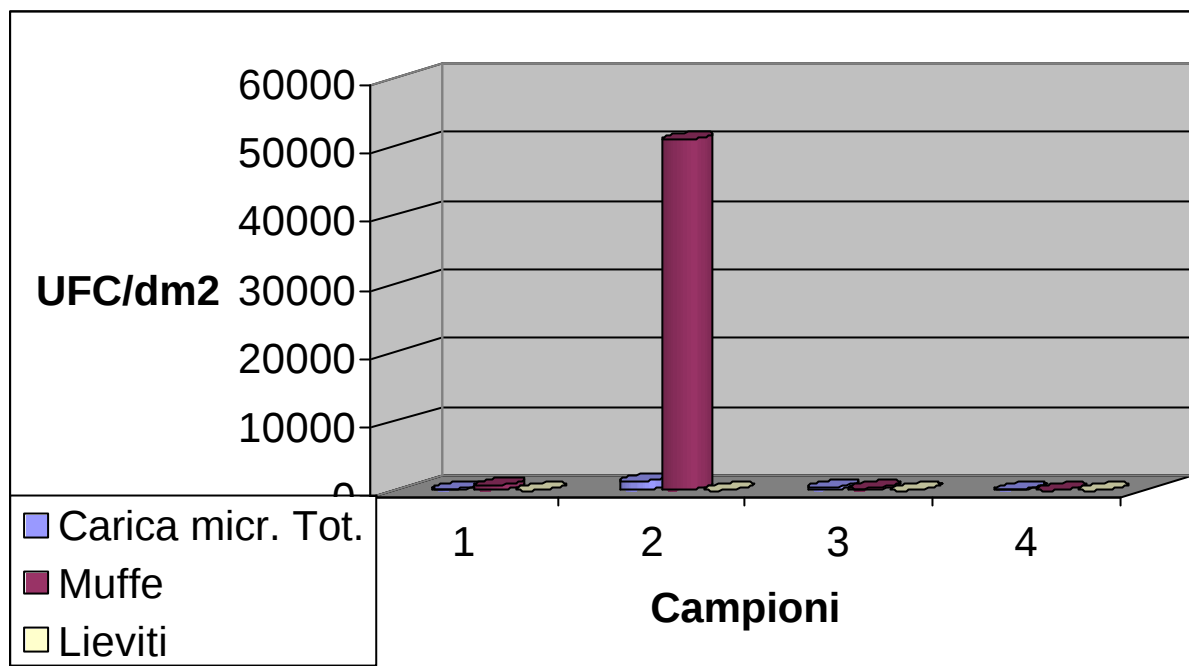
Dati raccolti e conclusioni

In questa parte saranno elencati i dati ottenuti ed in base a questi saranno fatte delle considerazioni sul campione. E' importante far notare che le conclusioni a cui si giunge sono solo indicative in quanto, per avere delle fonti affidabili, sarebbe stato necessario effettuare uno studio statistico raccogliendo più campioni. Quello a cui si vuole giungere tuttavia è mettere in luce i segni del degrado superficiale, operato da diversi fattori di carattere ambientale (umidità, muffe, esposizione alla luce, ecc.).

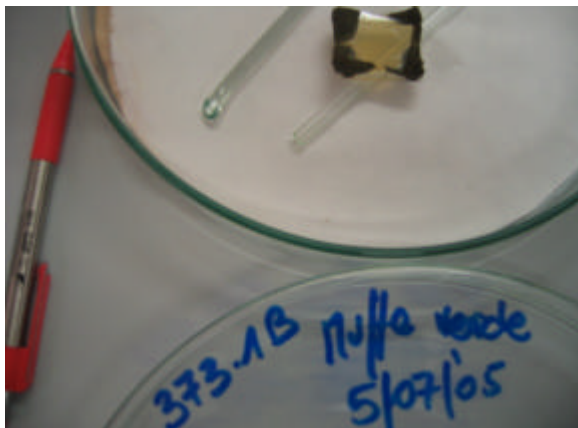
Dati raccolti dall'analisi delle muffe

Questi dati sono serviti principalmente per mettere in evidenza i primi segni del degrado che opera su una muratura. Le muffe ed in genere le efflorescenze, sono infatti il primo sintomo che si può osservare anche a occhio nudo.

I risultati ottenuti dalla crescita della coltura su vetrino sono:



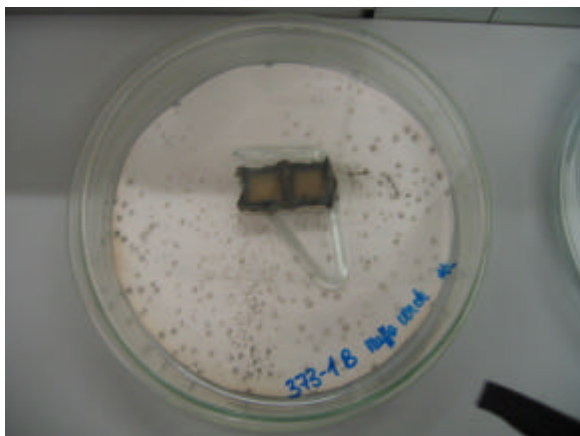
Il grafico mostra un elevato valore di Unità formanti colonia per dm^2 di muffa per il secondo campione. Effettivamente questo era stato prelevato da un punto più riparato dalla luce e dall'aria, condizioni favorevoli per la nascita di microrganismi. Ciononostante è stato possibile isolare due muffe e farle crescere separatamente. Trattasi di quelle relative al primo e al terzo campione. La presenza della crescita di microrganismi sulla superficie del campione sul quale sono state condotte le successive analisi è importante per sostenere la tesi del degrado operato proprio in quel punto. Le muffe possono essere osservate nelle seguenti foto.



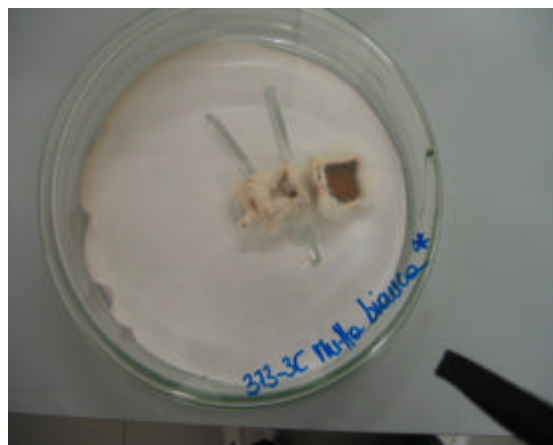
Muffa verde



Muffa bianca



Muffa verde relativa al primo campione



Muffa bianca relativa al terzo campione

Dati raccolti dalla spettroscopia e dalla cromatografia

Il primo dato di maggior interesse è rappresentato dalla diminuzione di Calcio nella zona degradata. Questa diminuzione si osserva sia dall'analisi tramite spettroscopia sia dalla reazione con HCl dei due campioni. Si potrebbe far risalire questa diminuzione al processo di carbonatazione subito dal carbonato di calcio (CaCO_3), in seguito al scioglimento in acqua della CO_2 , nell'intonaco (questo è anche il noto fenomeno carsico, che dà origine alle caverne):



In seguito a questa reazione si forma bicarbonato di calcio che, a differenza del carbonato di calcio, è solubile in acqua. In genere, il bicarbonato formatosi in questa reazione viene trascinato via dall'acqua lasciandosi alle spalle delle cavità.

Altri dati da osservare sono l'aumento di nitrati e solfati nella parte degradata. E' importante ricordare che la parte degradata è quella esposta verso l'esterno. L'aumento dei solfati si potrebbe spiegare con il deposito di anidride solforosa (SO_3) sulla superficie dell'intonaco, la quale, reagendo con l'ossigeno atmosferico e l'acqua presente nell'intonaco, porta alla formazione di acido solforico (H_2SO_4). L'acido solforico indebolisce l'intonaco in seguito alla reazione di solfatazione con quest'ultimo. Questa reazione porta alla formazione di solfato di calcio biidrato (gesso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e alla liberazione di CO_2 . Se non vi è l'azione dilavante della pioggia, sullo strato di gesso formatosi verranno a depositarsi delle particelle solide, in seguito alla condensa dell'umidità sulla superficie. In seguito all'evaporazione dello strato di condensa, grazie alla maggiore porosità del gesso rispetto al normale intonaco, rimarranno depositate tali particelle (polvere, sporcizia, ...) creando delle macchie nerastre sulla superficie.

Per quanto riguarda la maggiore presenza di Nitrati nella parte degradata, e quindi in quella più esterna, si potrebbe fare riferimento alla presenza di microrganismi (muffe e lieviti), provata sperimentalmente dall'analisi microbiologica. La presenza di muffe o di organismi organici in genere, innesca delle reazioni che portano alla distruzione del carbonato di calcio sottostante, con la formazione di composti azotati. La maggior quantità di nitrati quindi potrebbe essere spiegata da queste reazioni e quindi dalla presenza di microrganismi sulla superficie.

Il confronto degli altri elementi, in particolare Mg, Na, Cl e K sono stati fatti per osservare se vi fossero state eventuali migrazioni dei sali solubili presenti nell'intonaco, in seguito all'azione

dell'acqua. Per capire meglio questa situazione vengono riportate le solubilità delle sostanze che intervengono maggiormente nel degrado.

SOSTANZA	SOLUBILITA'(g /100g di solv)
Ca(HCO ₃) ₂	1,1
CaCO ₃	0,014
Na ₂ CO ₃ *10H ₂ O	21,5
CaCl ₂ *6H ₂ O	2790
MgCl ₂	542
Ca(OH) ₂	1,85
NaNO ₃	921
CaSO ₄ *2H ₂ O	2,41
MgSO ₄ *2H ₂ O	710
Na ₂ SO ₄ *10H ₂ O	110

Tra questi è da notare l'elevata solubilità di cloruro di calcio idrato, solfato di magnesio idrato, nitrato di sodio e di cloruro di magnesio. Osservare questi dati può farci intuire le differenze che si riscontrano nei due campioni, soprattutto per quanto riguarda il Magnesio e i Cloruri.

L'umidità superficiale adsorbita e l'acqua già presente nell'intonaco, possono aver portato in soluzione tali sali, provocando la loro migrazione ed una conseguente differenza tra anioni e cationi nelle due zone sudiate.

Nella seguente tabella sono riportati i valori ricavati dall'analisi.

	Unità di misura	Campione A	CampioneB
Fe	mg/kg	524,6	840,5
Al	mg/kg	412,9	259,4
Mn	mg/kg	25,5	36,05
Ca	mg/kg	196470	222320
Mg	mg/kg	92836	101080
K	mg/kg	240,3	327,5
Na	mg/kg	551,6	732,3
Cl	mg/kg	52,9	183,8
Solfati	mg/kg	165,6	40,9
Nitrati	mg/kg	183,6	8,1
Fluoruri	mg/kg	135,5	19,5

Capitolo 4

Materiali e tecniche per il risanamento

Dato che il principale responsabile del degrado è l'acqua, i rimedi che si adottano puntano all'eliminazione di questo agente dalle murature. Si può intervenire con i metodi descritti nel secondo capitolo oppure puntare all'idrofobizzazione della parete tramite opportuni additivi di natura sintetica da aggiungere agli intonaci. Tale intervento ha lo scopo di ostacolare l'entrata dell'acqua, la quale è in grado di determinare con la sua presenza l'attivazione e la cinetica dei processi di degrado. Da fonti storiche si capisce che questa operazione era in uso anche nell'antichità; studi compiuti sul Partenone hanno evidenziato la presenza di fosforo, attribuibile a trattamenti effettuati con caseina, bianco d'uovo e colle animali. Ma è solo con la metà del '900, grazie al boom dei prodotti di sintesi, che si matura una svolta fondamentale riguardo ai protettivi. Nascono e vengono messi in commercio numerosi prodotti polimerici, prevalentemente di natura organica, con ottime proprietà adesive e idrorepellenti. La loro funzione non è solo protettiva, ma anche di consolidamento nei confronti dei componenti minerali. La loro applicazione può avvenire tramite iniezione a pressione, con siringa, o a pennello. La tecnica a pressione si utilizza quando si vuole raggiungere una buona profondità di impregnazione.

Sono disponibili in commercio una grande quantità di prodotti idrofobizzanti. Sono principalmente prodotti di sintesi (resine epossidiche, poliviniliche, silosaniche, silaniche, termoplastiche/termoindurenti,...). Questi prodotti, il più delle volte, vengono iniettati nella struttura ancora in fase liquida, facendoli così filtrare intimamente nella struttura porosa dell'intonaco. Per contro questi materiali, presentano scarsa resistenza alla luce e all'aria. I materiali organici di sintesi più utilizzati sono:

Resine epossidiche o poliviniliche: sono composti di sintesi completamente organici. Sono state le prime resine messe a punto per questi obiettivi. Presentano un'ottima stabilità agli agenti atmosferici ed inquinanti, hanno eccellenti qualità impermeabilizzanti e hanno ottime caratteristiche adesive. Tuttavia non riescono a creare un buon legame con l'intonaco nel quale vengono iniettate data la diversa natura dei due materiali.

L'uso di queste resine è stato soppiantato per il fatto che la loro applicazione sulle murature da proteggere, a fine polimerizzazione, si presentavano come una pellicola più o meno spessa. I difetti legati a questa tecnica risiedevano nel fatto della non-traspirabilità del supporto murario, che portava a cedimenti del film polimerico nel caso di umidità residua.

I nuovi prodotti di sintesi introdotti nel mercato sono prodotti NON FILMANTI, che puntano a creare una barriera chimica idrofobizzando la struttura capillare del supporto murario, e allo stesso tempo renderlo traspirabile nei confronti dell'acqua. Questi prodotti infatti penetrano intimamente nella struttura, rivestendo i capillari invertendo il menisco dell'acqua, respingendola. Inoltre, grazie alla loro particolare struttura chimica riescono a reagire con il supporto, diventandone parte. Si parla in questo caso di impregnanti idrofobizzanti e non di impermeabilizzanti.

I più utilizzati in questo settore sono composti di sintesi a base di silicio in parte organici ed in parte inorganici. Sono preferiti ai precedenti in quanto hanno caratteristiche di protezione notevolmente superiori, ma soprattutto perché riescono a creare dei legami eteri con i gruppi ossidrilici presenti nell'intonaco, ancorandosi al materiale. I più utilizzati sono:

- Polisilossani
- Silani solubili in solventi organici / silani idrosolubili

I *siliconi (o polisilossani)* sono polimeri caratterizzati dalla ripetizione di un'unità strutturale formata da un atomo di silicio centrale legato ad un ossigeno e a due gruppi alchilici.

La fortissima polarità esistente tra il silicio e l'ossigeno rende questi materiali molto resistenti a sollecitazioni termiche e all'azione di cariche (acidi e basi forti). Il fatto che questo tipo di legame inoltre sia di circa 10 pm più lungo rispetto al legame C-C, riduce molti problemi di ingombro sterico. La flessibilità della catena polimerica si spiega innanzitutto negli angoli di legame Si-O-Si, molto più aperti rispetto a quelli C-C-C, e nel fatto che non vi sono cariche elettriche sui gruppi R laterali, responsabili della formazione di barriere di energia potenziale nei confronti della rotazione di tali gruppi.

Poiché i silossani sono degli oligomeri (polimeri a basso peso molecolare) costituiti da un numero compreso generalmente tra 4 e 9 unità monomeriche, le dimensioni delle molecole sono tali che la penetrazione nei pori e nei capillari più sottili, che sono quelli che presentano la maggiore forza capillare, non è ottimale. Infatti, non è da considerare un protettivo ideale per manufatti esposti ad aggressione di soluzioni saline. Particolarmente insidioso è il cloruro di sodio, in zone marine o sui viadotti autostradali, presenti nei sali per il disgelo, perché come ione-cloruro, date le ridottissime dimensioni, entra attraverso i capillari più piccoli e attacca le armature metalliche.

I *monomeri silanici in solvente organico* sono utilizzati tutte quelle volte che si vuole raggiungere una buona profondità di impregnazione. I monomeri più utilizzati sono gli alchil-alcossisilani e sono molecole del tipo $\text{RSi}(\text{OR})_3$; il gruppo alchilico legato direttamente all'atomo centrale di silicio, determina il grado di impermeabilizzazione e quindi la resistenza del materiale alla degradazione chimica dovuta agli acidi e alle sostanze alcaline azotate derivate dal metabolismo di funghi e muffe.

Presentano gli stessi vantaggi dei siliconi dal punto di vista dell'impiego, tuttavia sono utilizzati in minor misura per il problema dell'emissione di monomeri residui non polimerizzati, soprattutto se vengono applicati in un ambiente chiuso. Lo stato attuale della tecnologia, in conformità con le normative europee vigenti in tema di emissione di sostanze organiche volatili (VOC), consente l'utilizzo di ottimi sistemi a base acquosa, ovvero di *monomeri silanici idrosolubili*.

Meccanismo di protezione dei siliconi

In assenza di protettivo l'acqua bagna molto bene l'intonaco, formando dei legami a ponte di idrogeno. Il protettivo invece crea dei legami eterei che si formano in seguito a disidratazione fra i gruppi ossidrilici dell'intonaco e l'ossigeno legato al silicio presente nel protettivo. La parte organica crea una barriera nei confronti dell'acqua, impedendo che questa bagni la superficie.

Un caso pratico di risanamento

In questo capitolo verrà preso in considerazione il risanamento della chiesa parrocchiale di S.Stefano di Portogruaro. La ditta che si è occupata del progetto è la Edilstrada, che da anni si occupa di questo tipo di interventi. L'edificio era soggetto ad un tipico caso di umidità di risalita capillare dal sottosuolo, che aveva provocato gravi danni alla base delle murature. Dato lo stato degradato delle murature e il loro esiguo spessore, la scelta è ricaduta sul taglio chimico, in quanto il taglio meccanico avrebbe portato dei problemi di stabilità strutturale all'edificio.



Il progetto



Lo stato delle murature

L'operazione preliminare che si è attuata è stata quella di mettere a nudo la muratura, rimuovendo l'intonaco o altro rivestimento, per tutto il perimetro della costruzione, fino ad un'altezza di circa 50-60 cm.



Muratura messa a nudo

La tecnica di applicazione prevede:

- *Perforazione*: consiste nell'effettuare dei fori alla base del muro tramite trivella elettrica. Questi fori sono leggermente inclinati verso il basso ed effettuati per una profondità di poco inferiore a quella del muro. L'interasse tra i fori è di circa 10 cm tuttavia questo è in funzione del diametro dei fori. Per un diametro di circa 30 cm l'interasse è di circa 10/12 cm.



Fori effettuati sulla parete

- *Trattamento con cemento osmotico*: il segno di colore rosso che si nota nelle foto è il risultato dell'applicazione del cemento osmotico. Si ottiene così il cosiddetto *cassero di tenuta*, che ha il compito di chiudere e sigillare la muratura. La scelta ricade sul cemento osmotico per favorire la traspirabilità nei confronti del vapore acqueo.



La muratura è stata trattata con cemento osmotico

- *Applicazione delle cannucce*: dopo aver preventivamente eliminato eventuali sporcizie e residui dai fori tramite soffiatura, si applicano delle cannucce in PVC che hanno diametro esterno pari a quello del foro. Successivamente vengono stuccate onde evitare la fuoriuscita del prodotto iniettato.
- *Iniezione nella muratura*: l'iniezione del prodotto idrofobizzante avviene a pressione tramite delle pompe airless a circa 7-8 atm. Questo garantisce il raggiungimento di buone profondità d'impregnazione. L'iniezione avviene con apposite lance applicate sulle cannucce e collegate alle pompe. In questa fase il prodotto da iniettare viene caricato e portato in pressione direttamente nelle pompe.
- *Fase conclusiva*: a lavoro concluso le cannucce vengono tagliate o estratte dai fori e sigillate con un prodotto impermeabilizzante. Infine si ricopre con intonaco deumidificante (macroporoso), che grazie alla sua traspirabilità permette la fuoriuscita dell'umidità dalla muratura sotto forma di vapore acqueo.

Il prodotto idrofobizzante utilizzato

Per questo trattamento è stata scelta una resina silanica in soluzione acquosa, sostanzialmente formata da monomeri alchil-alcossi silanici. Questi sono preferiti alle resine silosatiche dato che le ridotte dimensioni di questi monomeri permettono una miglior impregnazione, garantendo un'adeguata penetrazione all'interno della struttura capillare. Per questo motivo riescono a formare uno strato idrorepellente all'interno dei pori del materiale, invece di formare un film continuo come altri prodotti. Il vantaggio risiede nel fatto che viene garantita sia l'idrofobizzazione che la traspirabilità della parete.

Caratteristiche chimiche

Il gruppo alchilico R direttamente legato all'atomo di silicio è formato da una catena con un numero di atomi di carbonio compresa tra 3 e 8. Questo gruppo è il responsabile del carattere idrofobo del protettivo e quindi della resistenza del materiale alla degradazione chimica dovuta agli acidi e alle sostanze derivanti dal metabolismo di muffe e funghi. I restanti 3 gruppi $-O-R$ invece una volta iniettati idrolizzano in acqua originando degli alchil-silanoli:

I tre gruppi ossidrilici che si vengono a formare rendono compatibili queste molecole con il substrato minerale, formando dei legami dipolo-dipolo o a ponte d'idrogeno.

Il meccanismo di protezione è simile a quello dei polisilossani, solo che le molecole di alchilsilossano sono in grado di penetrare nei pori della struttura muraria, realizzando una protezione più profonda e quindi più efficace.

In questo tipo di interventi sarebbe auspicabile studiare lo stato delle murature, soprattutto se si opera su edifici storici o di antica costruzione, perché si potrebbero verificare durante le operazioni di iniezione delle tensioni indesiderate, che influirebbero sulla stabilità e sul risultato finale dell'operazione di risanamento. Nel caso trattato se si osserva la figura 1, relativa allo stato della muratura a lavoro completato, si può notare come questa non sia omogenea, ma formata da più "blocchi". La non omogeneità del muro si traduce in un comportamento anisotropo nei confronti di diversi tipi di sollecitazioni. L'iniezione della resina a 7-8 atm, ha sicuramente provocato degli scompensi alla struttura, provocando degli sforzi di taglio tra i diversi blocchi del muro, generando rotture e tensioni residue.

Se si ultimasse il lavoro applicando il cemento macroporoso, ignorando le rotture e le tensioni generate, oltre che avere problemi di stabilità strutturale, si potrebbero avere ancora problemi di umidità, generati da infiltrazioni d'acqua nelle crepe generatesi in seguito all'intervento.

E' importante dunque studiare a fondo il tipo e la struttura della muratura con cui si ha a che fare, osservare in quali punti è debole e capire se la pressione d'iniezione può provocare deformazioni indesiderate o impreviste.

CONCLUSIONI

L'ambiente in cui viviamo presenta oramai innumerevoli insidie per l'uomo e per l'ambiente stesso. La Bioedilizia, per le ragioni già esposte, è sicuramente una valida risposta a questi problemi.

Attualmente per risolvere e prevenire i fenomeni di degrado degli edifici vengono adottate tecniche sempre più innovative, lasciando spazio alla continua ricerca di nuovi materiali sempre meno impattanti con l'ambiente e tecniche applicative sempre meno invasive.

Le costruzioni in ambienti umidi presentano problemi strutturali e conservativi di notevole importanza sia dal punto di vista statico che della manutenzione. Le difficoltà degli interventi di risanamento, risentono di una mancanza di ricerca che porti a soluzioni integrate nell'uso di materiali innovativi. Gli sviluppi nel prossimo futuro riguarderanno la ricerca di materiali sempre più innovativi che garantiranno a tutte le costruzioni una risposta efficace alle problematiche legate all'umidità, arrivando ad un miglioramento della stabilità e della conservazione delle strutture portanti nel rispetto dell'ambiente e delle persone.