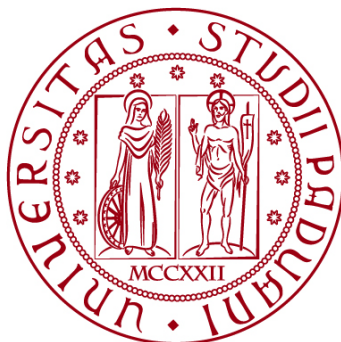


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**IL CALCESTRUZZO FOTOLUMINESCENTE:
CARATTERISTICHE E APPLICAZIONI**

Relatore: Chiar.mo PROF. PAOLO COLOMBO

Laureando: SARA BACCAGLINI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

***Ai miei carissimi nonni,
Bruna, Bruno, Rosina e Pietro***

CALCESTRUZZO FOTOLUMINESCENTE CARATTERISTICHE ED APPLICAZIONI

SOMMARIO

Capitolo 1: TEMATICHE AMBIENTALI

- 1.1 Gas serra
- 1.2 Riscaldamento globale
- 1.3 Consumo di suolo
- 1.4 I rifiuti
- 1.5 Consumo di energia elettrica

Capitolo 2: COSTRUZIONI E SOSTENIBILITA'

- 2.1 Economia circolare
- 2.2 Ecodesign
- 2.3 Mercato delle costruzioni: un futuro sostenibile
- 2.4 Verifiche e certificazioni ambientali

Capitolo 3: IL CALCESTRUZZO FOTOLUMINESCENTE

- 3.1 Fenomeno della fotoluminescenza
- 3.2 Componenti luminescenti
 - 3.2.1 Graniglie
 - 3.2.2 Pigmenti
 - 3.2.3 Vernici

Capitolo 4: APPLICAZIONI

- 4.1 I prodotti delle aziende
 - 4.1.1 Colabeton
 - 4.1.2 Mageste Cave e calcestruzzi
 - 4.1.3 AGT Ambient Glow Technology
- 4.2 Progetti realizzati
 - 4.2.1 Van Gogh path
 - 4.2.2 Innovation Hills
 - 4.2.3 Ciclabile Borgo a Mozzano
- 4.3 Urbanismo tattico

Capitolo 5: CONCLUSIONI

- 5.1 Ottimizzazione delle risorse
- 5.2 Microclima e mitigazione delle temperature
- 5.3 Sguardo al futuro

Capitolo 1. TEMATICHE AMBIENTALI

Nell'odierna società è fondamentale includere in ogni nostra attività un'attenzione particolare alla sostenibilità ambientale.

Mai come oggi risulta importante salvaguardare il più possibile il nostro pianeta, che sta subendo notevoli alterazioni, dal punto di vista climatico, delle risorse utilizzate e degli ecosistemi tutti.

Le cause di questi cambiamenti sono da attribuire non solo alla naturale evoluzione del pianeta, bensì agli esseri umani che ormai per troppo tempo sono stati disattenti nei confronti dell'ambiente e hanno contribuito a velocizzare il mutamento dello stesso.

L'impegno globale diventa quindi quello di progredire in un'ottica diversa, non mirata solo al conseguimento di un risultato, ma a raggiungerlo nel modo più equosolidale possibile, per cercare di frenare, o meglio mitigare i dannosi effetti che l'evoluzione ha portato.

L'edilizia, in tutto il mondo e per qualsiasi epoca, ha sempre rivestito un ruolo fondamentale nelle numerose attività umane: simbolo di crescita, innovazione tecnologica e bellezza.

Viene spontaneo chiedersi dunque quali siano effettivamente, tra i molti citabili, i cambiamenti climatici che più influenzano il mondo costruito e le costruzioni future.

1.1 GAS SERRA

L'effetto serra è un fenomeno naturale, che permette alla temperatura sulla superficie di non abbassarsi notevolmente; questo effetto, considerato per lo più anomalo, permette di mantenere un clima ideale per l'uomo e per gli ecosistemi che lo circondano.

L'utilizzo di combustibili fossili ha fatto sì che si alterasse l'equilibrio termico del nostro pianeta, dato che i gas serra trattengono, dentro l'atmosfera, il calore che normalmente viene prodotto non permettendo il naturale scambio con l'esterno dell'atmosfera.

Per combustibili fossili si intendono quei materiali, utilizzati a scopo di produrre energia, che si sono formati da una decomposizione anaerobica (in assenza di ossigeno) di materia vivente animale, nel caso ad esempio di petrolio e gas naturale, di materia vivente vegetale, nel caso di carbone e metano; la loro energia è all'interno dei legami chimici, principalmente a causa della forte presenza di carbonio.

Sin dalla Rivoluzione Industriale vengono utilizzati come carburanti e anche nella nostra era moderna vengono considerati quasi indispensabili, se non fosse che il loro utilizzo smisurato ha portato non pochi problemi ai nostri ecosistemi.

I gas serra possono essere di origine naturale o antropica; i più dannosi per l'ambiente sono:

- CO₂: anidride carbonica, derivata principalmente dalla combustione di combustibili fossili
- CH₄: metano, le cui emissioni sono prevalentemente legate allo smaltimento dei rifiuti e alle attività di allevamento
- N₂O: protossido di azoto, emesso soprattutto dalle attività agricole.

Da parte dell'Unione Europea è stato messo a punto un protocollo, il protocollo di Kyoto, che impegna le Nazioni europee a ridurre le emissioni di gas serra, in percentuale specifica per ogni Stato.

L'agenzia italiana ARPAV, specifica che per il periodo che va dal 2013 al 2020 l'intera Unione Europea ha aderito al Pacchetto Clima ed Energia, che poneva gli Stati europei in condizione di ridurre i gas serra almeno del 20%, rispetto alle baseline dell'anno 1990.

La stessa agenzia specifica che l'Unione Europea ha da poco stabilito nuovi obiettivi, da raggiungere entro il 2030, sulle emissioni di gas serra: ridurre del 40% le emissioni rispetto al riferimento sulle emissioni del 1990.

Lo scopo comune dunque è quello di ridurre il più possibile le emissioni dei gas nocivi, ad esempio adottando forme di energia rinnovabile per i nostri scopi, sfruttando un'energia pulita, che si reintegri naturalmente in una scala temporale umana e che quindi non esaurisca e non inquina.

Le principali fonti rinnovabili, cui si fa riferimento sono:

- Energia solare
- Energia eolica
- Energia geotermica
- Energia idroelettrica

1.2 RISCALDAMENTO GLOBALE

Il riscaldamento globale, conseguenza dell'effetto serra pronunciato, ha suscitato negli ultimi decenni notevoli preoccupazioni, legate allo scioglimento dei ghiacciai ad esempio, oppure in modo molto più vicino a noi osservando che le temperature vanno via via sempre aumentando, creando un disagio non lontano dalle nostre realtà.

Quello che noi percepiamo non viene propriamente definito "cambiamento climatico", perché si è soliti considerare il clima terrestre come qualcosa di stabile nel tempo; le nostre abitudini ci porterebbero a definirlo piuttosto come un "cambiamento meteorologico", che sappiamo subisce variazioni continue e più rapidamente nel tempo (un cambiamento climatico interessa epoche intere, quello meteorologico varia di ora in ora).

Risalendo alle origini più remote del nostro pianeta ci accorgiamo che, in realtà, il clima terrestre ha subito notevolissime mutazioni, secoli dopo secoli; viene quindi spontaneo chiedersi come mai solo ora questo aspetto stia diventando sempre più preoccupante.

L'Associazione italiana di epidemiologia, con la sua rivista "epiprev", propone un articolo in merito, asserendo che la fondamentale differenza tra i cambiamenti climatici passati e quelli odierni sta nel fatto che il riscaldamento globale che noi subiamo oggi interessa il 98% della superficie terrestre, andamento diverso rispetto alle scorse epoche nelle quali il fenomeno (di riscaldamento o raffreddamento in alcuni casi, con le ere glaciali ad esempio) era ridotto ad aree di gran lunga inferiori.

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), nel suo rapporto sugli indicatori del clima (anno 2019 il più recente) ha evidenziato come il 2019 sia stato nettamente più caldo della media storica, con circa +1,56°C in più rispetto al valore climatologico di riferimento degli anni 1961-1990, come è illustrato nella **figura 1.2.1**; oltre a questo segnala anche che non è stato un caso isolato, ma che è stato il ventitreesimo anno consecutivo con anomalie di temperatura positive rispetto alla norma di riferimento.

Questo fenomeno ha avuto effetti anche sugli agenti meteorologici, con eventi estremi molto rilevanti: precipitazioni straordinarie e continue, di forte intensità, che hanno superato di 2 o 3 volte la percentuale attesa e potenti venti di tempesta hanno portato forti mareggiate e conseguenti frane e smottamenti lungo il territorio italiano (evento simbolo l'acqua alta registrata a Venezia di ben 187cm che ha portato danni irreparabili a tutta la città).

Nelle grandi città l'innalzamento delle temperature si traduce nelle cosiddette isole di calore urbano: delle zone microclimatiche nelle quali la temperatura aumenta dai 4°C ai 5°C, rispetto alle zone periferiche.

Le cause sono da attribuirsi all'intensa urbanizzazione e cementificazione, dei grandi centri in particolare, ma anche alla mancanza di proporzionate aree verdi, ostruzione della circolazione dell'aria dovuta alla morfologia degli edifici e dalle emissioni di CO₂ prodotte dal settore residenziale per lo più.

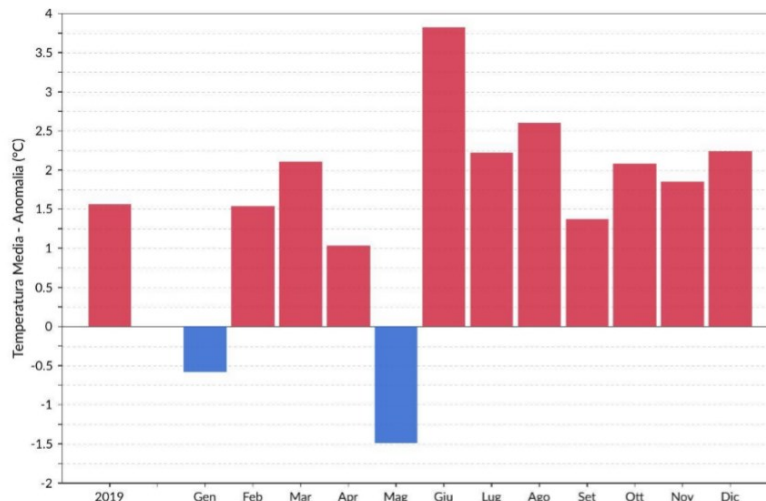


FIGURA 1.2.1: *Anomalia della temperatura (annua e mensile) sul territorio italiano rispetto agli anni di riferimento 1961-1990. Fonte ISPRA*

Le UHI (Human Heat island) sono l'effetto più evidente di come l'azione dell'uomo abbia influenzato l'ambiente circostante; questi fenomeni possono influenzare i sistemi ecologici urbani, come anche le situazioni idrologiche, il metabolismo energetico e la salute stessa degli abitanti. Le soluzioni sono molteplici: tetti verdi, utilizzo di superfici ad alta riflettanza e aree verdi, che permetterebbero una mitigazione del fenomeno.

Lo studio delle isole di calore è stato effettuato su diverse scale.

In seguito verrà illustrato lo studio e considerati i dati di "Research on Urban Heat-island Effect" dalla quarta conferenza internazionale sulle contromisure sull'isola di calore urbano del 2016 (documento a cura di Li Yanga, Feng Qian, De-Xuan Song, Ke-Ji Zheng).

Il primo studio delle UHI risale al XIX secolo, svolto dallo studioso Lake Howard e nelle epoche successive scienziati di tutto il mondo ne hanno studiato gli effetti e le caratteristiche.

La Cina è uno dei luoghi in cui si stanno registrando le maggiori influenze delle isole di calore: a Shanghai dal 1961 agli anni 2000 si registra un aumento di 7,4 °C.

La continua e assidua urbanizzazione si ripercuote ampliando il fenomeno; le temperature delle superfici sono in aumento con inevitabili variazioni dell'ecosistema e dello sfruttamento delle risorse, ma anche alterazioni dal punto di vista meteorologico.

Al centro dello studio sopra citato c'è il parco industriale di Bozhou in Cina, in cui l'articolo ha simulato numericamente l'ambiente termico urbano per riuscire ad avere un riferimento teorico per la futura pianificazione urbanistica dell'area.

L'area si trova adiacente ad un fiume e per le sue coordinate geografiche si trova in una zona climatica caratterizzata da temperature che d'estate sono elevate, con un'alta percentuale di umidità e temperature rigide d'inverno.

Considerati i dati relativi a temperature, precipitazioni, venti confort termico, il mese considerato è il mese di luglio il quale ha la temperatura media più alta dell'anno pari a 28°C.

L'area è stata suddivisa in zone, con diverse caratteristiche quindi a livello di densità abitativa e di ambiente costruito; lo studio mostra come l'effetto di ventilazione concorra a mitigare la temperatura solo quando l'apertura del condotto superi i 150m e per quanto riguarda i prati, questi riescono ad influenzare la temperatura quando le dimensioni superino i 120m x 120m. Nelle zone limitrofe a fiumi, laghi le temperature risultano notevolmente abbassarsi.

Attraverso la simulazione numerica si conclude che l'effetto delle UHI è causato maggiormente dalla distribuzione degli edifici e in generale delle costruzioni, ma anche dalla scarsa ventilazione garantita.

Allo stesso modo le radiazioni solari persistenti, in assenza di un corretto flusso d'aria, porta le temperature ad alzarsi, mentre nelle aree verdi, nei paraggi di laghi o fiumi, la regolazione della temperatura avviene naturalmente attraverso l'acqua e la vegetazione.

International Journal of Environmental Monitoring and Analysis (Md. Nuruzzaman. Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis. Vol. 3, No. 2, 2015, pp. 67-73) elenca 8 strategie per ridurre le UHI:

1. Utilizzo di materiali ad alto albedo per i tetti
2. Utilizzo di pavimentazioni ad alto albedo
3. Aree verdi
4. Alberi ombrosi
5. Pavimentazioni permeabili
6. Specchi d'acqua
7. Pianificazione urbana
8. Tetti verdi

Le strategie che limitano il crearsi del fenomeno delle isole di calore sono molteplici, anche se il più impattante risulta essere quello che include la maggiorazione degli spazi verdi e occupati dalla vegetazione.

Al tempo stesso, per gli ambienti costruiti si può altrettanto agire sia in maniera immediata che in previsione di cambiamenti consistenti per il futuro.

1.3 CONSUMO DI SUOLO

Diversamente a come si è soliti pensare, il suolo è una risorsa molto fragile, che spesso non viene sfruttata e valorizzata nel modo più corretto.

Il suolo assume funzioni assai diverse, da quella di approvvigionamento, a quelle di supporto, a quella di regolazione e anche a quelle ricreative.

Le azioni dell'uomo, che nella maggior parte dei casi variano le funzioni native del terreno, portano a notevoli scompensi alle funzioni dello stesso e possono provocare rilevanti danni agli ecosistemi; basti pensare ad un'elevata densità costruttiva (strade, infrastrutture, abitazioni), ma anche a scorrette pratiche agricole ad esempio.

Se analizziamo nello specifico la parola "consumo", vedremo che è strettamente legato al concetto di "copertura", nello specifico di copertura artificiale: il consumo di suolo è la variazione che il terreno subisce passando da una copertura naturale o semi naturale, a una di

tipo artificiale (impermeabilizzazione del terreno, coperture permanenti, strade o infrastrutture varie).

Una problematica connessa, molto gravosa per le nuove costruzioni, è la tematica dello smaltimento delle acque: per lavori di nuova costruzione, recupero e urbanizzazione viene introdotto il concetto di invarianza idraulica, che implica cioè degli accorgimenti e delle regole stabilite, per far sì che il volume e le portate d'acqua che vengono convogliate ai ricettori rimangano invariate.

Questo principio risulta necessario proprio a causa dell'aumento assiduo della cementizzazione, che riduce la quantità d'acqua assorbita dal terreno, aumentando di conseguenza la portata e la velocità di quell'acqua che invece arriva agli scolì e ai sistemi di acquedotto e fognatura.

In Italia il consumo di suolo viene monitorato dal Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, facente parte dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), che ogni anno realizza in merito un Rapporto nazionale.

Citando il suddetto rapporto dell'anno 2020, come ben schematizzato della **figura 1.4.1**, si denota come in Italia i cambiamenti maggiori siano stati confinati a delle zone in particolare, come ad esempio il Veneto e la Lombardia, che hanno un elevato valore di densità costruita (anche se ora è in atto un lieve rallentamento); gli incrementi maggiori dunque rilevati, indicati dal consumo di suolo netto in ettari dell'ultimo anno, sono avvenuti nelle regioni: Veneto (con 785 ettari in più), Lombardia (+642 ettari), Puglia (+625), Sicilia (+611) ed Emilia-Romagna (+404).

La Valle d'Aosta è la prima regione a consumo "quasi zero" (solo 3 ettari in più). Umbria, Liguria, Molise, Basilicata e Trentino-Alto Adige sono le altre regioni che, quest'anno, hanno avuto incrementi inferiori ai 100 ettari.

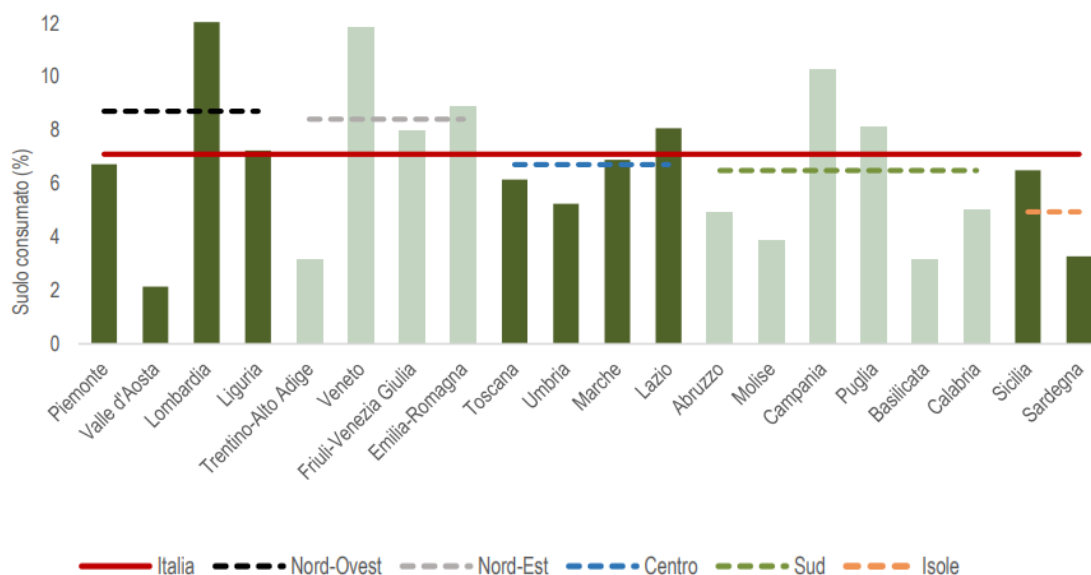


Figura 1.4.1: Suolo consumato a livello regionale e di ripartizione geografica (% 2019). In rosso la percentuale nazionale.

Fonte: elaborazioni ISPRA su cartografia SNPA

1.4 I RIFIUTI

L'incremento dell'utilizzo di beni di consumo ha fatto sì che aumentasse di conseguenza anche la produzione di materiali di scarto, che sono appunto i rifiuti.

Questa macro categoria si divide in due principali gruppi: rifiuti solidi urbani e rifiuti speciali.

Del primo gruppo fanno parte i rifiuti domestici, derivanti dalle abitazioni, aree verdi o strade; nel secondo gruppo troviamo invece i rifiuti di tipo industriale, di attività agricole, commerciali e sanitarie.

L'impatto che questi hanno sull'ambiente viene definito tramite classi di pericolosità, che quindi classificano un rifiuto pericoloso da uno non pericoloso (in relazione all'ambiente), imponendo così anche la giusta modalità di smaltimento.

La gestione dei rifiuti, quindi il loro deposito e trattamento, prevede due diverse tipologie di raccolta: la raccolta differenziata, che suddivide per tipologia gli scarti con lo scopo di recuperarli il più possibile e quindi di riciclarli o produrre energia, la seconda invece è la raccolta indifferenziata, che invece comprende materiali che non si possono in alcun modo recuperare e sono destinati quindi alle discariche o agli inceneritori.

Economicamente le discariche sono le meno costose, di contro però hanno che l'altra produzione di gas prodotti inquinano l'ambiente e danneggiano gravemente l'ecosistema.

Secondo l'International Solid Waste Association, l'organizzazione mondiale che riunisce gli operatori del settore trattamento e smaltimento rifiuti, nel mondo vengono prodotte circa 4 miliardi di tonnellate di rifiuti ogni anno e, nel giro di 10 o 15 anni si prevede che questa cifra salirà del 50% a causa della crescita della popolazione e dello sviluppo economico. Tuttavia, sempre secondo le stime, circa la metà della popolazione mondiale non ha accesso a sistemi di gestione dei rifiuti in quanto non possono sostenerne gli elevati costi, pertanto enormi quantità di rifiuti vengono abbandonate generando danni ambientali e sanitari devastanti.

Oltre a questo va sottolineato che in alcuni Paesi del mondo le tecnologie di smaltimento non sono così sviluppate, quindi ricorrono a metodi di raccolta indifferenziata che portano a pratiche dannose per il suolo, l'aria e l'acqua del nostro pianeta.

Per l'Unione Europea si fa riferimento alla Direttiva 2008/98/ CE sui rifiuti, che stabilisce un quadro giuridico per il trattamento dei rifiuti nell'UE, in modo da limitare i danni all'ambiente e fornire i mezzi per un riciclo e riutilizzo.

I punti chiave della direttiva sono:

- Viene stabilita una gerarchia dei rifiuti
- Principio del "chi inquina paga", che fa ricadere sul produttore dei rifiuti i costi annessi
- Fa una distinzione tra rifiuti e sottoprodotti (una sostanza o un oggetto risultante da un processo di produzione il cui scopo principale non è la produzione di quella sostanza o oggetto).
- La gestione dei rifiuti deve essere effettuata senza alcun rischio per l'acqua, l'aria, il suolo, le piante o gli animali, senza arrecare fastidio a causa del rumore o degli odori, né recare danno alla campagna o ai luoghi di particolare interesse.
- I produttori o detentori di rifiuti devono trattarli da soli o farli trattare da un operatore ufficialmente riconosciuto. Entrambi richiedono un permesso e vengono controllati periodicamente.
- Le autorità nazionali competenti devono stabilire piani di gestione dei rifiuti e programmi di prevenzione dei rifiuti.
- Condizioni speciali si applicano ai rifiuti pericolosi, agli oli usati e ai rifiuti organici.
- Introduce obiettivi di riciclaggio e recupero da raggiungere entro il 2020 per i rifiuti domestici (50%) e per i rifiuti da costruzione e demolizione (70%).

Nel mondo delle costruzioni questi aspetti si traducono in nuove modalità e nuovi materiali, che nello spirito di concetti come “economia circolare” ed “ecodesign”, tentano di ridurre il più possibile i danni ambientali prodotti dall’eccesso di rifiuti, con materiali accessibili e innovativi e tecniche non invasive ed equosolidali.

1.5 CONSUMO DI ENERGIA ELETTRICA

Il consumo di energia elettrica comporta, se avviene in quantità troppo elevate, sia a problemi di tipo ambientale (che si riferiscono più al fattore di produzione della stessa) sia a livello economico di costi da parte di enti pubblici e privati che si trovano a sostenere spese molto onerose.

Attualmente la principale fonte utilizzata per la produzione di energia elettrica proviene da combustibili fossili che sono dannosi in termini di emissione di anidride carbonica e quindi molto inquinanti per l’aria.

I combustibili fossili continuano a dominare il mix di combustibili: circa il 77% del fabbisogno energetico del cittadino europeo medio è soddisfatto da petrolio, gas e carbone. L’energia nucleare fornisce il 14%, mentre il restante 9% proviene da fonti energetiche rinnovabili (dati forniti dall’agenzia Europea dell’ambiente).

L’energia è sempre più una priorità politica; costituisce uno dei cinque principali ambiti di sviluppo su cui punta la strategia Europa 2020 nel raggiungimento degli obiettivi fissati per:

portare al 20% il consumo energetico dell’Europa proveniente dall’energia rinnovabile;
aumentare del 20% l’efficienza energetica.

Oltre agli obiettivi specifici della strategia energetica 2020, altri settori di interesse sono oggetto di svariate politiche, sintetizzate nel sito web della Commissione europea. Tali politiche includono:

migliorare la sicurezza dell’approvvigionamento;
garantire la competitività dell’economia europea e la disponibilità di energia a prezzi accessibili;
promuovere lo sviluppo di un mercato interno dell’energia competitivo;
definire livelli minimi di tassazione dell’energia.

Il Green Deal è un insieme di direttive che punta a fare diventare l’UE, entro il 2050, il primo continente ad essere completamente ecosostenibile.

A tal proposito questo accordo prevede di modificare le vecchie direttive in ambito ambientale, ormai definite obsolete, e di introdurne di nuove che favoriscano la produzione ed il consumo dell’energia rinnovabile, sia da parte delle imprese operanti all’interno dei confini dell’Unione sia dei cittadini nel loro privato, con delle agevolazioni fiscali e dei sostenimenti economici.

Si articola in 5 punti:

- 1) Garantire l’accesso all’energia rinnovabile a tutti i cittadini europei in modo sicuro ed economico
- 2) Convertire l’industria in un’economia rinnovabile
- 3) Garantire la costruzione e la ristrutturazione degli edifici in modo ecosostenibile
- 4) Convertire il trasporto pubblico e privato rendendolo sostenibile ed intelligente
- 5) Garantire la presenza della biodiversità sul suolo europeo e ricostruirla dove necessario

Le energie rinnovabili tornano ad essere fondamentali per la produzione di energia elettrica; in Italia si registrano tendenze positive in merito all'utilizzo delle stesse.

Verranno in seguito riportati dati della federazione ANIE, in particolare ANIE Rinnovabili, in cui si comparano dati del 2021 con quelli del 2022 (in riferimento al primo semestre) in merito alle energie rinnovabili.

Nel 1° semestre del 2022 si registra un totale cumulato di **1.211 MW** di nuova potenza installata (+168% rispetto allo stesso periodo del 2021), così suddiviso: 1.061 MW per fotovoltaico (+193%), 123 MW per eolico (+66%) e 27 MW per idroelettrico (+72%).

Analizzando i dati di produzione pubblicati da Terna, le FER risentono nel 1° semestre 2022 dello scarso apporto da fonte idroelettrica a causa della siccità che ha colpito il nostro Paese, compensato però dall'incremento della produzione eolica (+9%) e fotovoltaica (+10%). Nel 1° semestre 2022 le FER hanno prodotto 52,3 TWh contro i 59,7 TWh del 1° semestre 2021; questa performance ha permesso di coprire solamente il 33% del fabbisogno elettrico nazionale (a differenza del 39% del 1° semestre 2021)

Capitolo 2. COSTRUZIONI E SOSTENIBILITA'

L'intento è quello di focalizzarsi ora sul mondo delle costruzioni, trattando nello specifico tematiche legate a fattori ambientali rilevanti ed esponendo alcuni dei principi alla base delle nuove tecniche, usi e materiali innovativi proposti dallo stesso.

2.1 ECONOMIA CIRCOLARE

La creazione di una vera e propria economia, risale alla Rivoluzione Industriale, con la quale è stato avviato un sistema di produzione che viene definito lineare, basato essenzialmente in tre procedure ripetute nel tempo: prendere, produrre e smaltire.

Sino a pochi decenni fa, questo meccanismo risultava vincente poiché le materie prime venivano recuperate senza problemi di quantità e i prodotti stessi venivano concepiti in maniera tale da essere semplicemente utili a soddisfare i bisogni dell'acquirente, senza badare troppo alla vita utile degli stessi.

Un aspetto fondamentale che, però, non era stato preso in considerazione è l'impatto che questo tipo di processo avrebbe avuto negli anni, risultate oggi molto negativo sia da un punto di vista ambientale che da un punto di vista sociale.

Le grandi produzioni, il consumo di massa e la globalizzazione hanno arrecato gravi danni all'ambiente naturale, con un'accelerazione che nei secoli precedenti non c'era stata; la quantità di materie prime disponibili non è più abbondante e i rifiuti, creati sia dalla produzione stessa che dallo scarto delle famiglie, hanno raggiunto quantità ormai quasi ingestibili.

Ancora una volta risulta necessario cambiare prospettiva, ad esempio analizzando in particolare gli scarti, prodotti da nuclei famigliari, ma soprattutto dalle aziende: è possibile ridurli? O meglio, ottimizzare la produzione in modo da avere un guadagno più vasto, sia in termini economici che di sostenibilità ambientale?

L'economia circolare si basa proprio su questi aspetti, cerca di massimizzare le capacità dei beni, in modo che questi siano sfruttati al massimo delle loro caratteristiche e non vengano sprecati.

Non si tratta di "fare di più con meno", ma semplicemente di impiegare le risorse in modo intelligente, risolvendo inoltre il problema dello scarso utilizzo e la riduzione dei rifiuti.

Per portare un esempio pratico si riportano i dati statistici forniti dalla ricerca condotta in Europa sulle abitudini di consumo, dall' "avanzata dell'economia circolare" (HARVARD BUSINESS REVIEW ITALIA, articolo di Mark Esposito, Terence Tse e Khaled Soufani): in Europa, in un anno solare, gli autoveicoli presenti rimangono parcheggiati per il 92% del tempo, evidenziando un utilizzo molto basso e di conseguenza un potenziale spreco molto rilevante.

Il modello circolare ha proposto una soluzione, o meglio un concetto, che è uno dei principali motori dello stesso, la condivisione: schemi di car sharing, come quello proposto da Uber, contribuiscono a ridurre la produzione di inquinanti e a utilizzare al massimo le capacità dei veicoli circolanti, dato che un minor numero di persone avrebbe bisogno di acquistare autovetture e che gli stessi veicoli già circolanti verrebbero utilizzati da più persone, massimizzando gli effetti.

L'introduzione di questa nuova realtà ha portato però a numerose proteste, da parte di taxiisti per lo più, che hanno visto il loro lavoro sfumare così come il loro guadagno; da qui quindi nasce un'altra esigenza, cioè quella delle aziende già esistenti, di poter avere gli strumenti per poter prosperare nell'ambito dell'economia circolare e su quali siano le opportunità di mercato di cui possono beneficiare a breve termine.

Dallo studio “Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe”, realizzato dal McKinsey Center for Business and Environment in collaborazione con Ellen MacArthur Foundation e SUN (Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit), emerge come la produttività delle risorse in Europa possa aumentare fino al 3% ogni anno qualora venga adottato un sistema circolare facilitato dalle nuove tecnologie e dai nuovi materiali.

Questa ricerca si centra su 3 aspetti fondamentali per il fabbisogno umano: mobilità, alimentazione ed edilizia; a livello numerico emerge ad esempio che per l’edilizia, la tecnologia applicata ai processi industriali potrebbe ridurre i costi di costruzione fino al 50%.

Si stima che in un’economia circolare il reddito disponibile delle famiglie europee, entro il 2030, potrebbe risultare superiore di ben l’11% rispetto al percorso di sviluppo attuale (ciò equivale a circa il 7% in più in termini di Pil).

La Commissione Europea, con la direttiva Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy del 2 dicembre 2015, ha raccolto una serie di linee guida per supportare il passaggio dell’Unione Europea verso l’EC; ogni Stato membro sta però agendo secondo strategie e velocità diverse.

L’Olanda, ad esempio, rappresenta un caso particolare: risale a settembre 2016 il programma governativo “A Circular Economy in the Netherlands by 2050” ed è stato lanciato, nello stesso anno, anche il programma “The Netherlands Circular Hotspot”.

Questi piani sono vere e proprie linee guida, obiettivi per il Paese, ai quali hanno aderito numerosissime aziende del territorio, favorendo così una benefica transizione verso un’economia e uno stile di vita sostenibile, con una pianificazione territoriale forte e resiliente sotto i principi dell’economia circolare.

Il progetto sta avendo numerosi risultati, sia su scala metropolitana/regionale che su scala decisamente più piccola come quella di quartiere/edificio.

In Italia, citando il rapporto sull’economia circolare del 2019, a cura del Circular Economy Network (Gruppo di lavoro del Network e della Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile e gruppo di lavoro ENEA), le proposte di economia circolare in Italia sono riassunte in 10 punti fondamentali:

1. Diffondere e arricchire la visione, le conoscenze, la ricerca e le buone pratiche dell’economia circolare
2. Implementare una strategia nazionale e un piano d’azione per l’economia circolare
3. Migliorare l’utilizzo degli strumenti economici per l’economia circolare
4. Promuovere la bioeconomia rigenerativa
5. Estendere l’economia circolare negli acquisti pubblici
6. Promuovere l’iniziativa delle città per l’economia circolare
7. Realizzare un rapido ed efficace recepimento del nuovo pacchetto di direttive europee per i rifiuti e l’economia circolare
8. Attivare rapidamente un efficace end of waste: strumento indispensabile per un’economia circolare
9. Assicurare le infrastrutture necessarie per l’economia circolare
10. Estendere l’economia circolare anche al commercio on line

Il rapporto del Circular Economy Network mette a confronto 5 Nazioni europee che sono quelle con le più importanti economie dell’Unione, cioè Italia, Francia, Germania, Regno Unito e Spagna: secondo lo studio eseguito, l’Italia ha ottenuto la migliore performance, confrontata con le altre 4, anche se vengono registrati piccoli segnali di rallentamento di cui bisogna tener conto.

Considerando ad esempio i dati relativi alla produzione, l'Italia ha ottenuto risultati notevoli a confronto con gli altri Stati esaminati; nello specifico in merito alla produzione si fa riferimento a produttività delle risorse, produttività energetica e quota di risorse rinnovabili, tutte voci in cui i risultati ottenuti sono stati molto positivi.

Anche nella gestione dei rifiuti, tra le 5 grandi economie, l'Italia primeggia a fianco della Germania: il riciclo dei rifiuti urbani nel 2016 è stato pari a 45,1%, in linea con la media europea, la percentuale di riciclo di tutti i rifiuti è invece pari al 67%, nettamente superiore alla media europea (55%), lo smaltimento in discarica per l'Italia è ridotto al 25%, in linea con la media europea, ma con valori ancora elevati rispetto ad altre realtà come la Germania, la Francia e il Regno Unito.

I principi dell'economia circolare trovano applicazione anche nel campo dell'urbanistica, cioè nella pianificazione dei flussi, come si evince dalla tesi pubblicata da Zanotto sull'economia circolare: la chiave sarebbe quella di creare delle catene chiuse all'interno della realtà della città, nelle quali la circolazione di energia, materiali, ma anche rifiuti, siano reperiti e utilizzati in maniera territoriale (per città, province, regioni) e ragionata a livello di sostenibilità.

Questo studio del metabolismo urbano, garantisce un'attenzione particolare all'inserimento dei principi di economia circolare, favorendo l'ottimizzazione dei cicli e delle risorse anche a livello organizzativo delle realtà comunali, territoriali strette.

Volendo mettere una nota negativa però, la transizione al modello circolare ha numerosi costi (tra cui, ad esempio, la spesa in ricerca e sviluppo, i finanziamenti per favorire l'ingresso sul mercato di nuovi prodotti, nonché la spesa pubblica per la creazione di infrastrutture digitali); dunque l'integrazione di queste tipologie di business avviene in modo graduale, anche per via del coinvolgimento stretto del campo pubblico e politico.

Il processo deve avvenire in maniera cauta anche per un secondo motivo, il cosiddetto effetto rimbalzo: quando i prezzi diminuiscono a causa di un aumento della produttività delle risorse, i consumatori tendono a un maggior consumo, il che potrebbe, a sua volta, ad annullarne i benefici ottenuti.

Tenuto conto di questi aspetti, si può confermare, in ogni caso, che la cultura dell'economia circolare è senz'altro uno degli obiettivi più fruttuosi ai quali possiamo aspirare, da un punto di vista sociale, economico e soprattutto di sostenibilità ambientale, richiede grandi sforzi ma i benefici sarebbero duraturi e appaganti nel tempo.

2.2 L'ECODESIGN

L'ecodesign è uno strumento che, a fianco dell'economia circolare, permette di sviluppare un modello economico sostenibile.

E' una nuova frontiera del design e i cui principi si basano sull'intero ciclo di vita del prodotto: dall'approvvigionamento e impiego delle materie prime, che devono essere riutilizzabili, biodegradabili, riciclabili e non tossiche, alla lavorazione nel processo produttivo e alla distribuzione, all'efficienza energetica (ridotto consumo energetico nella fase produttiva) e di ridotto impatto ambientale.

Un altro aspetto di cui si tiene conto è il ciclo di vita del prodotto che deve poter essere allungato il più possibile, attraverso il riciclo e/o il riutilizzo dei suoi componenti (in alternativa il prodotto dovrà risultare biodegradabile al 100%, in modo da rientrare completamente nel ciclo naturale).

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia analitica e sistematica che valuta l'impronta ambientale di un prodotto o di un servizio, lungo il suo intero ciclo di vita spaziando dalle fasi di estrazione delle materie prime costituenti il prodotto, alla sua produzione, sua distribuzione, uso e sua dismissione finale, restituendo i valori di impatto ambientale associati al suo ciclo di vita. Ugualmente tramite le tecniche di LCA si può calcolare l'impronta ambientale di un servizio, contabilizzando l'impronta di tutto ciò che serve per l'erogazione di quel medesimo servizio. Al termine dei calcoli, il valore di impronta ambientale di un prodotto/servizio viene così restituito secondo diverse "categorie di impatto", che rappresentano tutti i diversi impatti che questo genera nei vari comparti ambientali.



Figura 2.2.1: *Processo di Life Cycle Assessment*

In Italia vige una direttiva, quella europea, sull'ecodesign: Direttiva 2009/125/CE, relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia.

Istituisce un quadro di specifiche minime per la progettazione ecocompatibile che i prodotti che consumano energia devono soddisfare per poter essere utilizzati e venduti nell'UE (non si applica ai mezzi di trasporto di passeggeri o merci).

La direttiva 2012/27/UE ha modificato la legislazione del 2009 per promuovere ulteriormente l'efficienza energetica, invitando le autorità nazionali a fissare un obiettivo nazionale indicativo di efficienza energetica e ad approvare una strategia a lungo termine per rinnovare le strutture residenziali e commerciali.

In merito dal 1 gennaio 2014, vige l'obbligo di rinnovare il 3 % della superficie complessiva degli edifici di proprietà del governo e l'introduzione di regimi obbligatori di efficienza energetica per raggiungere un risparmio energetico annuo pari all'1,5 % per gli utenti finali tra il 1 gennaio 2014 e il 31 dicembre 2020.

2.3 MERCATO DELLE COSTRUZIONI: UN FUTURO SOSTENIBILE

Focalizzando ora l'attenzione sul mercato delle costruzioni, questo ha necessariamente un impatto molto forte nelle economie mondiali e soprattutto sull'ambiente.

Il consumo di cemento, in particolar modo, che rappresenta un'importante fetta del mercato delle costruzioni, anche se in un contesto di crisi, rappresenta il 7% del settore, con 27000 imprese coinvolte (dato fornito dal "Position Paper" di Federbeton) e di conseguenza un comparto strategico per l'economia nazionali.

Utilizzando ancora una volta i dati di Federbeton, facendo un'analisi di impatto ambientale, risulta come in Europa, considerando l'intero ciclo di vita degli edifici, questi siano responsabili di:

- 40% del consumo di energia
- Circa 35% delle emissioni di gas serra
- 50% di tutto il consumo di materie prime
- Circa 30% di tutta l'acqua utilizzata

Scenari futuri mostrano come la popolazione mondiale sia destinata a crescere sempre più, di conseguenza crescerà anche la domanda di cemento: il legame infatti tra queste due sfere è inevitabile, dato che un maggior numero di persone necessitano di un maggior numero di abitazioni, infrastrutture e servizi.

Alla luce di queste osservazioni si denota come sia importante indirizzare il mercato verso un uso efficiente delle risorse e verso flussi circolari di materia, nell'ambito dunque di piani di economia circolare: applicando questi principi si possono apportare significativi benefici alle emissioni di gas serra nei processi produttivi, attraverso il riutilizzo efficace dei prodotti esistenti, salvaguardando materie prime naturali non rinnovabili e adottando tecniche di cattura e utilizzo del carbonio.

Il miglior veicolo per il contenimento dei cambiamenti climatici, in riferimento a cemento e calcestruzzo, è la filiera produttiva attraverso azioni volte al recupero di materia, recupero energetico e ottimizzazione dei processi produttivi.

Le aziende produttrici hanno infatti progressivamente aumentato i tassi di sostituzione di combustibili fossili e materie prime naturali, con materie prime residuali derivanti ad esempio da altri processi industriali, raggiungendo dunque importanti traguardi nel campo della riduzione delle emissioni.

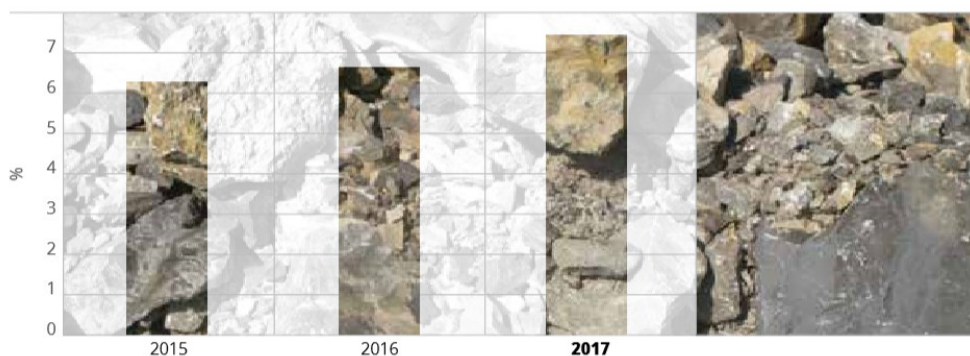


Figura 2.3.1: Tasso di sostituzione delle risorse naturali con rifiuti o materie prime seconde (% sul totale di materie prime utilizzate).

Fonte: Rapporto sostenibilità Aitec 2017

Per studiare adeguate strategie volte alla riduzione delle emissioni, è necessario individuare le origini nella fase di produzione, dunque quali sono le fasi nelle quali è necessario intervenire. Un componente importante nel calcestruzzo è il clinker, componente attivo che per essere prodotto richiede un'elevata intensità energetica e dunque a un grosso quantitativo di CO₂ emesso.

Le fasi del processo che generano una più alta percentuale di emissioni sono la decarbonatazione (del carbonato di calcio che costituisce la maggior parte delle materie prime da cui si origina il clinker) e la successiva combustione (necessaria alla sintetizzazione dei componenti fondamentali). Le emissioni prodotte per decarbonatazione sono pressoché irriducibili, a causa di processi chimici sviluppati che sono in alcun modo evitabili o sostituibili; l'attenzione quindi va posta sull'aliquota prodotta dal processo di combustione, variando ad esempio i combustibili, sostituendoli con materiali meno inquinanti.

Di seguito vengono proposte 3 strategie, che apportano riduzioni significative di anidride carbonica, effettuate dalla filiera.

SOSTITUTIVI DEL CLINKER NEI CEMENTI

Essendo il clinker l'elemento richiedente la più grande spesa energetica e di conseguenza la più alta produzione di CO₂, si può sostituirne parte, nella produzione di cemento, con materiali e sottoprodotti provenienti da altre attività industriali.

Esempi di materiali sostitutivi sono le ceneri volanti (da centrali elettriche a carbone), le scorie d'altoforno (dalle acciaierie); i materiali sostitutivi possono anche essere di origine naturale come ad esempio le pozzolane o il calcare.

Variando il contenuto di clinker si riduce quindi notevolmente la produzione di anidride carbonica, ma ne influenza il tipo di utilizzo andando a variare la predisposizione di tutta la filiera.

CALCESTRUZZO RICICLATO

I componenti del calcestruzzo, in particolar modo gli aggregati possono essere quasi totalmente sostituiti da aggregati industriali, come scorie di acciaieria o rifiuti da demolizione, a patto però che i sostitutivi rispettino, dal punto di vista delle caratteristiche tecniche, i criteri di quelli originari.

Il calcestruzzo, alla fine della sua vita, può anche essere completamente riciclato, per produrre nuovo calcestruzzo o per altre applicazioni, come ad esempio sottofondi stradali; in alcuni casi possono essere studiate strutture formate da elementi assemblabili e facilmente disassemblabili, in modo da poterne riciclare le parti che possono essere recuperate per sfruttarle in altre costruzioni.

Un'altra strada prevede di recuperare il materiale dal cosiddetto C.D., cioè il calcestruzzo di ritorno: questo prodotto è quello reso all'impianto per esubero o per mancata accettazione al cantiere; da questo materiale si può ottenere del nuovo calcestruzzo, oppure aggregati per riempimenti.

Quello del calcestruzzo di ritorno rimane però un tasto ancora delicato, di difficile interpretazione soprattutto dal punto di vista legislativo.

CALCESTRUZZI INNOVATIVI

L'innovazione, lo studio e la scienza sono sempre stati il motore che ha permesso al campo delle costruzioni di adeguarsi e adattarsi alle nuove sfide proposte dall'ambiente circostante e, in particolar modo al giorno d'oggi, a salvaguardarlo.

Esiste una classe di calcestruzzi definiti "speciali" che hanno, a livello prestazionale, caratteristiche di gran lunga superiori rispetto al calcestruzzo tradizionale; le caratteristiche variano a seconda dei casi e soprattutto a seconda delle esigenze richieste dalla progettazione e dal cantiere.

Calcestruzzo drenante

Questa tipologia di calcestruzzo è stata studiata principalmente in relazione al problema di consumo di suolo, legato per lo più al fattore di invarianza idraulica.

Il materiale garantisce un'elevata permeabilità e dunque è capace di regolarizzare il deflusso delle acque piovane evitando il sovraccarico delle reti di drenaggio.

Questa principale caratteristica è accompagnata da altre note positive, come il fatto di avere resistenze meccaniche elevate, ma anche facilità e rapidità di posa; le applicazioni sono molteplici ma viene per lo più impiegato per pavimentazioni stradali, ciclo-pedonali, percorsi e aree di passaggio di vario tipo a seconda dei carichi richiesti.

Calcestruzzo a polvere reattiva RPC

Appartiene ad una classe di calcestruzzi ad alta resistenza meccanica, che può arrivare ad una resistenza meccanica a compressione di 200N/mm².

Da uno studio svolto dal dipartimento di scienza dei materiali dell'Università di Ancona, si evince il Reactive Powder Concrete (RPC) è un conglomerato cementizio privo di aggregati grossi che contiene: additivi superfluidificanti per diminuire il rapporto acqua/cemento a valori molto bassi (0.15-0.25) e ridurre, quindi, la porosità capillare della matrice cementizia; fumo di silice, materiale pozzolanico di dimensione sub-micronica capace di allocarsi tra gli interstizi dei granuli di cemento e di ridurre, quindi, ulteriormente la porosità capillare; micro-fibre in acciaio (diametro 0.18 mm, lunghezza 13 mm) per rinforzare la matrice cementizia e migliorare in particolare la tenacità.

E' proprio grazie a questa particolare composizione, nella quale la matrice cementizia presenta una microstruttura pressoché priva di pori capillari, che garantisce che la resistenza meccanica a compressione (200 MPa) sia così elevata, avvicinandosi al limite massimo di 250 MPa previsto dalla teoria di Powers per un materiale a porosità nulla.

Calcestruzzo self-healing

Il calcestruzzo viene spesso definito come un materiale "eterno", che ha una durabilità molto lunga ed è per questo un materiale ampiamente utilizzato in edilizia; i problemi che solitamente però riguardano le strutture composte da questo materiale, sono problemi di fessurazione e degrado che il tempo può portare.

E' infatti necessario fornire una adeguata risposta ai molteplici problemi legati da un lato alla crescente domanda di strutture ed infrastrutture nei paesi in crescita e dall'altro all'invecchiamento ed al decadimento prestazionale di quelle esistenti nei paesi del cosiddetto mondo sviluppato.

Al fine di soddisfare i requisiti lungo tutta la vita utile dell'opera, il livello prestazionale iniziale deve essere assai elevato, con conseguente aumento dei costi di costruzione e la manutenzione nel tempo deve essere garantita.

In tale contesto, materiali da costruzioni "autoriparanti", capaci quindi di attivare meccanismi di controllo ed autoriparazione del danneggiamento, costituirebbero una

valenza di superiore entità per l'ingegneria civile. La autoriparazione delle fessure porterebbe non solo a prevenire l'ingresso di agenti aggressivi, capaci di innescare i tipici meccanismi di degradazione e decadimento della prestazione strutturale nelle strutture in calcestruzzo armato, ma, potrebbe, se del caso, anche portare ad un parziale recupero delle prestazioni fisico-meccaniche rilevanti per la applicazione di interesse, con un allungamento della vita di servizio dell'opera.

L'acqua è l'elemento della pasta cementizia che permette l'autoriparazione, tramite un fenomeno di idratazione ritardata che essenzialmente permette ai componenti anidri presenti nelle lesioni di reagire nuovamente e ridurre dunque lo spessore o fissare del tutto la fessurazione.

Oltre all'acqua anche altri fattori influenzano il processo, come elencato dall'estratto ATECAP sul calcestruzzo auto-riparante:

- I costituenti del mix design (quantità cemento elevate garantiscono processo migliore)
- Lo stato tensionale lungo le fessure
- La temperatura dell'acqua (temperature più elevate favoriscono il processo)
- Alternanza di condizioni di saturazione e esposizione all'aria con diversi gradi di umidità relativa.

Un campo dove questo processo trova spazio è quello dei HFRCC, compositi cementizi fibrorinforzati ad alte prestazioni, in quanto materiali contenuti elevati quantitativi di cemento e un basso rapporto acqua/cemento nella miscela, oltre ad avere un campo di fessurazione stabile molto ampio.

Nella ricerca ATECAP sopra citata si evince che sono in corso programmi sperimentali che prevedono l'inserimento nel mix design di additivi cristallizzanti, capaci di promuovere l'effetto riparante e di conseguenza recuperare le capacità meccaniche iniziali dei manufatti.

Tra vari esempi citabili è scopo di questa tesi focalizzarsi su uno in particolare di questa classe di calcestruzzi: Il calcestruzzo fotoluminescente.

2.4 VERIFICHE E CERTIFICAZIONI AMBIENTALI

Per misurare l'effettiva funzionalità ed efficienza dei metodi proposti per un'edilizia più verde lo si fa in termini di impronta ambientale: lo scopo è quello di misurare le performance degli edifici. Esistono numerosi sistemi di certificazione di sostenibilità, ad esempio LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) un programma di certificazione volontario che può essere applicato a qualsiasi tipo di edificio e concerne tutto il ciclo di vita dell'edificio stesso, dalla progettazione alla costruzione, oppure il BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) una tra le certificazioni più note a livello internazionale, i quali standard possono essere ben applicati sia per nuove costruzioni che per ristrutturazioni.

L'Italia è stata la prima nazione europea a introdurre l'obbligo, nei bandi pubblici, di inserire i criteri ambientali minimi (CAM) cioè i requisiti ambientali definiti per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di vita, tenuto conto della disponibilità di mercato.

Capitolo 3. IL CALCESTRUZZO FOTOLUMINESCENTE

Il calcestruzzo fotoluminescente, fa parte della categoria di calcestruzzi innovativi, ideati per un'edilizia green e all'avanguardia in termini di efficienza e prestazioni.

Questo materiale è in grado, tramite il fenomeno della fotoluminescenza, di assorbire la luce del sole nelle ore diurne per poi riemetterla di notte: questo tipo di illuminazione naturale è una fonte di energia pulita, rinnovabile ed innocua per animali ed esseri umani.

Questa tipologia di calcestruzzo ricade sotto la categoria di calcestruzzi per mobilità lenta, dunque sentieri pedonali, ciclabili ma anche parcheggi e piazze in zone ad esempio di scarsa illuminazione. La miscela viene studiata appositamente a seconda dei casi e della resistenza meccanica richiesta, ma solitamente la composizione rimane quella del calcestruzzo classico, i quali componenti sono: sabbia, ghiaia, legante (cemento) e acqua; agli inerti vengono sostituiti in percentuale (anche in questo caso a seconda delle proprietà richieste) dalla graniglia fotoluminescente.

In alcuni casi la fotoluminescenza viene accoppiata ad altre metodologie per rendere il materiale finito ancora più sostenibile, ad esempio con la realizzazione di calcestruzzi drenanti e fotoluminescenti, oppure utilizzando pietrisco riciclato in parziale sostituzione a quello tradizionale e i clasti luminescenti.

Il fenomeno fisico sfruttato è quello della fotoluminescenza: all'interno della miscela di calcestruzzo ci sono dei clasti "speciali" che assorbono le onde elettromagnetiche e con questa energia lavorano nel campo visibile dando vita al fenomeno della luminescenza (visibile dunque all'occhio umano).

Risulta essere un calcestruzzo molto versatile, disponibile in diverse colorazioni in base alle esigenze architettoniche e costruttive e anche lavorabile, con la possibilità di dare forme e design anche particolari.

Questo sotto intende anche un ulteriore aspetto che è quello della versatilità ma soprattutto della buona integrazione del materiale all'ambiente circostante, quindi un'ottima opportunità anche dal punto di vista dell'urbanismo tattico, con lo scopo di non danneggiare troppo (anche dal punto di vista visivo) gli ambienti naturali.

Essendo un calcestruzzo per pavimentazioni è anche predisposto per ospitare un'armatura, con le tradizionali reti elettrosaldate sia a singolo che a doppio strato, con superfici neutre (color grigio-cemento solitamente) o colorate e con gli aggregati grossi parzialmente a vista.

In Olanda è stato utilizzato, su progetto dello Studio Rooseghaarde, per la realizzazione di una pista ciclabile ispirata all'opera d'arte di Vincent Van Gogh "la notte stellata": la trama del materiale ricorda infatti l'omonima opera d'arte e i clasti luminescenti di notte si accendono con questa particolare struttura che rende omaggio all'artista in maniera innovativa e singolare.

Il percorso ciclabile fa parte di un progetto dello Studio più grande, che prende il nome di "Smart Highways", che si propone l'obiettivo di realizzare strade "intelligenti", ecosostenibili dal punto di vista ambientale, soprattutto dal punto di vista del consumo energetico, impiegando materiali innovativi (tra cui il calcestruzzo fotoluminescente) e tecniche di illuminazione che permettano un basso consumo di energia elettrica e non solo, anche particolari rivestimenti del manto stradale che tramite reazioni chimiche permettono alle auto vetture elettriche di ricaricarsi al passaggio in strada (di cui si parlerà in maniera più estesa nei capitoli seguenti).

La fotoluminescenza può provenire, oltre che dai clasti presenti nella miscela, anche da altri materiali come ad esempio vernici e pigmenti, che possono essere affiancati al calcestruzzo oppure utilizzati singolarmente, per conferire ulteriori proprietà di sostenibilità e proiettare anche l'ambiente costruito in un'ottica più green.

3.1 IL FENOMENO DELLA FOTOLUMINESCENZA

Il termine luminescenza indica il fenomeno dell'emissione di luce da un materiale dopo l'eccitazione dei suoi stati elettronici da parte di una fonte esterna.

In funzione della lunghezza d'onda e dal materiale che assorbe le radiazioni si possono avere diversi effetti, alcuni visibili e altri no.

La fotoluminescenza è la proprietà fisica distintiva delle cosiddette «terre rare», alluminati inorganici presenti in natura: i pigmenti fotoluminescenti sono non tossici, non radioattivi e il contenuto in metalli pesanti è venti volte inferiore al limite imposto dalla legge.

La luce solare o artificiale catturata durante il giorno è poi restituita al buio per un massimo di otto ore con intensità calante.

La fotoluminescenza comporta dunque l'eccitazione mediante radiazione elettromagnetica; a seconda del materiale, i fotoni possono essere emessi con il meccanismo della fluorescenza (emissione di luce per meno di 10^{-8} s) o fosforescenza (emissione di luce per minuti o ore).

I materiali che possiedono queste caratteristiche sono per lo più composti inorganici e sono generalmente chiamati fosfori ma, negli ultimi 30 anni, sono stati studiati altri tipi di fosfori a lunga fosforescenza (persistente) basati su alluminati metallici alcalini o alcalino-terrosi drogati con ioni di terre rare o ioni di metalli di transizione.

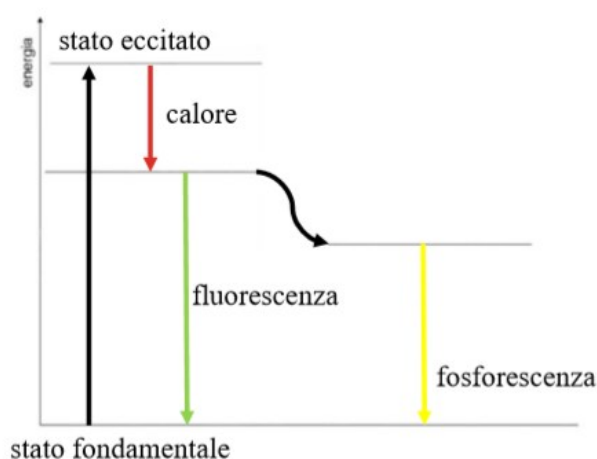


FIGURA 3.1.1: Grafico energia/lunghezza d'onda con indicazione dei vari stati.

Fonte "la fotoluminescenza" di M.F.De Santis

3.1.1 FLUORESCENZA

La fluorescenza è un fenomeno molto rapido che cessa al termine dell'eccitazione degli atomi; prende il nome dalla fluorite, il materiale sul quale è stato osservato il fenomeno per la prima volta.

L'atomo, assorbendo energia, fa scattare gli elettroni ad un livello energetico superiore rispetto a quello di partenza, ma la permanenza è molto breve (infatti il fenomeno ha scarsa durata); quando l'elettrone si riposiziona nel livello energetico originario viene liberata una quantità di energia, emessa sotto forma di radiazioni elettromagnetiche.

La banda di radiazioni emesse è detta radiazione di Stokes o antiStokes a seconda che sia di lunghezza d'onda maggiore o minore della radiazione assorbita.

Una volta avvenuta l'eccitazione dallo stato elettronico fondamentale a uno eccitato, con assorbimento dell'energia, il decadimento avviene parzialmente all'interno del livello elettronico eccitato, in seguito a decadimento in un livello vibrazionale inferiore.

Fenomeni di fluorescenza hanno luogo con molte sostanze in diversi stati di aggregazione; in particolare la fluorescenza assume particolare importanza dal punto di vista analitico e consente di rilevare composti.

Il maggior numero di esempi di fluorescenza si ha per composti organici per i quali si raggiungono limiti di rivelazione più elevati.

Il fenomeno è condizionato da diversi fattori tra cui:

- La temperatura: al diminuire della temperatura la fluorescenza aumenta
- Il ph: il livello di ph nel composto può influenzare il fenomeno
- Colloidi: colloidi o sostanze colorate possono ridurre l'intensità

La fluorescenza viene applicata ed utilizzata in molti ambiti, ad esempio nelle lampade o per il riconoscimento di banconote false; una particolare applicazione la si trova nella prospezione idrografica, cioè la ricerca del percorso dei corsi d'acqua sotterranei: alcuni corsi d'acqua possono essere inghiottiti da condotte naturali ipogee e riaffiorare anche a grande distanza, anche suddividendosi o diramandosi; per tenere tracciato il loro percorso viene diluito nell'acqua una soluzione di fluorescina che permette di trovare fonti di affioramento e il trasporto di suddette acque da monte.

3.1.2 FOSFORESCENZA

A differenza della fluorescenza, la fosforescenza continua a manifestarsi anche quando si cessa l'azione eccitante delle particelle.

L'elettrone non passa direttamente dallo stato iniziale a quello eccitato e viceversa, ma esistono dei livelli intermedi, a seconda del materiale analizzato.

L'effetto dunque può durare anche alcuni giorni e può addirittura diventare stabile se viene aggiunto materiale radioattivo (fenomeno persiste senza esposizione alla luce).

Lo spin di un elettrone è una quantità che descrive un momento angolare meccanico classico basato sul movimento rotazionale di una massa.

Lo spin di un elettrone può assumere valore $+\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$; secondo il Principio di esclusione di Pauli se due elettroni si trovano nello stesso orbitale hanno spin antiparalleli e quindi si trovano in uno stato di singoletto (S_0), cioè lo stato originale della maggior parte delle molecole in cui gli elettroni hanno spin appaiati.

A seguito dello spostamento ad un livello superiore quindi l'elettrone mantiene il suo spin e si trova in uno stato eccitato di singoletto (S_1); le orientazioni rimangono dunque antiparallele.

L'interconversione rapida che avviene in un tempo tra 10^{-11} e 10^{-6} secondi dallo stato S_1 a quello di tripletto T_1 energeticamente favorito porta all'inversione dello spin (il tripletto è lo stato più stabile dove si colloca l'elettrone dopo l'inversione di spin).

Gli stati di tripletto sono caratterizzati da spin paralleli di entrambi gli elettroni e sono metastabili. Il rilassamento avviene tramite la fosforescenza si traduce in un'altra variazione dello spin dell'elettrone.

Il ritorno allo stato fondamentale di singoletto (S_0) può verificarsi dopo un notevole ritardo.

Inoltre, più energia è dissipata durante questo tipo di rilassamento fosforescente rispetto a quello che si verifica nella fluorescenza.

La fosforescenza è un fenomeno non dannoso per la salute, è presente anzi anche in natura come ad esempio si può citare la cosiddetta "fosforescenza marina": alcuni tipi di meduse, ma in maggior parte plancton, se a contatto con particolari sostanze emettono luce e colorano la superficie del mare che di notte si illumina.

Lo stesso fenomeno viene replicato oggi come fonte di energia pulita, in ingegneria ed altri ambiti, ad esempio per segnalazioni stradali (strisce pedonali, strisce laterali, cartellonistica).

Il calcestruzzo fotoluminescente è un esempio di applicazione innovativo e green: i clasti eccitati emettono luce per diverso tempo dopo l'esposizione al sole, ecco perché vengono utilizzati per segnare percorsi ed utilizzati come fonte di energia luminosa, senza ricorrere ad esempio ad altre fonti come quella elettrica, per l'illuminazione.

3.2. COMPONENTI LUMINESCENTI

L'applicazione della luminescenza a questa tipologia di calcestruzzo innovativo viene fatta tramite l'aggiunta, alla miscela in particolare ma in alcuni casi anche alla superficie, di materiali lavorati affinché abbiano questa caratteristica e riescano quindi ad assorbire energia per poi riemetterla.

Le graniglie sfruttano gli alluminati che combinati tra loro danno vita a diverse colorazioni; i supporti sui quali vengono fatti aderire gli alluminati sono resina e vetro (nel caso del vetro gli alluminati vengono fatti fondere a temperature tra i 1000 e 1250 gradi con cicli da 3 a 12 ore).

Altri metodi per ottenere la luminescenza sono l'utilizzo di pigmenti o vernici.

3.2.1 GRANIGLIE

Hanno la particolarità di avere colorazioni molto diverse, che possono variare di molto dal giorno alla notte, dopo l'esposizione ai raggi solari.

Data la vasta gamma di colorazioni e caratteristiche intrinseche, in questo paragrafo sarà citata la graniglia luminosa offerta dall'azienda "Bright Materials" (Verona-Italia).

La graniglia prodotta ha base vetrosa e l'effetto luminescente dura dalle 3 alle 10 ore in base al tipo di vetri e alla tecnica usata, senza predisposizioni elettriche, ma soltanto con l'esposizione per pochi minuti a qualsiasi fonte luminosa, sia naturale che artificiale.

Per ottenere il prodotto finito dunque vengono combinati tra loro diversi materiali quali vetro, pietre naturali, resine, compositi, aggregati cementizi e terre colorate.

Questo materiale quindi si presta bene per essere inserito nelle miscele di pavimentazioni, in particolare si presta alla realizzazione di:

- Pavimentazioni stradali drenanti
- Piste ciclo-pedonali
- Strade secondarie e d'accesso
- Aree ad utenza promiscua e "zone 30"
- Viali e strade in zone sottoposte a tutela ambientale
- Percorsi per impianti sportivi e campi da golf
- Piazzali di sosta
- Sentieri e camminamenti

Le graniglie sono il materiale più usato e anzi impiegato largamente per il confezionamento del calcestruzzo fotoluminescente, al quale per l'appunto, vengono sostituiti parte degli inerti tradizionali con questi ciottoli "lavorati" per avere caratteristiche luminescenti a dare questa particolare caratteristica al prodotto finito.

3.2.2 PIGMENTI

I pigmenti sono materiali che hanno una granulometria ridotta rispetto alle graniglie, hanno la consistenza di una sabbia o di una polvere; sono solitamente, alla luce solare, biancastre ma, una volta irradiate, assumono colorazioni molto diverse tra loro.

Si cita ora lo studio di questo tipo di pigmenti seguito da "Galileo Visionary District - R&D Materials Division", che ha pensato ad hoc questo tipo di pigmento, che per le sue particolarità risulta essere molto adatto anche per applicazioni esterne

I prodotti standard utilizzati sono a base di solfuro di zinco, questi pigmenti necessitano di maggiore energia luminosa per attivarsi e saturarsi ma, una volta rimossa la fonte di radiazione, generano una luminosità più intensa e per un tempo molto più lungo: con una durata di più di 12 ore, equivalenti ad una notte intera, offrono un'efficacia 10 volte superiore ai prodotti tradizionali. La composizione chimica è del tutto innocua, non nociva, infatti è composta da sostanze non pericolose, a base di alluminati di stronzio ed elementi di terre rare; a differenza di altre classi di pigmenti che, grazie alla presenza di un radioisotopo radioattivo, sono in grado di assicurare tempi lunghi di emissione luminosa, questa particolare tipologia risulta maggiormente efficace e assicura una durata più lunga di emissione di luce (utile soprattutto nelle ore notturne e che può essere usata come sorgente luminosa permettendo un risparmio energetico perché sostituirebbe fonti "esterne" come l'energia elettrica).

Infine, sempre rispetto ai pigmenti tradizionali a bassa durata, questi prodotti possono essere impiegati per applicazioni esterne, in quanto resistono bene alla luce, alle intemperie e alla temperatura.

Sono disponibili in tre versioni diverse, a seconda del colore di emissione, che può essere verde, blu o viola; è possibile ottenere anche altri colori ma si riduce il livello di fosforescenza, che varia con la concentrazione del colore aggiunto.

3.2.3 VERNICI

Anche le vernici possono essere un prodotto che dà luminescenza; queste particolari pitture, considerate prodotto finito, vengono solitamente stese sopra le superfici per renderle luminescenti.

Alla luce diurna hanno una colorazione bianca o giallastra, poi però una volta irradiate e osservate in assenza di luce possono dare colorazioni molto diverse e dare visibilità.

Anche se materiali esternamente applicati, le vernici possono essere prodotti adatti a diminuire il consumo energetico; in merito si cita la pubblicazione “Cool, photoluminescent paints towards energy consumption reductions in the built environment” (Federica Rosso et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1343 012198).

In questo studio è stata confezionata una vernice fredda che riflette la luce solare in ingresso (a causa dell'elevata riflettanza solare) ed è stata applicata su un edificio e su alcune superfici di una piazza pubblica, con lo scopo di analizzare l'effettivo “guadagno” energetico che si può ottenere impiegando la fotoluminescenza proveniente dalla vernice.

L'applicazione sull'edificio garantisce non solo un minor impiego di fonti luminose esterne, ma anche un effetto raffrescante: la luce solare viene riflessa e non entra quindi all'interno sotto forma di calore, riducendo quindi anche la richiesta energetica per il raffreddamento dello stabile (nel periodo estivo, nel periodo invernale l'effetto è trascurabile).

I materiali di base per le vernici possono essere molto diversi tra loro; la vernice impiegata nello studio precedentemente citato è bianca durante l'esposizione ai raggi solari, per rimettere di notte una luce di colore azzurro fluorescente.

Il campione è composto per un 75% in peso da primer (che è la porzione che conferisce proprietà di fotoluminescenza) e di un 15% in peso di indurente.

La soluzione delle vernici risulta interessante poiché può essere considerata soluzione alla sostenibilità ambientale in ambiente costruito, perché consentirebbe un minor utilizzo di energia (elettrica per gli esterni e di raffreddamento per gli interni) e dare nuova vita ad ambienti che prima risultavano pesanti e onerosi per costi e ambiente.

3.2.4 MATERIALI A CONFRONTO

I prodotti luminescenti vengono ora messi a confronto, anche se in realtà si prestano ad utilizzi diversi l'uno dall'altro e ognuno di essi ha caratteristiche e applicazioni diverse sulla base delle situazioni e obiettivi predisposti.

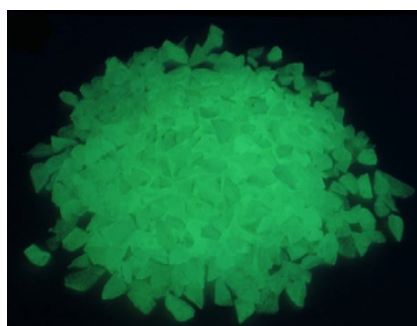
Per fare un confronto viene citato “Phosphorescent-based pavements for counteracting urban overheating - A proof of concept” (Ioannis Kousis, Claudia Fabiani, Laura Gobbi, Anna Laura Pisello) condotto su pavimentazioni fotoluminescenti, in particolare confezionando ben 5 moduli di pavimentazione fotoluminescente, utilizzando per ognuno diversa graniglia/resina fotoluminescente il materiale di base per ognuno dei blocchi è la tradizionale miscela di calcestruzzo (sabbia, acqua, cemento, inerti) in cui parte degli inerti del mix design è stata sostituita con una quota di graniglia lavorata.

Nello specifico sono state utilizzate graniglie di vetro e smalti a base epossidica.

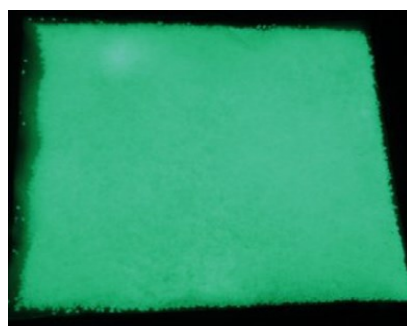
In riferimento a tale sperimentazione i materiali luminescenti utilizzati sono:

- Graniglia di vetro: di colore giallo e una di colore blu, parzialmente sostituiti ne mix design
- Smalto a grana grossa e grana fine: sono stati stesi sopra le pavimentazioni al momento della maturazione e sono state confezionate miscelando resina epossidica con graniglia di vetro fotoluminescente (da 1cm per quella grossa e 0.2cm per quella fine)

Per ottenere la fosforescenza dei vari componenti, questi sono stati lavorati con alluminato di stronzio con droganti di disprosio ed europio.



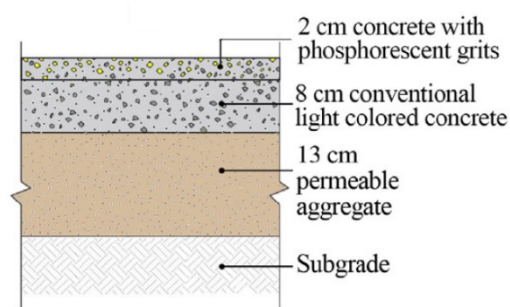
(a)



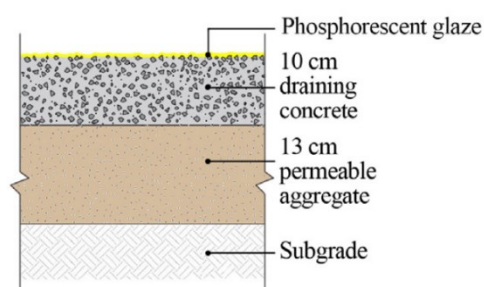
(b)

FIGURA 3.2.1: (a) Graniglia luminescente gialla e (b) graniglia fine per confezionamento smalto.

Fonte "Phosphorescent-based pavements for counteracting urban overheating - A proof of concept" di Ioannis Kousis, Claudia Fabiani, Laura Gobbi, Anna Laura Pisello



(a)



(b)

FIGURA 3.2.2: (a) Pavimentazione con graniglia e (b) pavimentazione con smalto.

Fonte "Phosphorescent-based pavements for counteracting urban overheating - A proof of concept" di Ioannis Kousis, Claudia Fabiani, Laura Gobbi, Anna Laura Pisello

I 6 campioni totali (5 con elementi luminescenti e 1 di calcestruzzo tradizionale da riferimento) sono stati poi esposti all'ambiente, posizionati sopra il tetto e monitorati con l'utilizzo di sensori: un sensore per misurare la temperatura, uno per la direzione del vento e la velocità, uno per misurare la temperatura e l'umidità del vento ed infine uno per misurare le radiazioni riflesse. I risultati ottenuti (con temperature estive registrate durante il giorno aventi una media di 25 C° e un massimo registrato di 37.5 C°) mostrano che i campi dove è stata utilizzata la resina fosforescente ha le peggiori capacità di riflessione, seguiti da quelli mescolati con aggregati luminescenti; la massima riflessione si ha nel campo di riferimento confezionato con calcestruzzo classico.

Per quanto riguarda la temperatura di superficie, nelle ore diurne, mettendo a confronto i campi in cui è stata utilizzata la resina, in uno a grana grossa e nell'altro a grana fine, si nota che quello rivestito con resina con materiale luminescente a grana grossa mostra temperature meno elevate in superficie rispetto a quello a grana fine; questo risultato è da imputarsi al fenomeno di raffreddamento dovuto all'evaporazione, che nella miscela a grana fine viene meno per la riduzione delle cavità aperte nella miscela di calcestruzzo.

Nei blocchi in cui sono stati utilizzati gli inerti luminescenti si sono registrate temperature superficiali minori, rispetto a quello in cui è stata utilizzata la miscela tradizionale, in particolare nelle ore del mattino e del primo pomeriggio; verso il tardo pomeriggio e durante la notte sono annotate temperature più elevate, quando però il vento (a basse velocità) contribuisce a dissipare il calore emanato.

In sintesi con questo importante studio abbiamo dati utili per appurare che il materiale luminescente, miscelato con il calcestruzzo, può effettivamente dare un contributo positivo in termini di assorbimento delle radiazioni e temperature di superficie, di conseguenza quindi contribuire a diminuire l'utilizzo di energia (in particolare elettrica) nelle opere esterne all'aperto.

Capitolo 4. APPLICAZIONI

Il calcestruzzo fotoluminescente è stato presentato nel 2018 alla fiera SAIE di Bologna; presso lo stand di Colacem-Colabeton che aveva dedicato il proprio spazio alle “Strade della sostenibilità”. L’esperienza proposta simulava un parco notturno, avente un percorso illuminato proprio attraverso la fotoluminescenza del calcestruzzo offrendo agli occhi di chi lo percorreva uno spettacolo unico, dal punto di vista visivo ma che esplicava al tempo stesso perfettamente anche la grande ricerca, innovazione e funzionalità del materiale proposto.

Nel corso degli anni numerose aziende hanno deciso di sperimentare con questo materiale e produrre miscele che contenessero clasti fotoluminescenti per vari usi, dal semplice arredo urbano all’impiego in maniera meccanica.

Lo sviluppo di nuove graniglie, sabbie, polveri è in continua evoluzione e sono allo studio nuove formule per garantire le migliori prestazioni alle pietre luminose.

Sia in Italia che all’estero sono stati ideati progetti in cui è stato impiegato questo materiale innovativo, per la realizzazione di piazzali, piste ciclabili e pedonali, ma anche come elemento decorativo per percorsi o aree gioco per bambini.

La modernità del materiale lo porta ad essere al centro anche di numerose iniziative per la riqualificazione e sfruttamento green delle aree pubbliche, con effetti positivi a livello sociale ma anche ambientale.

4.1 I PRODOTTI DELLE AZIENDE

4.1.1 COLABETON

Colabeton è un’azienda italiana che produce e distribuisce calcestruzzo preconfezionato. Offre una vasta gamma di prodotti e tra questi un’intera linea proiettata alla sostenibilità ambientale chiamata “SmartThinking”.

Lo scopo del gruppo è quello di analizzare le diverse situazioni in cui è richiesto l’impegno del calcestruzzo e utilizzare il mix più adatto in termini di esigenze progettuali e non solo, anche quelle del Pianeta.

A partire da FlatStone e FlatDrain, due miscele già prodotte dall’azienda, sono state fornite due varianti: BrightStone (calcestruzzo fluido colorato per pavimentazioni ad effetto architettonico in versione fotoluminescente) e DrainStone (calcestruzzo a consistenza terra umida con effetto drenante in versione fotoluminescente).

BrightStone fa parte dei calcestruzzi a prestazione garantita ideali per pavimentazioni a mobilità lenta come marciapiedi, piste ciclabili, piazze e zone verdi; si prestano quindi ad essere armate con reti elettrosaldate interne o esterne.

Si possono ottenere diversi effetti per la superficie esterna, per far sì che il materiale aderisca bene alla situazione circostante: superfici neutre, colorate o addirittura con aggregati parzialmente a vista e per la versione fosforescente la componente luminescente può essere fornita in diverse colorazioni (giallo, blu, rosso, ecc) offrendo, insieme alla combinazione di aggregati, cementi (bianchi e grigi) e all’utilizzo di speciali ossidi colorati, una vasta possibilità di combinazioni sia cromatiche che di tessitura superficiale.

Le caratteristiche meccaniche di seguito elencate fanno riferimento a dati riportati dalla scheda tecnica fornita dall’azienda che valgono sia per il mix Bright che per il tradizionale Flat.

Gli aggregati utilizzati sono provvisti di marcatura CE in conformità alle norme UNI EN 12620 e UNI 8520-2, opportunamente selezionati al fine di garantire il raggiungimento delle resistenze meccaniche a compressione e della lavorabilità prefissate.

Oltre alle eccellenti proprietà elasto-meccaniche, tessiturali e di colore, gli aggregati selezionati per la produzione dei calcestruzzi flatStone vengono specificatamente sottoposti a prove di caratterizzazione petrografica per la minimizzazione del rischio di potenziale reattività agli alcali. Riguardo alla posa in opera, dopo che questa è avvenuta e successivamente alla staggiatura della piastra di pavimentazione, si sottopone il calcestruzzo ad un trattamento “disattivante/ritardante” per bloccare temporaneamente il processo di presa del calcestruzzo nei primi millimetri più superficiali del pavimento.

Nelle 24 ore successive all’applicazione del trattamento disattivante/ritardante, mediante idrolavaggio a pressione, si procederà all’asportazione dei finissimi (cemento e sabbie) che rivestono gli aggregati grossi conferendo alla superficie un aspetto naturale con effetto ghiaia a vista.

In base alle modalità di realizzazione dell’opera sono disponibili diverse classi di consistenza e vengono aggiunti anche additivi (conformi ai prospetti 3.1 e 3.2 oppure ai prospetti 11.1 e 11.2) della norma UNI EN 934-2) in particolare additivi superfluidificanti. Questi servono a incrementare la durabilità e la lavorabilità, limitando quindi l’utilizzo di acqua che potrebbe causare fessurazioni e problematiche dal punto di vista della resistenza e dell’estetica (fenomeno del ritiro idraulico del calcestruzzo); gli additivi riduttori di acqua utilizzati sono specifici per pavimentazioni industriali il cui effetto è quello di garantire un’elevata coesione del calcestruzzo, ma una bassa viscosità in movimento in grado di facilitare la posa e la stesa manuale del conglomerato evitando così che l’operatore provveda a dannose riaggiunte di acqua in cantiere.

Alcuni dati utili (scheda tecnica Colabeton – FlatStone):

- Intervallo caratteristico di resistenza a compressione (R_{ck}): 30 ÷ 45 Mpa
- Intervallo di resistenza a trazione semplice: 3 ÷ 4.5 Mpa
- Classi di consistenza “S”: S3 ÷ S4
- Diametro massimo dell’aggregato: 15 – 25 mm

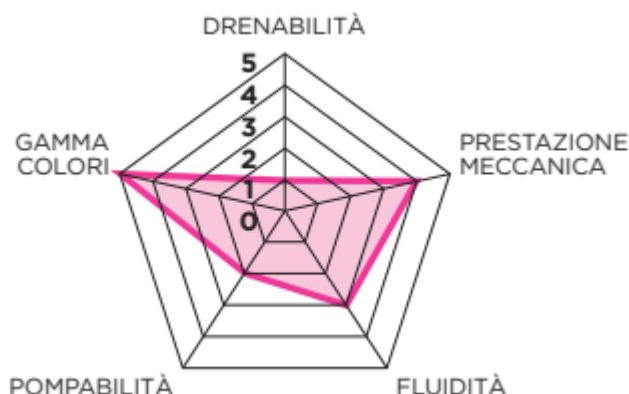


FIGURA 4.1.1: Grafico di sintesi delle caratteristiche meccaniche di BrightStone Colabeton (scheda tecnica)

DrainStone è una formulazione doppiamente utile, poiché la base di partenza è un calcestruzzo drenante cioè con elevata porosità che permette di smaltire le acque piovane evitando così fenomeni di acquaplaning o ristagno di pozze d'acqua su aree pedonali e ciclabili con ripercussioni positive in termini di sicurezza per gli utenti.

La capacità di smaltimento delle acque è pari a $350\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ (dato fornito da Colabeton); è una soluzione molto valida in termini di smaltimento delle acque piovane poiché aiuta il reintegro dell'acqua di falda ed elimina l'esigenza di vasche di accumulo, pozzetti e di altri dispositivi per la presa e lo smaltimento dell'acqua piovana e in questo senso, qualitativamente il calcestruzzo drenante comporta una riduzione dei costi generali di progetto derivanti dall'abbattimento in tutto o in parte dei dispositivi tradizionalmente impiegati per l'allontanamento delle acque dalle superfici pavimentate.

Anche per questa tipologia di calcestruzzo vengono impiegati additivi superfluidificanti e vengono utilizzati aggregati provvisti di marcatura CE in conformità alle norme UNI EN 12620 e UNI 8520-2, opportunamente selezionati – in particolar modo dal punto di vista granulometrico - al fine di garantire la capacità drenante e la resistenza meccanica a compressione prefissata in relazione allo specifico progetto.

In particolare aumentare il dosaggio dell'aggregato grosso, favorisce il drenaggio ma non garantisce prestazioni meccaniche elevate, di contro utilizzando un maggior quantitativo di sabbia (grana fine) si aumenta la resistenza meccanica ma diminuisce la porosità e dunque lo smaltimento delle acque.

La consistenza a “terra umida” viene creato utilizzando una pasta legante sufficientemente viscosa da riuscire a ricoprire l'aggregato lapideo ma al tempo stesso preservare i macropori che garantiscono le proprietà sopra descritte.

La messa in opera può avvenire manualmente, tramite laser screed o vibrofinitrice stradale.

Alcuni dati utili (scheda tecnica Colabeton – FlatDrain):

- Intervallo caratteristico di resistenza a compressione (R_{ck}): $15 \div 20 \text{ Mpa}$
- Intervallo di densità in situ: $1600 \div 2000 \text{ kg/m}^3$
- Classi di consistenza “S”: S1
- Diametro massimo dell'aggregato: $10 - 15 \text{ mm}$

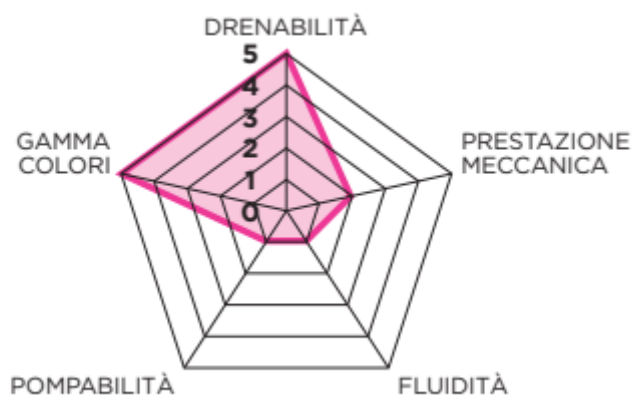


FIGURA 4.1.1: Grafico di sintesi delle caratteristiche meccaniche di BrightDrain Colabeton (scheda tecnica)

4.1.2 MAGESTE CAVE E CALCESTRUZZI

L'azienda Mageste, è un'azienda italiana con sede in territorio pugliese che si occupa della produzione di calcestruzzi ma anche dell'estrazione di pietra dalla cava di Altamura. Offre una vasta gamma di calcestruzzi tra cui anche la variante fotoluminescente denominata "pavimento fotoluminescente".

È un calcestruzzo strutturale che ha caratteristiche fotoluminescenti date da una particolare operazione termica che consente agli illuminati di aderire ai clasti e conferire le proprietà di fosforescenza.

Gli inerti lavorati sono in parte anche provenienti da vetro riciclato, cosa che rende il prodotto sostenibile non solo per le caratteristiche conferite ma anche sostenibile per la percentuale di materiale di recupero che viene utilizzato nella miscela.

4.1.3 AGT AMBIENT GLOW TECHNOLOGY

Questa azienda si occupa della produzione di ciottoli luminescenti, di ogni forma, colore e per molteplici campi di impiego.

I loro aggregati si inseriscono bene anche all'interno di calcestruzzi, in particolare nella superficie per renderli così ecosostenibili e indubbiamente scenografici dal punto di vista visivo, evitando anche un eccessivo inquinamento luminoso.

Le pietre luminose AGT™ possono essere seminate e spatolate su calcestruzzo fresco e quindi esposte utilizzando un ritardante per calcestruzzo (con dimensioni consigliate della pietra luminosa: 12 mm); possono anche essere seminate sullo strato superiore di asfalto e laminate.

Le graniglie proposte hanno proprietà luminescenti date dall'alluminato di stronzio, elemento di terre rare non radioattivo e quindi fonte di energia pulita e non nociva; il pigmento viene miscelato in resina o vetro per creare i ciottoli luminescenti (disponibili in diversi diametri sino ad arrivare alle sabbie).

È importante notare che ci sono anche diverse qualità di pigmento bagliore: maggiore è la qualità, più luminoso e lungo sarà il bagliore; gli aggregati luminosi di resina antiritiro AGT™ Commercial Grade e Ultra Grade ad alte prestazioni hanno tempi di incandescenza di oltre 10 ore e risultano quindi adatti ad applicazioni di interessi quali ad esempio sentieri pedonali e o ciclabili, perché garantirebbero una buona visione notturna nell'arco delle ore di buio.

Le proprietà di fotoluminescenza vengono garantite per 20 anni e non necessitano di particolare manutenzione, oltre a quella ordinaria.

Un altro prodotto da poter utilizzare, come rivestimento o aggiunta all'ordinario calcestruzzo è il "Resin Coarse Glow Sand" che offre le stesse prestazioni di bagliore delle pietre luminose di grado ULTRA, offrendo però una maggiore flessibilità in quanto possono essere applicate anche su superfici in calcestruzzo già esistenti tramite un sigillante topico trasparente.

La sabbia incandescente in resina viene sigillata sulla superficie del rivestimento trasparente e quindi una seconda mano di sigillante blocca il materiale.

La superficie rivestita con questa sabbia crea una superficie luminosa funzionale e antiscivolo che resiste all'abrasione.

4.2 PROGETTI REALIZZATI

4.2.1 VAN GOGH PATH

Si tratta di una pista ciclabile, ispirata al quadro di uno dei più famosi pittori olandesi e da cui prende il proprio nome: la notte stellata di Van Gogh.

La realizzazione di questo percorso è la giusta sintesi tra valorizzazione della cultura ed innovazione, portata dal calcestruzzo fotoluminescente che assorbe la luce solare durante il giorno e la riemette di notte formando, grazie al design creato in superficie, numerosissimi punti colorati che riproducono la trama dell'omonimo quadro.

Il percorso fa parte di un progetto più ampio dello studio Rooseegarde, chiamato "Smart Highways".

Le "strade intelligenti" sono strade studiate e pensate per interagire al meglio con gli utenti che la percorrono, in un'ottica volta al risparmio energetico e all'energia pulita.

Le strisce centrali e laterali ad esempio diventano anch'esse "glow in the dark" cioè sono rivestite da una vernice che è in grado di assorbire la luce diurna e riemetterla di notte fino a 10 ore di durata (dati forniti dallo studio Roseegarde).

Oltre alle Glowing lines sono stati inoltre sperimentati altri modi per rendere sostenibili le strade futuristiche del progetto Smart Highways:

- Interactive lights, sono luci posizionate ai lati della strada che funzionano solo al passaggio del veicolo nella strada, si spengono immediatamente dopo il passaggio del veicolo risparmiando energia elettrica quando questa non è necessaria cioè quando non ci sono veicoli che usufruiscono della strada.
- Wind lights, luci provviste di una elica che è in grado di produrre l'energia (energia eolica) necessaria all'accensione della lampada posizionata al centro; il passaggio dei veicoli, accoppiato al corretto posizionamento del sistema, fa sì che il flusso d'aria creato metta in movimento le piccole pale dell'impianto e illumini temporaneamente il percorso, per il tempo necessario al passaggio delle vetture.
- Induction priority lines, corsie rivestite con un film che permette ai veicoli elettrici di ricaricarsi quando questi percorrono la corsia
- Temperature responsive lines, sono anche queste rivestite da uno strado che reagisce alla temperatura o meglio, quando le temperature scendono sotto lo zero mostrano un pattern che avverte così i guidatori che la strada è scivolosa e di prestare dunque attenzione.



FOTO 4.2.1: *schema tecnologie Smart Highways*
Fonte: studio Roseegarde

4.2.2 INNOVATION HILLS

A Rochester Hills, Michigan, è stato ideato un parco che prende il nome di “Innovation Hills”: all’interno è possibile svolgere numerose attività come escursioni, pesca e svago per i più piccoli ed è stato studiato in un’ottica sostenibile ambientalmente dal punto di vista delle risorse e della realizzazione, ma anche di fusione con l’ambiente naturale circostante ricco di fiumi e laghi. All’interno del parco c’è una delle strade pedonali fotoluminescenti più lunga d’America, accessibile a pedoni e ciclisti.

E’ stata progettata dall’architetto Ralph Nunez, che ha utilizzato diverse tipologie di graniglia fotoluminescente per creare percorsi e aree di sosta all’interno del parco in modo da ridurre al minimo il consumo di energia elettrica per illuminare le aree del parco.

Il percorso percorribile è di quasi 2,5 km ed è stato realizzato utilizzando granuli di diametro modesto, posizionati in superficie sia in modo casuale che per creare delle vere e proprie trame sul manto stradale.

Sono state utilizzate anche delle sabbie luminescenti, per ricreare immagini come ad esempio il simbolo di un albero, in una delle terrazze che danno sul fiume.

L’applicazione più artistica della miscela luminescente è stata in un punto di osservazione “fluttuante”: un disco circolare di calcestruzzo fotoluminescente è stato posizionato nell’erba, affacciato su uno specchio d’acqua cosicché di notte la sensazione sia quella di galleggiare illuminati solamente dalla luce prodotta dalla graniglia.



FOTO 4.2.2: foto dell’innovation hills glow path

A destra il percorso pedonale a sinistra il punto di osservazione con vista diurna

Fonte: AGT Ambient Glow Technology

4.2.3 CICLABILE BORGO A MOZZANO

Anche in Italia, in alcuni comuni, sono stati realizzati dei primi percorsi utilizzando il calcestruzzo fotoluminescente.

Uno dei primi si trova a Borgo Mozzano in provincia di Lucca, dove è stata realizzata una pista ciclabile di ben 200m con una superficie totale di 500m².

La base è di resina poliuretanica, fornita dall'azienda Saint-Gobain Weber; l'utilizzo di questo materiale di base fornisce caratteristiche notevoli tra cui ottime capacità drenanti, flessibilità e quindi assecondare i movimenti naturali di assestamento senza danneggiamenti.

La speciale resina trasparente prodotta da Saint-Gobain Weber usata per questa pista ciclabile, fa parte della linea degli impermeabilizzanti poliuretanici weberdry Pur: si tratta di un materiale elastico ad applicazione liquida che non ingiallisce e rimane inalterato in un intervallo di temperature tra i -30 gradi e i 90 gradi; un polimero stabile ai raggi Uv normalmente utilizzato, in quanto trasparente, per l'impermeabilizzazione sopra piastrella qualora si voglia salvare l'estetica del proprio balcone o del terrazzo. In ambito decorativo weberdry Pur Trans è utilizzato anche per sentieri e camminamenti, corselli, piazzali e strade in zone sottoposte a tutela ambientale.

Alla miscela è stata aggiunta una graniglia vetrosa, di diverse colorazioni, quasi impercettibile nelle ore diurne, ma che di notte rilascia la propria luce per effetto della fotoluminescenza.

La posa in opera non richiede numerosi o laboriosi passaggi: si miscelano in betoniera per pochi minuti la resina e la ghiaia, in un rapporto 1:20 e si versa successivamente il composto sulla sede di posa, staggiandolo e compattandolo. La graniglia fotoluminescente viene depositata solamente sullo strato superficiale, per ricreare l'effetto desiderato (fonte Redazione LavoriPubblici.it).

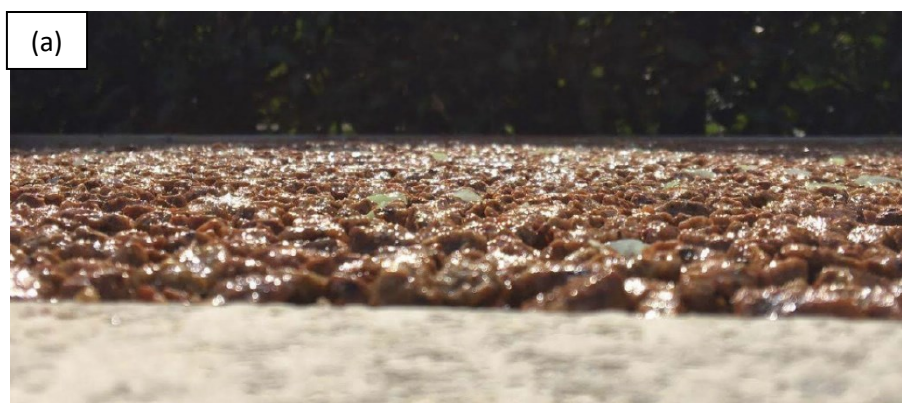


FOTO 4.2.3:

foto (a):

resina poliuretanica

visione diurna

foto (b): pista ciclabile

di Borgo a Mozzano

nelle ore serali

Fonte: Weber Saint-Gobain

4.3 URBANISMO TATTICO

L'urbanismo tattico è un movimento, che nasce in America e che è diventato molto diffuso anche in Italia grazie a numerosi progetti: si tratta di un insieme di interventi non invasivi, che hanno come scopo principale la condivisione e l'incontro tra persone sfruttando spazi pubblici che assumono nuova vita ma soprattutto nuove funzioni.

“L'urbanismo tattico comprende tutti quegli interventi a breve termine a basso costo e alla piccola scala i cui benefici possono essere apprezzati anche nel lungo periodo” (Mike Lydon, Antony Garcia, Tactical Urbanism. Short-term Action for Long-term Change, Island Press, 2015). A questa definizione si accompagnano cinque punti che caratterizzano l'urbanismo tattico:

- 1) Approccio deliberato e graduale per indurre cambiamento
- 2) Idee locali per una pianificazione locale
- 3) Impegno a breve termine e aspettative realistiche
- 4) Basso rischio e ritorno elevato
- 5) sviluppo del capitale sociale tra cittadini e di una collaborazione tra istituzioni pubbliche, private e organizzazioni non profit.

Il carattere precario dell'urbanismo tattico si basa sulla sperimentazione e sulla creatività, le attività sono poco invasive e trovare una soluzione immediata a problemi di vita quotidiana.

A New York ad esempio già nel 2009 è partito un progetto che prevedeva la pedonalizzazione di Times Square; una grande metropoli come New York meritava uno spazio in cui le persone potessero effettivamente stare, uno spazio a misura d'uomo.

Gli interventi da fare erano numerosi ed inizialmente non era stato previsto come un intervento definitivo, infatti il progetto pilota prevedeva la realizzazione di ampi viali pedonali e la parziale chiusura al traffico per alcuni tratti della piazza.

Dopo il grande successo ottenuto con questa prima fase l'amministrazione ha deciso di dare il via ad un progetto più ampio e soprattutto permanente per Times Square, che da snodo stradale si sta trasformando in uno spazio ricco di cultura, di spazi condivisi e di incontro.

Quello della metropoli americana è un valido esempio di urbanismo tattico: l'idea di partenza, cioè quella di fornire ad ogni abitante della città uno spazio aperto e di qualità, si è trasformato in una riqualificazione permanente dell'area che porta benefici alla popolazione ma anche all'ambiente poiché ogni intervento è mirato anche alla riduzione dell'inquinamento.

In generale le tipologie di intervento sono molteplici, per citarne alcuni:

- Open Streets, spazi temporanei sicuri dove poter passeggiare, andare in bicicletta o stare semplicemente all'aria aperta senza automobili
- Parking Day, è un evento per lo più annuale che converte i parcheggi in aree pubbliche, volgendo l'attenzione sulla quantità di spazio che le automobili utilizzano solo per la sosta
- Pop-Up Retail: adibire spazi commerciali e negozi momentaneamente sfitti a luoghi di socialità

E' evidente come lo studio di nuovi materiali, come il calcestruzzo fotoluminescente, sia fondamentale sia per creare nuovi spazi, ma anche per riqualificarne altri che risultano non sfruttati o in stato di degrado.

Le proprietà di questo materiale garantirebbero una maggiore fruibilità degli spazi pubblici come piazze, sentieri pedonali e piste ciclabili in maniera sicura e non nociva per l'ambiente.

Capitolo 5. CONCLUSIONI

Si vogliono ora riassumere, a conclusione di questa trattazione i punti fondamentali per i quali questo calcestruzzo è stato studiato e ideato.

5.1 MICROCLIMA E MITIGAZIONE DELLE TEMPERATURE

Come precedentemente anticipato, il fenomeno delle isole di calore urbano è un fenomeno diretta conseguenza dell'aumento di temperature e della massiccia cementificazione e urbanizzazione.

Le strategie per combattere questo fenomeno sono molteplici, l'aumento di aree verdi, ma in particolar modo uno studio attento dei materiali da costruzione scelti permetterebbe di diminuire di gran lunga questo fenomeno e raffrescare i centri urbani.

Gli effetti quindi che si devono ricercare sono dunque:

- elevato albedo
- elevata riflettanza solare

Con il termine "Albedo" s'intende la frazione di luce o, più in generale, di radiazione incidente che è riflessa in tutte le direzioni ed indica dunque il "potere riflettente" di una superficie.

La riflettanza solare è la proprietà di un materiale/superficie a riflettere l'irradiazione solare.

Una superficie dotata di elevata riflettanza solare riflette la maggior parte dell'irradiazione solare incidente e quindi rimane più fresca in superficie

Negli ultimi anni sono stati sperimentati diversi materiali che avessero queste caratteristiche, in modo da diminuire drasticamente le temperature nelle città, soprattutto nel periodo estivo: vengono definiti "cool materials".

Il calcestruzzo fotoluminescente dunque rappresenta un'ottima soluzione in quanto riuscirebbe ad assorbire la luce dei raggi solari durante il giorno, quando insistono sulle superfici e generano calore, per rimettere poi la luce di notte quando invece dovrebbero essere utilizzati altri strumenti per illuminare.

5.2 OTTIMIZZAZIONE DELLE RISORSE

L'aumento della popolazione, la rapida crescita delle infrastrutture e l'espansione urbana, hanno fatto sì che la domanda energetica abbia raggiunto livelli molto alti.

Focalizzandoci in particolare nel consumo di energia elettrica questa ha subito una rapida impennata, a causa di diversi fattori quali le nuove tecnologie ad esempio, di conseguenza la domanda è cresciuta sempre più.

In particolar in Italia, l'iniziativa SuperBonus si è rivelato, a livello internazionale, uno dei più ambiziosi piani di conversione energetica secondo rapporto dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) "Energy Efficiency 2022"; lo scopo è quello di aumentare di almeno due classi energetiche le prestazioni degli edifici.

Il report mette in luce anche altri aspetti, quali ad esempio l'invasione russa dell'Ucraina che ha portato all'aumento record dei prezzi per le economie di tutto il mondo alla quale i Governi hanno risposto con il lancio di politiche rilevanti, impegni di spesa e campagne pubbliche.

Un'importante sottolineatura fatta dall'Agenzia è che però in realtà la vera chiave di volta sarebbe migliorare e investire sulle economie in via di sviluppo, che necessitano di aiuti significativi.

Oltre a investire su nuove fonti di energia e efficientamento energetico, un'altra area della ricerca si focalizza sullo studio e la sperimentazione di nuovi materiali, come il calcestruzzo fotoluminescente che possano portare ad una significativa diminuzione dell'energia elettrica utilizzata per l'illuminazione e garantire un risparmio economico ma soprattutto una fonte energetica rinnovabile eco-friendly.

Per fornire qualche dato concreto, si vuole citare ora uno studio dell'Università di Perugia (tesi Chiatti Laura) che ha analizzato per via sperimentale un tratto di percorso di mobilità lenta confrontando due diversi scenari: un primo scenario in cui l'illuminazione proveniva solo da energia elettrica, il secondo invece combinando energia elettrica e calcestruzzo con graniglia luminescente per illuminazione.

L'esperimento è stato eseguito con l'utilizzo di un software chiamato DIALux evo, che permette di riprodurre ambienti interni ed esterni con la possibilità di imporre anche i gradi di illuminazione richiesti da normativa, oltre che predisporre anche di sistemi di illuminazione come lampioni, fari commercialmente disponibili, per aver un risultato molto preciso.

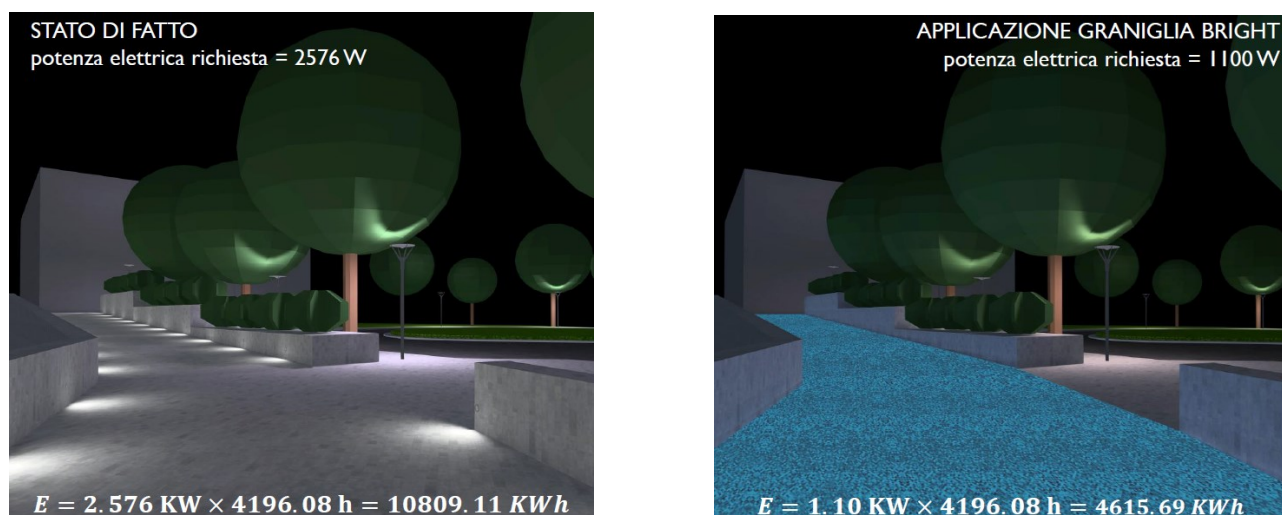


FIGURA 5.1: Rappresentazione dei due scenari.

Fonte tesi "COOL PHOTOLUMINESCENT MATERIALS" di Chiatti Laura

Dalla sperimentazione emerge come in un anno, per un tempo pari a circa 4196 ore (media delle ore di accensione dell'illuminazione), la domanda di energia elettrica del tratto stradale considerato sia pari a 10809 KWh; Utilizzando il calcestruzzo fotoluminescente la domanda di energia elettrica si abbassa notevolmente arrivando a 4615 KWh, ciò significa un risparmio energetico annuo di circa 6193 KWh, che è il consumo energetico di due anni di una famiglia tipo. Pensato su una scala più grande, come potrebbe essere una grande città, il risparmio energetico dunque sarebbe elevato, come sarebbe elevato anche il risparmio dei costi legati all'energia elettrica per l'illuminazione.

5.3 SGUARDO AL FUTURO

Materiali innovativi come questo sono il risultato del continuo studio e della ricerca, motrici della nostra società moderna.

Il nostro mondo sta cambiando e noi con lui; è necessaria una maggiore consapevolezza nel volerlo rispettare e curare, per permettere non solo a noi, ma soprattutto alle generazioni future di poterne usufruire e non solo sfruttarne gli immensi potenziali che esso ha.

La noncuranza del passato ha fatto sì che oggi i danni siano innumerevoli ed alcuni purtroppo irreparabili, basti pensare ai ghiacciai ormai quasi scomparsi, alle specie animali che abbiamo perso o più vicino a noi malattie proliferate negli anni a causa della scarsa qualità dell'aria in ambienti di lavoro o sociali.

Il settore delle costruzioni, da sempre parte fondamentale delle civiltà di tutti i tempi, ha e deve avere un ruolo importante di conversione e cambiamento volto all'ottimizzazione delle risorse, al recupero del costruito e alla promozione di uno stile di vita che si adatta al luogo in cui viviamo e non viceversa, utilizzando non consumando.

Una piccola innovazione come questa, in un campo come quello delle costruzioni e dell'ingegneria può sembrare irrilevante nel quadro generale delle cose ma, in realtà, è un tassello dei tanti che ci permetteranno di costruire un futuro migliore ed è noto che a piccoli passi si raggiungono meravigliosi traguardi.

SITOGRAFIA

- ARPAV VENETO: https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori_ambientali/atmosfera/emissioni/emissioni-in-atmosfera-di-gas-ad-effetto-serra-co2-ch4-n2o/view
- EPIPREV: <https://www.epiprev.it/editoriale/riconoscimento-e-attribuzione-del-riscaldamento-globale-recente-cosa-dice-oggi-la-scienza>
- ISPRA (rapporto clima): <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/notizie-e-novita-normative/notizie-ispra/2020/07/clima-in-italia-il-2019-e-il-terzo-anno-piu-caldo-dal-1961-segnati-nuovi-record-assoluti-nel-mese-di-giugno#:~:text=m%20di%20quota.-,Online%20il%20Rapporto%20Ispra%20%E2%80%9CGli%20indicatori%20del%20clima%20in%20Italia,C%20al%20Sud%20e%20Isola>
- SOLID WASTE ASSOCIATION: <https://www.iswa.org/about-iswa/>
- SISTEMA NAZIONALE PROTEZIONE AMBIENTE: <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita-suolo-e-territorio/il-consumo-di-suolo>
- L'AVANZATA DELL'ECONOMIA CIRCOLARE: https://www.researchgate.net/profile/Mark-Esposito/publication/283843294_L%27avanzata_dell%27economia_circolare/links/5648406008ae451880acd566/Lavanzata-delleconomia-circolare.pdf
- "GROWTH WITHIN: A CIRCULAR ECONOMY VISION FOR A COMPETITIVE EUROPE" PUBLISHED BY THE ELLEN MACARTHUR FOUNDATION AND THE MCKINSEY CENTER FOR BUSINESS AND ENVIRONMENT: <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/2016-11-28-assessment-prof-guenther-schulze-of-report-growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe.pdf>
- VERSO L'ECONOMIA CIRCOLARE COME STRUMENTO DI PIANIFICAZIONE. IL CASO OLANDESE – POLIMI: https://re.public.polimi.it/handle/11311/1041055#.YNh_6OgzaUk
- FEDERBETON POSITION PAPER : https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Federbeton_Position_Paper_Economia_Circolare.pdf?ver=2019-07-29-162843-327
- ATECAP: https://www.penetron.it/public/allegati_certificati/Allegato%209.pdf
- BRIGHT MATERIALS: https://brightmaterials.it/?gclid=EAlaIqobChMlyOuSubKT_QIVBsPVCh1suwypEAAyASA_AEgLE_PD_BwE
- GALILEO VISIONARY DISTRICT - R&D MATERIALS DIVISION: <https://www.galileovisionarydistrict.it/>
- COLABETON: <https://www.colabeton.it/>
- MAGESTE CAVE E CALCESTRUZZI: <https://www.cavemageste.it/>
- STUDIO ROOSEEGARDE: <https://www.studioroosegaarde.net/project/van-gogh-path>
- DELL'AGENZIA INTERNAZIONALE DELL'ENERGIA (IEA) "ENERGY EFFICIENCY 2022": <https://www.iea.org/>

BIBLIOGRAFIA

- “LA FOTOLUMINESCENZA” (M.F.DE SANTIS)
- FEDERBETON POSITION PAPER (FEDERBETON)
- UNIVERSITA’ DELL’UNIVERSITÀ DI PERUGIA (TESI CHIATTI LAURA)
- COOL, PHOTOLUMINESCENT PAINTS TOWARDS ENERGY CONSUMPTION REDUCTIONS IN THE BUILT ENVIRONMENT” (FEDERICA ROSSO ET AL 2019 J. PHYS.: CONF. SER. 1343 012198)
- PHOSPHORESCENT-BASED PAVEMENTS FOR COUNTERACTING URBAN OVERHEATING - A PROOF OF CONCEPT” (IOANNIS KOUSIS, CLAUDIA FABIANI, LAURA GOBBI, ANNA LAURA PISELLO)
- TACTICAL URBANISM SHORT-TERM ACTION FOR LONG-TERM CHANGE, (MIKE LYDON, ANTONY GARCIA ISLAND PRESS, 2015)

RINGRAZIAMENTI

*Grazie al mio relatore Colombo Paolo,
per i suoi indispensabili consigli e per le conoscenze trasmesse
durante tutto il processo di stesura dell'elaborato*

*Grazie mamma Cristina, papà Giampaolo e sorella Sofia,
per il sostegno ricevuto e per avermi permesso di arrivare fin qui*

*Grazie Lorenzo,
per avermi trasmesso la tua immensa forza
ed essermi stato sempre accanto*

*Grazie Giulia, Mery, Francesca ed Elena,
per tutti gli sfoghi e i momenti di spensieratezza trascorsi assieme*

*Grazie Chiara, Ludovica, Edoardo e tutti i più vicini compagni di corso,
con i quali ho condiviso questo percorso
e mi hanno incoraggiata
sin dall'inizio.*

