

L'innovazione per la progettazione sostenibile

a cura di
Renata Morbiducci



L'innovazione per la progettazione sostenibile

a cura di
Renata Morbiducci

con i contributi di
Clara Vite,
Salvatore Polverino,
Vittoria Bonini



è il marchio editoriale dell'Università di Genova



Per la realizzazione del capitolo 3, Salvatore Polverino ringrazia il Programma operativo nazionale (PON) «Ricerca e Innovazione 2014-2020» Azione IV.6 «Contratti di ricerca su tematiche Green» in quanto RTD-A (DM1062/2021, CUP D31B21008360007 – progetto «Sistemi costruttivi a base di materiali bidimensionali per un comportamento efficiente e resiliente delle costruzioni» SC 08/C1, SSD ICAR/10) presso il Dipartimento Architettura e Design dell'Università di Genova.

© 2023 GUP

I contenuti del presente volume sono pubblicati con la licenza
Creative commons 4.0 International Attribution-NonCommercial-ShareAlike.



Alcuni diritti sono riservati

e-ISBN (pdf) 978-88-3618-232-9

Pubblicato ad agosto 2023

Realizzazione Editoriale

GENOVA UNIVERSITY PRESS

Via Balbi, 6 – 16126 Genova

Tel. 010 20951558 – Fax 010 20951552

e-mail: gup@unige.it

<https://gup.unige.it>

INDICE

Parte I Innovazione e sostenibilità

- | | |
|---|----|
| 1. Introduzione | 9 |
| <i>Renata Morbiducci</i> | |
| 2. Strumenti e normative per la valutazione delle sostenibilità | 19 |
| <i>Clara Vite</i> | |
| 3. Materiali innovativi per il progetto sostenibile | 40 |
| <i>Salvatore Polverino</i> | |
| 4. Sul disegno tecnico: progetto e costruzione | 66 |
| <i>Vittoria Bonini</i> | |

Parte II Esempi di applicazioni nella didattica

- | | |
|--|-----|
| 1. Introduzione | 84 |
| <i>Renata Morbiducci</i> | |
| 2. Edificio di nuova costruzione | 89 |
| <i>Salvatore Polverino, Vittoria Bonini, Clara Vite,
Renata Morbiducci</i> | |
| 3. Edificio esistente | 116 |
| <i>Clara Vite, Renata Morbiducci</i> | |
| 4. Intervento sul costruito. Un complesso residenziale | 145 |
| <i>Clara Vite, Renata Morbiducci</i> | |
| 5. Intervento sul costruito. Un quartiere storico: la Maddalena | 179 |
| <i>Vittoria Bonini, Salvatore Polverino, Renata Morbiducci</i> | |

PARTE I
INNOVAZIONE E SOSTENIBILITÀ

3. Materiali innovativi per il progetto sostenibile

Salvatore Polverino

3.1 L'innovazione in sistemi costruttivi a base di materiali tecnologicamente avanzati

Negli ultimi decenni la ricerca di soluzioni tecnologiche che consentano il raggiungimento di inediti livelli di prestazioni nelle infrastrutture e nelle costruzioni è stata fortemente influenzata da molteplici fattori, primi fra tutti i requisiti ambientali. Il settore delle costruzioni, a causa della diffusa bassa efficienza energetica dell'esistente, è responsabile di oltre il 30% del consumo energetico mondiale e di un terzo delle emissioni globali totali dirette e indirette di CO₂ e di particolato¹. L'applicazione di strategie per il miglioramento delle prestazioni energetiche e la conseguente riduzione delle relative emissioni di carbonio può comportare l'ottenimento di ingenti benefici per gli attori e gli *stakeholders* del settore, come, ad esempio, maggiore comfort ambientale, costi di gestione inferiori e valori immobiliari più elevati².

¹ IEA, «Statistics Report: CO2 Emissions from Fuel Combustion», Paris, 2020. <https://www.iea.org/>

² M. Casini, *Smart Buildings Advanced Materials and Nanotechnology to Improve*, Sawston, Woodhead Publishing, 2016, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2015-0-00182-4>.

A fronte delle suddette considerazioni, nel processo di progressiva decarbonizzazione dell'economia europea per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050, il settore delle costruzioni gioca un ruolo significativo³, potendo contribuire a una riduzione di circa 6,5 miliardi di tonnellate di emissioni di CO₂ entro il 2040⁴.

Gli strumenti applicabili per il raggiungimento del suddetto obiettivo e per l'attivazione di una nuova fase evolutiva del settore delle costruzioni sono molteplici. Tra questi, si possono identificare diversi aspetti emergenti, come una maggiore industrializzazione dei processi edilizi, la digitalizzazione delle costruzioni e l'utilizzo di materiali innovativi⁵.

Nelle costruzioni, questi ultimi, possono operare su diversi livelli di scala per ridurre il loro impatto ambientale e migliorarne le prestazioni fisiche e meccaniche⁶; essi possono, infatti, essere impiegati dalla macroscale, come sistemi di componenti di elementi costruttivi ad alte prestazioni (in grado di garantire prestazioni dinamiche sempre efficienti al variare delle condizioni ambientali)⁷, fino alla nanoscale, come 'aggiunte' in materiali 'tradizionali' (compositi cementizi, metalli, ecc.).

³ European Commission, *A Clean Planet for All. A European Long-Term Strategic Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*, in «Com(2018)», 773, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773>

⁴ IEA, «World Energy Outlook 2019», Paris, 2019. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>

⁵ M.J. Ribeirinho *et al.*, *The next Normal in Construction*, 2020. <https://www.mckinsey.de/en/capabilities/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-material-distribution>

⁶ J. Lehne, F. Preston, *Making Concrete Change; Innovation in Low-Carbon Cement and Concrete*, 2018. www.chathamhouse.org

⁷ A. Ritter, *Energy-Exchanging Smart Materials*, in *Smart Materials In Architecture, Interior Architecture and Design*, Basel, Birkhäuser Basel, 2007, pp. 164-72, https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8227-8_8.

Il suddetto risultato è conseguibile grazie al ‘*design* della materia’ attraverso l’impiego di nanotecnologie, per mezzo delle quali è possibile ottenere dei materiali da costruzione tecnologicamente avanzati (*advanced construction materials*)⁸; in tale categoria rientrano quei prodotti specificamente progettati per possedere inedite caratteristiche (strutturali, funzionali, ambientali) superiori rispetto ai materiali tradizionalmente utilizzati per svolgere le stesse funzioni⁹. Inoltre, a seconda del diverso meccanismo di reazione del materiale tecnologicamente avanzato rispetto al variare delle condizioni ambientali, è possibile distinguere un comportamento prestazionale di tipo statico o dinamico.

Nel primo caso si ha un tipo di *performance* ‘tradizionale’ dei materiali da costruzione: la prestazione offerta risente relativamente del mutare delle condizioni ambientali che, inevitabilmente, ne influenza in parte le caratteristiche.

Nel secondo caso è presente un meccanismo di reazione allo stimolo esterno, espletata dal materiale tecnologicamente avanzato, chiaramente distinguibile e consistente in un mutamento delle proprie peculiarità (ottiche, meccaniche, ecc.) o nella produzione di energia. In questo secondo caso si può parlare, nell’ambito del settore delle costruzioni, di materiale intelligente (*smart material*). Tale categoria rappresenta una delle più recenti frontiere nell’evoluzione del settore, costituendo una rottura con il concetto classico di materiale da costruzione.

⁸ M.F. Leone, *Cemento nanotech : nanotecnologie per l’innovazione del costruire*, Tecnologia e progetto, Napoli, CLEAN, 2012.

⁹ F. Pacheco-Torgal, *1 - Introduction to Nanotechnology in Eco-Efficient Construction*, in *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction*, Seconda Edizione, a cura di F. Pacheco-Torgal *et al.*, Series in Civil and Structural Engineering, Sawston, Woodhead Publishing, 2019, 1-9, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00001-3>.

3.2 Materiali innovativi a comportamento dinamico

Come anticipato nel precedente paragrafo, oggi giorno uno dei campi del settore dei materiali per le costruzioni che ha destato maggiore interesse negli ultimi anni è rappresentato da quelle componenti definite *smart* o intelligenti. Queste, come visto in precedenza, reagiscono a uno stimolo esterno e sono in grado di garantire un comportamento dinamico e di adattare le loro caratteristiche alle nuove condizioni ambientali¹⁰. Tale inedito comportamento è dovuto a un meccanismo di reazione innescato da un cambiamento del campo energetico nel materiale, dovuto ad agenti esterni quali, ad esempio, il passaggio di corrente elettrica, la variazione del campo magnetico o il trasferimento di calore. In tal modo, lo stimolo esterno può attivare un'alterazione della struttura del materiale a livello molecolare (come la configurazione elettronica degli elettroni), innescando una differenza di potenziale, una reazione chimica, una variazione nelle proprietà meccaniche, una trasformazione di fase, ecc. In seguito, si ha poi la manifestazione degli effetti dei suddetti meccanismi indotti a livello macroscopico, come un cambiamento di colore, di proprietà ottiche, di deformazione, ecc.¹¹.

Tra le numerose peculiarità, i materiali intelligenti, per essere definiti tali, sono caratterizzati dalle seguenti principali caratteristiche¹²:

- immediatezza: la risposta agli stimoli avviene in tempo reale e la reazione è contestuale all'evento che la scatena;
- transitorietà: reagiscono a più condizioni ambientali;
- auto-attuazione: la capacità di reagire è insita nel materiale e non hanno bisogno di elementi esterni per innescarla;
- selettività: la reazione è distinguibile e prevedibile.

¹⁰ M. Addington, D. Schodek, *Smart Materials and New Technologies - for Architecture and Design Professions*, New York, Routledge, 2004.

¹¹ M. Casini, *op. cit.*

¹² M. Addington, D. Schodek, *op. cit.*

Un'ulteriore caratteristica dei materiali intelligenti è che i meccanismi di risposta sono generalmente reversibili e bidirezionali. A tal riguardo, un interessante esempio è rappresentato dai materiali piezoelettrici; quest'ultimi sono caratterizzati dal produrre una corrente elettrica quando soggetti a deformazione. Allo stesso modo, se viene applicata una differenza di potenziale, si verifica una deformazione nel materiale¹³.

Un'ulteriore peculiarità, derivante dall'impiego dei materiali intelligenti, consiste nella dimensione contenuta delle loro applicazioni rispetto ad analoghi sistemi costruttivi che prevedono l'impiego di elementi tradizionali; infatti, le suddette soluzioni innovative non necessitano di ingombranti elementi esterni per attivare i meccanismi di reazione, poiché il processo avviene nell'elemento a livello molecolare; un interessante esempio di quanto sopra esposto è rappresentato dai sistemi di schermatura solare basati su materiali a memoria di forma (*shape memory materials, SMM*), i quali non necessitano di motori esterni per il movimento degli elementi oscuranti¹⁴.

In base al meccanismo di reazione allo stimolo esterno, i materiali intelligenti sono generalmente classificati in due grandi gruppi: nel primo ricadono quei particolari elementi la cui reazione consiste nella mutazione di specifiche proprietà; nel secondo insieme, rientrano i materiali che sono in grado di assorbire uno 'stimolo energetico' e di restituirlo all'ambiente nella stessa forma o in un'altra. A tal riguardo nei prossimi paragrafi saranno affrontate maggiormente nel dettaglio le suddette categorie.

3.3. Materiali a proprietà mutevoli

Gli elementi che reagiscono agli stimoli esterni tramite meccanismi che ne mutano le caratteristiche intrinseche (forma, trasparenza, fase, ecc.)

¹³ A. Ritter, *op. cit.*

¹⁴ M. Addington, D. Schodek, *op. cit.*

prendono il nome di materiali a proprietà mutevoli¹⁵. Questi sono caratterizzati da processi di reazione reversibili e, di conseguenza, si ha un ritorno delle proprietà allo stato iniziale quando lo stimolo esterno o i suoi effetti terminano. Tali cambiamenti possono riguardare caratteristiche meccaniche, magnetiche, termiche, ottiche, e in base alle principali peculiarità del processo i materiali possono essere classificati nelle seguenti principali famiglie:

- a memoria di forma (*shape memory materials, SMM*): leghe a memoria di forma, polimeri a memoria di forma, legno a cambiamento di forma;
- cromogenici (*chromogenic materials*): termocromici, fotocromici, meccancromici, elettrocromici;
- a cambiamento di fase (*phase-change materials, PCM*);
- a proprietà reologiche variabili: elettroreologici, magnetoreologici.

I materiali a proprietà mutevoli possono essere applicati principalmente nelle seguenti tipologie di elementi costruttivi¹⁶:

- schermature solari intelligenti: sistemi dinamici e autoregolanti che non prevedono l'impiego di elementi meccanici per il loro movimento;
- serramenti intelligenti: elementi dell'involucro trasparente basati sull'impiego di vetri a controllo dinamico della radiazione solare (materiali cromogenici);
- elementi ad alto calore latente: componenti dinamiche caratterizzate da elevata inerzia termica per un efficientamento energetico delle costruzioni e per il miglioramento del benessere ambientale esterno o interno degli utenti.

Oltre alle principali tipologie di materiali precedentemente menzionate, alcuni autori considerano anche i materiali fotocatalitici come com-

¹⁵ M. Addington, D. Schodek, *op. cit.*

¹⁶ M. Casini, *op. cit.*

ponenti a proprietà mutevoli. In tali elementi lo stimolo esterno è rappresentato dalla radiazione UV che innesca un meccanismo di risposta basato su reazioni chimiche (fotocatalisi)¹⁷. Questi materiali sono generalmente utilizzati in rivestimenti o compositi cementizi con proprietà autopulenti e capaci di degradare le sostanze nocive presenti nell'aria¹⁸.

Di seguito, sono elencate le principali tipologie di materiali a proprietà mutevoli utilizzate in architettura e in edilizia.

3.3.1. Leghe a memoria di forma

Le leghe a memoria di forma (*shape memory alloys*, SMA) sono materiali metallici caratterizzati dalla capacità di poter ritornare, in seguito alla presenza di uno stimolo esterno, a una forma memorizzata¹⁹. Il processo è innescato da sollecitazioni esterne, ad esempio un aumento della temperatura o uno stress meccanico, che innescano una modificazione all'interno della struttura del metallo; quest'ultimo è generalmente caratterizzato da due differenti conformazioni: austenite e martensite. Nel primo stadio avviene la memorizzazione della forma del materiale, che presenta una temperatura maggiore di quella ambientale di impiego e un comportamento meccanico a bassa deformazione simile ad altri metalli comunemente impiegati (per esempio l'acciaio)²⁰. Al contrario, quando la temperatura è prossima a quella di impiego si ha il secondo stato (martensite): il comportamento della lega metallica cambia, diventando

¹⁷ M. Le Pivert *et al.*, *Direct Growth of ZnO Nanowires on Civil Engineering Materials: Smart Materials for Supported Photodegradation*, in «Microsystems and Nanoengineering», 5, 1, 2019, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0102-1>.

¹⁸ L'applicazione di tali elementi nel campo dei compositi cementizi è esposta nel paragrafo 3.5.

¹⁹ M. Casini, *op. cit.*

²⁰ G. Song, N. Ma, H.N. Li, *Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures*, in «Engineering Structures», 28, 9, 2006, pp. 1266-74, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.12.010>.

estremamente flessibile, grazie a una struttura molecolare di tipo romboidale²¹. Successivamente, quando la temperatura aumenta, a causa del calore dell'ambiente circostante o al passaggio di una corrente elettrica, c'è un ritorno allo stato inizialmente memorizzato²². Come suggerito già dal nome, a tale categoria appartengono materiali metallici, generalmente a base di nichel-titanio, rame o ferro. Grazie alle loro proprietà le leghe a memoria di forma sono spesso utilizzate come attuatori controllati elettronicamente in sistemi costruttivi complessi. Infine, vi sono alcuni materiali che impiegano un meccanismo di funzionamento alternativo a quello precedentemente descritto, basato sul fenomeno della superelasticità, dove la transizione dall'austenite alla martensite avviene per mezzo dell'applicazione di uno stress meccanico²³.

3.3.2. Polimeri a memoria di forma

I polimeri a memoria di forma (*shape memory polymers, SMP*) sono materiali capaci di modificare il proprio aspetto, ritornando a una forma inizialmente memorizzata²⁴. Lo stimolo esterno può essere di diversa natura: passaggio di corrente elettrica, assorbimento di calore o di umidità. I primi due casi sono equivalenti poiché la corrente elettrica è impiegata, sfruttando l'effetto Joule, per produrre il calore necessario affinché venga innescata la deformazione del materiale. Gli *SMP* attiva-

²¹ M. Addington, D. Schodek, *op. cit.*

²² S. Vollach, D. Shilo, *The Mechanical Response of Shape Memory Alloys under a Rapid Heating Pulse*, in «Experimental Mechanics», 50, 6, 2010, pp. 803-11, <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9320-z>.

²³ B. Mas *et al.*, *Superelastic Shape Memory Alloy Cables for Reinforced Concrete Applications*, in «Construction and Building Materials», 148, 2017, pp. 307-20, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.041>.

²⁴ S. Beites, *Morphological Behavior of Shape Memory Polymers toward a Deployable, Adaptive Architecture*, in *ACADIA 2013: Adaptive Architecture - Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, Cambridge, Riverside Architectural Press, 2013, pp. 121-28.

ti dall'aumento di temperatura sono quelli più comunemente impiegati nell'edilizia (per esempio, in componenti per la schermatura solare)²⁵; il loro comportamento è discretizzabile in due principali stadi: in una prima fase il materiale possiede una forma generica; successivamente, con l'aumento della temperatura, questi ritorna nella conformazione inizialmente memorizzata²⁶.

I principali svantaggi applicativi dei *SMP* rispetto alle leghe a memoria di forma (*SMA*) sono la minore resistenza legata al numero inferiore di cicli di fatica sopportabili (cioè 200 per i *SMP* contro 200.000 per le *SMA*) e la limitata durabilità nei confronti degli agenti atmosferici²⁷. Al contrario il principale vantaggio applicativo derivante dal loro utilizzo è il minor costo del sistema rispetto all'impiego di componenti a base di *SMA*.

3.3.3. Legno a cambiamento di forma

Il legno a cambiamento di forma è un materiale in cui la variazione del livello di umidità ambientale costituisce lo stimolo esterno che innesca una deformazione dell'elemento²⁸. In particolare, il materiale, ispirato a principi biomimetici (imita il meccanismo delle lamelle esterne delle pigne), sfrutta la capacità delle fibre di uno 'strato sensibile', di un sistema composito multistrato, di curvarsi in funzione del contenuto di umidità

²⁵ J. Yoon, *SMP Prototype Design and Fabrication for Thermo-Responsive Façade Elements*, in «Journal of Facade Design and Engineering», 7, 1, 2019, pp. 41-61, <https://doi.org/10.7480/jfde.2019.1.2662>.

²⁶ M. Behl, A. Lendlein, *Shape-Memory Polymers*, in «Materials Today», 10, 4, 2007, pp. 20-28, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70047-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70047-0).

²⁷ F. Fiorito *et al.*, *Shape Morphing Solar Shadings: A Review*, in «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 55, 2016, pp. 863-84, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086>.

²⁸ D. Wood *et al.*, *Material Computation-4D Timber Construction: Towards Building-Scale Hygroscopic Actuated, Self-Constructing Timber Surfaces*, in «International Journal of Architectural Computing», 14, 1, 2016, pp. 49-62, <https://doi.org/10.1177/1478077115625522>.

ambientale assorbita²⁹. L'elemento composito è costituito da due o più fogli di legno di diverse essenze incollati con le fibre perpendicolari tra loro e parallele ai bordi del pannello. I materiali utilizzati sono caratterizzati da una diversa sensibilità alla variazione dell'umidità ambientale; lo strato più sensibile alla variazione di umidità (per esempio il legno di faggio e di acero) è definito come l'elemento conduttore. Al contrario, l'altro strato (per esempio il legno di abete rosso) costituisce la parte resistiva³⁰. I sistemi possono raggiungere diversi gradi di curvatura a seconda della loro stratificazione: con un singolo strato di curvatura ci sarà una curvatura gaussiana zero e un sistema monoclastico; quando si passa a un sistema *bilayer* si può ottenere un elemento con curvatura gaussiana negativa (cioè anticlastico); infine, costituendo un sistema di diversi elementi sensibili su un elemento di supporto rinforzato (per esempio, un substrato rinforzato con fibra di vetro) si può ottenere una curvatura gaussiana positiva (sinclastica)³¹.

3.3.4. Materiali a cambiamento di fase

I materiali a cambiamento di fase (*phase-change materials, PCM*) sono elementi in grado di assorbire o rilasciare grandi quantità di calore in funzione della variazione della temperatura ambientale³². In particolare, il materiale è caratterizzato dal passaggio da uno stato solido a uno liquido o gasso-

²⁹ D. Wood *et al.*, *Hygroscopically Actuated Wood Elements for Weather Responsive and Self-Forming Building Parts – Facilitating Upscaling and Complex Shape Changes*, in «Construction and Building Materials», 165, 2018, pp. 782-91, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.134>.

³⁰ D. Wood *et al.*, *From Machine Control to Material Programming - Self-Shaping Wood Manufacturing of a High Performance Curved Clt Structure – Urbach Tower*, in *Fabricate 2020 Making Resilient*, a cura di M. Skavara *et al.*, London, UCLpress, 2020, pp. 50-57.

³¹ D. Wood *et al.*, *op. cit.*, 2018.

³² Y. Cui *et al.*, *A Review on Phase Change Material Application in Building*, in «Advances in Mechanical Engineering», 9, 6, 2017, pp. 1-15, <https://doi.org/10.1177/1687814017700828>.

so quando si ha un incremento della temperatura del sistema, assorbendo calore dall'ambiente circostante. Al contrario, quando la temperatura diminuisce, il materiale ritorna al suo stato iniziale (per esempio solido) rilasciando calore all'ambiente³³. I *PCM* sono generalmente a base organica (ad esempio paraffina, acidi grassi, ecc.)³⁴, inorganica (sali idrati), o una miscela eutettica di questi³⁵. Inoltre, i *PCM* sono solitamente impiegati in un sistema composito con un altro materiale (polimeri, composti cementizi, gesso, ecc.) attraverso l'inserimento tramite macroincapsulamento, microincapsulamento o iniezione diretta nella matrice con cui sono combinati (come nel caso della struttura di un polimero o nei vuoti interstiziali dei compositi cementizi)³⁶. Infine, si possono ottenere diverse morfologie di microincapsulamento dei *PCM*: mononucleare, polinucleare, inserimento nella matrice e a più pareti o multifold³⁷.

³³ H. Yin et al., *Experimental Research on Heat Transfer Mechanism of Heat Sink with Composite Phase Change Materials*, in «Energy Conversion and Management», 49, 6, 2008, pp. 1740-46, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.10.022>.

³⁴ R. Wen et al., *Preparation and Thermal Properties of Fatty Acid/Diatomite Form-Stable Composite Phase Change Material for Thermal Energy Storage*, in «Solar Energy Materials and Solar Cells», Febbraio, 178, 2018, pp. 273-79, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.01.032>.

³⁵ S. Kahwaji et al., *Stable, Low-Cost Phase Change Material for Building Applications: The Eutectic Mixture of Decanoic Acid and Tetradecanoic Acid*, in «Applied Energy», 168, 2016, pp. 457-64, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.115>.

³⁶ B.P. Jelle, S.E. Kalnæs, *Chapter 3 - Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings*, in *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting Materials, Technologies, Optimization and Case Studies*, a cura di F. Pacheco-Torgal et al., Sawston, Woodhead Publishing, 2017, pp. 57-118, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4>.

³⁷ M. Jurkowska, I. Szczygieł, *Review on Properties of Microencapsulated Phase Change Materials Slurries (MPCMS)*, in «Applied Thermal Engineering», 98, 2016, pp. 365-73, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.051>.

3.3.5. Materiali Cromogenici

I materiali cromogenici sono *smart materials* in cui lo stimolo esterno causa un cambiamento delle proprietà ottiche³⁸; queste variazioni sono reversibili: quando l'agente esterno non è più presente, le proprietà ottiche ritornano al loro stato originale³⁹. Ricadono in questa categoria i cosiddetti sistemi fotocromatici in cui la radiazione ultravioletta innesca il cambiamento delle proprietà ottiche; infatti, questa, una volta assorbita dagli elementi del sistema, crea uno stato di eccitazione nel materiale che passa dall'essere riflettente all'essere assorbente nei confronti della luce incidente⁴⁰. Inoltre, fanno parte di tale categoria i sistemi termocromici, dove l'aumento di temperatura costituisce lo stimolo esterno che causa reazioni chimiche o cambiamenti di fase all'interno del materiale⁴¹. Altro esempio è rappresentato dai sistemi elettrocromici dove il passaggio di una corrente elettrica rappresenta lo stimolo esterno⁴². In tale tipologia si hanno reazioni di ossido-riduzione che favoriscono il passaggio di energia da uno stato di accumulo a uno stato conduttivo, per poi confluire in quello propriamente elettrocromico.

³⁸ C.M. Lampert, *Chromogenic Smart Materials*, in «Materials Today», Marzo 2004, pp. 28-35.

³⁹ R.S. Zakirullin, *Chromogenic Materials in Smart Windows for Angular-Selective Filtering of Solar Radiation*, in «Materials Today Energy», 17, 2020, 100476, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100476>.

⁴⁰ M. Casini, *Active Dynamic Windows for Buildings: A Review*, in «Renewable Energy», 119, 2018, pp. 923-34, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>.

⁴¹ C. Fabiani, V. L. Castaldo, A.L. Pisello, *Thermochromic Materials for Indoor Thermal Comfort Improvement: Finite Difference Modeling and Validation in a Real Case-Study Building*, in «Applied Energy», 262, Novembre 2019 (2020), 114147, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114147>.

⁴² M. Pittaluga, *17 - Electrochromic Glazing and Walls for Reducing Building Cooling Needs*, a cura di F Pacheco-Torgal *et al.*, Oxford, Woodhead Publishing, 2015, pp. 473-97, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00017-0>.

Tale processo si traduce macroscopicamente nella trasformazione del vetro dall'essere opaco a trasparente⁴³.

Infine, queste caratteristiche possono essere unite, come nel caso dei materiali termoelettrocromici, che cambiano la proprietà grazie all'effetto combinato dell'aumento della temperatura e dell'incidenza della radiazione solare⁴⁴.

3.4. Materiali a scambio energetico

I materiali a scambio energetico reagiscono agli stimoli esterni assorbendo energia da una fonte esterna e la restituiscono all'ambiente nella stessa forma o in un'altra. Questo meccanismo di reazione è possibile grazie alle dinamiche che avvengono a livello atomico: lo stimolo esterno (per esempio il passaggio di corrente elettrica, l'impatto di un fotone, l'aumento di temperatura, ecc.) provoca uno stato di eccitazione degli atomi costituenti la struttura del materiale, aumentando il livello energetico degli elettroni. Successivamente, a causa della loro instabilità, le suddette particelle tendono a tornare alla loro condizione stabile iniziale, rilasciando così l'energia assorbita nella forma originaria o trasformandola in un'altra di diversa natura⁴⁵.

I materiali a scambio energetico possono essere impiegati principalmente come componenti alla base di sistemi compositi, costituiti da più elementi distinguibili, come nel caso di un modulo fotovoltaico; alternativamente possono essere utilizzati in conformazioni in cui l'u-

⁴³ T.D. Nguyen *et al.*, *Electrochromic Smart Glass Coating on Functional Nano-Frameworks for Effective Building Energy Conservation*, in «Materials Today Energy», 18, 2020, 100496, <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100496>.

⁴⁴ P. Di Sia, *Nanotechnologies and Advanced Smart Materials*, in *The ELSI Handbook of Nanotechnology*, Wiley Online Books, Marzo 4, 2020, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119592990.ch4>.

⁴⁵ A. Ritter, *op. cit.*

nione irreversibile dei singoli costituenti genera l'elemento *smart*: è il caso di un rivestimento autoriscaldante.

I materiali che rientrano in questa categoria comprendono elementi⁴⁶:

- autoriscaldanti;
- luminescenti (fotoluminescenti, elettroluminescenti, chimicoluminescenti, termoluminescenti);
- piezoelettrici e piroelettrici;
- elettrostrittivi e magnetostrittivi;
- fotovoltaici.

Questi ultimi elementi sono materiali capaci di trasformare la radiazione solare incidente in elettricità, rappresentando così uno dei principali strumenti per la produzione di energia da fonti rinnovabili⁴⁷. In tale settore la tendenza attuale nella ricerca è quella di trovare soluzioni a basso costo e il meno possibile inquinanti; un esempio di tale filone di ricerca è rappresentato dallo sviluppo di soluzioni fotovoltaiche basate sull'impiego di moduli di ultima generazione a base di perovskite come possibile alternativa a sistemi tradizionali a base di silicio⁴⁸.

Nelle pagine seguenti vengono discussi in modo più dettagliato i materiali a scambio energetico maggiormente impiegati in edilizia e in architettura, come gli autoriscaldanti, i luminescenti e i piezoelettrici.

⁴⁶ M. Casini, *op. cit.*, 2016.

⁴⁷ D. Vatansever, E. Stiores, T. Shah, *Alternative Resources for Renewable Energy: Piezoelectric and Photovoltaic Smart Structures*, in *Global Warming*, a cura di B. Raj Singh, Rijeka, IntechOpen, 2012, <https://doi.org/10.5772/50570>.

⁴⁸ M. Batmunkh, Y. Lin Zhong, H. Zhao, *Recent Advances in Perovskite-Based Building-Integrated Photovoltaics*, in «Advanced Materials», 32, 31, 2020, 2000631, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202000631>.

3.4.1. Materiali Elettrotermici

I materiali autoriscaldanti o elettrotermici (*self-heating materials*) sono elementi intelligenti il cui impiego consente di utilizzare il passaggio di una corrente elettrica per la produzione di calore⁴⁹. Questi materiali sfruttano l'effetto Joule, fenomeno regolato dall'omonima legge, in cui è esplicitata la relazione che lega l'intensità della corrente, la resistenza elettrica e il calore prodotto. I sistemi elettrotermici tradizionali sono a base di metalli altamente conduttivi elettricamente che formano resistenze lineari attraversate dalla corrente⁵⁰. Negli ultimi anni vi sono state le prime interessanti applicazioni di sistemi non metallici basati su rivestimenti elettricamente conduttivi⁵¹; questi elementi sono generalmente composti da tre componenti principali: un legante (cementizio o polimerico), un solvente (organico, inorganico o a base d'acqua) e un'aggiunta conduttiva. Quest'ultimi elementi consentono il flusso di corrente attraverso il materiale e sono principalmente a base di carbonio o metalli⁵². I sistemi a base di materiali elettrotermici, a seconda delle condizioni finali di impiego, possono essere realizzati in

⁴⁹ D.D.L. Chung, *Self-Heating Structural Materials*, in «Smart Materials and Structures», 13, 3, 2004, pp. 562-65, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>.

⁵⁰ S. Kubba, *Chapter Nine - Impact of Energy and Atmosphere*, in *Handbook of Green Building Design and Construction*, Seconda Edizione, a cura di S. Kubba, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 443-571, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810433-0.00009-5>.

⁵¹ Z. Zhao *et al.*, *Development of High-Efficient Synthetic Electric Heating Coating for Anti-Icing/de-Icing*, in «Surface and Coatings Technology», 349, Marzo 2018, pp. 340-46, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.011>.

⁵² C.Y. Tuan, *Electrical Resistance Heating of Conductive Concrete Containing Steel Fibers and Shavings*, in «ACI Materials Journal», 101, 1 (n.d.), <https://doi.org/10.14359/12989>;

O. Redondo *et al.*, *Anti-Icing and de-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets*, in «Composites Science and Technology», 164, 18 Agosto 2018, pp. 65-73, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.031>.

opera, mediante l'applicazione di vernici conduttive direttamente sul substrato da riscaldare, o arrivare in situ su elementi prefabbricati, che vengono montati su appositi elementi di supporto (pannelli in cartongesso, rotoli in materiale plastico, ecc.).

3.4.2. Materiali Piezoelettrici

I materiali piezoelettrici sono elementi a scambio energetico in cui una sollecitazione meccanica esterna genera una deformazione del componente, in grado di attivare una differenza di potenziale elettrico⁵³. In molti elementi piezoelettrici è valido anche il contrario: in seguito all'applicazione di una differenza di tensione, si verifica una deformazione della materia⁵⁴. Il comportamento sopra descritto si applica ai materiali polarizzati come il quarzo o le ceramiche innovative (ad esempio il titanato-zirconato di piombo o il titanato di bario)⁵⁵. Questi sono costituiti da dipoli, che, quando non soggetti a deformazione, sono allineati, formando una carica uniforme sull'intera superficie del materiale. Nel momento in cui è applicata una sollecitazione meccanica, l'uniformità degli elementi viene meno, alterando l'equilibrio delle cariche elettriche e generando, di conseguenza, una differenza di potenziale superficiale⁵⁶.

⁵³ N. Sezer, M. Koç, *A Comprehensive Review on the State-of-the-Art of Piezoelectric Energy Harvesting*, in «Nano Energy», 80, Novembre 2020 (2021), 105567, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>.

⁵⁴ A. Aabid *et al.*, *A Review of Piezoelectric Material-Based Structural Control and Health Monitoring Techniques for Engineering Structures: Challenges and Opportunities*, in «Actuators», 10, 5, 2021, p. 101, <https://doi.org/10.3390/act10050101>.

⁵⁵ J. Chen *et al.*, *Piezoelectric Materials for Sustainable Building Structures: Fundamentals and Applications*, in «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 101, Novembre 2018 (2019), pp. 14-25, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.038>.

⁵⁶ S. Guerin, S.A.M. Tofail, D. Thompson, *Organic Piezoelectric Materials: Milestones and Potential*, in «NPG Asia Materials», 11, 1, 2019, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0110-5>.

A causa del loro meccanismo di reazione, questi elementi sono utilizzati come sensori e attuatori. I materiali comunemente usati per queste applicazioni sono i fluoropolimeri polarizzati (per esempio PVDF), che possiedono anche proprietà piroelettriche, cioè producono una carica elettrica indotta da una variazione di temperatura⁵⁷.

3.4.3. Materiali luminescenti

Gli elementi luminescenti sono materiali intelligenti che assorbono energia da uno stimolo esterno e la emettono sotto forma di luce^{58 59}. L'agente che innesca il meccanismo di reazione può essere di diversa natura: l'impatto della radiazione solare (comportamento fotoluminescente), il passaggio di una corrente elettrica (materiali elettroluminescenti) o una reazione chimica (chimicoluminescenza)⁶⁰. I materiali luminescenti più utilizzati sono solfuri metallici (per esempio ZnS)⁶¹, terre rare ed elementi a base di alluminio (alluminato di stronzio)⁶². Le impurità presenti nel materiale giocano un

⁵⁷ Y. Xin *et al.*, *The Use of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Films as Sensors for Vibration Measurement: A Brief Review*, in «Ferroelectrics», 502, 1, 25 Settembre 2016, pp. 28-42, <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1232582>.

⁵⁸ Energia nello spettro visibile, dovuta alla transizione di elettroni da uno stato superiore a uno inferiore.

⁵⁹ Y. Xin *et al.*, *op. cit.*

⁶⁰ G. Blasse, B.C. Grabmaier, *A General Introduction to Luminescent Materials*, in *Luminescent Materials*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1994, pp. 1-9, https://doi.org/10.1007/978-3-642-79017-1_1.

⁶¹ P. Moraitis, R.E.I. Schropp, W.G.J.H.M. van Sark, *Nanoparticles for Luminescent Solar Concentrators - A Review*, in «Optical Materials», 84, Luglio 2018, pp. 636-45, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.07.034>.

⁶² A. Escudero *et al.*, *Luminescent Rare-Earth-Based Nanoparticles: A Summarized Overview of Their Synthesis, Functionalization, and Applications*, in «Topics in Current Chemistry», 374, 4, 2016, <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0049-8>.

ruolo chiave nel meccanismo di reazione. Questi elementi, infatti, producono ‘trappole’ che bloccano l’elettrone dal rilasciare energia sotto forma di luce, regolando il processo⁶³. Per governare il meccanismo di reazione, la miscela di base può essere progettata scegliendo appositi materiali fosforici definendo così le impurità presenti e modulando il corrispondente rilascio di energia⁶⁴. Tra gli elementi appartenenti alla presente categoria di materiali a scambio energetico, le componenti elettroluminescenti, in particolare, hanno una notevole versatilità di applicazione grazie all’elevata compatibilità con substrati di diversa natura. Infine, i suddetti sistemi hanno una buona durabilità grazie al completamento della loro applicazione con la ricopratura mediante uno strato protettivo trasparente, atto a garantirne, nel contempo, l’emissione di luce⁶⁵.

3.5. Conglomerati intelligenti

Il processo di innovazione che ha portato allo sviluppo e sperimentazione di materiali intelligenti ha coinvolto anche il settore dei compositi cementizi. Dalla fine del XX secolo, questo settore è stato caratterizzato da un rapido processo di evoluzione tecnologica che ha portato alla creazione di prodotti in grado di raggiungere livelli prestazionali sempre più elevati in funzione delle diverse esigenze costruttive⁶⁶. Al

⁶³ M. Addington, D. Schodek, *op. cit.*

⁶⁴ Y.K. Frodason *et al.*, *Self-Trapped Hole and Impurity-Related Broad Luminescence in β -Ga₂O₃*, in «Journal of Applied Physics», 127, 7, 2020, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1063/1.5140742>.

⁶⁵ L. Akcelrud, *Electroluminescent Polymers*, in «Progress in Polymer Science (Oxford)», 28, 6, 2003, pp. 875-962, [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00140-5).

⁶⁶ M. Tang, *High Performance Concrete-Past, Present and Future*, in *Proceedings of the International Symposium on UHPC*, Kassel, 2004, pp. 3-9.

giorno d'oggi, l'alto livello di prestazioni è raggiunto anche grazie al possesso di 'proprietà dinamiche', ovvero alla capacità di reagire ai cambiamenti delle condizioni ambientali adattando le proprie caratteristiche intrinseche⁶⁷.

I compositi cementizi che presentano le suddette caratteristiche prendono il nome di 'conglomerati intelligenti' (*smart concrete*)⁶⁸. Questi materiali devono il loro peculiare comportamento all'aggiunta di particolari elementi denominati *filler* funzionalizzanti. Questi ultimi possono essere di diversa natura (generalmente, a base di carbonio o di metallo) e migliorano sia le proprietà fisiche del materiale (ad esempio la conducibilità elettrica e termica), sia il meccanismo di reazione agli stimoli esterni, amplificando le capacità reattive già presenti nel composito cementizio; a tal riguardo, un esempio emblematico è rappresentato dalla proprietà di piezoresistività, caratteristica insita nel composito, che l'aggiunta di *filler* funzionalizzanti rende utilizzabile per applicazioni finalizzate al monitoraggio strutturale⁶⁹. Infine, anche i materiali intelligenti illustrati nei precedenti paragrafi, possono essere impiegati quali *filler* funzionalizzanti in grado di trasformare un composito cementizio tradizionale in uno *smart concrete*; ricadono in quest'ultima casistica, i cosiddetti 'conglomerati autoregolanti' (*self-adjusting concrete*) in cui i materiali a cambiamento di fase vengono inseriti nella ma-

⁶⁷ A. Meoni *et al.*, *An Experimental Study on Static and Dynamic Strain Sensitivity of Embeddable Smart Concrete Sensors Doped with Carbon Nanotubes for SHM of Large Structures*, in «Sensors (Switzerland)», 18, 3, 2018, pp. 1-19, <https://doi.org/10.3390/s18030831>.

⁶⁸ D. Wang, W. Zhang, B. Han, *New Generation of Cement-Based Composites for Civil Engineering*, *New Materials in Civil Engineering* (INC, 2020), <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818961-0.00025-9>.

⁶⁹ D.D.L. Chung, *Piezoresistive Cement-Based Materials for Strain Sensing*, in «Journal of Intelligent Material Systems and Structures», 13, 9, 2002, pp. 599-609, <https://doi.org/10.1106/104538902031861>.

trice cementizia al fine di rendere auto-termoregolabile un composto cementizio tradizionale⁷⁰.

Nei casi precedentemente esposti, si parla di ‘conglomerato intelligente intrinseco’ (*intrinsic smart concrete*), dato che gli agenti funzionalizzanti sono collocati all’interno della matrice cementizia. Al contrario, la funzione *smart* può essere esercitata da elementi posti all’esterno del composto cementizio, ma che cooperano sinergicamente con esso; quest’ultimo è il caso del conglomerato a recupero di energia (*energy-harvesting concrete*), in cui gli elementi piezoelettrici applicati alla superficie esterna sfruttano la deformazione del sistema, per produrre una differenza di potenziale. Nel caso precedentemente esposto si può usare la denominazione di ‘conglomerato intelligente non-intrinseco’ (*non-intrinsic smart concrete*), definizione utilizzata da Tian et al.⁷¹ per indicare una particolare categoria di conglomerati intelligenti autosensibili per il monitoraggio strutturale, caratterizzati da sensori esterni al materiale. La scelta di utilizzare uno smart concrete non intrinseco può derivare da diversi fattori come, ad esempio, la necessità di avere un sistema di conglomerato autosensibile, senza rendere l’intero calcestruzzo elettricamente conduttivo con la conseguente diminuzione delle proprietà meccaniche dovuto ad alti carichi di *nanofiller*⁷².

Le origini degli *smart concrete* possono essere individuate nelle prime sperimentazioni degli anni ’90 del XX secolo con le cosiddette miscele autodiagnostiche (*self-diagnostic concrete*), impiegate per il moni-

⁷⁰ D. Zhang et al., *Development of Thermal Energy Storage Concrete*, in «Cement and Concrete Research», 34, 6, 2004, pp. 927-34, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.022>.

⁷¹ Z. Tian et al., *A State-of-the-Art on Self-Sensing Concrete: Materials, Fabrication and Properties*, in «Composites Part B: Engineering», 177, Maggio 2019, 107437, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107437>.

⁷² Y. Lin, H. Du, *Graphene Reinforced Cement Composites: A Review*, in «Construction and Building Materials», 265, 2020, 120312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312>.

toraggio strutturale, in cui il composito è in grado di ‘percepire’ quando il materiale raggiunge il punto critico di rottura, grazie all’uso di fibre di carbonio e vetro incorporate nella matrice cementizia⁷³. Negli anni successivi, il crescente interesse per il miglioramento delle prestazioni dei materiali da costruzione, finalizzato a una maggiore sicurezza e durabilità delle opere con, nel contempo, un contenimento del consumo di risorse e dell’impatto ambientale, ha favorito la ricerca nel settore, ottenendo così più di venti categorie di conglomerati intelligenti⁷⁴.

Infine, al giorno d’oggi, il termine *smart concrete* è talvolta impiegato anche per definire compositi cementizi caratterizzati dall’applicazione di nanotecnologie in cui non vi è una specifica reazione a stimoli esterni; in quest’ultima casistica rientra il calcestruzzo superidrofobico, le cui proprietà sono dovute a una particolare conformazione superficiale, definita alla nanoscala, e non a una reazione esterna, come la caduta di un liquido sulla superficie⁷⁵.

Nelle pagine seguenti sono presentate le principali tipologie di conglomerati intelligenti, in cui è evidente la reazione a uno stimolo esterno, come avviene nei materiali intelligenti descritti nei paragrafi precedenti.

3.5.1. Calcestruzzo autoriscaldante

Il conglomerato autoriscaldante (*self-heating concrete*) è un composito cementizio che utilizza il passaggio di corrente elettrica per produrre calore⁷⁶.

⁷³ N. Muto *et al.*, *Design of Intelligent Materials with Self-Diagnosing Function for Preventing Fatal Fracture*, in «Smart Material Structures», 1992, pp. 324-29, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/1/4/007>.

⁷⁴ B. Han, L. Zhang, and O. Jinping, *Smart and Multifunctional Concrete Towards Sustainable Infrastructures*, Singapore, Springer, 2017, <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>.

⁷⁵ *Ibidem*.

⁷⁶ H. Lee *et al.*, *Self-Heating and Electrical Performance of Carbon Nanotube-Enhanced Cement Composites*, in «Construction and Building Materials», 250, 2020, 118838, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118838>.

Il conglomerato, come altri materiali autoriscaldanti, sfrutta l'effetto Joule trasformando la corrente elettrica in calore⁷⁷. I calcestruzzi autoriscaldanti sono prodotti aggiungendo riempitivi conduttivi all'interno della matrice cementizia in modo da aumentare la conduttività elettrica, formando un percorso conduttivo all'interno del materiale⁷⁸. I suddetti *filler* impiegati possono avere dimensioni alla scala microscopica, per esempio fibre di acciaio, fibre di carbonio, fogli a base di fibre di carbonio, grafite, ecc.⁷⁹, o in alternativa a quella nanometrica, come nanotubi di carbonio o grafene, ecc.⁸⁰.

3.5.2. Calcestruzzo fotocatalitico

Il calcestruzzo fotocatalitico è un conglomerato intelligente che può essere impiegato per la riduzione dell'inquinamento ambientale⁸¹. In particolare, il composito cementizio, attraverso processi di fotocatalisi, contribuisce alla degradazione di sostanze tossiche (ad esempio NO_x,

⁷⁷ Z. Tang *et al.*, *Self-Heating Graphene Nanocomposite Bricks*, in «Materials», 13, 714, 2020, pp. 1-13.

⁷⁸ D.D.L. Chung, *op. cit.*

⁷⁹ Z. Hou, Z. Li, J. Wang, *Electrical Conductivity of the Carbon Fiber Conductive Concrete*, in «Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.», 22, 2, 2007, pp. 346-49, <https://doi.org/10.1007/s11595-005-2346-x>.

⁸⁰ G. M. Kim *et al.*, *Heating and Heat-Dependent Mechanical Characteristics of CNT-Embedded Cementitious Composites*, in «Composite Structures», 136, 2016, pp. 162-70, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.010>;

I. Rhee *et al.*, *Thermal Performance, Freeze-and-Thaw Resistance, and Bond Strength of Cement Mortar Using Rice Husk-Derived Graphene*, in «Construction and Building Materials», 146, 2017, pp. 350-59, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.109>.

⁸¹ H. Witkowski *et al.*, *Air Purification Performance of Photocatalytic Concrete Paving Blocks after Seven Years of Service*, in «Applied Sciences (Switzerland)», 9, 9, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9091735>.

SO₂, ecc.), rendendole innocue⁸². Inoltre, le superfici fotocatalitiche hanno anche un comportamento autopulente: il meccanismo di fotocatalisi degrada le sostanze inquinanti e macchianti che si depositano sulla superficie del manufatto, che sono successivamente rimosse con lo scorrimento dell'acqua piovana⁸³.

Il conglomerato viene prodotto utilizzando aggiunte fotocatalitiche come composti semiconduttori, ad esempio TiO₂, ZnO, CdS, ecc.⁸⁴. Il sistema fotocatalitico è caratterizzato principalmente da tre configurazioni diverse. La prima consiste nell'impiegare sostanze fotocatalitiche direttamente nel processo di miscelazione del composito cementizio⁸⁵. Il secondo metodo consiste nell'utilizzare una sostanza, definita vettore (*carrier*), per il trasporto delle componenti fotocatalitiche nella miscela (ad esempio, aggregati fini o grossolani impregnati di un rivestimento fotocatalitico)⁸⁶. Infine, un terzo metodo consiste nell'applicare uno strato (*layer*) fotocatalitico sulla

⁸² R.K. Nath, M.F.M. Zain, M. Jamil, *An Environment-Friendly Solution for Indoor Air Purification by Using Renewable Photocatalysts in Concrete: A Review*, in «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 62, 2016, pp. 1184-94, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.018>.

⁸³ S.N. Zailan *et al.*, *Review on Characterization and Mechanical Performance of Self-Cleaning Concrete*, in «MATEC Web of Conferences», 97, 2017, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701022>.

⁸⁴ K. He, Y. Chen, M. Mei, *Study on Influencing Factors of Photocatalytic Performance of CdS/TiO₂ nanocomposite Concrete*, in «Nanotechnology Reviews», 9, 1, 2020, pp. 1160-69, <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0074>.

⁸⁵ L. Yang *et al.*, *Photocatalyst Efficiencies in Concrete Technology: The Effect of Photocatalyst Placement*, in «Applied Catalysis B: Environmental», 222, Ottobre 2017 (2018), pp. 200-208, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.10.013>.

⁸⁶ L. Yang *et al.*, *Enhanced Photocatalytic Efficiency and Long-Term Performance of TiO₂ in Cementitious Materials by Activated Zeolite Fly Ash Bead Carrier*, in «Construction and Building Materials», 126, 2016, pp. 886-93, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.062>.

superficie esterna del manufatto in calcestruzzo o malta⁸⁷. Il conglomerato fotocatalitico, tra gli *smart concrete*, è il composito cementizio più utilizzato, con numerosi esempi applicativi in architettura e in edilizia⁸⁸.

3.5.2. Calcestruzzo autopercettivi

Il conglomerato autopercettivo (*self-sensing concrete*) è un composito capace di rilevare, grazie all'introduzione di sensori o *filler* funzionalizzanti, la comparsa di fenomeni nel materiale come sollecitazioni meccaniche, lesioni, aumento di temperatura, variazioni di umidità o deformazione eccessiva⁸⁹. In misura maggiore rispetto ad altre tipologie di *smart concrete*, i conglomerati autopercettivi spesso presentano sensori o elementi sensibili esterni al composito cementizio, non inglobati nella matrice (conglomerato autopercettivo non intrinseco)⁹⁰: questi possono essere inseriti all'interno del materiale o incollati sulla sua superficie e sono di diversa natura. A tal riguardo, sono documentate in letteratura applicazioni di estensimetri a resistenza elettrica, fibre ottiche, materiali piezoelettrici, polimeri a memoria di forma, ecc.⁹¹. Se

⁸⁷ V.B. Koli, S. Mavengere, J.S. Kim, *An Efficient One-Pot N Doped TiO₂-SiO₂ Synthesis and Its Application for Photocatalytic Concrete*, in «Applied Surface Science», 491, Giugno 2019, pp. 60-66, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.123>.

⁸⁸ H.S. Russell *et al.*, *NO_x Remediation*, in «Catalyst», 11, 675, 2021, pp. 1-45.

⁸⁹ M.T. Mohammadi *et al.*, *Chapter 17 - Nano Self-Sensing Concretes (NSCs)*, in *Micro and Nano Technologies*, a cura di S. Thomas *et al.*, Elsevier, 2021, pp. 373-95, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823358-0.00019-8>.

⁹⁰ Z. Tian *et al.*, *op. cit.*

⁹¹ Y.Y. Lim, S.T. Smith, C.K. Soh, *Wave Propagation Based Monitoring of Concrete Curing Using Piezoelectric Materials: Review and Path Forward*, in «NDT and E International», 99, Giugno 2018, pp. 50-63, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.06.002>.

nel composito cementizio sono inseriti *filler* elettricamente conduttivi, il materiale diventa esso stesso un sensore e in questo caso si ha un conglomerato autopercettivo intrinseco⁹². Gli additivi hanno il compito di aumentare la conducibilità elettrica del composito cementizio e possono essere di natura metallica (fibre di acciaio)⁹³ o a base di carbonio (fibra di carbonio, nanotubi di carbonio, ecc.)⁹⁴. Nel caso di un sistema basato su un conglomerato autopercettivo intrinseco, il materiale può costituire l'elemento strutturale stesso o può essere posizionato nei suoi punti critici⁹⁵.

3.6 Sintesi e considerazioni conclusive

Nel presente capitolo sono state illustrate le principali peculiarità dei materiali intelligenti impiegati nel settore delle costruzioni.

Dapprima sono state elencate le caratteristiche essenziali di uno *smart material* e del meccanismo di reazione agli stimoli provenienti dall'ambiente esterno; in seguito, sono state riportate le principali famiglie di materiali ricadenti in questa categoria analizzandone le ca-

⁹² B. Han, S. Ding, X. Yu, *Intrinsic Self-Sensing Concrete and Structures: A Review*, in «Measurement: Journal of the International Measurement Confederation», 59, 2015, pp. 110-28, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.

⁹³ I.S. Abbood, S.S. Weli, F.L. Hamid, *Cement-Based Materials for Self-Sensing and Structural Damage Advance Warning Alert by Electrical Resistivity*, in «Materials Today: Proceedings», 46, 2021, pp. 615-20, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.381>.

⁹⁴ G. Yıldırım *et al.*, *Self-Sensing Capability of Engineered Cementitious Composites: Effects of Aging and Loading Conditions*, in «Construction and Building Materials», 231, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117132>.

⁹⁵ J. Han *et al.*, *A Review on Carbon-Based Self-Sensing Cementitious Composites*, in «Construction and Building Materials», 265, 2020, 120764, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120764>.

ratteristiche e le attuali tendenze di ricerca. A tal riguardo, sono stati individuati quali classi di elementi intelligenti i materiali a proprietà mutevoli, a scambio energetico e gli *smart concrete*.

Nei precedenti paragrafi si è visto come le principali differenze tra le tipologie individuate risiedano nel diverso meccanismo di reazione agli stimoli esterni: mentre i materiali a proprietà mutevoli cambiano le proprie caratteristiche, quelli a scambio energetico sono in grado di assorbire e trasformare la sollecitazione esterna in una forma di energia di natura uguale o diversa rispetto allo stimolo esterno che ha innescato la reazione. La seconda categoria presenta numerose affinità con un'ulteriore tipologia di materiali tecnologicamente avanzati, la quale prevede l'impiego di conglomerati cementizi additivati con aggiunte nanotecnologiche, cioè gli *smart concrete*. Questi infatti presentano molteplici meccanismi di risposta, caratterizzati per lo più da processi che portano alla trasformazione di forme energetiche, lasciando inalterate le loro proprietà.

Analizzando le principali potenzialità applicative esposte nei precedenti paragrafi, si può notare come i materiali intelligenti possano ricoprire un ruolo chiave nel processo di adattamento e mitigazione agli effetti dei cambiamenti climatici. Nel contempo, però, vi è ancora tutt'oggi un netto divario tra l'ampio bagaglio di conoscenze, derivanti dalle esperienze sperimentali, e le ancora limitate applicazioni nel settore edile e architettonico; questo scarto implica che tali soluzioni vengano impiegate per lo più in settori dell'ingegneria tecnologicamente più avanzati e tradizionalmente più aperti all'innovazione di processo e di prodotto (aerospaziale, energetico, biomedicale, ecc.).

Renata Morbiducci, è architetto, dottore di ricerca in ingegneria delle strutture. Professore ordinario di architettura tecnica e docente per Corsi di Dottorato, di Master e di Corsi universitari in Ingegneria e Architettura. È membro dell'ONG RINGO, Delegazione COP-UNFCCC. È responsabile scientifico di progetti internazionali e nazionali. Ha svolto attività di ricerca presso la University of Colorado (Boulder) e la Northwestern University (Evanston Chicago) ed è stata docente presso la Florida International University (FIU).

Il settore delle costruzioni sta entrando nella nuova era di trasformazione circolare e digitale dell'economia, con un rapido allineamento dei processi di produzione, costruzione e gestione ai principi dell'industria 4.0. La codifica di quelle che possono essere definite «scelte progettuali sostenibili» può essere definita investigando i principali ambiti annessi alla progettazione tecnica dell'architettura e dell'edilizia. A partire degli insegnamenti dei corsi universitari si possono distinguere numerosi ambiti di azione culturale teorica e applicativa dove analizzare gli sviluppi dei diversi aspetti inerenti l'innovazione nella progettazione sostenibile del costruito. Il presente volume contiene contributi di Renata Morbiducci, Clara Vite, Salvatore Polverino e Vittoria Bonini; in tali contributi gli autori analizzano i possibili strumenti al servizio di una progettazione sostenibile dell'architettura e di una sua declinazione nella didattica universitaria dal punto di vista teorico-applicativo.

e-ISBN: 978-88-3618-232-9

In copertina:
Sostenibilità
composizione di Alessandro Castellano, 2023