

ISSN: 2724-184X

TransDis Researches

note verso una transdisciplinarietà dei saperi
volume I

Martina Castaldi
Gaia Leandri
Stefano Melli
Salvatore Polverino

PhD course in
Architecture and Design
University of Genova

Addoc Logos
Urban and territorial policies

A multiscalar PhD Laboratory

#4 - October 2025

ADDDOC LOGOS

3

Collana / Collection

ADDDOC LOGOS - Monografie di Dottorato

pubblicazione semestrale / biannual magazine
e-ISSN (pdf) 2724-184X - e-ISBN (pdf) 978-88-3618-340-1
ISSN 2724-1831

Direttore / Editor in Chief

Manuel Gausa Navarro – Coordinatore ADD

Comitato di indirizzo / Steering Board

Carmen Andriani, *Progettazione Architettonica* (DAD-UNIGE)
Niccolò Casiddu, *Design* (DAD-UNIGE)
Maria Linda Falcidieno, *Rappresentazione e Comunicazione* (DAD-UNIGE)
Adriana Gherzi, *Paesaggio* (DAD-UNIGE)
Andrea Giachetta, *Tecnologia* (DAD-UNIGE)
Guglielmo Bilancioni, *Teoria e Storia* (DAD-UNIGE)
Roberto Bobbio, *Urbanistica* (DAD-UNIGE)

Comitato scientifico / Scientific Committee

Atxu Aman (Universidad Politécnica de Madrid - ETSAM-UPM, Madrid)
Pepe Ballesteros (Escuela Técnica Superior de Arquitectura - ETSAM-UPM, Madrid)
Nicola Braghieri (Université de Lausanne)
Guya Bertelli (Politecnico di Milano)
Maurizio Carta (Università degli Studi di Palermo)
Marcos Cruz (Bartlett School)
Alessandra Capuano (Università La Sapienza, Roma)
Medardo Chiapponi (IUAV, Venezia)
Daniela Colafranceschi (Università Mediterranea di Reggio Calabria)
Isotta Cortesi (Università di Napoli Federico II)
Ricardo Devesa (Urban Next/Universidad de La Salle, Barcelona)
Meltem Eti (Marmara University, Istanbul)
Raffaella Fagnoni (IUAV, Venezia)
Francesca Fatta (Università Mediterranea di Reggio Calabria)
Sara Favargiotti (Università di Trento)
Carlo Gasparini (Università Federico II Napoli)
Vicente Guallart (Institute for Advanced Architecture - IAAC Barcelona)
Arild Gustavsen (NTNU, Norwegian University, Oslo)
Michael Jacob (University of Grenoble)
Xavier Llobet (Universitat Politècnica de Catalunya, ETSAB-UPC, Barcelona)
Carles Llop (Universitat Politècnica de Catalunya, ETSAB-UPC)
Areti Markopoulou (Institute for Advanced Architecture, IAAC, Barcelona)
Nicola Marzot (Università degli Studi di Ferrara)
Giovanna Massari (Università di Trento)
Marco Navarra (Università degli studi di Catania)
Marco Nobile (Università degli Studi di Palermo)
Élodie Nourrigat (ENSAM, École Nationale Supérieure d'Architecture, Montpellier)
José Luis Esteban Penelas (Universidad Europea de Madrid, EAID-UEM, Madrid)
Gabriel Perez (Universitat de Lleida, ETSA-UdL, Lleida)
Mosè Ricci (Università di Trento)
Amadeu Santacana (Universitat Politècnica de Catalunya, ETSAB-UPC)
Vicente Sarrablo (Universidad Internacional de Catalunya, ESARQ-UIC, Barcelona)
Jörg Schröder (Leibniz University, Hannover)
Federico Soriano (Università Politécnica di Madrid-ETSAM-UPM, Madrid)
José Luis Sosa (Universidad de Las Palmas, ETSU-ULPG)
Pedro Urzaiz (ETSAM - Madrid)

Board ADD - PhD Course in Architettura and Design, UNIGE

Carmen Andriani, Alberto Bertagna, Guglielmo Bilancioni, Enrica Bistagnino, Roberto Bobbio, Nicola Braghieri, Cristina Candito, Niccolò Casiddu, Luisa Chimenz, Adriana Del Borghi, Raffaella Fagnoni, Maria Linda Falcidieno, Giovanni Galli, Manuel Gausa, Adriana Gherzi, Andrea Giachetta, Massimiliano Giberti, Christiano Lepratti, Adriano Magliocco, Areti Markopoulou, Francesca Mazzino, Renata Morbiducci, Maria Carola Morozzo, Massimo Musio Sale, Alireza Naser Eslami, Élodie Nourrigat, Giulia Pellegri, Silvia Pericu, Katia Perini, Vittorio Pizzigoni, Paolo Rosasco, Maria Benedetta Spadolini, Alessandro Valenti, Valter Scelsi, Mario Ivan Zignego.

Addoc Logos

Urban and territorial policies

#4 | TransDis Researches
note verso una transdisciplinarietà dei saperi
vol. I

Per la realizzazione della parte IV, 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.

UPI *Il presente volume
me è stato sottoposto a double blind peer-review*
UNIVERSITY PRESS ITALIANE secondo i criteri stabiliti dal protocollo UPI

© 2025 GUP

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



Alcuni diritti sono riservati

e-ISSN (pdf) 2724-184X - e-ISBN (pdf) 978-88-3618-340-1
ISSN 2724-1831

Pubblicato a ottobre 2025

Realizzazione Editoriale
GENOVA UNIVERSITY PRESS
Via Balbi 5, 16126 Genova
Tel. 010 20951558
e-mail: gup@unige.it
<https://gup.unige.it>

*A Manuel Gausa,
docente appassionato,
progettista e sognatore,
aperto ai giovani e al futuro,
va questo volume, da Lui fortemente sostenuto.
Con riconoscenza.*

sommario

- 11** **Martina Castaldi**
Il rilievo integrato: applicazioni procedurali sostenibili. Il caso studio di Palazzo Barberini a Roma
- 33** **Gaia Leandri**
Il bianco e il nero a Genova nel Medioevo. La pietra tra simbolo e materia
- 65** **Stefano Melli**
Arcipelago paesaggio. Una nuova tassonomia per il progetto di giardino pensile
- 103** **Salvatore Polverino**
Applicazione del grafene nei materiali da costruzione

Il rilievo integrato: applicazioni procedurali sostenibili. Il caso studio di Palazzo Barberini a Roma

Prefazione

L'Unione Europea negli ultimi anni ha varato diverse leggi e azioni per promuovere uno sviluppo per un'Europa maggiormente sostenibile anche in relazione al Patrimonio Culturale e ai suoi campi d'applicazione. L'obiettivo di queste azioni è ad ampio raggio e prevede la possibilità di migliorare e supportare le industrie creative e i settori scientifici coinvolti per incoraggiare un approccio sempre più tutelante e valorizzante e al contempo più verde del Patrimonio. La ricerca italiana e le università hanno accolto questa sfida e negli anni hanno contribuito, con metodologie e tecnologie innovative, a rendere maggiormente fruibile e accessibile i siti culturali italiani. Infatti, l'ingente Patrimonio Culturale Nazionale, nelle diverse accezioni storiche, architettoniche e archeologiche, implica un costante lavoro di tutela e valorizzazione al fine di consentirne una fruizione ottimale.

L'adattamento delle moderne tecnologie al campo del recupero dei valori architettonici sta modificando gli approcci conoscitivi legati alla disciplina del rilievo, aprendo pratiche di gestione del cambiamento mediante nuove opportunità applicative. Nel panorama tecnologico odierno le tecnologie APR¹ si rivelano di estrema utilità per implementare le tecniche di rilievo per la protezione del patrimonio culturale, modificandone la percezione e offrendo nuovi orizzonti strategici per la tutela sostenibile nel tempo. La ricerca qui presentata nasce dalla riflessione scaturita a seguito dell'impiego di diverse metodologie di rilievo col fine di analizzare, confrontare e comprendere gli effetti a breve e lungo termine della sperimentazione dei nuovi servizi sostenibili che integrino le pratiche tradizionali di rilievo architettonico con le nuove metodologie digitali nell'ambito anche della mediazione museale.

Nell'ottica delle azioni promosse dalla Commissione Europea, in merito a "Sostenibilità e Patrimonio Culturale"², l'obiettivo di questo studio è rafforzare il ruolo del rilievo architettonico nel contribuire a uno sviluppo inclusivo e sostenibile, tramite l'applicazione di nuove tecnologie di rilievo integrato, generando un modello 3D accurato per la documentazione, conservazione, catalogazione e fruizione di patrimoni architetto-

¹ APR è la sigla di aeromobile a pilotaggio remoto, più noto come drone. Spesso vengono usati anche altri acronimi, ma i più comuni sono: UAV (*unmanned aerial vehicle*, velivolo aereo senza pilota) e la traduzione inglese di APR cioè RPV (*remotely piloted vehicle*). Sono apparecchi, solitamente in grado di volare, che non presentano piloti umani a bordo; essi controllati da un computer presente sul mezzo o mediante un controllo da remoto comandato da un pilota.

² European Commission – Culture and Creativity (Last accessed 26/06/2024 <https://culture.ec.europa.eu/it/cultural-heritage/cultural-heritage-in-eu-policies/sustainability-and-cultural-heritage>).

nici complessi. Si prende come caso studio Palazzo Barberini a Roma, dove sono stati eseguiti rilievi integrati tramite laser scanner, drone e macchina fotografica. La scelta di sperimentare differenti metodologie d'indagine è servita non solo per comprendere quale tecnica fosse più interessante, per ottenere specifici risultati in termini anche di sostenibilità, ma anche per testare quale si adattasse al meglio per rappresentare e rilevare aree puntuali dell'edificio.

1. Nuove applicazioni procedurali sostenibili nel campo del rilievo architettonico

L'analisi oggettiva di un patrimonio architettonico complesso, nelle sue diverse fasi di studio, che comprendono la documentazione sullo stato dell'arte, l'analisi storico-urbanistica, la ricerca bibliografica e d'archivio in connubio al rilevamento architettonico, consente di sviluppare strategie mirate per la tutela e la conservazione del patrimonio culturale in questione. Un tale approfondimento critico-analitico richiede tempistiche e risorse considerevoli, in termini di finanziamenti e di personale coinvolto. I rilievi tradizionali, infatti, si eseguono per spettri di ricerca puntuali raccogliendo in più fasi dati specifici relativi al campo d'indagine considerato. Sebbene questa pratica risulti essere sempre funzionale, portando a risultati di notevole precisione e controllo, non sempre però si rivela come la scelta più sostenibile ed efficiente, introducendo quindi la necessità di sviluppare nuovi approcci tecnici e metodologici, in grado altresì di ridurre i costi e le tempistiche di intervento. Il nuovo panorama tecnologico fornisce strumenti capaci di raccogliere una maggiore quantità di dati in tempi decisamente ristretti; dispositivi come droni, laser scanner, stazioni totali avanzate e tecnologia SLAM infatti, se correttamente programmati, riescono a migliorare e implementare la qualità della ricerca fornendo un supporto significativo nella gestione dei dati. Questi, se impiegati per il rilevamento, contribuiscono a fornire una documentazione maggiormente dettagliata ad altissima risoluzione, in grado di porre le fondamenta per un incremento sostenibile dei sistemi di analisi e di crescita delle metodologie di carattere multidisciplinare in campo architettonico.

Oggi più che mai, nello scenario mondiale di criticità ambientale e sociale, legate nella maggioranza dei casi a eventi quali conflitti bellici ed emergenze sanitarie, compare l'importanza dell'impiego di nuovi strumenti digitali non invasivi e di facile accessibilità, come gli UAV³, per un'elaborazione digitale e conseguente catalogazione e diffusione del patrimonio artistico e culturale. Nell'ultimo periodo la Croce Rossa e la protezione civile hanno promosso attività e azioni di intervento proprio in aree caratterizzate da emergenze e rischio ambientale per salvaguardare il patrimonio culturale e tutelare anche ricercatori e operatori; il prossimo futuro sarà sicuramente volto a un'implementazione dell'uso dei droni in ambito culturale al fine di raggiungere risultati sempre più performanti, sostenibili e in grado di produrre benefici sociali⁴.

Gli UAV, comunemente conosciuti come droni, sono dispositivi pilotati da remoto nati inizialmente per scopi militari; nell'ultimo decennio questi hanno iniziato a essere utilizzati anche con

³ UAV (*unmanned aerial vehicle*, velivolo aereo senza pilota).

⁴ Alsuhli G., Fahim A., Gadallah Y. (2022), A survey on the role of UAVs in the communication process: A technological perspective, *Computer Communications*, in *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 194.

fini dilettantistici e nonché per le prime applicazioni in campo architettonico. L'utilizzo dei droni per scopi civili di qualsiasi natura viene normato da differenti enti, tra questi ricordiamo: ENAC – Ente Nazionale per l'Aviazione Civile; EASA – European Union Aviation Safety Agency e FAA – Federal Aviation Administration. Il primo è strettamente legato al territorio italiano, il secondo all'Unione Europea e il terzo al territorio degli Stati Uniti d'America. In base alla normativa Europea 2019/947⁵ e 2019/945⁶ le operazioni con UAS vengono classificate in tre categorie in base al rischio dell'operazione stessa: *open category*, o 'basso rischio' con decollo inferiore a 250 g e senza richiesta di autorizzazioni preventive; *specific category*, o 'medio rischio' con autorizzazione necessaria dopo una valutazione del rischio, e *certified category*, o 'alto rischio' dove le autorizzazioni sono necessarie sempre per drone, pilota e pilota da remoto. L'età minima per i piloti da remoto che gestiscono un UAS⁷ in operazioni nella categoria open o specific è di 16 anni; mentre non è richiesta un'età minima per i piloti remoti che utilizzano UAS costruiti da privati con una massa massima al decollo inferiore a 250 g. Il regolamento dell'ENAC dell'11 novembre 2019 stabilisce differenti aree in cui ci sono limitazioni o *no-fly zone*. In questi casi è sempre necessario inviare una richiesta di sorvolo, sul portale di *d-flight*, e attendere le autorizzazioni necessarie e l'esito positivo dall'ENAC e/o eventualmente anche dalla Prefettura. La presenza di norme così restrittive garantisce la qualità e la preparazione del pilota che opererà nelle diverse campagne di rilievo anche a fronte di situazione di rischio. Tali normative stanno subendo integrazioni e modificazioni. Dal gennaio del 2024 è stata infatti cambiata la classificazione dei droni andando a suddividere ulteriormente le differenti classi di UAV, non più solamente in base al peso ma anche in relazione alle strumentazioni aggiuntive che caratterizzano la macchina. Trattandosi di strumenti altamente sofisticati, ma che vengono controllati da remoto, è sempre necessario agire in condizioni di sicurezza personale e per le terze parti. Quando si lavora in contesti pubblici o che coinvolgono altri è quindi necessario richiedere autorizzazioni preventive all'ufficio di riferimento e realizzare accurati piani di sorvolo che tengano in considerazione l'ambiente di lavoro, l'oggetto di studio e le persone o cose che possano venire a contatto in maniera diretta o indiretta durante le operazioni. È sempre quindi consigliato pianificare in maniera minuziosa tutti gli step che accompagnano le fasi di rilievo tramite UAV al fine di garantire standard di sicurezza adeguati durante tutto il processo e portare il dispositivo al massimo delle performance al fine di carpire adeguatamente tutti i dati necessari.

⁵ (Last accessed 25/06/2024 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0947>).

⁶ (Last accessed 25/06/2024 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0945>).

⁷ UAS (*Unmanned Aircraft System*, Sistema aereo senza pilota).

2. Gli SDG e il rilievo integrato

Il patrimonio culturale, per il suo valore etico, storico ed estetico, rappresenta l'identità culturale dell'uomo. La sua tutela e valorizzazione necessita di un'approfondita documentazione e il rilievo si configura come strumento critico per mezzo del quale è possibile comprendere le trasformazioni principali e probabili future, anche in termini di funzione, fruizione e gestione per dimostrare, tramite un caso studio applicativo,

le potenzialità dei sistemi integrati di rilievo di patrimoni architettonici complessi. Rilevare la città e le sue trasformazioni storiche e urbane permette di arrivare a una descrizione puntuale, attraverso gli scatti, nuvole di punti ed elaborazioni digitali, delle architetture e degli ambienti storico-culturali della città «con l'obiettivo di approfondire le tematiche connesse alla lettura, comprensione e rappresentazione dello spazio urbano e del territorio finalizzato alla progettazione, conservazione, restauro e recupero»⁸. Per fare questo a oggi ci si può e deve avvalere di tecnologie come laser scanner e droni; la comparazione, ad esempio, tra queste tipologie di rilievo servirà a mostrare come queste due metodologie possano essere sostenibili per la visualizzazione e la gestione degli interventi che si dovrebbero attuare in uno specifico sito. Lo scopo della ricerca è stato quello di sperimentare, comprare e analizzare tecnologie innovative di rilievo integrato che implementino e completino le pratiche di rilievo tradizionali col fine di raggiungere gli obiettivi connessi ad aspetti di tipo conoscitivo, di conservazione e di catalogazione di un bene seguendo un *iter* diretto piuttosto che frammentato. I dati metrici, tecnologici, geometrici, storici e stilistico-formali, vengono raccolti e immediatamente scremati rendendo così la comprensione dell'oggetto di studio corretta e istantanea. L'impiego di strumenti innovativi ha ricadute positive non solo sull'elaborato grafico restitutivo finale ma anche nella tutela della sicurezza degli operatori durante la campagna di rilievo. Gli studi fino ad ora promossi fanno riferimento alle linee guida redatte da programmi europei, dall'ONU e nel raggiungimento di obiettivi dell'Agenda 2030⁹ per lo Sviluppo Sostenibile. I paesi che hanno preso parte a questo programma, tra cui l'Italia, hanno come obiettivo il raggiungimento di risultati entro il 2030 in materia di sostenibilità. Per rendere più capillare e diversificato il campo di applicazione sono stati redatti circa 200 obiettivi definiti *Sustainable Development Goals* (Fig. 1.1). Gli SDGs che vengono

⁸ Pellegrini G. (2015), Rilevare per conoscere, Rappresentare per descrivere. In: PATRIMONIO ARTISTICO CULTURALE PAESAGGISTICO, GS Digital, Genova, p. 9.

⁹ È un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità sottoscritto nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell'ONU. Essa ingloba 17 'Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile' - Sustainable Development Goals, SDGs - in un grande programma d'azione per un totale di 169 'target' o traguardi. L'avvio ufficiale degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile ha coinciso con l'inizio del 2016, guidando il mondo sulla strada da percorrere nell'arco dei prossimi 15 anni: i Paesi, infatti, si sono impegnati a raggiungerli entro il 2030. (Last accessed 25/06/2024 <https://unric.org/it/agenda-2030/>).



Fig. 1.1. Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (Retrieved from <https://sdgs.un.org/goals>, last accessed 18/03/2024)

presi in considerazione in questa ricerca e all'intero delle applicazioni in campo del rilievo architettonico posso primariamente essere: il numero 9 *Industria, innovazione e infrastrutture*, grazie a una promozione di sistemi tecnologici innovativi equi e responsabili, e il numero 11 *Città e comunità sostenibili*, grazie alla tutela a priori e post catastrofi naturali degli insediamenti umani al fine di renderli maggiormente sicuri, duraturi e sostenibili. In tale senso l'uso di tecnologie avanzate di rilievo indiretto come i droni rendono più accessibili le operazioni di monitoraggio e sicurezza permettendo un notevole abbattimento delle tempistiche e la possibilità di condivisione dei dati in un network interoperabile e maggiormente coeso.

Tali goal, applicati al campo del rilievo architettonico che integra le metodologie tradizionali a quelle più moderne, potrebbero portare sicuramente a un miglioramento dell'eccellenza della gestione del patrimonio culturale tangibile che può essere portato avanti anche grazie al sostegno delle industrie culturali e creative, misurando le situazioni di pericolo dei siti e dei beni culturali, arricchendo le competenze degli operatori del settore culturale, promuovendo l'inclusione sociale e la qualità della vita affinando, inoltre, l'accesso ai servizi culturali tramite la condivisione dei dati in modalità virtuale tridimensionale. Anche se questa prassi sicuramente non avrà effetti misurabili nell'immediato può essere vincente sul lungo periodo per creare una nuova metodologia applicativa che consenta una maggiore fruizione e scambio di dati tra operatori scientifici e industrie creative. La creazione di una solida metodologia in abbinamento a un interconnesso sistema di scambio dati potrà essere la base di partenza per una migliore e più consapevole tutela e valorizzazione dei beni culturali.

3. NUOVI METODI DI RILIEVO SOSTENIBILE – Sostenibilità e *Change Management* mediante laser scanner e fotogrammetria: differenze e analogie

¹⁰ «Identifica l'ambito disciplinare relativo alle attività delle amministrazioni pubbliche realizzate grazie all'ausilio delle reti telematiche e della rete Internet in particolare. (...) Negli anni più recenti, l'e. ha assunto una notevole importanza, anche maggiore di quella attribuita all'e-business, in virtù delle potenzialità che tale disciplina ha mostrato sia nell'avvicinare il cittadino e l'impresa all'amministrazione, aumentandone il consenso e la soddisfazione, sia nel migliorare in termini generali l'efficienza e l'efficacia delle attività amministrative, generando risparmi nei costi e migliorando la qualità dei servizi della pubblica amministrazione.» [Enciclopedia Treccani].

¹¹ «È una società che consiste in una o più e-comunità coinvolte nei settori dell'e-Government, dell'e-Democracy, dell'e-Business, dell'e-Learning e dell'e-Health, che utilizzano le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) per raggiungere interessi e obiettivi comuni. Le prime aree della e-society emerse sono state l'e-Learning e l'e-Business.» [Enciclopedia Treccani].

In una prospettiva di visione futura, che potenzialmente coinvolgerà sempre di più l'aspetto economico, basato su paradigmi di democrazia digitale quali il web, l'*e-government*¹⁰, l'*e-society*¹¹ e le *e-community*¹², la digitalizzazione si è trasformata in un obiettivo di fondamentale importanza nell'agenda dello sviluppo sostenibile di tutti i settori dell'attività umana. La Commissione Europea, in questi ultimi anni, ha dato il via alla promozione di questa nuova tendenza coniando slogan quali «Un'Europa adatta all'era digitale»¹³ e incoraggiando l'uso e l'approfondimento di *big data* e *cloud computing*¹⁴ attraverso lo sviluppo di tecnologie come il *data mining*¹⁵, il *data analytics*¹⁶, la *data fusion*¹⁷ e il *deep learning*¹⁸.

Il *Cultural Heritage*, come molti altri settori, contribuisce alla produzione di dati e rappresenta il patrimonio informativo dell'umanità. In tale cammino evolutivo l'Italia, ricca di siti storici, artistici e architettonici sta sperimentando processi innovativi di documentazione, conoscenza, gestione e fruizione degli stessi tali da rappresentare una condizione di assoluta eccellenza in ambito internazionale. Fino a pochi anni fa l'interesse nella protezione del patrimonio culturale tangibile era volto solamente alla trasmissione dello stesso alle generazioni

future; oggi, invece, è necessario considerare molteplici aspetti, tra cui i metodi di comunicazione, di indagine dei siti stessi e di previsione. La *New European Agenda for Culture 2018*¹⁹, adottata dall'Unione Europea il 22 maggio 2018, mira a sfruttare il potenziale della cultura in diversi campi strategici; a tal fine, sono stati prefissati tre obiettivi: uno sociale, uno economico e uno per le relazioni esterne. L'agenda ha delineato anche nuove modalità di conoscenza del patrimonio culturale, proponendo così un cambio di prospettiva che vada a focalizzarsi maggiormente sulle potenziali relazioni tra la transizione digitale e la percezione stessa del patrimonio culturale. Essa, inoltre, ha attribuito notevole rilevanza alle strategie denominate *Digital4Culture*, all'interno delle quali uno degli obiettivi primari è quello di «Sfruttare tutto il potenziale della cultura per contribuire a costruire un'Unione più inclusiva e più equa, sostenendo l'innovazione, la creatività, l'occupazione e la crescita sostenibile»²⁰. La digitalizzazione del patrimonio culturale svolge un ruolo essenziale nella raccolta e nell'analisi dei dati con due obiettivi primari: l'archiviazione per la conservazione delle informazioni e l'analisi degli stessi per condurre una ricerca avanzata.

Nell'ultimo decennio sono stati affrontati diversi cambiamenti all'interno del campo del rilievo architettonico, sono state fatte sperimentazioni e applicate differenti metodologie e tecnologie; tra queste sono stati impiegati gli UAV al servizio del patrimonio culturale, con lo scopo di monitorare, scansionare, gestire e archiviare dati. In architettura questi dispositivi hanno permesso di raggiungere un nuovo punto di vista che, a differenza delle immagini satellitari e aerofotogrammetriche, offre, grazie a un'altitudine inferiore, un maggiore grado di dettagli non perdendo i riferimenti percepiti da terra. La vera innovazione nell'impiego di queste nuove tecnologie risiede nelle loro dimensioni compatte e nella possibilità di essere pilotati da remoto; queste caratteristiche donano numerosi vantaggi anche e soprattutto per la sicurezza degli operatori. Gli UAV, utilizzati congiuntamente a laser scanner e fotocamere ad altissima risoluzione, consentono a livello operativo, una raccolta di dati più efficiente ed economica, in tempistiche ridotte, rispetto ai metodi di rilevamento tradizionali. L'aspetto temporale ed economico sono due fattori di notevole importanza che permettono, rispetto al passato, di restituire un modello totale e oggettivo del bene documentato. Per una gestione più consapevole e un miglioramento delle tecniche di rilievo integrato, lo studio e la conoscenza delle nuove tecniche di questa tecnologia contribuiscono a redigere un'analisi sostenibile in campo economico, temporale e umano.

In una breve analisi di comparazione di tecnologie e metodologie avanzate, impiegabili singolarmente o in combinazione tra di loro, si propone un raffronto tra il rilievo mediante il laser scanner e quello fotogrammetrico.

I sensori laser scanner, o laser 3D, permettono di rilevare oggetti tridimensionali di dimensioni e risoluzioni differenti tramite l'uso di dispositivi LiDAR²¹, o in generale di *Mobile laser scanning* (MLS) che emettono un raggio laser. Tale fascio laser che colpisce le superfici del bene scansionato, una volta che ritorna alla testa scanner georeferenziata, permette di calcolare, in base al tempo di ritorno, la posizione esatta dell'og-

¹² «Comunità virtuale o comunità online è un insieme di persone interessate ad un determinato argomento, o con un approccio comune alla vita di relazione, che corrispondono tra loro attraverso una rete telematica, come internet, e le reti di telefonia, costituendo una rete sociale con caratteristiche peculiari.» [Enciclopedia Treccani].

¹³ (Last accessed 25/06/2024 <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/a-digital-future-for-europe/>).

¹⁴ In italiano definita come 'nuvola informatica', indica un metodo di erogazione di servizi offerti da un fornitore a un utente, a partire da un insieme di risorse preesistenti e disponibili in remoto, mediante la rete internet.

¹⁵ Insieme di tecniche e metodi necessari all'estrazione di informazioni partendo da una grande quantità di dati.

¹⁶ È un processo di raccolta e analisi di grandi volumi di dati per estrarre informazioni nascoste.

¹⁷ È un processo di integrazione di dati multipli al fine di ottenere informazioni maggiormente utili e accurate ricavate da un'unica fonte di dati.

¹⁸ È il campo di ricerca dell'apprendimento automatico e dell'intelligenza artificiale che si basa su diversi livelli di rappresentazione, corrispondenti a gerarchie di caratteristiche di fattori o concetti, dove i concetti di alto livello sono definiti sulla base di quelli di basso.

¹⁹ (Last accessed 25/06/2024 <https://www.cultureinexternalrelations.eu/2018/06/01/new-european-agenda-for-culture/#:~:text=New%20European%20Agenda%20for%20Culture%202018%20On%2022,supporting%20innovation%2C%20creativity%20and%20sustainable%20jobs%20and%20growth%E2%80%9D>).

²⁰ Traduzione personale del seguente testo reperito dal sito EU Policy Documents «Harness the full potential of culture to help build a more inclusive and fairer Union, supporting innovation, creativity and sustainable jobs and growth». (Last accessed 25/06/2024 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2018:267:FIN>).

²¹ LiDAR acronimo di: laser imaging, detection, and ranging.

getto. Inizialmente le scansioni laser prevedevano esclusivamente l'uso di stazioni totali a terra mentre negli ultimi anni si stanno sperimentando le prime tecnologie LiDAR applicate alla tecnologia UAV. Nella tecnica LiDAR per ogni raggio di scansione direzionato si ottengono solo due parametri: il tempo di volo, direttamente proporzionale alla distanza, e l'intensità della radiazione riflessa. Queste due informazioni, presenti su ogni punto scansionato, costituiscono un'immagine sintetica degli oggetti rispettando rigorosamente la loro geometria, mentre tutte le altre caratteristiche, cromatiche o di illuminazione, vengono scelte convenzionalmente. I sensori laser scanner producono quindi modelli digitali sotto forma di nuvola di punti, ovvero un insieme di punti con coordinate spaziali (x,y,z) . Tale nuvola, però, spesso non è di facile comprensione e risulta difficile estrarne le informazioni necessarie. Per ovviare al problema è utile realizzare un modello 3D unendo i punti della nuvola in superfici mesh. Al fine di rendere più chiara la nuvola di punti scanner è consigliabile combinare anche le informazioni di tipo cromatico e radiometrico che si ricavano da un rilievo di tipo fotogrammetrico. La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di acquisire dati metrici e spaziali di uno specifico oggetto mediante il reperimento e l'analisi di una coppia di fotogrammi stereometrici, ovvero due immagini fotografiche successive e parzialmente sovrapponibili. La fotogrammetria aerea nasce per ottenere informazioni accurate e affidabili dell'ambiente terrestre e oggetti fisici mediante una fase di registrazione, misurazione e interpretazione delle immagini catturate dall'alto tramite un metodo di misura indiretto. Negli ultimi anni vi è stata un'estensione di questa pratica grazie alla digitalizzazione, all'elaborazione e all'analisi delle immagini basandosi su modelli matematici e geometrici traducibili attraverso l'uso di algoritmi di software specifici.

Le fotografie necessarie, per un rilievo fotogrammetrico, possono essere scattate tramite macchine fotografiche reflex oppure droni. L'elaborazione automatica delle immagini lavora processando una notevole mole di dati che o vengono usati per ricostruire in 3D l'oggetto scansionato, partendo da immagini 2D parzialmente sovrapponibili grazie al riconoscimento di punti omologhi; oppure tramite la tecnica dell'ortofoto, mappando in 2D l'oggetto per creare una mappa digitale con informazioni di tipo planimetrico. Con la fotogrammetria è anche possibile tracciare la cromia e l'illuminazione dell'immagine, estraendo le gamme di colori, la riflessione speculare e determinare l'illuminazione ambientale mediante l'interazione dell'oggetto con i materiali circostanti. I metodi elencati se usati in combinazione tra di loro consentono di ottenere risultati maggiormente precisi: un esempio sono l'ortofotografia con metodi cromatici per produrre ortomosaici ovvero composizioni di fotogrammi geometricamente corretti e georeferenziati. I risultati di tutte queste tecniche che partono dall'acquisizione di immagini fotogrammetriche, si evincono tramite nuvole di punti per la costruzione di mesh e di texture ad altissima qualità.

La prima differenza tra rilievo laser scanner e rilievo fotogrammetrico consiste nella modalità di captazione dei dati, infatti, il primo è di tipo attivo poiché prevede l'emissione di laser

nello spettro NIR²² o UV²³ per generare un'immagine 3D; mentre il secondo è di tipo passivo poiché la misurazione si basa su immagini in zone chiaramente identificabili con target. Un'altra macro-differenza tra i due strumenti consta che gli strumenti fotogrammetrici sono più economici e leggeri piuttosto che quelli laser anche se recentemente si sta studiando l'applicazione LiDAR ai droni con dimensioni e peso ridotti. La scansione laser presenta diversi vantaggi rispetto a quella fotogrammetrica, come la possibilità di operare in condizioni di scarsa illuminazione o in notturna, ma non può superare le prestazioni di risoluzione, realismo dell'immagine, accuratezza dei dati e costi delle apparecchiature degli strumenti fotogrammetrici. La tempistica di post-produzione, in entrambe le tecniche di rilievo, dipende dalla mole di dati reperiti e dalle dimensioni dell'oggetto scansionato ma risulta sempre inferiore rispetto a una post-produzione dei dati esito del rilievo diretto. Gli elaborati ottenuti dalle scansioni laser e fotogrammetriche, le nuvole di punti, vengono comparate per capire quale delle due sia più affidabile tramite il software Cloudcompare che ne calcola le differenze metriche che normalmente si equivalgono. L'integrazione tra differenti tecniche di rilievo permette di definire dei sistemi informativi complessi rendendo il modello adatto a rappresentazioni multi-scalari. Il modello digitale consente inoltre di aggiornare continuamente e di integrare nel tempo, nuovi dati e/o elaborati.

²²Near-infrared spectroscopy o la spettroscopia nel vicino infrarosso è una tecnica di analisi secondaria che utilizza la regione infrarossa dello spettro elettromagnetico (da circa 800 nm a 2500 nm) per indagare in modo non distruttivo le proprietà chimico-fisiche dei campioni.

²³Ultra-violet o spettroscopia ultravioletta è una tecnica spettroscopica di assorbimento molecolare comunemente utilizzata in chimica analitica.

4. PALAZZO BARBERINI A ROMA **Caso studio, cenni storici e le fasi del rilievo**

Durante l'attività formativa per dottorandi di Rilievo e Rappresentazione dei Beni Architettonici "Digital Tales: tecnologie e saperi per la conoscenza del patrimonio culturale"²⁴, che si è tenuta durante le attività formative presso il Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura dell'Università di Roma - La Sapienza, è stato scelto come caso studio applicativo Palazzo Barberini a Roma, emblema di un sito di notevole interesse culturale e allo stesso tempo con situazioni di rischio relative all'accessibilità dei luoghi. L'immobile, infatti, sta subendo parziali restauri e ne necessita altrettanti. Essendo un luogo estremamente frequentato l'uso di rilievi tradizionali avrebbe necessariamente portato a una chiusura del Palazzo per diverse giornate comportando notevoli perdite economiche. È quindi stato eseguito un progetto specifico di studio della narrazione delle nuove tecniche digitali nel campo del rilievo architettonico mediante l'uso dei laser scanner e degli UAV per cercare di ovviare a questa premessa.

²⁴ Coordinata dal Prof. G.M. Valenti dell'Università di Roma La Sapienza, presso il Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura della Facoltà di Architettura.

4.1 Cenni storici – La famiglia Barberini e l'impianto architettonico del Palazzo

Per una maggiore comprensione della costruzione di Palazzo Barberini è necessario illustrare una breve panoramica storico-bibliografica della famiglia Barberini. Maffeo Virginio Romolo Barberini (1568-1644) nasce a Firenze nell'agiata famiglia di commercianti di tessuti trasferitesi da Barberino di Val d'Elsa²⁵ da qui ribattezzati e meglio conosciuti, nella città fiorentina, col cognome di Barberini al posto di Tafani (Fig. 1.2). A

²⁵ Frazione del comune di Barberino Tavarnelle, nella città metropolitana di Firenze, in Toscana.

Fig. 1.2. Ritratto di papa Urbano VIII, già Maffeo Virginio Romolo Barberini, opera di Pietro da Cortona del 1627 (Retrieved from https://it.wikipedia.org/wiki/Papa_Urbano_VIII last accessed 18/03/2024)



seguito della prematura scomparsa del padre e grazie agli interessi e alle ricchezze dello zio, Maffeo persegue studi umanistici e viene successivamente indirizzato a Roma nella via per il cardinalato che ottiene nel 1606. Lo stemma della famiglia (Fig. 1.3), che fino a quel momento era rappresentato da tre tafani, per questioni di nobiltà viene sostituito da tre api e in concomitanza scompare definitivamente il cognome Tafani a favore di Barberini²⁶. Nel 1623 Maffeo Barberini, succede a papa Gregorio XV, e viene eletto come papa Urbano VIII. A seguito dell'incarico papale vi è la necessità di realizzare una residenza nobiliare nel cuore di Roma; nel 1625 Maffeo acquista da Alessandro Sforza, un edificio di carattere medievale e commissiona all'architetto Carlo Maderno la ristrutturazione al fine di ottenere una sede di

²⁶ Spagnolo M. (2011), I luoghi della cultura nella Roma di urbano VIII, in Atlante della Letteratura, in Luzzatto S., Pedullà G. (a cura di), Einaudi, Torino, pp. 387-408.



Fig. 1.3. Stemma della famiglia Barberini posto sopra il fornice centrale di Palazzo Barberini (Fotografia dell'autore)

rappresentanza, per le visite ufficiali e un luogo di *otium*, per la famiglia papale, nel cuore di Roma. Per queste motivazioni e in questo clima di rappresentanza inizia il rinnovo della fabbrica di Palazzo Barberini.

Palazzo Barberini, sito a Roma in via delle Quattro Fontane, è oggi la sede, insieme a Palazzo Corsini, della Galleria Nazionale d'Arte Antica (Fig. 1.4). È un palazzo emblema del gusto barocco frutto del genio di illustri architetti come Carlo Maderno, Gian Lorenzo Bernini e Francesco Borromini. Maderno ristrutturò l'edificio medievale esistente, Villa Sforza, caratterizzato da un unico volume compatto; a questo aggiunge due corpi di fabbrica laterali che cingono la facciata est verso il giardino e quella ovest verso via delle quattro fontane; questa configurazione con forma ad "H" è di assoluta innovazione per l'epoca (Fig. 1.5)²⁷; egli, infatti, realizza una struttura ad ali aperte, collegando con un corpo centrale l'ex ala Sforza a quella nuova. L'accesso principale alla dimora avveniva da piazza Grimana, odierna Barberini, o dalla secondaria via Felice, odierna alle quattro fontane e attualmente unico ingresso principale.

La facciata principale è scandita orizzontalmente in tre registri e verticalmente è simmetrica rispetto al portale d'accesso

²⁷ Antinori A. (2003), Roma: palazzo Barberini alle Quattro Fontane, in Storia dell'architettura italiana. Il Seicento, in Scotti Tosini A. (a cura di), Electa, Milano, tomo I, pp. 140-145.



Fig. 1.4. Facciata principale Palazzo Barberini, vista dall'ingresso su via delle Quattro Fontane (Fotografia dell'autore)

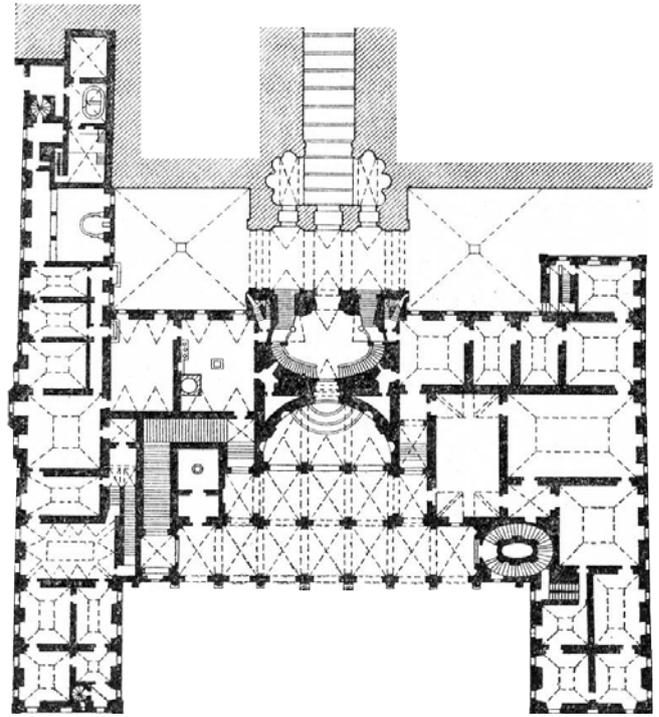


Fig. 1.5. Pianta piano terra di Palazzo Barberini (Retrieved from <https://wiki.ead.pucv.cl/Archivo:PlantaBarberini.jpg> last accessed 18/03/2024)

principale ripartendosi in sette assi di bucatore. I registri orizzontali sono cadenzati architettonicamente da bucatore ad arco a tutto sesto incorniciate da paraste che salendo vanno dall'ordine dorico al corinzio. Al centro della facciata è presente lo stemma della famiglia Barberini riconoscibile dalle tre api, simbolo della famiglia e richiamate in quasi tutti i particolari architettonici di facciata come negli echini di capitelli ionici o nelle metope. Sopra la parte porticata si eleva una finta loggia vetrata pensata da Bernini nel 1629. Francesco Borromini invece fu incaricato di realizzare diversi particolari architettonici, come le finestre del piano nobile nel corpo centrale e la rampa retrostante (Fig. 1.6).



Fig. 1.6. Facciata retrostante di Palazzo Barberini, vista dalla rampa progettata da Francesco Borromini (Fotografie dell'autore)



Fig. 1.7. Scalone a pozzo quadrato di Palazzo Barberini progettato da Gian Lorenzo Bernini, 1630 (Fotografia dell'autore)



Fig. 1.8. Scalone elicoidale di Palazzo Barberini progetto di Francesco Borromini, 1633-34 (Fotografia dell'autore)

Attraverso le arcate del piano terra si accede al portico articolato in due file da sette e cinque campate a volta a crociera; questo spazio era inizialmente utilizzato per posteggiare le carrozze e accedere ai giardini pensili retrostanti.

A questo ambiente si accede attraverso due scale collocate a destra e sinistra del corpo principale e che si configurano come l'emblema del gusto barocco romano in un risultato di grandioso sfarzo architettonico. La prima scala del 1630, progettata da Bernini, ha un impianto a pozzo quadrato e si innesta in una complessa articolazione di livelli perché si inserisce sulla preesistente ala settentrionale dell'edificio Sforza collegando l'ingresso principale sul cortile con la già esistente scalinata. Bernini riuscì a ovviare le complessità architettonico-distributive accentuando le proporzioni monumentali e lo stile aulico nello sviluppo dello scalone. Le rampe sono sorrette da colonne binate fino al piano primo per poi mutarsi in pilastri per i restanti piani mentre le pareti laterali ospitano nicchie con statue (Fig. 1.7). Il secondo scalone del 1633-34, realizzato da Borromini, presenta un impianto elicoidale a pianta ovale ed era destinato a una circolazione prettamente di natura privata, oggi invece è utilizzato come uscita del percorso museale. Esso si sviluppa con una pianta ovale schiacciata longitudinalmente avvitandosi attorno al suo asse di rotazione; è composto da dodici colonne doriche binate il cui capitello è decorato con piccole api per ogni girata (Fig. 1.8). La complessità e la maestosità di questi due scaloni ha reso ancora più affascinante Palazzo Barberini che vede il connubio del lavoro di grandi maestri italiani del XVII secolo.

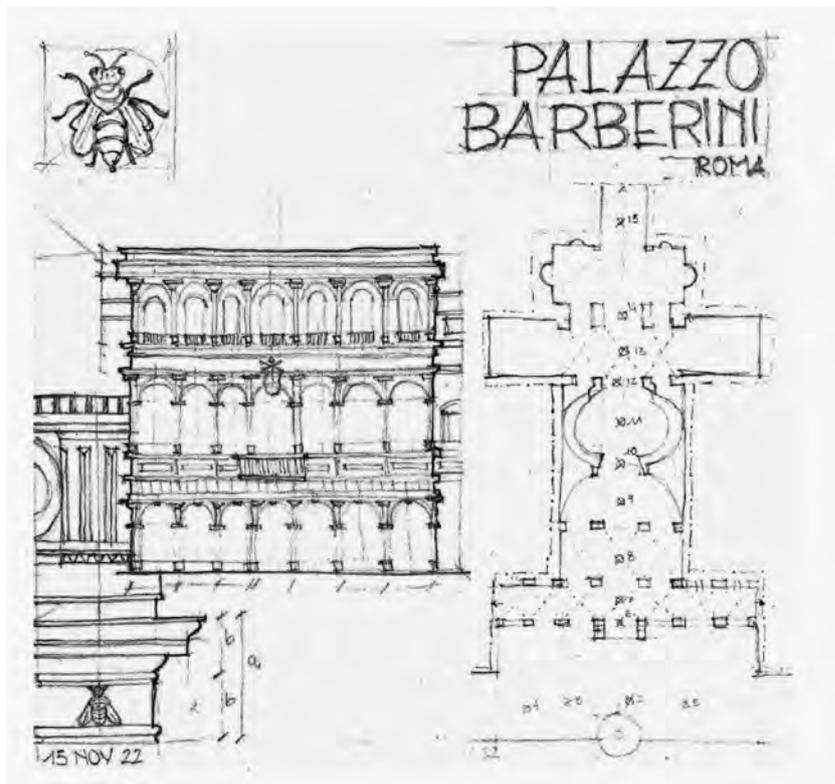
Al piano nobile si colloca il salone di rappresentanza che è di grande impatto visivo grazie all'immensa volta affrescata con il Trionfo della Divina Provvidenza e il compiersi dei suoi fini sotto il pontificato di Urbano VIII di Pietro da Cortona nel 1632-39. L'affresco è uno splendore di illusionismo organizzato in finte trabeazioni che incorniciano un cielo aperto, animato da scene che simboleggiano il buon governo e le virtù di papa Urbano VIII e della sua famiglia.

I discendenti della famiglia Barberini sono rimasti proprietari del palazzo fino al 1955 occupando però, nel tempo, sempre meno spazio; infatti già nel 1949, lo stato italiano acquistò il palazzo utilizzandolo come sede della Galleria Nazionale d'Arte Antica, collezione che ospita famose opere come "Narciso" (1597-99) e "Giuditta ed Oloferne" (1600-02) di Michelangelo Merisi detto il Caravaggio, "Ritratto di Enrico VIII" (1536-37) di Hans Holben il Giovane, "La Fornarina" (1520 circa) di Raffaello Sanzio e la statua della "Vestale Tuccia, o La Velata" (1743) di Antonio Corradini.

4.2 Le fasi del rilievo

Palazzo Barberini è ubicato all'interno di un tessuto edilizio molto compatto e articolato, si trova infatti nell'area del secondo rione, quello di Trevi, (R. II) nel centro storico di Roma. L'immobile ospita quotidianamente migliaia di turisti; durante l'autunno del 2022 vi erano in atto i cantieri di restauro della sola facciata laterale e retrostante anche se sarebbero stati necessari per tutto l'immobile. Un progetto di restauro di tale entità necessita l'organizzazione di un piano conoscitivo di rilievo finalizzato alla comprensione delle pratiche

Fig. 1.9. Disegno schematicizzato realizzato sul posto e proporzionato a vista (Elaborazione dell'autore)



progettuali idonee da mettere in atto. La campagna di rilievo, portata avanti nel corso dell'attività formativa, si è svolta su due sessioni parallele: una prima laser scanner e una seconda fotogrammetrica con lo scopo di comprendere quale delle due tipologie fosse più sostenibile, da un punto di vista dell'abbattimento delle tempistiche e dei costi, e idonea alla sicurezza del personale e dei fruitori del luogo.

²⁸ Disegno schematico e proporzionato a vista realizzato sul posto.

Per prima cosa è stato realizzato un eidotipo²⁸ di prospetto, di pianta e dei particolari architettonici del palazzo; sulla pianta si sono andati a individuare i punti di ripresa per il rilievo scanner e sul prospetto la quantità di sovrapposizione minima per il rilievo fotogrammetrico (Fig. 1.9). Tale progettazione del posizionamento della testa scanner e della sovrapposizione degli scatti si rende necessaria per un efficiente controllo dell'operato digitale del rilievo e permette, nel momento dello scaricamento dei dati e della post-produzione, di comprendere e superare eventuali limiti o mancanze del progetto di rilievo. Per il rilievo scanner, o Terrestrial laser scanning (TLS), è stato impiegato lo scanner dell'azienda MicroGeo Z+F IMAGER® 5016 con flash integrato, utile per le aree dove vi è poca luce, e fotocamera integrata per le riprese equirettangolari da 80 MP. Questo scanner permette di acquisire dati, fino a 1 milione di punti al secondo, a una distanza massima di 360 m dalla testa rotante rimanendo estremamente preciso (Fig. 1.10). Questa tipologia di scanner, fra quelli in commercio, è uno dei più sostenibili poiché certificato come "eye-safe" ovvero il laser è di classe 1²⁹ e può essere quindi impiegato anche in aree pubbliche senza alcun tipo di restrizione e/o danno a terzi.

²⁹ «Laser, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificazione della Luce attraverso un'Emissione Stimolata di Radiazioni), produce un intenso fascio di luce altamente direzionale. L'esposizione di alcuni tipi di laser può provocare danni al corpo umano in particolar modo agli occhi e alla pelle. Il centro CDRH, Center for Devices & Radiological Health (Centro per i Dispositivi & Salute

La scelta dei punti di ripresa scanner si è concentrata su quelle aree che potevano creare maggiori problemi: i fornicci del porticato, le fasce sovramarcapiano, le differenti sporgenze e i coni d'ombra sotto la postazione della testa scanner il cui campo visivo è di 360°x320°. Sono state eseguite 15 scansio-

ni in tutto per la facciata principale e la rampa retrostante borrominiana, ognuna delle quali aveva una durata di circa 5 minuti nei quali era possibile, tramite il software collegato alla postazione scanner allineare manualmente le scansioni precedentemente fatte. Tale procedimento è stato possibile poiché prima di iniziare le scansioni si è andati a geolocalizzare la testa scanner tramite il sistema di coordinate WGS 84³⁰; questa possibilità consente di ottimizzare le tempistiche e di abbattere maggiormente i minimi margini d'errore valutando, inoltre, la bontà della scansione già *in loco* ed eventualmente avere la possibilità di ripeterla. Al termine di ogni scansione è possibile scattare immagini equirettangolari³¹ utili per la realizzazione di *virtual tour* o *interactive image*. L'allineamento e la l'unione delle nuvole di punti, post-campagna di rilievo, su software come Autodesk Recap ha riportato un margine d'errore complessivamente inferiore ai 4 mm (Fig. 1.11). Le scansioni laser acquisite hanno consentito di generare un modello 3D affidabile e accurato supportato dal software di modellazione matematica Rhinoceros. Il rilievo fotogrammetrico, mirato alla realizzazione di texture ad alta definizione, è stato impiegato sulla facciata principale di Palazzo Barberini, sulle nicchie laterali poste sulla rampa borrominiana retrostante e sulla statua della Velata Tuccia (1743) di Antonio Corradini, posta al primo piano nobile. Sono stati impiegati il drone DJI Mavic mini 2, con fo-

Radiologica), ha classificato i laser in diverse categorie basate sulla forza d'uscita e sulla lunghezza dell'onda. La classe laser 1 è considerata dalla attuale conoscenza medica sicura». (Last accessed 24/06/2024 <https://www.apinex.com/it/classificazione-dei-laser.html>).

³⁰ World Geodetic System 1984, conosciuto anche come EPSG:4326, è un sistema di coordinate geografiche geodetico, mondiale, basato su un ellissoide di riferimento elaborato nel 1984.

³¹ Generalmente sono panorami sferici 360°x180° proiettati su di un piano; spesso sono ottenute da fotocamere a 360° dedicate o dall'unione di una serie di scatti utilizzando un software di stitching a 360°.



Fig. 1.10. Scanner laser utilizzato per il rilievo scanner di Palazzo Barberini (Fotografia dell'autore)

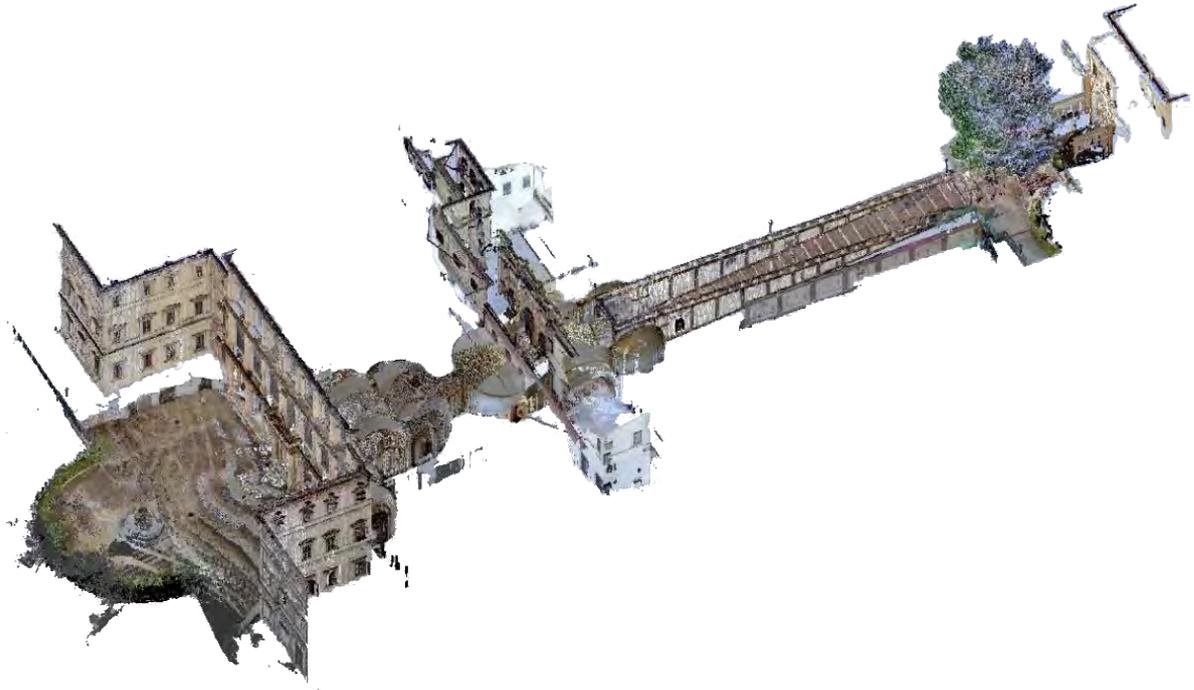


Fig. 1.11. Nuvola di punti ricavata dal rilievo Laser Scanner di Palazzo Barberini (Elaborazione dell'autore)

³² Il gimbal è uno strumento che permette di ridurre notevolmente o eliminare le vibrazioni e stabilizzare fotografie e video grazie a un sistema di rilevamento e contrasto dei movimenti indesiderati che si basa su sensori e motori avanzati.

to camera integrata da 12 megapixel e video con risoluzione a 4k stabilizzato, ottimale poiché essendo di piccole dimensioni e rimanendo sotto il peso di 250 g rientra nella classe C0 e richiede patentino A1-A3; e una macchina fotografica Reflex Sony Alpha A7C con treppiedi con testa Gimbal³² della DJI estendibile fino ai 12 m per una ripresa a Close-range photogrammetry (CRP). Questa tipologia di rilievo si basa sulla SfM, o sistema *Structure from Motion*, che è una tecnica di *range imaging* che permette di realizzare immagini tridimensionali partendo dalla connessione di punti omologhi e target di immagini bidimensionali; il limite di questa tecnologia sono le condizioni di illuminazione che potrebbero alterare la cromia e creare un allineamento meno preciso delle camere.

Come per il rilievo laser scanner, anche in questo caso, l'eidotipo di prospetto dell'immobile è servito per redigere il piano di volo del drone e lo studio della sovrapposizione di scatti manuali con macchina fotografica. Per il prospetto si è deciso di dividere fittiziamente la facciata in 5 strisciate verticali e in 4 orizzontali, che consentivano una sovrapposizione degli scatti del 60%; per la programmazione del piano di volo del drone ci si è tenuti a una distanza di facciata costante di circa 5 m e si è deciso di scattare foto con un angolo di 45° al fine di ottenere più punti omologhi possibili tra le aree rilevate con scanner e quelle d'ombra. Le fotografie riprese con la macchina fotografica sono state scattate in modalità manuale e formato .raw con ISO a 100, apertura a f/16 e tempo di scatto 1/100s poiché la giornata era soleggiata; mentre le immagini ricavate da drone sono state prese in modalità automatica, con doppio formato .raw e .jpeg. Le stesse modalità e parametri si sono utilizzati anche per il rilevamento fotogrammetrico delle nicchie locate all'inizio della rampa borrominiana dal lato della facciata retrostante. Le due tecniche di rilievo fotogrammetrico si sono svolte in circa una ventina di minuti per strumento impiegato. Una volta scaricate tutte le immagini sono state elaborate sul software Agisoft Metashape 1.8.5 che

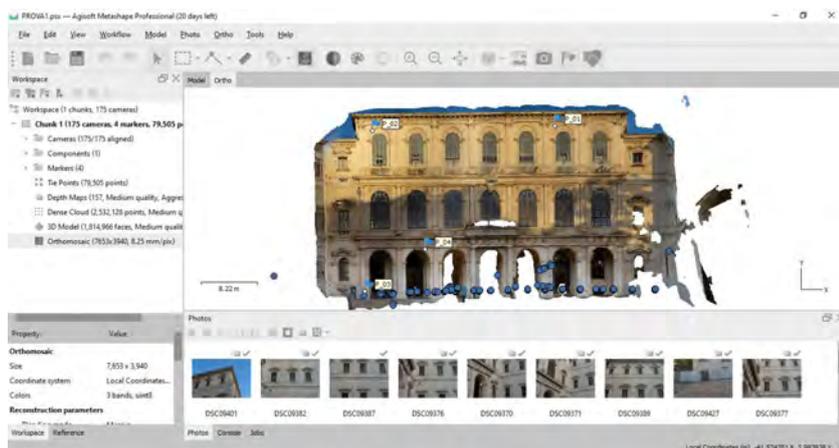


Fig. 1.12. Ortomosaico elaborato di Agisoft Metashape della facciata principale di Palazzo Barberini (Elaborazione dell'autore)

ha permesso, dopo l'allineamento delle camere, di ottenere una nuvola sparsa e densa, la mesh, la texture ad alta risoluzione ed infine l'ortomosaico (Fig. 1.12).

Una volta realizzate le due campagne di rilievo si è passati all'elaborazione dei dati ottenuti. Per prima cosa sono state comparate le due nuvole di punti ottenute dalla scansione laser e da quella fotogrammetrica; l'equiparazione sul software Cloudcompare ha fornito un dato molto positivo poiché la differenza metrica tra le due nuvole era inferiore ai 3 mm. È facilmente comprensibile che la nuvola scanner sia maggiormente precisa nel dato metrico, andando a rispettare in maniera più dettagliata le reali geometrie dell'immobile; mentre quella fotogrammetrica ha una risoluzione altissima nella ricezione dei colori e della texture. È stato quindi fondamentale unire le due scansioni per ottenere dati diversificati ma che fossero in grado di interagire e integrarsi tra di loro. È sempre utile confrontare i rilievi con le fotografie storiche o i precedenti rilievi col fine di comprendere quali siano state le trasformazioni subite dal caso studio (Fig. 1.13). In questo caso si è deciso di sovrapporre la texture, ricavata dalla nuvola di punti fotogrammetrica, al rilievo storico settecentesco; com'è possibile vedere la differenza è decisamente accettabile considerando che le strumentazioni utilizzate sono estremamente differenti e non paragonabili essendo di due differenti epoche storiche.



Fig. 1.13. Sovrapposizione della texture ricavata dal rilievo fotogrammetrico e del rilievo originale settecentesco della facciata principale di Palazzo Barberini (Elaborazione eseguita durante l'attività formativa dei dottorati nazionali di Rilievo e Rappresentazione dei Beni Architettonici che si è tenuta presso l'Università di Roma1 – La Sapienza)

5. Conclusioni

³³ Historical o Heritage Building Information Modelling.

La restituzione di modelli digitali ad alta risoluzione di complessi architettonici, archeologici e culturali in generale è di grande supporto per la corretta comprensione delle tecniche sensorie. Arricchendo le competenze degli operatori del settore culturale è possibile realizzare studi più dettagliati e in grado di promuovere anche l'inclusione sociale tramite l'introduzione di nuove pratiche di accesso ai servizi culturali come la condivisione di dati in network più coesi e interoperabili, su piattaforme come l'HBIM³³, e in modalità virtuale come la realtà aumentata, il 3D virtual tour, la mixed reality e il metaverso. La ricerca presentata si concentra sul legame che è possibile instaurare tra le diverse metodologie di rilievo integrato per una prassi operativa sostenibile e col fine di restituire modelli di studio e visualizzazione 3D fruibili, non solo dalla comunità scientifica ma anche e soprattutto per una divulgazione delle informazioni a livello di mediazione museale turistico e sociale. Per poter comprendere al meglio se le due tipologie di rilievo integrato usate fossero davvero più sostenibili di quello tradizionale si è deciso di fare un'analisi per analogie e differenze delle due modalità. Il dato più immediato e significativo riguarda la notevole ammortizzazione delle tempistiche del rilievo integrato rispetto a quello tradizionale; infatti, si sono rese necessarie circa 12+12 ore per rilevare nel completo tutte le aree esterne di Palazzo Barberini e post-produrre i dati. L'immobile ha una superficie molto ampia e se si fosse realizzata una campagna di rilievo diretto si sarebbero impiegati sicuramente più giorni con la conseguente chiusura e deviazione delle aree accessibili al pubblico e una notevole perdita dal punto di vista economico per il museo. Un altro aspetto fondamentale è il superamento della frammentazione operativa dal momento che con un'unica campagna di rilievo si acquisiscono dati di diversa natura e vengono resi interagibili in un unico database; questo non è possibile col rilievo tradizionale poiché si eseguono campagne mirate per ogni tipologia di indagine: cromatica, metrica, del degrado, ecc. Tale aspetto risulta essere molto interessante poiché grazie a un singolo rilievo è possibile studiare il bene in maniera esaustiva e tramite differenti approcci e chiavi di lettura. La catalogazione e la fruizione di dati da parte della comunità scientifica è molto rilevante perché le attività di scambio di informazioni risultano essere più snelle e con un network più coeso e interoperabile dal momento che le nuvole di punti sono supportate da programmi come l'HBIM. Per la digitalizzazione del patrimonio culturale, i dati principali sono ottenuti mediante tecniche fotogrammetriche, che nella maggior parte dei casi non possono essere superate in termini di accuratezza e quantità di dati da quelli forniti dalle tecniche LiDAR; mentre l'analisi cromatica può essere esclusivamente effettuata con tecniche fotografiche. I metodi di scansione laser hanno diversi punti di forza che le rendono piuttosto utili come sistemi complementari nella digitalizzazione degli obiettivi del patrimonio culturale. Così, la tecnica Airborne LiDAR scanning, o ALS, è generalmente utile nel caso di aree coperte da vegetazione e/o nel caso di immagini fotografiche rumorose, quando la stima del modello 3D risulterebbe carente per nuvole di punti di qualità.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Adami A., Balletti C., Guerra F., Vernier P. (2010), Dalla scansione laser al modello: il caso esemplare di San Francesco della Vigna. In Borgherini M., Guerra A., Modesti P. (edited by). *Architettura delle facciate: le chiese di Palladio a Venezia. Nuovi rilievi, storia, materiali*, Marsilio, Venezia, pp. 195-206. ISBN 8831798049.
- Amendola A. (2017), Lusingare la vista. Il colore e la magnificenza a Roma tra tardo Rinascimento e Barocco, in *Dentro il Palazzo*, Edizioni Musei Vaticani, volume 2.
- Antinori A. (2003), Roma: palazzo Barberini alle Quattro Fontane, in *Storia dell'architettura italiana. Il Seicento*, in Scotti Tosini A. (a cura di), Electa, Milano, tomo I, pp. 140-145.
- AA.VV. (2011), *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*, Chiavoni E., Filippa M. (a cura di) Gangemi Editore, Roma.
- AA.VV. (2011), *Verso un disegno "integrato": La tradizione del disegno nell'immagine digitale*, Gangemi Editore, Roma.
- AA.VV. (2017), *De-Sign Environment Landscape City*, G. Pellegrini (a cura di) David and Matthaus S.r.l., Serrungarina (PU).
- AA.VV. (2018), *De-Sign Environment Landscape City*, G. Pellegrini (a cura di), Genova University Press, Genova.
- Alghamdi Y., Munir A., La H. M. (2021), Architecture, Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles, in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 9-20, 1 Nov. 2021.
- Alsuhli G., Fahim A., Gadallah Y. (2022), A survey on the role of UAVs in the communication process: A technological perspective, Computer Communications, In *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 194.
- Barone V. (2020), Reale e virtuale per il patrimonio culturale. Nuovi ponti attraverso antiche frontiere, in *Paesaggi domestici*, a cura di Barone V. e Pagano A., L'Erma di Bretschneider, pp. 219-226.
- Beldon Scott J. (1991), *Images of nepotism. The Painted Ceilings of Palazzo Barberini*, Princeton University Press, New Jersey.
- Bertelli C., Briganti G., Giuliano A. (2009), *Storia dell'arte italiana*, Bruno Mondadori, Milano, Volume 3.
- Bertocci S., Bini M. (2012), *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Città Studi edizioni, Firenze.
- Bertocci S., Farneti F. (2020), *L'architettura dipinta: storia, conservazione e rappresentazione digitale. Quadraturismo e grande decorazione nella pittura di età barocca*, dida Press, Firenze (Last accessed 22/06/2024 https://issuu.com/dida-unifi/docs/l_architettura_dipinta_bertocci_farneti).
- Bevilacqua M.G., Russo M., Giordano A., Spallone R. (2022), 3D Reconstruction, Digital Twinning, and Virtual Reality: Architectural Heritage Applications, In *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Christchurch (New Zealand), 12-13 March 2022, pp. 92-96.
- Castagnaro C., Crispino D. (2022), Drone flight as a knowledge tool for Cultural Heritage, in Parrinello S., Barba S., Dell'Amico A., di Filippo A., a cura di. *D-SITE. Drones - Systems of Information on Cultural Heritage for a spatial and social investigation*, 16-18 giugno 2022, Pavia, Italia. Pavia: Pavia University Press. pp. 184-191.
- Clini P. (2008), *Il rilievo dell'architettura*, Aracne, Roma.
- Clini P., Quattrini R. (2011), Le panoramiche sferiche per il rilievo e la comunicazione dell'architettura, un nuovo approccio alla realtà virtuale speditiva. In AA. VV., *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*, Ricerca PRIN 2007, Gangemi, Roma, pp. 239-251.
- Circolo Ufficiali delle Forze Armate d'Italia (2001), *Palazzo Barberini*, Palombi Editori, Roma.
- Di Monte M. (2015), Settecento elegante, illuminismo selvaggio. La decorazione degli appartamenti della principessa Cornelia Costanza a Palazzo Barberini, in atti di convegno *Imatges del poder a la Barcelona del Set-cents. Relacions i influències en el context mediterrani*, Palau Moja, Barcellona, 28- 29/04/2015 (Last accessed 20/06/2024 https://www.academia.edu/es/28649385/Settecento_elegante_illuminismo_selvaggio_La_decorazione_degli_appartamenti_della_principessa_Cornelia_Costanza_a_Palazzo_Barberini_I_parte).
- Docci M., Maestri D. (2012), *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma.
- Duran Z., Ozcan K., Atik M. E. (2021), Classification of Photogrammetric and Airborne LiDAR Point Clouds Using Machine Learning Algorithms. In *MDPI Journals*, n. Drones 2021 5, 104. (Last accessed 24/06/2024 <https://doi.org/10.3390/drones5040104>).
- Gavallotti Cavallero D. (1984), Il programma iconografico per la Divina Sapienza nel Palazzo Barberini: una proposta, in *Studi in onore di Giulio Carlo Argan*, Multigrafica Editrice, Roma, pp. 269-290.
- Inzerillo L., Acuto F., Di Mino G., Uddin M. Z. (2022), Super-Resolution Images Methodology Applied to UAV Datasets to Road Pavement Monitoring. In *MDPI Journals*, n. Drones 2022 6, 171 (Last accessed 24/06/2024 <https://doi.org/10.3390/drones6070171>).
- Ioniță S., Turcanu-Carutiu D. (2022), Use of Drones for Digitization and Monitoring the Built Cultural Heritage: Indoor and Outdoor, in Turcanu-Carutiu D. a cura di, *Heritage - New Paradigm*, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.100346 (Last accessed 17/06/2024 <https://www.intechopen.com/chapters/78976>).
- Liang Y., Fan X, Yang Y., Li D., Cui T. (2022), Oblique View Selection for Efficient and Accurate Building Reconstruction in Rural Areas Using Large-Scale UAV Images. In *MDPI Journals*, n. Drones 2022 6, 175. (Last accessed 24/06/2024 <https://doi.org/10.3390/drones6070175>).
- Limongiello M., et al. (2021), Digital survey and reconstruction for enhancing epigraphic readings with eroded surface. In *MetroArcheo 2021, IMEKO TC4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage*, 22-24 ottobre 2020, Università di Trento.
- Lo Turco M., Mattone M., Rinaudo F. (2017), Metric survey and bim technologies to record

- decay conditions, In *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-5(W1), pp. 261-268.
- Messaoudi K., Oubbati O. S., Rachedi A., Lakas A., Bendouma T., Chaib N. (2023), A survey of UAV-based data collection: Challenges, solutions and future perspectives, In *Journal of Network and Computer Applications* 216.
- Mochi Onori L., Vodret R. (1998), *Capolavori della galleria Nazionale d'Arte Antica*. Palazzo Barberini, Gebart, Roma.
- Nilson T., Thorell K. (2018), *Cultural Heritage Preservation: The Past, the Present and the Future*, Författarna och Halmstad University Press, Halmstad - ISBN: 978-91-87045-95-0 (pdf).
- Pellegrini G., Salvetti F., (2020). Advanced representation for preservation and communication of cultural heritage. In *XVIII International Forum Le Vie dei Mercanti World Heritage and Contamination* - ISBN:97888-492-3937-9.
- Pellegrini G. (2015), New applications of integrated survey on UAV platform for architecture and environment. In AA.VV. *Proceedings of VII Convencion de Agrimensura*, La Habana, 23/26 Septiembre 2015. p. 1-8, La Habana: La Habana Editorial Obras, ISBN: 9789592471368.
- Pellegrini G. (2015), Rilevare per conoscere, Rappresentare per descrivere. In: *PATRIMONIO ARTISTICO CULTURALE PAESAGGISTICO*, GS Digital, Genova, pp. 7-16.
- Remondino F. (2011), Heritage recording and 3D modelling with photogrammetry and 3D scanning, in *Remote Sensing*, 3 (6), pp. 1104-1138 (Last accessed 20/06/2024 <https://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>).
- Richards J.A., Jia X. (2006), *Remote sensing digital image analysis. An introduction*, Fourth Edition Berlin.
- Rinaudo, F., Chiabrandò, F., Lingua, A., Spanò, A. (2012), Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer, In *IAPRSS&IS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress*, 25 August - 01 September 2012, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B5, pp. 583-588.
- Sharma V. (2019), Advances in Drone Communications, State-of-the-Art and Architectures. In *MDPI Journals*, n. 2019, 3, 21.
- Spagnolo M. (2011), I luoghi della cultura nella Roma di urbano VIII, in *Atlante della Letteratura*, in Luzzatto S., Pedullà G. (a cura di), Einaudi, Torino, pp. 387-408.
- Steenbeek A., Nex F. (2022), CNN-Based Dense Monocular Visual SLAM for Real-Time UAV Exploration in Emergency Conditions. In *MDPI Journals*, n. Drones 2022 6, 79.
- Tabarrini M. (2014), I due scaloni d'onore di palazzo Barberini: tradizione, innovazione e fortuna, in *LA FESTA DELLE ARTI. Scritti in onore di Marcello Fagiolo per cinquant'anni di studi*, a cura di Cazzato V., Roberto S., Bevilacqua M., Gangemi Editore, volume I, pp. 402-411.
- Teulière C., Marchand E., Eck L. (2015), 3-D Model-Based Tracking for UAV Indoor Localization, In *IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS*, vol. 45, no. 5, pp. 869-879, May 2015.
- Venturini L. (2013), *UAV. Profili giuridici*, Tesi di dottorato di ricerca in diritto ed economia dei sistemi produttivi, dei trasporti e della logistica, relatore/tutor prof. Rosafo E. Università degli Studi di Udine.
- Vignogna A. (2018), *Swarm of drones: il futuro delle tecnologie autonome*, Tesi di dottorato di ricerca in informatica per il management, relatore/tutor prof. Mollona E. Università degli Studi di Bologna.
- Zammar L. (2017), *Scenography at the Barberini court in Rome: 1628-1656*, Tesi di dottorato di ricerca, University of Warwick.

**Il bianco e il nero a Genova nel Medioevo.
La pietra tra simbolo e materia**

Prefazione

Il contributo intende offrire una lettura della storia antica genovese attraverso i colori dei suoi materiali, le pietre e i marmi che ancora oggi riaffiorano tra gli intonaci dei vicoli. La porzione di territorio su cui sorge Genova, caratterizzata da un ricco sottosuolo compreso tra l'anfiteatro di calcari marnosi verso l'arco montano e le formazioni ofiolitiche sulle coste, ha inevitabilmente determinato la sua immagine, per i contemporanei e per i posteri.

¹ *Mappatura, catalogazione e digitalizzazione schede delle logge medievali genovesi. Attività di ricerca affidata dalla Fondazione Franzoniana ETS, 2022-2025, Genova.*

La ricerca, che si innesta sul lavoro di mappatura e analisi storico-architettonica delle logge medievali genovesi¹, è finalizzata all'implementazione dell'indagine sulle strutture medievali delle logge nella mappatura di tre sestieri al fine di riportare un'analisi completa di ciascun manufatto sotto diversi profili.

Attraverso un inquadramento nel contesto sociale, politico e commerciale dell'epoca, ci si è soffermati sulla funzione rappresentativa dei materiali da costruzione anticamente utilizzati, sugli apparati decorativi e sull'impatto visivo che tali strutture hanno avuto nel corso dei secoli, tali da far conoscere Genova come la "città di pietra".

Ci si propone così di indirizzare la lettura dell'attuale centro storico verso una comprensione che deriva non solo dai dati archivistici e storici, ma, soprattutto, dall'interpretazione dei materiali, della forma e dell'immagine che restituisce ai nostri occhi una città complessa, originale, dal cuore antico e fortemente legato al suo territorio.

1. I colori della Genova medievale

Agli occhi ammirati dei viaggiatori, Genova nel Medioevo offriva uno spettacolo da non dimenticare: costruita intorno al porto, mostrava un nucleo compatto che si diradava nelle aree suburbane con splendide ville in mezzo alla vegetazione. A partire dalla testimonianza del Petrarca, una caratteristica costante dell'abitato era la tipologia degli edifici, di cui ogni osservatore coglieva alcune caratteristiche.

Un ignoto viaggiatore del 1344 era stupito per l'abbondante

presenza di marmi, che denotava la ricchezza degli abitanti: «Da Nizza passammo lungo il castello di Monaco [...] e così per mare fino a Genova, città congestionata ove sono edifici di marmo elevati come rupi»². Nel 1407 un poemetto di anonimo esaltava «*candida cum nigris et marmora, qualia summis / illicet esse solent turrata palacia regum*»³. Nel 1436 il fiorentino Giannozzo Manetti era colpito dalla bicromia e descriveva i «palazzi privati in marmo, in parte bianco, in parte nero, variamente diversi fra di loro con piacevole effetto»⁴. Se dal mare appariva come un arco di pietra ai piedi dei monti, per chi attraversava le sue strette vie lo scenario non era meno sorprendente, con l'altezza inusitata delle costruzioni i cui tetti sembravano raggiungere «*auras nubiferas*», le dimore regali con ampie finestre decorate, le file di colonnati a perdita d'occhio. Così la descriveva il Filelfo nel 1448⁵.

Nonostante le iniziali strutture lignee persistessero come casi isolati fino al XV secolo, nella storia architettonica della città vi era stato un largo impiego di materiali lapidei e di laterizi fin dal 1100, incoraggiato soprattutto per motivi di sicurezza, in considerazione della ridotta distanza tra le costruzioni in legno che era spesso causa di incendi devastanti⁶. La pietra, più costosa, era impiegata negli edifici pubblici e solo parzialmente in alcune dimore private; il laterizio era il materiale abitualmente usato per i piani alti delle case e per l'edilizia popolare⁷.

Oggi i colori del Medioevo genovese si identificano con le facciate a bande alterne in marmo bianco di Carrara e in pietra nera di Promontorio, una caratteristica di forte impatto visivo, in origine assimilata attraverso influssi toscano-emiliani e islamici. Pur mediando con la tradizione costruttiva e decorativa delle vicine regioni geografiche e delle lontane culture del Mediterraneo, Genova elabora un proprio linguaggio architettonico e particolari soluzioni coloristiche. Favorita dalla posizione geografica, a partire dall'XI secolo diventa gradualmente, e via via sempre più attivamente, un crocevia di scambi tra Occidente e Oriente. Passaggio strategico verso il mare e verso l'entroterra, la città si trova al centro di intensi rapporti economico-commerciali e politico-militari.

Tra il XII e il XIII secolo Genova definisce la propria 'forma' dal punto di vista politico, commerciale e urbanistico iniziando a plasmare una propria identità culturale e abitativa attraverso la costruzione di nuove mura, l'ampliamento delle infrastrutture portuali, la disposizione degli insediamenti urbani fortemente condizionati dal ceto dirigente e l'edificazione, o riedificazione, di chiese e conventi.

La prosperità economica recentemente conquistata e le relazioni con i paesi vicini garantiscono la disponibilità di materiale pregiato e di maestranze forestiere. L'abbondanza *in loco* della pietra scura e la possibilità di procurarsi marmi bianchi di provenienza apuana favoriscono le scelte dei Genovesi, adottate in base alle esigenze costruttive, ma con soluzioni sempre qualitativamente convincenti. Se per il portico della *Ripa Maris* risalente al 1133 era stata privilegiata la pietra scura perché offriva caratteristiche di particolare solidità⁸, già alla metà del XII secolo è possibile individuare un primo utilizzo della bicromia nelle porte urbane (fig. 2.1) e nelle chiese di San Damiano e San Donato (fig. 2.2).

² Petti Balbi, G. (2008). *Genova medievale vista dai contemporanei*. Genova: Compagnia dei Librai, pp. 190-191.

³ Belgrano, L. T. (1888). Contribuzioni alla storia di Genova specialmente nella poesia, *ASLi*, XIX, p. 658.

⁴ Petti Balbi, G. (2008). *Genova medievale*, cit., pp. 136-139.

⁵ Braggio, C. (1890). Giacomo Bracelli e l'umanesimo dei Liguri al suo tempo, *ASLi*, XXIII, p. 32.

⁶ Gli incendi raramente rimanevano circoscritti a singole case, più spesso si estendevano alle aree circostanti causando la rovina di chiese e mercati. Tra il 1122 e il 1194 gli analisti registrano ben sei distruzioni di parte dell'abitato dovute al fuoco. Cfr. *Annali genovesi di Caffaro e dei suoi continuatori*, I, pp. 26, 40, 50; II, pp. 185, 197, 241.

⁷ Nella Riviera di Ponente imprese specializzate rifornivano di laterizi il settore edile genovese. I mattoni venivano prodotti *in loco* per sfruttare l'argilla presente in quantità maggiore rispetto al resto del territorio ligure, prevalentemente montuoso e privo di pianure alluvionali. La lavorazione era rigidamente regolamentata a garanzia della buona qualità del prodotto (terra senza impurità, acqua dolce, cottura uniforme, dimensionamento secondo le «giuste misure»). La compravendita del mattone era la più soggetta a frodi per la facilità di limatura sulle dimensioni; fino all'inizio del XVI secolo si registravano tre diverse qualità di mattoni con costi differenti. Cfr. Montagni, C. (1993). *Costruire in Liguria. Materiali e tecniche degli antichi maestri muratori*. Genova: Sagep, pp. 24-43; Boato, A. (2005). *Costruire "alla moderna". Materiali e tecniche a Genova tra XV e XVI secolo*, *Biblioteca di Archeologia dell'Architettura*, 4, Firenze: All'Insegna del Giglio, pp. 48-52.

⁸ Per questa opera pubblica, i lodi consolari stabilivano nel dettaglio materiali e misure. Le colonne dovevano essere tutte in pietra, «*nulla columpna ibi sit de ligno*». Cfr. Grossi Bianchi, L., Poleggi, E. (1980). *Una città portuale del Medioevo. Genova nei secoli X-XVI*. Genova: Sagep, pp. 57-60.

Fig. 2.1. Porta Soprana o di Sant'Andrea. 1155 ca. Foto dell'autore

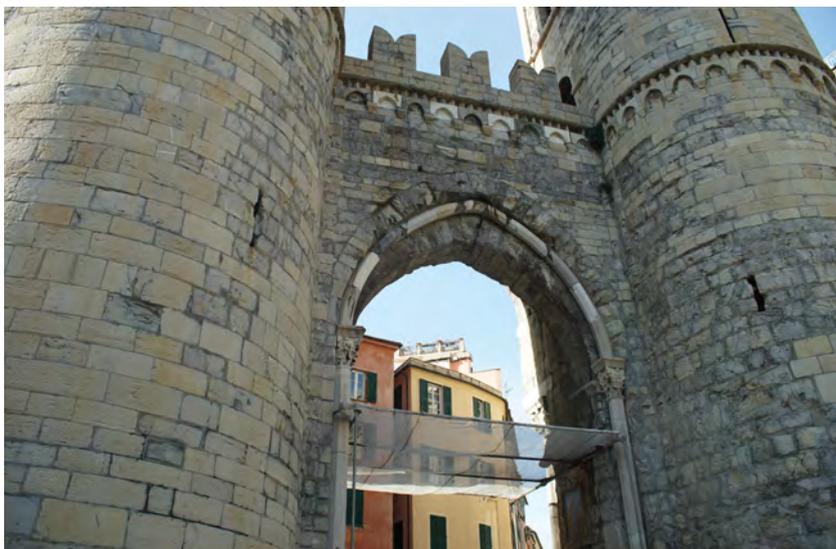
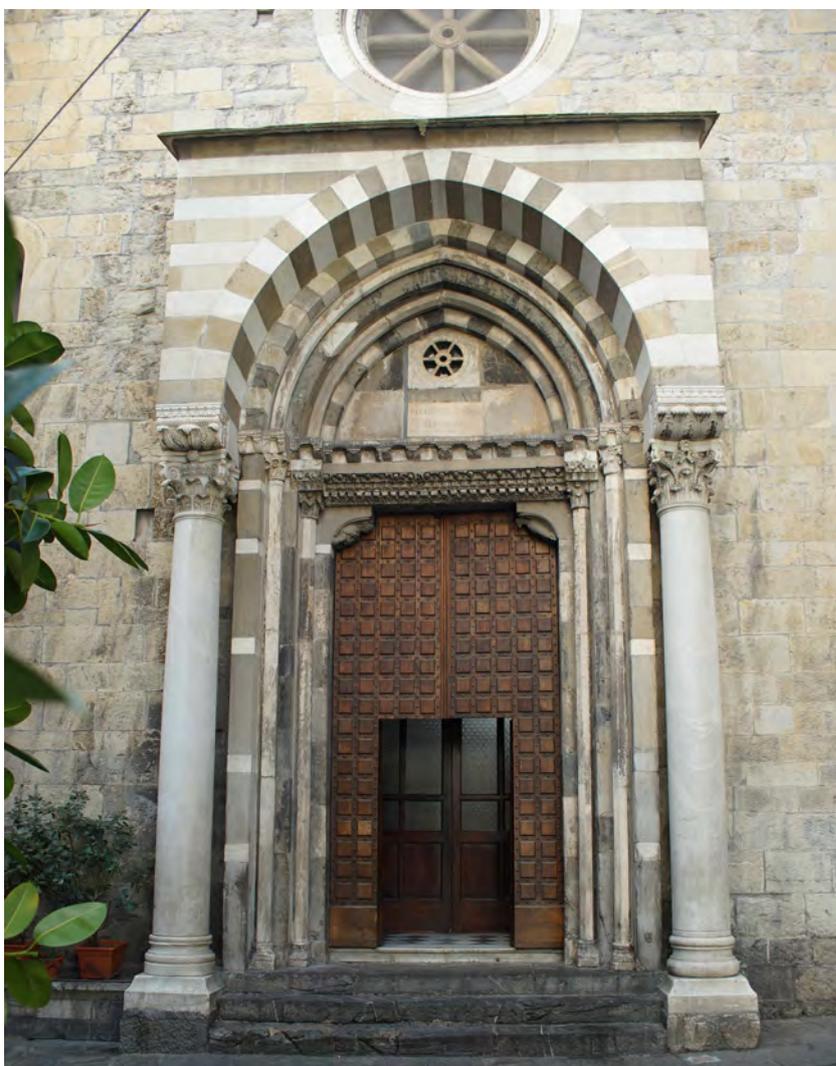


Fig. 2.2. Chiesa di San Donato. XII secolo. Portale di accesso con architrave romano. Foto dell'autore



Alla cattedrale di San Lorenzo, sede vescovile e punto di riferimento per le magistrature civili, vengono riservate forme architettoniche solenni e soluzioni coloristiche che la trasformano in un particolare oggetto di ammirazione e di culto. Durante la sua riedificazione che dura circa un secolo a partire dal 1118, i paramenti murari sono costruiti in parte con la pietra scura e in parte con le bande orizzontali bianche e nere in facciata e nei portali laterali di San Giovanni e di San Gottardo. Quest'ultimo interrompe la tessitura muraria della parete sud con la sua complessa confi-



Fig. 2.3. Cattedrale, portale di San Gottardo. 1155 ca. Foto dell'autore

gurazione a protiro, sovrastato da una loggetta trifora e preceduto da un arco romanico. Le colonne sono di marmo bianco, mentre il paramento bicromo pone in risalto la sua struttura, quasi isolandola dal contesto (fig. 2.3)⁹.

Il linguaggio coloristico è già entrato nel lessico architettonico e decorativo. Quando vengono edificati i portali della facciata in stile goticizzante si adottano stilemi nuovi con l'utilizzo di ornamenti policromi elaborati e inserti polimaterici, che non annullano ma esaltano il partito decorativo sottostante¹⁰. Come sottolinea Di Fabio: «la loro assoluta originalità consiste proprio nell'uso del paramento a fasce bicrome, combinato con la policromia degli elementi verticali, delle sculture, degli smalti, del mosaico, contrapposto al bianco dei capitelli e delle cornici orizzontali, arricchito dagli intarsi marmorei minuti» (fig. 2.4)¹¹. Le fasce bicrome, altrove lisce, si movimentano nei forni in intrecci e torsioni, ma rimangono come *leitmotiv* coloristico di fondo.

Il candore del marmo contribuisce a mettere in risalto alcuni dettagli ornamentali di pregio in un sapiente gioco di chiari-scuri. È il caso dei sarcofagi antichi inseriti nelle pareti (fig. 2.5), dei due altorilievi che rappresentano scene di caccia con uomo e leone posti sui pilastri dell'arcata centrale¹² (fig. 2.6), delle colonnine tortili che delimitano all'esterno gli strombi del portale centrale.

⁹ Un ricco apparato scultoreo illustra il programma iconografico di tipo decorativo-narrativo che si sviluppa a nastro in corrispondenza dei capitelli e degli strombi. Cfr. Di Fabio, C. (1981). I portali romanici della Cattedrale di Genova. Contributo alla storia del Duomo nel XII secolo, *Bollettino d'Arte*, 12, 89-122; Di Fabio, C. (2016) Genova, XII-XIII secolo. Arte in una città europea e mediterranea: percorsi e cesure, *Genova nel Medioevo. Una capitale del Mediterraneo al tempo degli Embriaci* (a cura di Pessa, L.), Catalogo della mostra, Genova, 19 marzo-26 giugno 2016. Genova: Sagep, pp. 54-56.

¹⁰ La facciata è opera di maestranze francesi che tra il 1215 e il 1225 la erigono con le tecniche dell'*opus francigenum*, introducendo nell'apparato decorativo un nuovo lessico che la trasforma in un inedito *medium* di comunicazione. Cfr. Di Fabio, C. (2016). Genova, XII-XIII secolo. Arte in una città europea, cit., pp. 62-63.

¹¹ Di Fabio, C. (1992) "...i porfidi e i marmi naturali", *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, p. 191.

Fig. 2.4. Cattedrale, portali della facciata. Inizio sec. XIII. Decorazione con pietre bianche e nere e marmi policromi. Foto dell'autore

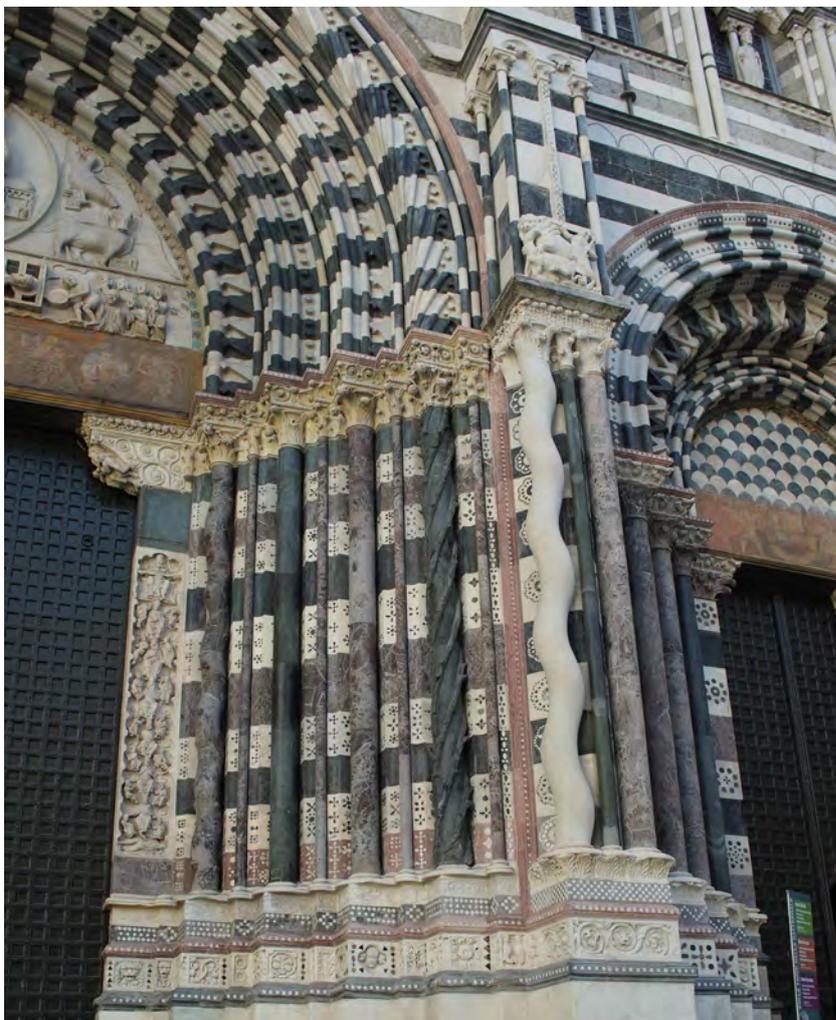


Fig. 2.5. Cattedrale, parete nord. Fronti di sarcofagi romani strigilati, IV-V secolo d.C. Sull'urna collocata inferiormente è ancora leggibile una scena nuziale. Foto dell'autore



Fig. 2.6. Cattedrale, scena di venatio con leone che sbrana un animale e uomo che suona il corno. Inizio sec. XIII. Foto dell'autore



Interrompono l'uniformità delle pareti alcune fronti marmoree di sarcofagi risalenti al III-IV secolo d. C., di cui non è stato possibile finora risalire alle origini. Dufour Bozzo ha ipotizzato una provenienza da Roma sulla base di atti notarili stipulati a Genova *causa mercandi* nell'Urbe, ma nessun documento indica il tipo di attività commerciale¹³, come pure non si trovano riferimenti specifici nel trattato stipulato tra Romani e Genovesi nel 1165, che consentiva completa libertà di importazione ed esportazione, basata genericamente sulla «*bona fide*»: «*libere permittemus Romanos et homines eorum districtus adducere a Roma quascumque merces voluerint in Ianuam*»¹⁴. Restano da chiarire le motivazioni degli inserimenti di queste urne nell'apparato murario: a seguito dei lavori di restauro effettuati nell'Ottocento sembra che in alcuni casi venissero considerate solo materiale da costruzione; non sono stati ancora verificati gli intenti ornamentali legati al pezzo antico né la cosciente selezione tra immagini mitologiche e commemorative¹⁵.

I due altorilievi con scene di caccia, eseguiti da un collaboratore di Benedetto Antelami, risalgono al 1200 circa e si distinguono per la loro raffinata esecuzione, l'inconsueta espressività e la sicura padronanza dello spazio¹⁶. L'immagine del leone è un tema frequente nell'iconografia medievale. Si può dire che abbia un ruolo privilegiato come l'aquila; questi due animali rappresentano, insieme all'angelo e al bue alato, i quattro evangelisti, secondo le visioni di Ezechiele e di San Giovanni nell'Apocalisse. Il leone è rappresentato a partire dall'XI secolo nella decorazione religiosa di ascendenza lombardo-padana, compare ai lati dei portali delle chiese e sulle facciate, sorregge pulpiti e protiri ed è spesso presente negli ornamenti zoomorfi dei capitelli. È ritratto da solo o in lotta contro uomini, animali e mostri, con chiaro intento apotropico. In base al suo atteggiamento sono stati proposti vari significati allegorici, spesso contrastanti: simbolo del Male contro cui l'uomo trova rifugio nella Chiesa¹⁷, ma anche figura del Bene trionfante che si identifica con il Cristo, custode dell'autorità legittima, depositario della giustizia e simbolo di forza morale¹⁸. Dall'originario utilizzo in ambito religioso, la raffigurazione del leone viene poi mutuata anche nel campo dell'edilizia civile e privata.

Nel Due e Trecento la modulazione coloristica che prevede l'alternanza di bianco e nero diventa una prassi diffusa ed è presente sulle facciate delle fondazioni ecclesiastiche degli ordini religiosi (tra queste San Domenico, San Francesco di Castelletto, Sant'Agostino) e delle chiese gentilizie di San Matteo e Santa Maria in via Lata. Anche il Palazzo del Comune, che assume la sua definitiva connotazione di edificio civile tra la fine del XIII e l'inizio del XIV secolo, ha il prospetto caratterizzato dalle stesse modalità cromatiche¹⁹.

Questo costoso schema decorativo diviene uno *status symbol* anche presso alcune famiglie che per censo e potere politico possono competere con la committenza pubblica. Nei palazzi privati il paramento in pietra inizialmente era circoscritto al piano terreno e al primo piano, fino alla cornice di archetti, ed era applicato sulla facciata principale. I piani superiori e gli altri prospetti erano in laterizio a vista. Secondo l'annalista cinquecentesco Agostino Giustiniani, il fatto che molte case

¹² Sulle fonti del simbolismo medievale cfr. Trentini, A. (1971). Iconografia e simbolismo nelle sculture della facciata di S. Lorenzo in Genova, *Studi Genuensi*, VIII, pp. 82-84.

¹³ Dufour Bozzo si basa sui documenti pubblicati nella collana *Notai Liguri del secolo XII*. Cfr. Dufour Bozzo, C. (1967). Sarcofagi romani a Genova. *Quaderni dell'Istituto di storia dell'arte dell'Università di Genova*, n. 5. Genova: F.lli Pagano, pp. 12-14.

¹⁴ Imperiale di Sant'Angelo, C. (a cura di) (1936-1938). *Codice Diplomatico della Repubblica di Genova*, II. Roma: Tipografia del Senato, doc. nn. 8 e 9, pp. 17-27.

¹⁵ Dufour Bozzo, C. (1967). Sarcofagi romani a Genova, cit., 15-18; Dufour Bozzo, C. (1979). Il reimpiego dei marmi antichi nei monumenti medievali e l'esordio della scultura architettonica del "protoromanico" a Genova, *Bollettino d'Arte*, 3, 18, n. 1.

¹⁶ Di Fabio, C. (2016). Genova, XII-XIII secolo. Arte in una città europea, cit., p. 61.

¹⁷ Per i leoni stilofori di area toscana cfr. Baracchini, C., Filieri, M.T. (1992). "De ore leonis libera me domine", *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 126-129.

¹⁸ In alcuni casi la raffigurazione del leone è tratta da sarcofagi romani dove erano rappresentate *venationes* e scene circensi; anche gli avori e i tessuti orientali avevano contribuito a diffondere il tema della caccia. Cfr. Trentini, A. (1971). Iconografia e simbolismo, cit., pp. 84-108.

¹⁹ Grosso, O., Pessagno G. (1933). *Il Palazzo del Comune di Genova*. Genova: Società Ligure di Storia Patria, p. 54.

²⁰ Giustiniani, A. (1834). *Annali della Repubblica di Genova*, I. Genova: Editore Vincenzo Canepa, p. 72.

fossero «lavorate di bianchi e neri marmi per metà insino al secondo solaro», dimostrava «la modestia e parcità dei nostri antichi, i quali non permettevano che le case si fabbricassero insino al tetto con simil struttura, e con tanta spesa. E se ve ne sono alcune lavorate di simiglianti pietre insino al tetto li è stato concesso per avere operato qualche fatto egregio in utilità della patria»²⁰. La scelta dei paramenti è quindi un messaggio di alto contenuto sociale: i prospetti delle dimore esaltano anche coloristicamente le imprese compiute in nome e per conto di Genova.

Oltre alle residenze delle quattro principali famiglie, Doria (fig. 2.7), Spinola, Fieschi e Grimaldi, presentano prospetti bicromi anche altri palazzi, tra cui quelli dei Salvago (fig. 2.8), dei Lercari, dei Cattaneo, dei Camilla e dei Di Negro.

L'uso della bicromia all'esterno degli edifici signorili inizia a declinare nella seconda metà del Quattrocento, quando si fanno strada nuove soluzioni abitative che prevedono la chiusura del portico a piano strada, la creazione di un atrio interno e il rivestimento dei prospetti con intonaco affrescato.

Genova, con la ricchezza del suo centro medievale che presenta un campionario pressoché inesauribile di opere edilizie, ha offerto agli studiosi fin dal secolo scorso la possibilità di mettere a confronto materiali e tecniche di costruzione con le numerose



Fig. 2.7. Palazzi di Lamba Doria e di Andrea Doria. Piazza San Matteo. XIV-XVI secolo. Foto dell'autore



Fig. 2.8. Palazzo Salvago. XIV-XVI secolo. Piazza San Bernardo 26. Foto dell'autore

fonti archivistiche coeve; è così emerso un quadro sotto molti aspetti stimolante, anche se ancora suscettibile di approfondimenti, sulla cultura abitativa dell'epoca e sui suoi protagonisti.

2. Le pietre di Liguria

Le peculiarità geomorfologiche del territorio su cui sorge l'antico nucleo cittadino hanno condizionato le scelte edilizie e architettoniche, consentendo tuttavia la realizzazione di una *facies* urbana originale e coerente²¹.

La città si era sviluppata su una porzione di territorio caratterizzata dalla presenza di marna compatta, la cui ottima capacità come substrato portante forniva un buon appoggio diretto delle murature di fondazione, fino a reggere le molteplici sopraelevazioni che si sono succedute nei secoli.

I litotipi utilizzati durante il Medioevo includono diverse varietà locali come l'ardesia, la pietra di Promontorio, la pietra di Finale, le arenarie di Monte Zatta e Monte Gottero. L'alto grado di lavorabilità e durevolezza e la facile reperibilità di questi materiali, hanno fatto sì che siano stati utilizzati per l'edilizia cittadina e per le opere monumentali. A decorrere dal XVI secolo, quando le esigenze di abbellimento di chiese e palazzi si conformano al gusto più raffinato dei committenti, vengono utilizzati a scopo decorativo vari marmi colorati come il Rosso Levanto, il Verde Polcevera e il Portoro.

Dall'area orientale della Liguria, nella zona tra Lavagna, l'immediato entroterra presso il monte San Giacomo, Chiavari e la Val Fontanabuona, proviene l'ardesia, un materiale ricco di carbonato di calcio la cui struttura a reticolo stratificato permette una facile lavorazione in sottili e leggere lastre, impiegate nelle coperture degli edifici, per gli scalini, la pavimentazione interna ed esterna, la realizzazione di elementi decorativi come architravi di porte e finestre. L'ardesia ligure è un calcare marnoso di color plumbeo-nerastro, dovuto alla presenza di un pigmento grafitico generato dalla trasformazione di sostanze organiche presenti negli strati sedimentari originari, il suo colore è soggetto a schiarirsi quando è esposto alla luce. Uno dei pregi di questo materiale è la facile divisibilità a spacco mediante semplice pressione di un cuneo parallelamente alla scistosità principale; si possono ottenere lastre di grandi dimensioni e dello spessore di pochi millimetri, con superfici particolarmente regolari²².

L'uso dell'ardesia, presente già nella necropoli preromana di Chiavari, è attestato nel 1176 da un atto notarile che rinnova un antico accordo in base al quale i Recchesi dovevano fornire ai Savonesi gli abbadini (clappe) necessari alla copertura della loro chiesa di Santa Maria²³.

Da allora altri documenti testimoniano l'impiego diffuso dell'ardesia lavorata che attraverso i secoli ha avuto una vasta gamma di utilizzazioni, dai muretti a secco, ai pilastri, ai portali, al rivestimento di edifici e di chiese²⁴.

La protagonista principale dell'edilizia medievale genovese è la pietra di Promontorio, una roccia che proviene da banchi di colore scuro e ha la proprietà di diventare lucida quando lavorata. Il nome dato a questa pietra deriva dalla fascia collinare di estrazione, dove affiorano rocce sedimentarie formate da

²¹ Le caratteristiche dell'insediamento urbano dal X secolo, la progressiva connotazione in senso sociale degli spazi, la qualificazione edilizia nelle aree pubbliche e private sono delineate in Grossi Bianchi, L., Poleggi, E. (1980). *Una città portuale del Medioevo*, cit., pp. pp. 33-104.

²² Cortesogno, L., Gaggero, L. (1995). Storia Naturale dell'Ardesia, *Ardesia. Materiale Cultura Futuro* (a cura di Mannoni, T.). Genova: Sagep, pp. 9-15. Secondo Della Torre nell'Ottocento erano identificati quattro tipi di pietre scistose simili all'ardesia: il *tarso*, troppo friabile e inadatto a costruire, la *pietra dolce*, utilizzata per i muri a secco, la *pietra colombina*, di notevole durezza, adatta per elementi architettonici portanti come stipiti e architravi, l'*agro di ardesia*, più siliceo e con scistosità meno sviluppata a causa della minore percentuale di minerali argillosi, difficile da lavorare per la sua compattezza, usato in passato per edifici monumentali e per parti destinate a sorreggere pesi rilevanti. Si veda Della Torre, N. (1838). *Guida del viaggiatore alle cave delle lavagne della Liguria Orientale*, Chiavari: V. Botto Ed., IX-XIV.

Fig. 2.9. Mensola squadrata di appoggio in pietra di Promontorio. Sec. XII. Vico dei Notari. Foto dell'autore



²³ Savioli, L. (1995). Tradizione e Storia della Lavagna, *Ardesia. Materiale Cultura Futuro* (a cura di Mannoni, T.). Genova: Sagep, pp. 17-51; cfr. anche Montagni, C. (1993). *Costruire in Liguria*, cit., pp. 57-60.

²⁴ Così scriveva Giustiniani: «È in questo territorio una lapidicina ossia una vena di pietre rare, e qual si trova in pochi altri paesi. E la pietra, prima che sia veduta dall'aria e dal sole, è di sua natura molto tenera e facile a tagliare quasi come un melone ed una rapa [...] e se ne fanno tra le altre cose lastre di 3 palmi in quadro, sottili quanto è una costa di coltello, nominate dai Genovesi abbaini, de' quali cuoprono le case loro, [...] se ne fanno ancora di queste pietre lastre per far silicati di case, colonnette, fregi, architravi e cornici ed ornamenti di porte e di molti altri edificj. Ed è la pietra come ho detto molto abile al lavorare e paziente al scalpello». Cfr. Giustiniani, A. (1834). *Annali*, cit., p. 92.

²⁵ Marroni, M., Monechi, S., Perilli, N., Principi, G., Treves, B. (1992). *Late Cretaceous flysch deposits of the Northern Apennines, Italy: age of inception of orogenesis-controlled sedimentation*, *Cretaceous Research*, 13, 5-6, pp. 487-504.

²⁶ Alizeri, F. (1877). *Notizie dei professori del disegno in Liguria dalle origini al secolo sedicesimo*, V. Genova: Sambolino, p. 53.

²⁷ Nei turbolenti anni in cui la Repubblica temeva congiure interne e attacchi da potenze straniere, le aperture dentro alle cave potevano offrire rifugio per nascondersi o riunirsi anche a un migliaio di persone. Nel periodo tra il 1629 e il 1635, il Magistrato dei Padri del Comune ordinava di rendere inagibili le cave chiudendole definitivamente e, se necessario, facendole crollare con polvere pirica. Podestà, F. (1904). *Le cave di pietra nera detta di Promontorio*, *Giornale storico e letterario della Liguria*, V, pp. 188-191.

²⁸ Alizeri, F. (1875). *Guida illustrativa del cittadino e del forastiero per la città di Genova e sue adiacenze*. Genova: Sambolino, p. 664.

²⁹ Boscassi, A. (1891). *La cava di pietra nera di Promontorio*, *Giornale Ligustico di Archeologia, storia e letteratura*, XVIII, pp. 476-478.

³⁰ Cfr. Grosso, O. (1933). *Il restauro della torre di Palazzo*, *Genova*, febbraio, p. 103.

alternanze di strati argilloso-arenacei e marnoso-calcarei²⁵. La zona delle cave, che originariamente si estendeva dalle alture dietro Sampierdarena a Capo di Faro, si era via via attestata nel vallone di San Lazzaro a Fassolo, dietro al monastero di San Benigno. Utilizzata nei parati murari, nei pilastri e nelle colonne, o alternata al marmo, la sua presenza è una costante nello scenario urbano (fig. 2.9).

Alizeri, nel descrivere i portali marmorei dei palazzi realizzati tra il XV e il XVI secolo, sostiene che questa pietra non era qualitativamente inferiore al marmo: «Ai portali fin qui ricordati di schietto marmo carrarese, s'avvicendano a chi passeggia le nostre contrade i non pochi scolpiti in bel nero di promontorio che quasi non ardisci dir pietra, cotanto pareggia i marmi di saldezza e di luccore»²⁶.

Questo litotipo non era più stato utilizzato a partire dal Seicento, sostituito con ardesia o pietra di Finale. Il motivo dell'abbandono di un materiale tanto utilizzato per secoli è da ricercarsi nella chiusura definitiva delle cave nel 1635²⁷. Alizeri, nel citare le alture di Promontorio, scrive: «Oggimai non discerni né il come né il dove l'amena collina si sviscerasse a provvedere i macigni nerastri onde si abbellirono cotanti edificj e presero forma cotanti portali»²⁸.

Le cave venivano riscoperte nel 1891, quando alla ricerca di materiale da costruzione si fece saltare una parte del colle, rivelando l'imbocco di una galleria e strumenti da lavoro lì abbandonati. Boscassi scriveva sul *Giornale Ligustico*: «molto probabilmente è da credere che la cava di cui si tratta, sia quella antichissima di pietra nera di Promontorio di cui si era perduta la memoria»²⁹. Dall'inizio del secolo scorso questo materiale è utilizzato nuovamente per il recupero degli antichi manufatti³⁰.

Altri litotipi liguri di varia colorazione, di cui si fa un breve cenno, hanno avuto un utilizzo più circoscritto dovuto soprattutto al costo elevato; meno presenti durante il Medioevo, sono stati

impiegati a partire dal XVI secolo, quando la committenza sceglie di investire ingenti capitali nell'edilizia di prestigio.

Lungo il confine tra Genova e La Spezia sono presenti tipiche strisce ofiolitiche, responsabili della formazione del «Rosso Levante». Secondo le caratteristiche petrografiche e litologiche, esistono due principali litotipi: la «Breccia di Levante» e la «Breccia di Bonassola». Il colore tipicamente rossastro è dato dalla concentrazione di ematite con venature bianche di calcite. Questo marmo è stato utilizzato fin da epoca etrusca ed è stato impiegato durante il Medioevo per la decorazione degli edifici ecclesiastici, tra cui la cattedrale di San Lorenzo³¹. Il «Portoro», o di Portovenere, è un marmo nero con venature color giallo vivo, da cui il nome originario di «mischio giallo e nero». Si estrae nel territorio intorno a La Spezia, la sua formazione ricca di sostanza organica ne determina il colore scuro. La limitata disponibilità lo ha reso fin dall'epoca romana uno dei marmi più pregiati, utilizzato per la costruzione di templi e ville imperiali. In epoca medievale veniva impiegato insieme ad altri marmi policromi per le decorazioni di facciate, colonne, archetti pensili e rivestimenti interni delle ville situate lungo le riviere³². La pietra di Finale, un calcare bioclastico che affiora nella parte centro-occidentale della regione di Savona, presenta tonalità che vanno dal bianco al bruno chiaro. A seconda della zona di estrazione e delle caratteristiche cromatiche e fisiche, possono essere distinte alcune varietà: il «Bianco Doria», una roccia tenera estratta intorno a Boragni; il «Rosso Veruzzi», una roccia semi-dura di Veruzzi; il «Rosato di Finale», una roccia dura proveniente da Castel Gavone e Pian Marino. La pietra di Finale è stata utilizzata localmente fin dall'epoca romana e durante il Medioevo per rivestimenti, modanature, rilievi scultorei, decorazioni architettoniche e anche per infrastrutture come l'acquedotto³³.

3. La *claritas* del marmo

Il prezioso marmo bianco di cui la Liguria è priva arrivava principalmente dalle Alpi Apuane. All'epoca romana le cave che avevano fornito materiale per abbellire gli edifici pubblici e le dimore private più ricche dell'Urbe erano state per secoli quelle della fiorentina colonia di Luni³⁴. Nei luoghi di estrazione i marmorari, all'epoca schiavi, si limitavano a squadrare i blocchi o a sbizzare manufatti di grandi dimensioni, mentre il lavoro più specializzato di scultura e ornamentazione architettonica veniva effettuato presso i centri di destinazione. Il trasporto avveniva prima su carri e poi via mare dal porto lunense. A partire dal VI secolo la città entra in una fase di decadenza dovuta a ripetute invasioni e devastazioni, ma soprattutto al progressivo interrimento del porto per il continuo apporto di materiali alluvionali del fiume Magra, con conseguente formazione di paludi malsane. Le cave non sono più considerate beni produttivi e non si hanno più notizie del loro sfruttamento fino al 1185 quando Federico Barbarossa concede al vescovo di Luni, che già amministra il territorio del nuovo borgo di Carrara, i diritti di giurisdizione e sfruttamento del sottosuolo dando l'avvio a una rinnovata attività lavorativa e commerciale³⁵.

³¹ Lazzarini, L., Sangati, C. (2004). I più importanti marmi e pietre colorati usati dagli antichi, *Pietre e marmi antichi* (a cura di Lazzarini, L.). Padova: Cedam, pp. 73-100.

³² Fratini, F., Pecchioni, E., Cantisani, E., Antonelli, F., Giamello, M., Lazzarini M., Canova, R. (2015). Portoro, the black and gold Italian marble, *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 26, pp. 415-423.

³³ La pietra di Finale è stata utilizzata per le fabbriche di Strada Nuova e le ville extraurbane, per la Basilica di Santa Maria Assunta di Carignano, il Palazzo Lercari-Parodi in Via Garibaldi e la Villa Cambiaso ad Albaro. Cfr. Murialdo, G., Cabella, R., Arobba, D. (a cura di) (2019). *Pietra di Finale. Una risorsa naturale e storica del Ponente ligure*. Finale Ligure: Istituto internazionale di studi liguri, Museo archeologico del Finale, Museo Diffuso del Finale, Università degli Studi di Genova, pp. 123-306.

³⁴ Quasi tutti i marmi dei Fori imperiali provenivano da Luni. Si veda Klapisch-Zuber, C. (1973). *Carrara e i maestri del marmo (1300-1600)*. Massa: Deputazione di Storia Patria per le Antiche Provincie Modenesi, p. 65, nota 22. Plinio, estimatore del marmo greco per la statuaria, afferma che i romani avevano trovato un marmo ancora più bianco nelle cave lunensi. Cfr. Plinio il Vecchio (1988). *Storia Naturale* (a cura di Conte G. B.). Torino: Einaudi Editore, V, libro XXXVI, 533. Se lo scrittore latino può accettare, pur con delle riserve, che il marmo sia utilizzato negli edifici pubblici, la sua esibizione nelle case private lo scandalizza e a tale proposito riferisce due episodi del I secolo a.C. a testimonianza del lusso sfrenato che aveva preso piede in Roma presso i personaggi più facoltosi: Licinio Crasso era stato il primo a possedere nella sua casa sul Palatino sei colonne di marmo greco precedentemente usate nel proscenio di un teatro provvisorio che aveva allestito a

beneficio del pubblico durante la sua carica di edile; pochi decenni dopo Marco Scauro ne segue l'esempio facendo trasportare a Roma 360 colonne, anche in questo caso per la decorazione di un teatro provvisorio durato un mese; subito dopo le colonne più alte e di materiale più pregiato erano state collocate nell'atrio della sua casa. Plinio aggiunge: «Non sarebbe stato meglio prendere provvedimenti contro un esempio così negativo per i costumi? Hanno taciuto di fronte al fatto che moli tanto smisurate siano state introdotte in una casa privata, passando di fronte a statue di dei che erano ancora di argilla!». Cfr. Plinio il Vecchio (1988) *Storia Naturale*, cit., pp. 519-522.

³⁵ Mannoni, L., Mannoni, T. (1984). *Il marmo. Materia e cultura*. Genova: Sagep, pp. 184-197.

³⁶ Klapisch-Zuber C. (1973). *Carrara*, cit., pp. 19-31.

³⁷ Soltanto nel XV secolo sono adottate le prime misure dirette a salvaguardare il patrimonio architettonico e artistico di epoca classica. Cfr. Klapisch-Zuber, C. (1973). *Carrara*, cit., pp. 33-45.

Sul finire dell'XI secolo il marmo, dimenticato per lungo tempo, riacquista gradualmente un valore e un prestigio indiscussi. Per la sua lucentezza e la varietà dei colori, è inserito a pieno titolo nella categoria medievale del 'Bello'. Riacciandosi agli elogi di Boezio che ne aveva decantato lo splendore e a Isidoro di Siviglia che aveva identificato la bellezza nell'emanazione della luce, filosofi e teologi riscoprono la *claritas* del marmo attribuendole qualità mistiche: il suo candore assume un valore metafisico svelando la luminosità dello spirito attraverso lo splendore dei corpi. Se la Chiesa aveva dato avvio al riutilizzo di questo materiale già dal X secolo per adornare della sua 'luce' gli edifici ecclesiastici, i centri urbani vedono nel marmo il richiamo tangibile alla grandezza imperiale e ne fanno uso per legittimare il potere delle nuove istituzioni comunali. Anche se le costruzioni laiche sono costruite prevalentemente in pietra e mattoni, gli inserti marmorei – lapidi celebrative o colonne – ne esaltano il prestigio di monumento pubblico. A Genova, come in altre città, le epigrafi rappresentano una forma di arredo urbano che veicola messaggi di tipo politico e ideologico; significative quelle poste nelle porte urbane dove il Comune celebra la costruzione delle mura e glorifica le imprese genovesi con toni di fierezza e di orgoglio. Manifestazione di potenza celeste e terrena, segno di rarità e di ricchezza da esibire con orgoglio, il marmo diventa uno degli emblemi della rinascita medievale³⁶.

Le necessarie abilità tecniche per individuare e sfruttare le cave erano andate perse nel corso dei secoli. Prima di iniziare il faticoso recupero del marmo sui posti di estrazione, fino al XII secolo in Francia e in Italia si adottava la pratica del reimpiego di marmi antichi che diventa un sistema consueto di ricerca di materiale già lavorato. I testi medievali che tramandano la costruzione di chiese e monasteri mettono in rilievo questi saccheggi, occasionali o sistematici, effettuati sotto la protezione di vescovi o vicari imperiali. Si tratta di una attività su larga scala che non era considerata riprovevole, anzi la scoperta di un 'giacimento' era attribuita alla grazia divina. In Francia i monaci si spostano da una città all'altra in cerca del prezioso marmo, a rischio di pericoli e di grandi fatiche: a nord sono spogliate le città renane e a sud i centri della Provenza. Nella prima metà del secolo XI l'abate di Cluny adorna il chiostro del monastero con colonne marmoree trasportate per via fluviale «*non sine magno labore*». Nello stesso periodo gli abati Desiderio di Montecassino e Bonus di San Michele di Pisa acquistano a Roma colonne, capitelli e marmi vari. L'Urbe, Ostia e Tivoli sono i centri presi particolarmente di mira per le spoliazioni, per l'abbondanza e la qualità dei materiali. Anche le vittorie militari sono occasione per depredare i territori assoggettati o i nemici sconfitti, a partire dalla prima crociata e per tutto il XIII secolo; in particolare Venezia recupera in Oriente marmi preziosi per la fabbrica della cattedrale di San Marco³⁷.

Dal secolo XIII al XIV, accanto al metodo del reimpiego che si rivela con il passare del tempo sempre più antieconomico, spesso rischioso e destinato a esaurire con il tempo il materiale disponibile, si fa strada in Europa la riscoperta delle antiche cave. In Italia si riaprono quelle di Monte Pisano e delle Alpi Apuane; a Carrara arrivano sempre più numerosi i Fio-

rentini per la fabbrica di Santa Maria del Fiore, più saltuariamente Pisani, Orvietani e Senesi³⁸.

I Genovesi non erano certo insensibili ai materiali pregiati che potevano essere inseriti negli edifici della loro città. Come era avvenuto in altre località francesi e italiane interessate alla costruzione o ricostruzione di chiese e abbazie, il marmo per Genova era oggetto di spoliazioni di siti antichi o di bottino a seguito di scorrerie nel Mediterraneo. Come scrive l'annalista Caffaro, in un noto passo della sua *Liberazione dell'Oriente*, i Genovesi mentre erano nel porto di Laodicea durante la prima crociata

«misero a terra dodici colonne di marmo che ancora stavano erette nel palazzo di Giuda Maccabeo, e sopra una nave le caricarono; ed erano alte quindici palmi e colorate di colori diversi, rosse verdi e gialle, e lucide così che la gente vi si specchiava quasi come nello specchio»³⁹.

Il bottino non arrivò mai a Genova perché la nave fece naufragio, ma altre spoliazioni ebbero esito più fortunato e giunsero in patria⁴⁰. Caffaro inserisce questa acquisizione tra le opere fatte dai genovesi «ad onore di Dio»: la spoliazione è dissimulata sotto una motivazione religiosa, ampiamente giustificata nella diffusa mentalità dell'epoca. Oltre ai bottini di guerra, comunque aleatori, considerata la provenienza diversificata dei marmi antichi presenti a Genova e la scarsità di ritrovamenti *in loco*⁴¹, gli studiosi ipotizzano che fossero meta più sistematica di prelevamenti da parte dei Genovesi, altri siti come Roma, Ostia, Luni e le città romane del Nord Italia. Questa attività presuppone una scelta consapevole del manufatto antico e la formazione di una rete commerciale per la sua ricerca, l'acquisto e il trasporto, anche se non sono rimasti documenti in proposito⁴².

È nelle sedi di culto più autorevoli che si nota la costante presenza di marmi romani reimpiegati: negli edifici ecclesiastici urbani (la Cattedrale, Santa Maria di Castello, San Donato e San Damiano) e nei monasteri *extra moenia* di Sant'Andrea della Porta, San Tommaso, San Giovanni di Paverano e Santo Stefano. Il pezzo antico, cornice o capitello, è collocato in posizione ben visibile, con una duplice connotazione simbolica e decorativa. Mentre i capitelli mantengono la loro funzione originale e vengono posti nelle navate o nei chiostri, la cornice romana è utilizzata come architrave del portale, assumendo un ruolo di raccordo tra l'esterno e l'interno. Nelle chiese che presentano sobrie pareti in pietra spesso prive di decorazioni, il portale è l'unico apparato architettonico destinato a veicolare messaggi al fedele che varca la soglia del luogo sacro e la cornice antica collocata in posizione privilegiata rappresenta un riferimento aulico alla tradizione antica⁴³. La prima chiesa in cui compare un numero consistente di *spolia* è Santa Maria di Castello con un architrave inserito nella cornice trasversale del portale centrale, dieci colonne e una quindicina di capitelli romani (fig. 2.10)⁴⁴. Nelle chiese di San Damiano e San Donato l'architrave antico nel portale denota, rispetto a Santa Maria di Castello una più articolata struttura decorativa, segnando una fase di transizione fra il protoromanico e il romanico compiuto. Nell'erigere in forme maestose la cattedrale di San Lorenzo il reimpiego di architravi romani nei due portali laterali raggiunge esiti più elaborati: il

³⁸Klapisch-Zuber, C. (1973). *Carrara*, cit., 114-126. La presenza sul territorio di Carrara di forestieri che procuravano il marmo ai cantieri della loro città non era priva di difficoltà e di rischi. Le cave erano situate al centro di una zona in cui agli interessi commerciali si intrecciavano le lotte politiche tra comuni limitrofi e con alcuni signori italiani, i Visconti e i Malaspina, per il dominio di un territorio che aveva un ruolo strategico per le vie di comunicazione. Cfr. Bonatti, F. (1992). *Lunigiana: crocevia tra Genova, Pisa e Lucca, Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 332-337.

³⁹*Annali genovesi*, cit., I, p. 159.

⁴⁰Ne sono un esempio i reperti con iscrizioni cufiche in Santa Maria di Castello, probabile bottino proveniente dal Nord-Africa. Si veda Dagnino, A. (1987). *Scultura e Architettura, La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, 131. Cfr. anche Alizeri, F. (1847). *Guida artistica per la città di Genova*, I, Genova: Grondona, p. 9.

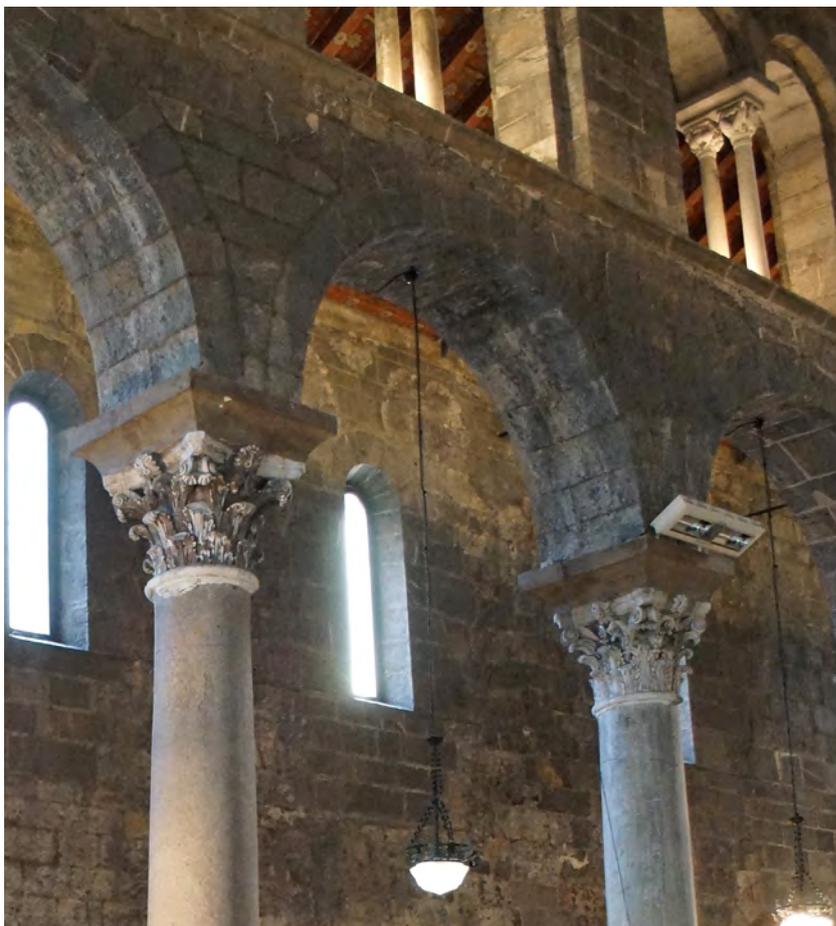
⁴¹Gli studi sui marmi reimpiegati a Genova sembrano escludere che i reperti provenissero da una ipotizzata necropoli romana situata nella zona antistante San Lorenzo. Cfr. Quartino, L. (2014). *Marmi romani reimpiegati a Genova: un problema aperto, Genova dalle Origini all'Anno Mille* (a cura di Melli, P.). Genova: Sagep, pp. 245-253.

⁴²Sul reimpiego dei marmi antichi si veda: Dufour Bozzo, C. (1979). *Il reimpiego dei marmi antichi*, cit., 1-58; Conti, G. (1980). *Marmi antichi di Genova: la decorazione architettonica, Rivista di Archeologia*, 4, pp. 31-55; Bedocchi, A. (2014). *Sarcofagi e marmi architettonici romani presenti a Genova, Genova dalle Origini all'Anno Mille* (a cura di Melli, P.). Genova: Sagep, pp. 256-263.

⁴³Dagnino, A. (1987). *Scultura e Architettura*, cit., p. 142.

⁴⁴La chiesa con annesso convento godeva di un indubbio prestigio sorgendo sulla sommità del *Castrum* di origine romana, a breve distanza dal castello vescovile fortificato. Già nel X secolo era un autorevole centro di potere politico e religioso. Sulle modalità operative adottate per posizionare i reperti antichi e uniformare ad essi il restante apparato architettonico-decorativo, si veda Po-

Fig. 2.10. Chiesa di Santa Maria di Castello, navata destra. Colonne e capitelli di epoca romana (I-II secolo d. C.). Foto dell'autore



leggi, E. (1973). *Santa Maria di Castello e il romanico a Genova*. Genova: Sagep, pp. 70-86.

⁴⁵ Dufour Bozzo, C. (1979). *Il reimpiego dei marmi antichi*, cit., pp. 2-13.

reperto antico non è l'elemento ornamentale con maggiore evidenza, ma si raccorda alla tematica iconografica dell'intero manufatto, più sobria nel portale di San Giovanni, più esuberante e maggiormente influenzata dalla cultura di matrice lombarda in quello di San Gottardo. Il pezzo classico si inserisce con un sapiente gioco di richiami nel nuovo repertorio figurativo mettendo in luce l'abilità delle maestranze nel realizzare efficaci soluzioni compositive che garantiscono continuità tra il manufatto antico e quello medievale⁴⁵.

La tipologia più frequente di marmi romani è rappresentata dalle colonne e dai capitelli. Collocati in posizione di rilievo nei monumenti cittadini – porte urbane, portali degli edifici religiosi, navate e chiostri – i capitelli sono un ornamento apprezzato dalla classe dominante laica ed ecclesiastica, per il richiamo alla romanità come segno di maestosità, di potere e di prosperità economica. Adoperati nelle chiese nelle due tipologie di più vasta divulgazione, la corinzia e la composita, vengono esibiti anche nelle logge private delle famiglie più cospicue per censo e autorevolezza. Quando non è possibile reperire materiale di epoca antica, si ricorre alla realizzazione di capitelli marmorei *ex novo* che per le caratteristiche dell'ornato e il loro coerente inserimento nel contesto architettonico creano una organica visione d'insieme. I capitelli possono poggiare su colonne o pilastri, spesso esagonali, monocromatici o a bande chiaroscure. Nel secondo caso il richiamo all'antichità si stempera nella bicromia di matrice medievale, sottolineando il comune sostrato culturale ligure. Questo schema di decorazione architettonica elaborato nel XII secolo mostra una sua vitalità fino alla fine del Quattrocento, quando negli

edifici privati verrà sostituito da nuove tipologie di decoro urbano che segnano il passaggio al gusto rinascimentale.

Parallelamente alla non facile ricerca di reperti antichi, le fonti documentarie attestano, anche se sporadicamente, l'acquisizione di marmo nelle cave apuane da parte dei Genovesi, in un'epoca precedente all'instaurarsi di rapporti commerciali di altre città con la zona di Carrara.

Ne sono testimonianza alcuni atti notarili rogati a Genova verso la fine del secolo XII: nel giugno del 1191 Duranto, figlio di Gordiano da Carrara promette di consegnare una colonna di marmo a Guglielmo *fondachiere* nel porto di Genova «*sanam et integram*»; tra i presenti all'atto Domenico *magister*, il costruttore che avrebbe preso in carico la colonna per collocarla nel luogo prestabilito⁴⁶. Nello stesso anno quattro marmorari carraresi, tra cui Duranto, affidano per sei anni un ragazzo di Miseglia, località situata presso le cave, al *magister* Guido Reja che si impegna, in base alle regole sull'apprendistato, a insegnargli il lavoro e, al termine, a consegnargli gli attrezzi del mestiere⁴⁷. Dieci anni più tardi in un atto notarile lacunoso è previsto il pagamento di colonne a marmorari carraresi⁴⁸. Nel 1214 un certo Ugo da Carrara raccomanda a un genovese due colonne con i loro capitelli che lascia nel porto affidandogli il compito di venderle⁴⁹.

La scarsità dei documenti non consente di provare una presenza significativa sui luoghi di estrazione, che sembra essere iniziata in epoca successiva. È difficile anche stabilire se in questo periodo fosse prassi corrente acquistare marmo già lavorato o semilavorato; dai casi presi in considerazione si rileva la prevalenza di marmo già lavorato da destinare a un cantiere o da immettere sul mercato per potenziali acquirenti. L'apprendistato presso maestranze residenti a Genova sembra comunque avvalorare l'ipotesi che queste ultime avessero già acquisito fama di abili lavoratori del marmo anche a Carrara⁵⁰.

4. Maestranze e cantieri

La rinascita dell'edilizia genovese nel XII secolo coincide con la presenza in città di manodopera specializzata proveniente dall'area tra il lago di Lugano e il lago di Como. Le origini di questa migrazione a Genova di maestranze lombarde denominate 'Antelami', il loro ruolo privilegiato nell'edificazione di strutture murarie e nell'elaborazione di un linguaggio architettonico e decorativo che andrà affinandosi nei secoli successivi, sono state oggetto di indagine da parte di alcuni studiosi che hanno trovato supporto nei documenti d'archivio per tracciare anche le loro abitudini familiari, sociali e imprenditoriali.

Sono state avanzate alcune ipotesi sulle loro iniziali competenze e sui primi contatti con Genova. È probabile che queste maestranze, esperte nella carpenteria e detentrici nelle terre di origine di antichi privilegi di ascendenza regia avessero trovato lavoro nella nostra città quando le case erano costruite prevalentemente in legno⁵¹. Venuti a contatto con i potenti signori residenti sul *Castrum*, alcuni li avrebbero seguiti in Oriente durante la prima Crociata, contribuendo alla costruzione delle macchine da assedio⁵².

⁴⁶ Hall, M. W., Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1938). Guglielmo Cassinese (1190-1192), I, *Notai Liguri del secolo XII*, II. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria, doc. n. 754, pp. 299-300.

⁴⁷ Hall, M. W., Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1938). Guglielmo Cassinese (1190-1192), I, cit., doc. nn. 762-763, pp. 303-304.

⁴⁸ Hall-Cole, M. W., Krueger, H. C., Reinert, R. G., Reynolds, R. L. (a cura di) (1939). Giovanni di Guiberto (1200-1211), I, *Notai Liguri del secolo XII*, V. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria, doc. n. 194 p. 105.

⁴⁹ L'accordo viene stipulato a Genova dal notaio Pietro Ruffo. Cfr. Alizeri, F. (1876). *Notizie dei professori del disegno*, cit., IV. Genova: Sambolino, p. 20.

⁵⁰ I Genovesi e le maestranze lombarde che lavorano a Genova compaiono a Carrara in numero significativo dalla prima metà del Quattrocento e nella seconda metà del secolo trovano un ambiente particolarmente favorevole quando Sarzana e le cave per circa venticinque anni cadono nominalmente sotto il dominio di Genova, di fatto sotto la signoria dei dogi Tommaso e Giano Fregoso. Si veda Poggi, F. (1929). Nota circa il dominio dei Campofregoso in Carrara, *ASLi*, LIV, fasc. II, 1pp. 41-161.

⁵¹ Bognetti, G. P. (1938). I Magistri Antelami e la Valle d'Intelvi, *Periodico storico comense*, II, fasc. I-IV, pp. 34-48.

⁵² Dufour Bozzo, C. (1989). *La porta urbana nel Medioevo. Porta Soprana di Sant'Andrea*

in Genova, immagine di una città. Roma: «l'ERMA» di Bretschneider, pp. 214-219.

⁵³ Cfr. Mannoni, T., Boato, A. (2009). I paramenti murari squadrati e non squadrati. Rapporti tra la Liguria e le valli d'Intelvi, *I Magistri Commacini. Mito e realtà del medioevo lombardo*, Atti del XIX Congresso internazionale di studio sull'alto medioevo, Varese-Como, 23-25 ottobre 2008, II. Spoleto: Fondazione Centro italiano di studi sull'alto medioevo, pp. 745-779.

⁵⁴ Il *magister* Bertamo risulta come testimone nell'atto di compravendita di un terreno. Cfr. Airaldi, G. (a cura di) (1969). *Le carte di Santa Maria delle Vigne di Genova (1103-1392)*. Genova: Bozzi, pp. 17-18. Non è da escludere che il ruolo dei *magistri* in questo tipo di contratti fosse anche quello di consulenti.

⁵⁵ La denominazione 'Antelami' è usata nei rogiti notarili non in modo univoco e questo ha favorito varie interpretazioni da parte degli studiosi. In alcuni casi si è ritenuto che il nome identificasse il luogo d'origine, la valle d'Intelvi, chiamata Antelago o Intelavo in documenti lombardi altomedievali. Si veda Bogneri, G. P. (1938). *I Magistri Antelami*, cit., pp. 17-71. In altri, pur riconoscendone il valore toponimico, è stato considerato prevalente il riferimento al mestiere esercitato piuttosto che alla provenienza. Cfr. Decri, A. (1997). La presenza degli Antelami nei documenti genovesi, *Magistri d'Europa. Eventi, relazioni, strutture della migrazione di artisti e costruttori dai laghi lombardi*, Atti del Congresso, Como 23-26 ottobre 1996. Milano: Nodo libri, pp. 407-432. Solo in pochi atti il notaio precisa tutti i dati in dettaglio, per esempio: «*Petrus Papinus magister Antelami de valle Antelami de loco de Averna*». Cfr. PoDESTÀ, F. (1913). *Il porto di Genova dalle origini alla caduta della Repubblica genovese (1797)*. Genova: Spiotti Editore, pp. 79, nota 1.

⁵⁶ Per gli anni 1157-1158 cfr. Chiaudano, M., Moresco, M. (a cura di) (1935). *Il cartolare di Giovanni Scriba*. Torino: Lattes & C. Editori, I, doc. n. CLXXXVII p. 99, n. CLXXXVIII pp. 99-100, n. CCLXXXVIII p. 154, n. CCCXXII pp. 169-170, n. CCCLXXVI p. 197, n. DXX pp. 278-279. Per gli anni 1182-83, cfr. Bogneri, G. P. (1938). *I Magistri Antelami*, cit., 55-57. Per l'anno 1186 cfr. Chiaudano, M. (a cura di) (1940). *Oberto Scriba de mercato (1186)*, *Notai Liguri del secolo XII, IV*. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria, doc. n. 163 pp. 161-162, n. 324 pp. 122-123, n. 325 p. 123, n. 331 p. 126. Per l'anno 1190 cfr. Chiaudano, M., Morozzo della Rocca, R. (a cura di) (1938). *Oberto Scriba de mercato (1190)*, *Notai Liguri del secolo XII, I*. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria, doc. n. 14 pp. 6-7, n. 29 pp. 12-13, n. 52 pp. 22-23, n. 237 p. 94, n. 273 p. 108, n. 361 p. 142, n. 374 pp. 146-147, n. 615 p. 243.

⁵⁷ Già in epoca imperiale le murature in opera squadrata (*opus quadratum*) che richiedevano manodopera specializzata, cave disponibili e tempi lunghi di lavorazione, erano utilizzate solo per grandi costruzioni pubbliche

In quella occasione, entrati in rapporto con maestranze locali, avrebbero imparato le tecniche per le costruzioni in muratura che nelle aree orientali erano state sempre utilizzate anche dopo il VI secolo. È anche possibile che le conoscenze sulle opere murarie fossero state acquisite direttamente in area lombarda, dove lavoratori edili erano attivi al seguito degli imperatori ottoniani⁵³.

La prima fonte scritta pervenuta in cui viene citato un *magister Antelami* risale al 1153⁵⁴. Nella seconda metà del secolo i documenti si intensificano e i *magistri* vi appaiono non come forestieri arrivati da poco in città, ma come persone già ben inserite nell'ambiente genovese⁵⁵. Oltre a figurare in prima persona nei capitoli che hanno come oggetto la costruzione o ristrutturazione di edifici, compaiono come testimoni in transazioni e testamenti, concludono contratti di *accomendatio* e di società per traffici marittimi, stipulano accordi che riguardano prestiti e depositi di denaro fruttifero⁵⁶. Questi documenti sono una preziosa testimonianza sul loro comportamento sociale: gli Antelami si sposavano in alcuni casi con donne genovesi, avevano rapporti di affari con le famiglie a quel tempo più influenti come i de Volta, i Vento, i de Castello, gli Embriaci e i Mallone, chiedevano spesso che i guadagni investiti in lire genovesi venissero restituiti in terzoli, la moneta corrente nei loro paesi d'origine. Le varie transazioni avvenivano secondo le consuetudini di Genova, ma quando si trattava di accordi stipulati esclusivamente tra *magistri* il notaio specificava che erano redatti «*secundum morem et consuetudinem terre Antelami*».

L'appellativo 'Antelami' li qualifica come appartenenti a una corporazione di artefici e lavoratori della pietra che ha svolto un ruolo chiave nell'edilizia civile e in quella religiosa. La loro competenza, accompagnata da abilità organizzative e progettuali ha fatto sì che diventassero un sicuro punto di riferimento nei cantieri cittadini. Le conoscenze sulle tecniche murarie erano andate diminuendo durante l'Alto Medioevo, la chiusura delle cave rendeva difficile reperire la materia prima e le diffuse costruzioni in legno avevano richiesto abilità soprattutto nell'arte della carpenteria.

Alcuni studiosi hanno esaminato e catalogato opere in muratura effettuate dagli Antelami nelle loro valli e hanno constatato l'utilizzo di una tecnica che, perfezionando l'*opus incertum* di ascendenza romana, consentiva di ottenere paramenti più ordinati, da lasciare a vista. Questo tipo di lavorazione aveva costi più contenuti e la struttura muraria, anche se di materiale meno pregiato, rispettava i tradizionali requisiti statici; l'abilità del muratore nella disposizione dei corsi faceva sì che l'osservatore ne ricavesse una impressione visiva di regolarità e simmetria⁵⁷. Mannoni e Boato hanno posto in evidenza la percezione delle opere murarie da parte di un osservatore in rapporto alla loro superficie, all'aspetto geometrico, al materiale utilizzato e al tipo di lavorazione. I paramenti lapidei contribuiscono a esaltare la forma architettonica di cui fanno parte, nel primo caso con il colore, l'opacità o la lucidità della pietra e il suo comportamento alla luce e all'ombra, nel secondo con i rapporti larghezza-lunghezza dei conci e la sequenza ritmica dei corsi che possono influire anche sulla sensazione di solidità, nel terzo è il materiale stesso che può generare associazioni sim-

boliche, come l'eternità del granito e la purezza del marmo. Nel caso della loro lavorazione le superfici ben levigate, con giunti fra i conci quasi invisibili, danno la percezione di un unico blocco lucido e riflettente che evoca la perfezione dal punto di vista estetico, mentre i conci bugnati comunicano una impressione di forza e di potenza⁵⁸.

È stato ipotizzato sulla base delle tecniche utilizzate che maestranze antelamiche avessero dato un rilevante apporto alla costruzione della cerchia muraria nota come 'mura del Barbarossa' e delle coeve porte urbiche. Le due porte, la Soprana e quella di Santa Fede, presentano una sobria ornamentazione che già accenna alla bicromia negli estradossi dei fornic. Anche se questa circostanza non è confermata da fonti documentarie, è comunque riscontrabile la capacità degli Antelami di adattare il loro *modus operandi* alle esigenze contingenti e alle richieste della committenza genovese⁵⁹.

Gli Antelami cercano nei territori dove lavorano materiali simili a quelli già conosciuti nei paesi d'origine: la pietra nera di Promontorio era un calcare molto simile alla pietra di Moltrasio presso le valli d'Intelvi, come pure la calce da loro prescelta era quella magnesiaca, di tradizione lombarda, che ottenevano sfruttando gli affioramenti di dolomia più vicini a Genova, nella zona di Sestri Ponente, presso il monte Gazzo.

In un documento del 1158 i *magistri de antelamo*, Iterio e Guido, stipulano una società della durata di cinque anni per la fabbricazione di calcionarias. Iterio partecipa alle spese per la quarta parte, la produzione è a carico di Guido che deve operare «*bona fide sine fraude*»; gli utili saranno divisi in proporzione⁶⁰. Nel 1206 un altro atto notarile registra la costituzione di una società tra Bartolomeo Porcello, appartenente a una famiglia influente, e il *magister* Guido, con la partecipazione di altri due soci, per l'esercizio di una calcinaia⁶¹.

Negli stessi anni gli Antelami estraggono la pietra di Promontorio. Nel 1225 l'abate di San Benigno autorizza il *magister* Alberto Sturigozo a estrarre pietre nel territorio del monastero, dalla sommità del monte fino al mare, al di fuori delle zone coltivate. Alberto promette di rispettare i confini indicati entro cui potrà «*petras [...] fodere et rumpere et inde extrahere et accipere*» per sé e per i suoi «*laboratores*», si impegna a corrispondere una somma in denaro all'abate e a piantare sessanta olivi, di cui la metà forniti dal monastero, nei luoghi e nei tempi opportuni⁶². Questi atti sono una testimonianza di come l'attività lavorativa dei *magistri*, inizialmente circoscritta alla realizzazione di opere murarie, assumesse negli anni una valenza anche imprenditoriale, implicando la fornitura di quasi tutto il materiale occorrente. Gli Antelami avevano in proprietà o in gestione anche cave di lavagna che fornivano abbondante materia prima⁶³.

Dall'esame di alcuni capitoli contenuti in atti notarili della fine del XII secolo, i rapporti tra committente e maestranze sembrano seguire una prassi abituale: il *magister* promette di edificare la parte in muratura con le scale, le volte ed eventualmente il portico. Il committente fornisce i marmi, le colonne e i capitelli – che saranno rifiniti dal *magister* – la calce, i legni e i ferri necessari. Il reperimento del marmo e di altri elementi in materiale pregiato è normalmente a carico del committente perché la scelta deve adattarsi alle sue esigenze e può avere costi non valutabili a priori⁶⁴.

dove i paramenti esterni rimanevano a vista; i muri destinati a essere rivestiti con lastre marmoree o con intonaci venivano realizzati con l'opera indeterminata (*opus incertum*) che richiedeva una preparazione meno elaborata delle pietre e una messa in opera più veloce. Si utilizzavano piccoli elementi sbizzati in forma di parallelepipedo: le pietre grezze migliori, di origine sedimentaria, erano collocate in corsi a vista, le altre, rocce magmatiche intrusive o troppo sfaldabili, nella parte interna. Negli edifici ecclesiastici genovesi erano senz'altro preferiti paramenti con conci di medie dimensioni e una lavorazione accurata che garantiva una totale uniformità alla muratura. Si veda Cagnana, A. (2005). L'introduzione dell'opera quadrata medievale a Genova: aspetti tecnologici e contesto sociale, *Arqueología de la Arquitectura*, 4, pp. 23-45.

⁵⁸ Mannoni, T., Boato, A. (2008). I paramenti murari, cit., pp. 449-750.

⁵⁹ Nei documenti la qualifica varia da «*lapidarius*» e «*marmorarius*», a «*magister marmorum*», «*magister petre*», «*pichapetra*», dal XVI secolo compare anche «*architector*». La varietà delle denominazioni, che non esclude qualifiche diverse nella stessa persona, è un segno delle loro multiformi competenze che si erano perfezionate fino a raggiungere livelli artistici di alta qualità anche nel campo della decorazione e della scultura. Sulla dizione «*pichapetra*» che diventa anche il nome di una contrada cittadina, cfr. Cervetto, L. A. (1903). *I Gaggini da Bissonne. Loro opere in Genova ed altrove. Contributo alla storia dell'arte lombarda*. Milano: Hoepli, p. 3.

⁶⁰ Cfr. Chiaudano, M., Moresco, M. (a cura di) (1935). Il cartolare di Giovanni Scriba, I, cit., doc. n. CCCXXIV p. 171.

⁶¹ Cfr. Hall-Cole, M. W., Krueger, H. C., Reinert, R. G., Reynolds, R. L. (a cura di) (1940). Giovanni di Guiberto (1200-1211), II, *Notai Liguri del secolo XII*, V. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria, doc. n. 1864 pp. 371-372. La produzione e il commercio della calce erano regolamentati e i produttori erano tenuti a prestare giuramento sull'osservanza delle norme; a tale proposito ci è pervenuto il *Sacramentum de calcinaroliis*, stilato probabilmente nel XII secolo e replicato nel XIII. Cfr. Rovere, A. (a cura di) (1992). I Libri Iurium della Repubblica di Genova, I/1, *Fonti per la Storia della Liguria*, II. Genova: Regione Liguria e Società Ligure di Storia Patria, doc. n. 142, pp. 210-211. Dalla fine del Trecento i *magistri* Antelami non possono più aver parte attiva nella conduzione delle fornaci, anche di laterizi. Si veda Boato, A. (2007). Organizzazione delle forniture e mercato dei materiali da costruzione a Genova (secoli XV-XVII), *Mélanges de l'école française de Rome. Italie et Méditerranée, L'Economie de la construction dans l'Italie moderne*, 119, 2, pp. 220-222.

⁶² Cfr. Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1951). Lanfranco (1202-1226), II, *Notai Liguri del secolo XII*, VI. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria, doc. n. 1628 p. 295.

⁶³ Andrea e Giacomo da Campione alla fine del Quattrocento utilizzano due cave nel

Chiavarese e sulle coste del Promontorio pagandone l'affitto a Teodorina Spinola. Il costo della locazione è parzialmente compensato con la costruzione da parte dei due *magistri* di una cappella per la nobildonna nella chiesa di Santa Maria di Castello. Nel relativo contratto gli Antelami specificano che per quanto riguarda il marmo bianco dovranno procurarselo a Carrara. Cfr. Alizeri, F. (1876). *Notizie dei professori del disegno*, IV, cit., pp. 227-228. Il *magister pichapetrum* Pietro da Carona, figlio di Gaspare, nel 1504 cede in locazione a due magistri metà della sua cava situata a Chiavari, vicino al mare. Cfr. Alizeri, F. (1877). *Notizie dei professori del disegno*, V, cit., p. 54.

⁶⁴Cfr. Chiaudano, M. (a cura di) (1940). Ober-to Scriba de mercato (1186), cit., doc. n. 234 p. 87; Chiaudano, M., Morozzo della Rocca, R. (a cura di) (1938). Ober-to Scriba de mercato (1190), cit., doc. n. 324 pp. 128-129; Hall, M. W., Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1938). Guglielmo Cassinese (1190-1192), II, cit., doc. n. 1415 pp. 119-120.

⁶⁵Montagni, C. (1993). *Costruire in Liguria*, cit., pp. 251-264.

⁶⁶Solo nel 1439 la corporazione si dota di Capitoli dell'Arte che normano prassi già in vigore da tempo; vari atti successivi del XVI secolo sono mirati a definire *de iure* situazioni già esistenti *de facto* tra muratori e scalpellini, con l'intento di evitare possibili motivi di attrito fra le maestranze. Cfr. Decri, A. (1997). La presenza degli Antelami nei documenti genovesi, cit., pp. 416-422; Dagnino, A. (1992). Gli scultori nei cantieri dei Magistri Antelami, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 131-133.

⁶⁷Sull'apprendistato si veda Klapisch-Zuber, C. (1973). *Carrara*, cit., pp. 173-188.

⁶⁸Cfr. Hall, M. W., Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1938). Guglielmo Cassinese (1190-1192), II, cit., n. 1531 p. 166.

⁶⁹Boato, A. (2013). Dalle cave ai cantieri: il mercato dei materiali lapidei a Genova in età medievale e moderna alla luce delle fonti d'archivio, *Archeologia Post medievale: società, ambiente, produzione*, 17, pp. 20-32.

⁷⁰Tagliaferro, L. (1987). Un secolo di marmo e di pietra: il Quattrocento, *La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, 215-263; Di Fabio, C. (2019). I *Magistri Antelami* a Genova fino al primo Duecento: origini ed esiti artistici di un fenomeno storico e di un monopolio, *Storia di Parma, VIII, La storia dell'arte: secoli XI-XV, 1* (a cura di Quintavalle, A. C.). Parma: MUP, pp. 74-93.

In questi anni gli Antelami hanno già elaborato un linguaggio costruttivo e una perizia tecnica, che li rende interlocutori privilegiati della committenza genovese. I loro cantieri sono di norma coordinati da uno o due responsabili che svolgono il ruolo di progettisti e capomastri e rispondono dell'esecuzione dei lavori. Nell'ambito del cantiere, operano varie figure professionali dotate dei rispettivi strumenti di lavoro: il carpentiere che ha il compito di innalzare i ponteggi e le armature provvisorie in legno e sovrintende alla realizzazione delle macchine necessarie al sollevamento e trasporto dei materiali, il «*piccapietra*» o scalpellino che sceglie, taglia e sborza le pietre, il «*cementario*» addetto alla preparazione della malta, il muratore che predispone gli apparati murari⁶⁵. Una figura che finora resta con contorni indefiniti per assenza di specifica documentazione è il «*magister lapidum*» che provvede all'apparato decorativo, per la massima parte capitelli, quando sono strettamente connessi alla struttura architettonica⁶⁶. Come lavoratori di supporto non mancano i manovali e gli apprendisti. Questi ultimi, dopo alcuni anni sono in grado di fornire un lavoro produttivo nell'ambito del cantiere. Nel contratto-tipo di apprendistato sono indicati alcuni elementi base come la durata, i reciproci obblighi e la presenza di garanti in quanto gli apprendisti sono in genere molto giovani⁶⁷. In un atto del 1192, Durante giura di stare con il *magister* Otone per sette anni «*causa serviendi*», il *magister* si impegna a fornirgli insegnamento, vitto e vestiario. Al termine l'apprendista riceverà gli strumenti di lavoro che gli sono assegnati in custodia, martello, cazzuola, filo a piombo, punte e scalpelli⁶⁸.

I costruttori e i fornitori devono sottostare alle disposizioni delle autorità pubbliche preposte al controllo del settore edile. Per il commercio di alcuni materiali, ardesia, laterizi, sabbia e calce, le disposizioni sono dettagliate e riguardano soprattutto la qualità del prodotto, le modalità della sua quantificazione (misura o pesatura), il rispetto delle tariffe e dei luoghi di vendita. Il trasporto dei materiali fino al cantiere coinvolge vari operatori e mezzi di trasporto. Considerato lo sviluppo costiero ligure, il trasporto via mare è il più veloce ed economico, quando non è l'unico possibile. Calce, mattoni e altro materiale non eccessivamente pesante o ingombrante possono essere trainati su carri, a dorso di mulo per via di terra o su apposite imbarcazioni. Lo sbarco deve avvenire nel porto per i necessari controlli pubblici; solo su specifica licenza può essere effettuato più vicino al cantiere. I materiali pesanti trasportati su lunghe distanze richiedono una trafila complessa dal luogo di estrazione a quello di lavorazione e costruzione. Il costo ripartito tra i vari interessati⁶⁹.

L'organizzazione lavorativa dei *magistri* Antelami nel Duecento si presenta quindi come un mondo professionale già ben definito che assume responsabilità individuali e societarie complesse⁷⁰. La consapevolezza dei mezzi espressivi diventa più matura, e accanto ai lavori murari e alla decorazione architettonica si fa strada un'attività di tipo scultoreo che darà prova di grande valore artistico con la presenza dei Gaggini da Bissone. Nei due secoli successivi, la presenza in città di cantieri antelamici e la ricchezza della documentazione d'archivio hanno concorso a rendere più tangibile la partecipazione dei *magistri* alle attività costruttive. Alcuni studiosi hanno effettuato

ricerche sulla loro identità personale e familiare, non facile da enucleare in considerazione delle omonimie, sul numero di presenze a Genova e nei luoghi di fornitura dei materiali, sulle qualifiche, i paesi d'origine e le opere commissionate⁷¹. Gli estratti dalla dogana dei marmi di Carrara indicano nel 1433 la presenza di maestranze che importano marmo già lavorato a Genova e in Liguria; si tratta quasi esclusivamente di capitelli e vi compaiono ripetutamente Piero Lombardo e Giovanni da Bissone «*de Ianua*»⁷².

Alizeri, sulla base delle fonti d'archivio, ipotizza una scelta consapevole da parte di queste maestranze, condivisa dai committenti, di utilizzare la bicromia come motivo ornamentale: «Non terrò che da loro facesse esordio quel vezzo così gradevole negli ornamenti contemporanei, di alternare i marmi carraresi alle pietre nerice di Promontorio o d'altre cave consimili; non dico nelle alterne listelle d'interi palazzi o d'imbasamenti, di lunga mano più antiche, bensì nel composto d'archetti e di mensole e di varie insegne che veggon-si anch'oggi. [...] Ma ch'essi ne fossero vaghi e largamente lo promovessero nol tacciono gli atti»⁷³.

5. L'edilizia privata tra XII e XV secolo

Il marmo apuano e la pietra di Promontorio sono i protagonisti dell'arredo urbano fino al XVI secolo. Una caratteristica di Genova è la straordinaria coerenza nell'uso dei materiali e nelle scelte coloristiche tra edifici ecclesiastici, civili e dimore private del ceto nobiliare. I corsi alternati dei paramenti murari, le epigrafi marmoree, l'inserimento di reperti antichi, i capitelli e le colonne parlano un linguaggio che pone in evidenza una comune matrice culturale. Le modalità architettoniche e decorative presentano tipologie costanti nonostante la presenza sul territorio delle contrade gentilizie diversificate per gruppi familiari, autorità e censo dei componenti. I consorzi nobiliari, attestati nei luoghi strategici per la difesa e il controllo, occupano porzioni di spazio pubblico e trasformano aree cittadine in contrade private, assumendo la tipica conformazione edilizia di nucleo abitato con una piccola piazza centrale, torre, talvolta chiesa gentilizia, *domus magna*, dimore dei consorti, cortile interno, fondaci e servizi comuni⁷⁴. La *domus* ha una disposizione dei locali su piani sovrapposti: un portico al piano terra su cui si apre l'ingresso, eventuale mezzanino, la *caminata* al primo piano, ai piani superiori altre camere e la cucina⁷⁵.

La loggia, situata sulla facciata dell'edificio, ha molteplici connotazioni: luogo privato e insieme aperto, destinato agli incontri e alla vita quotidiana, è l'immagine offerta dalla famiglia alla città⁷⁶. L'importanza di avere un ingresso confacente al prestigio del palazzo era già stata posta in evidenza da Vitruvio che scriveva: «Dal punto di vista della consuetudine e della tradizione si ottiene il decoro quando a edifici internamente sontuosi si costruiranno vestiboli ricchi ed eleganti. Giacché se l'interno avrà rifiniture eleganti e gli accessi saranno umili e poveri, non avremo decoro»⁷⁷.

Subito sopra alla loggia, assume le funzioni di marcapiano una cornice di archetti pensili, elementi ornamentali e funzionali

⁷¹ Poleggi, E. (1966). Il Rinnovamento edilizio genovese e i Magistri Antelami nel secolo XV, *Arte Lombarda*, 11, 2, 53-68; Tagliaferro, L. (1987). Un secolo di marmo e di pietra: il Quattrocento, *Notiziario storico-documentario*, cit., 256-259; Decri, A. (1996). La presenza degli Antelami nei documenti genovesi, cit., pp. 407-432.

⁷² Klapisch-Zuber, C. (1973). *Carrara*, cit., pp. 373-382.

⁷³ Alizeri, F. (1876). *Notizie dei professori del disegno*, IV, cit., p. 226.

⁷⁴ Poleggi, E. (1965). Le contrade delle consorterie nobiliari a Genova tra il XII e il XIII secolo. *Urbanistica*, 42/43, 15-20; Poleggi, E. (1981). Tipi abitativi ed aggregazioni urbane della nobiltà genovese, *La storia dei genovesi*, atti del I convegno di studi sui ceti dirigenti nelle istituzioni della Repubblica di Genova (Genova 7-9 novembre 1980). Genova: Associazione Nobiliare della Liguria, p. 199-211.

⁷⁵ Pandiani, E. (1915). Vita privata genovese nel Rinascimento, *ASLi*, XLVII, 65-116; Hughes, D.O. (1983). Sviluppo urbano e struttura familiare a Genova nel Medioevo, *Città, storia, società* (a cura di Abrams, P., Wrigley, E. A.). Bologna: il Mulino, pp. 109-138.

⁷⁶ Ad oggi, nei sestieri del Molo e della Maddalena sono state rilevate oltre 150 logge, di cui circa 40 con paramento bianco e nero. Cfr. Leandri, G. (2023). *Le logge medievali di Genova. Architettura e immagine della città*.

Genova: Genova University Press. Sul tema delle logge si vedano Morozzo della Rocca, R. (1976). *Le logge medioevali di Genova. Studi per la riapertura ed il restauro*. Genova: Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Genova; Falcidieno, M.L. (2001). Il portico come disegno unificante della città: percorso pubblico o pertinenza privata?, *Rilievo e forma urbana. Il disegno dei portici. Il disegno della città* (contributi al Convegno). Torino: Celid, pp. 569-572.

⁷⁷Vitruvio Pollione (2015). *Architettura* (a cura di Maggi, S., Ferri S.). Milano: BUR, pp. 118-121.

⁷⁸Alberti, L. B. (1966). *L'architettura* (a cura di Orlandi, G., Portoghesi, P.), II, Milano: Il Polifilo, pp. 520-521.

⁷⁹Nella decorazione dei chiostri di Sant'Andrea e di San Matteo sono presenti soggetti biblici ed evangelici. Sui capitelli del chiostro di Sant'Andrea (1158 ca.) compaiono scene di caccia e di lavori nei campi, animali e una figura femminile. Su due capitelli quadrangolari del chiostro di San Matteo (1310) il *magister* che lo aveva ristrutturato trascrive la data e il proprio nome; inoltre viene ritratto il priore Andrea de Goano inginocchiato davanti al Santo protettore dei Doria. Cfr. Di Fabio, C. (1987). Geografia e forme della scultura in Liguria, *La scultura a Genova e in*

di tradizione antelamica risalenti in Europa al IX secolo; gli archetti sono realizzati in materiale confacente allo stile del prospetto, in pietra nera, in marmo su appoggi stoncati in pietra per mantenere l'effetto bicromico, o in mattoni (fig. 2.11). La loggia, terminante con robusti pilastri angolari, spesso è decorata con una o più colonne marmoree e con capitelli che possono essere antichi o approntati *ex novo* su modello romano (Figg. 2.12 e 2.13). Il ruolo delle colonne è sottolineato dall'Alberti: «In tutta l'architettura l'ornamento fondamentale è costituito senza dubbio dalle colonne [...] la colonna conferisce vaghezza e decoro»⁷⁸. Il candore del marmo risalta sulle pareti scure creando suggestivi rimandi ai chiostrini e alle navate degli edifici sacri. L'ambivalenza tra sacro e profano è sottolineata dalla tipologia decorativa del capitello, dalla più arcaica mensola squadrata di raccordo, ai diffusi motivi a foglie d'acqua.

Anche nell'edilizia privata il marmo ha le stesse implicazioni già presenti nell'architettura religiosa: la rarità, l'intrinseco valore venale, il messaggio simbolico di autorità e prestigio, la ratifica di un potere recentemente acquisito. È stato rilevato che i motivi ornamentali presentano quasi sempre delle caratteristiche simili dovute a una produzione di cantiere che crea nel tessuto decorativo urbano una sostanziale uniformità di risultati. Mentre in ambito ecclesiastico viene perseguito un uso cosciente della scultura come messaggio esortativo rivolto ai fedeli e l'ornamentazione, inizialmente priva di motivi iconici, si arricchisce di figurazioni a sfondo narrativo⁷⁹, la decorazione delle dimore private presenta tipologie ricorrenti e standardizzate nelle logge e nelle finestre senza significative varianti o personalizzazioni⁸⁰.

In rari esempi la scultura rivela tratti di originalità, è il caso dei leoni che decorano i capitelli di due logge, in piazza dei Luxoro e in via di San Bernardo 18. I leoni intorno al capitello in piazza Luxoro, di fattura più arcaica, presentano alcune affinità nel movimento rotatorio con quelli che circondano la colonna di sinistra sulla facciata di San Lorenzo. Potrebbero essere interpretati come simboli della Vigilanza, 'leoni custodi' della chiesa o della casa⁸¹ (figg. 2.14 e 2.15). Più difficile appare il significato dei leoni, maschio e femmina, sui capitelli di via San Bernardo, purtroppo poco leggibili perché scalpellati⁸².

Fig. 2.11. Archetti pensili trilobati sul prospetto di Palazzo Salvago. Al di sopra Agnus Dei e bassorilievi con leoni. Foto dell'autore





Fig. 2.12. Piazza Embriaci 4. Colonna e capitello di reimpiego a foglie lisce. II-III sec. d. C. Foto dell'autore



Fig. 2.13. Loggia dei Camilla-Lercari. Vico degli Indoratori 14r-16r. Al centro colonna con capitello medievale in stile corinzio. Foto dell'autore



Fig. 2.14. Capitello con leoni. Piazza dei Luxoro. 1160 ca. Foto dell'autore



Fig. 2.15. Capitello con leoni. Cattedrale, inizio sec. XIII. Foto dell'autore

Tra i nuclei abitativi del XII-XIV secolo un caso emblematico è piazza San Matteo, contrada dei Doria, che rappresenta ancora oggi un complesso edilizio omogeneo, con la chiesa gentilizia e i palazzi fastosamente rivestiti in bianco e nero, in cui l'uniformità dei paramenti bicromi rende immediatamente riconoscibile la residenza di una delle famiglie più rappresentative per prestigio e influenza politica. La chiesa, edificata da Martino Doria nel 1125, è ricostruita nel 1278 in posizione arretrata rispetto alla precedente, per creare la piazza della contrada, dove prima vi era solo una via di transito. La sua facciata nel corso di un secolo è destinata a contenere le epigrafi che raccontano ai visitatori le imprese gloriose del casato. Le immagini visibili sul prospetto formano un lessico figurativo che richiama la tradizione aulica di epoca classica. Oltre

Liguria. *Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, pp. 93-110; Di Fabio, C. (1992). Cantieri, scultori ed episodi di committenza nel Trecento, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 223-226.

⁸⁰Dagnino, A. (1987). *Scultura e Architettura*, cit., 147-151; Dagnino, A. (1992). Continuità nella produzione di cantiere: per una tipologia dei capitelli a foglie, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 136-137.

⁸¹In base a una leggenda riportata dai Bestiari e dai Fabliaux medievali, il leone dorme con

Fig. 2.16. Chiesa di San Matteo, particolare della facciata con busto romano. Foto dell'autore

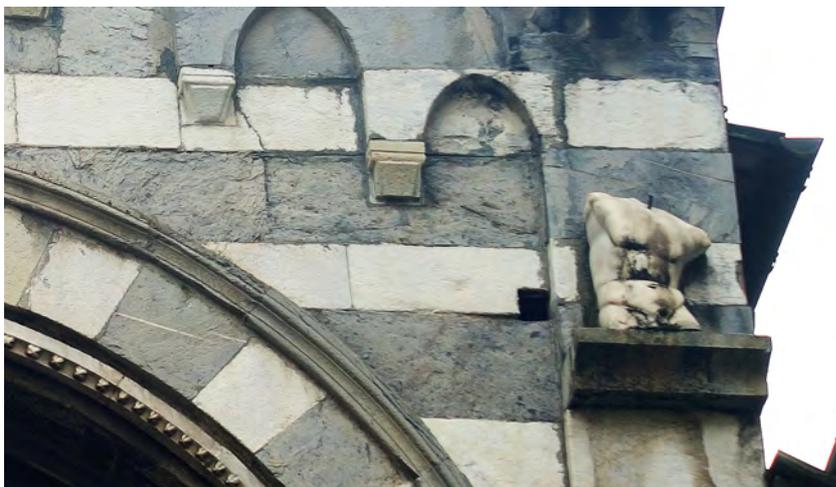


Fig. 2.17. Chiesa di San Matteo. Sarcofago romano del IV secolo d.C., con epigrafi che commemorano le imprese di Lamba Doria. Foto dell'autore



gli occhi aperti e pertanto era considerato immagine di Cristo che vede tutto, giorno e notte, e protegge le anime dal male. Teste di leone che potrebbero assumere questo significato occupano alcune formelle alla base del portale maggiore della cattedrale. Da questa credenza sarebbe nata la tradizione di dare ai batocchi delle porte l'aspetto di muso di leone che vigila. Cfr. Trentini, A. (1971). *Iconografia e simbolismo*, cit., pp. 89-90.

⁸² Ne tenta una interpretazione Di Fabio. Cfr. Di Fabio, C. (2019). *I Magistri Antelami a Genova fino al primo Duecento*, cit., p. 93.

⁸³ Dagnino, A. (1987). *Maestranze e cantieri, La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, pp. 173-174.

alle epigrafi sono presenti due busti antichi acefali collocati ai lati del rosone (fig. 2.16) e un sarcofago romano con una decorazione 'a stagioni', bottino di guerra di Lamba Doria dopo la battaglia di Curzola (fig. 2.17). Questo particolare utilizzo di un manufatto antico sulla facciata di una chiesa aveva già un precedente nelle fronti di sarcofago esibite sui parati murari della cattedrale di San Lorenzo⁸³. Il parallelismo nell'utilizzo di *spolia* da parte del tempio genovese più prestigioso e della chiesa privata è il segno di una ricerca di identità da parte dei Doria tra linguaggio iconico destinato ai fedeli e messaggio figurativo destinato all'enclave familiare e a un pubblico laico. La promozione visiva dell'epica familiare si realizza soprattutto con le lunghe epigrafi che commemorano le battaglie navali vinte dai Doria, incise in caratteri gotici epigrafici con

Fig. 2.18. Chiesa di San Matteo. Particolare di una epigrafe con stemma crociato del Comune e aquila doria. Prima metà sec. XIV. Foto dell'autore



uno spiccato sviluppo degli apici delle lettere che ne accentua l'aspetto ornamentale⁸⁴. Le iscrizioni sono perfettamente inserite nelle bande orizzontali di marmo bianco che, più alte di alcuni centimetri rispetto a quelle di pietra scura, consentono una maggior dimensione dei caratteri⁸⁵. In corrispondenza delle epigrafi appare il simbolo doriano dell'aquila, affiancato dallo stemma crociato del Comune (fig. 2.18).

L'aquila, emblema ricorrente nella cultura mesopotamica, nordica e romana, era originariamente simbolo solare connesso alle supreme divinità. Presente anche in alcune formelle del portale sinistro della cattedrale e nei capitelli delle porte urbiche, in epoca medievale assume molteplici valenze, quasi sempre positive: in ambito civile è segno di potenza e dell'autorità imperiale, in ambito religioso diventa emblema del Battesimo, della Resurrezione e del Giudizio finale, con trasposizione in chiave cristiana delle numerose leggende tramandate dall'antichità⁸⁶.

I palazzi che circondano la piazza erano all'epoca tutti porticati, i prospetti loggiati dovevano contribuire a rendere solenne e maestoso il centro della contrada. Anche se attualmente rimane visibile solo la loggia di Palazzo Lamba Doria, si può ricostruire idealmente l'aspetto della *curia* doriana, fiancheggiata da alti loggiati che la delimitano e nello stesso tempo ne amplificano visivamente lo spazio. Sulla destra della chiesa il palazzo detto 'di Brancaleone Doria' ha un affaccio sulla piazza e uno su Vico Doria, originario accesso all'edificio. La base del palazzo si componeva di quattro archi ogivali in laterizio su pilastri ottagonali in pietra, sormontati da un fregio di archetti in laterizio. Su piazza San Matteo rimane visibile una grande arca a conci bianchi e neri con contrarco in pietra ed estradosso a motivo bicromo; l'arco contiguo ha funzioni di passaggio verso il retrostante chiostro. A fianco di questo palazzo, la dimora di 'Domenicaccio Doria' presenta tre archi ogivali, tamponati, prospettanti la piazza, mentre altre due arcate si affacciano su via D. Chiossone. Gli archi sono sorretti da pilastri ottagonali bianchi e neri con capitelli marmorei decorati a foglie d'acqua e con motivo a *crochet*, i contrarchi sono in marmo con motivo ornamentale. Ai lati della facciata sono visibili quattro bassorilievi che rappresentano due *Agnus Dei* e due leoni⁸⁷. Di fronte alla chiesa i palazzi Doria-Quartara e Lamba Doria chiudono il lato occidentale della piazza. La loggia del secondo palazzo si compone di quattro archi ogivali sorretti da tre pilastri ottagonali centrali con capitelli in marmo a motivi vegetali e zoomorfi. Sui prospetti laterali sono ancora visibili le quadrifore originariamente presenti sulla facciata principale⁸⁸. All'angolo tra la piazza e Salita all'Arcivescovato il palazzo di Lazzaro Doria diventerà un dono del governo genovese ad Andrea Doria nel 1528. Palazzo Doria Danovaro chiude su Salita San Matteo la sontuosa recinzione di edifici intorno alla chiesa⁸⁹.

L'utilizzo delle bande bianche e nere continua a prevalere nelle scelte di tipo ornamentale della consorteria doriana anche quando a Genova cominciano a essere recepite nuove modalità decorative sui prospetti degli edifici. Non si tratta solo di una scelta mirata all'uniformità dei paramenti, ma della coscienza salvaguardia di un simbolismo visivo che ricordava i meriti della famiglia di fronte alla città. Nel 1486 Costantino Doria stipula un contratto con Giovanni da Lancio e Matteo

⁸⁴ Müller, R. (2003). Constructing Fame in a Town: The Case of Medieval Genoa, *Medium Aevum Quotidianum*, 47, pp. 8-32.

⁸⁵ Questo accorgimento serve anche a rendere più luminosa la facciata della chiesa, circondata da edifici che con la loro altezza diminuiscono la luce solare.

⁸⁶ Una delle caratteristiche leggendarie dell'aquila, già descritta da Plinio e recepita anche da Dante, era quella di poter fissare la luce del sole senza abbassare lo sguardo, da cui la sua identificazione con la figura di Cristo che ascende al cielo. Cfr. Trentini, A. (1971). Iconografia e simbolismo cit., pp. 108-114; Wittkower, R. (1987). *Allegoria e migrazione dei simboli*. Torino: Giulio Einaudi Editore, pp. 13-83.

⁸⁷ L'*Agnus Dei* è un morfema che compare frequentemente sulle facciate dei palazzi, spesso in una posizione d'angolo per una maggiore visibilità. L'origine di questo emblema risale alla tradizione biblica e si identifica con la vittima immolata in memoria del passaggio del Mar Rosso. Per i primi cristiani diventa simbolo del sacrificio di Cristo e in epoca più tarda si identifica con l'Agnello trionfante dell'Apocalisse di Giovanni Evangelista. Nelle contrade l'agnello che regge la croce e lo stendardo comunale assume una valenza sacro-profana: è quasi sempre posto al centro di lastre marmoree con ai lati le insegne del casato.

⁸⁸ L'interno del palazzo era stato distrutto da un incendio nel 1942; il restauro è avvenuto negli anni 1948-1950 e in quell'occasione è stata riaperta la loggia precedentemente murata.

⁸⁹ Alizeri, F. (1847). *Guida artistica per la città di Genova*, 2, cit., pp. 617-626.

⁹⁰ Alizeri, F. (1877). *Notizie dei professori del disegno*, V, cit., pp. 13-15.

⁹¹ Una ricognizione dei portali costruiti tra la metà del XV secolo e la metà del secolo successivo era stata effettuata a suo tempo da Alizeri. Cfr. Alizeri, F. (1877). *Notizie dei professori del disegno*, V, cit., pp. 5-130; si veda anche Boccardo, P. (1983). Per una mappa iconografica dei portali genovesi del Rinascimento, *La scultura decorativa del Primo Rinascimento*, Atti del I Convegno internazionale di studi, Pavia 16-18 settembre 1980. Roma: Viella Libreria Editrice, pp. 41-53. Per quanto riguarda il materiale utilizzato, è stato rilevato che i portali in marmo sono presenti soprattutto nelle zone un tempo abitate dalle famiglie più ragguardevoli, mentre quelli in ardesia o pietra di Promontorio si trovano sparsi in tutto il territorio urbano, con prevalenza negli insediamenti dove si svolgevano attività commerciali e produttive. Cfr. Gavazza, E. (1983). Problemi per un rilevamento iconografico della scultura «decorativa» a Genova nel Rinascimento, *La scultura decorativa del Primo Rinascimento*, Atti del I Convegno internazionale di studi, Pavia 16-18 settembre 1980. Roma: Viella Libreria Editrice.

da Bissone per la ristrutturazione di un palazzo che Alizeri identifica con quello che sarà donato anni dopo ad Andrea Doria. Nel documento viene ripetutamente specificato l'impiego dei marmi bianchi e neri e sono indicate le modalità di pagamento «pro dictis lapidibus albis et nigris ponendis in faciando dicto laborerio»⁹⁰.

Durante la seconda metà del Quattrocento buona parte del patrimonio immobiliare, improntato a una tipologia abitativa ancora medievale, subisce un rinnovamento che prelude ai cambiamenti in chiave rinascimentale del secolo successivo. È in questo periodo che i portici a piano strada vengono in buona parte tamponati e gli ingressi delle abitazioni nobiliari assumono la funzione di visibilità esterna che era stata precedentemente delle logge, trasmettendo messaggi solenni di esaltazione del casato. Viene così trasposto in chiave laica il gusto decorativo dei portali religiosi assegnando un particolare tipo di sacralità anche alle dimore private.

Il centro storico di Genova conserva ancora molti portali, in ardesia, in pietra di Promontorio e in marmo⁹¹; in alcuni casi rimane solo la targa murata senza gli stipiti, forse conseguenza di una ristrutturazione di antichi ingressi a seguito della chiusura di vani porticati. Questo *corpus* di manufatti, architettonici e decorativi insieme, testimonia la nuova propensione per motivi ornamentali e simbolici che consentano scelte personali, pur entro i limiti di ben precisi orientamenti stilistici. Rispetto alla decorazione precedente più uniforme e indeterminata, le immagini dei portali appaiono come affermazione di un indirizzo devozionale, di una tendenza di pensiero, oppure come dichiarazione solenne di appartenenza a un nucleo familiare. Al primo tipo si riconducono il Trigramma di Cristo, l'Annunciazione (fig. 2.19), l'Adorazione dei Magi, la raffigurazione di San Giovanni Battista⁹². Le immagini con il Trigramma e l'Annunciazione, tutte in ardesia o pietra di Promontorio, sembrano derivate da una committenza, forse appartenente al ceto mercantile, che non aveva espliciti intenti di esaltazione familiare, ma una generica propensione per il culto religioso. Il Trigramma, immagine dal valore altamente simbolico, ap-

Fig. 2.19. Sovrapporta in ardesia con l'Annunciazione. XV secolo. Archivolto De Franchi. Foto dell'autore



Fig. 2.20. Sovrapporta in pietra di Promontorio con il Trigramma di Cristo. Seconda metà del XV secolo. Via del Campo 11Ar. Foto dell'autore





Fig.2.21. Sovrapporta in marmo con l'Adorazione dei Magi, attribuita a Giovanni Gagini. Seconda metà del sec. XV. Via degli Orefici n. 47r. L'iconografia di tipo simbolico cede il passo a un descrittivismo accurato di matrice tardo gotica, con una raffinata caratterizzazione dei volti e degli atteggiamenti. Foto dell'autore

pare declinato in vari modi: scritto in caratteri gotici o capitali, può apparire senza decorazioni aggiuntive, essere inserito in una ghirlanda con corona sorretta da angeli o essere collocato al centro di un architrave o di una sovrapporta (fig. 2.20).

Una intenzione celebrativa può essere velatamente presente nell'Adorazione dei Magi che rimanda a opere pittoriche di area fiorentina in cui la finalità di esaltazione del casato era evidente nella rappresentazione del corteo (fig. 2.21). I soggetti a carattere religioso in alcuni casi potrebbero indicare anche un legame con alcune confraternite i cui priori appartenevano all'aristocrazia cittadina.

Buona parte dei portali rientra nel secondo tipo che comprende raffigurazioni nel sovrapporta in cui, accanto al tema religioso compaiono motivi esplicitamente connessi alla glorificazione familiare. Rispetto ai precedenti che vengono fatti risalire alla prima metà del XV secolo, questi ultimi con l'immagine di San Giorgio che combatte il drago sono più recenti (seconda metà del secolo e inizi del successivo). In un noto sovrapporta in Vico delle Mele 6 la figura di San Giovanni, delineata con un linguaggio arcaizzante, diventa intermediario tra la famiglia proprietaria del palazzo e la divinità. Il Santo appare nel deserto, vestito di pelli e con una lunga barba, mentre presenta al Padre Eterno una figura alata che fuoriesce da un grande cimiero, immagine ricorrente in ambito genovese e allusiva al 'genio' del casato, in questo caso la famiglia Grillo. Nella parte destra, alle spalle del Santo, sono raffigurati elementi esotici della flora e della fauna con inconsueta originalità (fig. 2.22).

I portali con la figura di San Giorgio sono numerosi e testimoniano la popolarità di una rappresentazione dai molteplici significati. Il motivo religioso è implicito nella presenza stessa del Santo, ma prevale la sua raffigurazione come guerriero a cavallo, simbolo del Bene che sconfigge il Male. In questa immagine si fondono insieme i miti pagani di Teseo e del Minotauro, di Perseo e di Andromeda e alcuni episodi del ciclo

ce, 35-39; Boccardo, P. (1983). Per una mappa iconografica dei portali, cit., pp. 41-43.

⁹² Il Trigramma rimanda alla predicazione di San Bernardino da Siena nella prima metà del Quattrocento. Questo simbolo, che compare già nei manoscritti greci del Nuovo Testamento intorno al III secolo d.C., era stato coniato anche su varie monete genovesi. Cfr. Levati, L.M. (1926). Relazioni di San Bernardino da Siena con Genova e la Liguria. ASLi, LIII, pp. 231-232. Le rappresentazioni dell'Annunciazione e dell'Adorazione dei Magi compaiono a seguito dell'insediamento in Santa Maria di Castello dei Domenicani, che portano un nuovo afflato religioso predicando il culto mariano. Mentre l'Annunciazione è raffigurata sempre con schemi semplificati di tipo simbolico-decorativo, l'Adorazione assume un andamento narrativo, che pone in risalto particolari eterogenei: il paesaggio, il corteo, i lavori nei campi dove gli uomini e gli animali sono colti negli atteggiamenti spontanei della vita quotidiana.



Fig.2.22. Sovrapporta in marmo con l'immagine di San Giovanni e il 'genio', simbolo araldico della famiglia. Prima metà del sec. XV. Vico delle Mele 6. Foto dell'autore

Fig. 2.23. Portale in marmo con la raffigurazione di San Giorgio e il drago. Ai lati figure alate con cartigli che rappresentano il casato. Particolare della sovrapporta. Sec. XV. Via di Canneto il Lungo 29r. Foto dell'autore



dei Cavalieri della Tavola Rotonda. San Giorgio rappresenta l'eroe solitario, il cavaliere votato alla difesa dei deboli, con cui poteva identificarsi il crociato che si recava in Terrasanta. Sui portali è quasi sempre raffigurato mentre proviene da destra, per consentire la vista del suo scudo con la croce, emblema di Genova. Il drago è presente in due atteggiamenti, nel primo cronologicamente più antico è supino sotto le zampe del cavallo e ha aspetto serpentiforme tranne la testa simile a quella del coccodrillo; nel secondo è rampante con zampe da uccello rapace e grandi ali palmate. La principessa in alcuni casi è in piedi, in altri inginocchiata.

L'immagine del santo assume valenza laica se collegata all'Ufficio delle Compere di San Giorgio, che ne aveva fatto il suo emblema, e ai portali dove appare evidente l'intento celebrativo del casato. In quest'ultimo caso la sua rappresentazione comprende figure laterali incorniciate da spirali fitomorfe. Inizialmente si tratta di cimieri piumati con l'insegna della famiglia da cui escono teste di animali con funzione araldica o personaggi alati a mezzo busto, che sorreggono come elemento identificativo torce o fiori o cartigli (fig. 2.23). Il motivo della figura fuoriuscente dall'elmo ha una sua persistenza che denota una scelta di tipo tradizionale, destinata a essere sostituita intorno al 1457, data dei primi portali attribuiti ai Gaggini, dalla rappresentazione di uomini armati, realisticamente descritti, che delimitano la scena e reggono lo scudo con le insegne. L'unico portale con la rappresentazione di San Giorgio che si differenzia dai modelli precedenti è quello di Vico dell'Oлива, dove lo sfondo è decorato come un arazzo a motivi floreali, la figura della principessa è assente, gli scudi araldici sono retti da amorini e ai lati della sovrapporta compaiono due telamoni dall'aspetto cadente, forse ricordo di qualche evento familiare (fig. 2.24)⁹³.

⁹³ Pavoni, R. (1983). I simboli di Genova alle origini del Comune, *Saggi e documenti*, III. Genova: Civico Istituto Colombiano, pp. 29-64; Boccardo, P. (1983). Per una mappa iconografica dei portali, cit., pp. 48-50; Müller Profumo, L. (1992). *Le pietre parlanti. L'ornamento nell'architettura genovese, 1450-1600*. Genova: F.lli Pagano Editori, pp. 82-104.

Altrettanto numerosi dei portali con l'immagine di San Giorgio sono quelli con tondi in cui sono iscritti profili maschili e femminili. Questi ultimi portali si caratterizzano per la semplicità della decorazione degli stipiti: non più ricchezza di ornamentazione ma rigore geometrico che pone in risalto le medaglie con i volti di imperatori romani o di ignoti personaggi, forse committenti o antenati. Il morfema del profilo imperiale deriva dall'ambiente culturale padovano dove l'opera petrarchesca *De viris illustribus* aveva trovato raffinate soluzioni pittoriche in alcune opere del Mantegna (fig. 2.25). L'immagine classicheggiante del profilo prelude alle complesse rappresentazioni allegoriche di due portali, uno della



Fig. 2.24. Portale in marmo con la raffigurazione di San Giorgio e il drago. Ai lati due inconsueti telamoni. Sec. XV. Vico dell'Oliva 13r. Foto dell'autore



Fig. 2.25. Portale in pietra di Promontorio con tonde e profili. Sec. XV. Via San Siro. Foto dell'autore

famiglia Doria, l'altro della famiglia Spinola, che sviluppano il tema del 'Trionfo', elaborazione iconica di una cultura di tipo preumanistico che dal Veneto si era diffusa in Italia già nel Trecento. Nel caso di Genova non si tratta dell'esaltazione di un personaggio storico, come avveniva in altre città, ma di una versione immaginosa destinata a celebrare il casato. I due portali, realizzati presumibilmente nell'ultimo decennio del XV secolo, rappresentano una *summa* dei temi figurativi elaborati sino ad allora con esiti che si differenziano dalla tradizione locale: negli stipiti compaiono candelabre, motivi fitomorfi, putti musicanti, tonde imperiali e nel centro dell'architrave il Trigramma incoronato. Nel sovrapporta si sviluppa il corteo del trionfo, con al centro il carro trainato da centauri, con figure di amorini e di armigeri. Una celebrazione in chiave quasi esclusivamente profana che si presta a inconsuete interpretazioni allusivo-simboliche (fig. 26)⁹⁴. Un portale che rimane unico per l'originalità della scena riprodotta è quello all'interno del palazzo di piazza San Matteo 17: su stipiti decorati a candelabre è collocato un rilievo che rappresenta la Resurrezione di Lazzaro, impostata al centro di una complessa prospettiva di loggiati sotto cui sono collocati gli astanti. Il soggetto era stato ispirato dal nome del committente, Lazzaro Doria, ricco imprenditore, politico e diplomatico (fig. 27)⁹⁵. La trasformazione della casa signorile che si chiude all'esterno per valorizzare gli ambienti interni del cortile o del vano

⁹⁴ Il portale Doria è unanimemente considerato di qualità superiore a quello, probabilmente successivo, degli Spinola. Gli studiosi, in assenza di una documentazione specifica, hanno fatto varie ipotesi sulle origini iconografiche dei due trionfi, dalla rappresentazione di festeggiamenti che si erano tenuti a Genova per gli ingressi di personaggi di alto rango ospiti delle due famiglie, alla derivazione figurativa da miniature di manoscritti e da disegni per le prime edizioni a stampa dei Trionfi petrarcheschi, alle meno probabili suggestioni visive derivate dai frammenti di un sarcofago antico murato nella catte-

Fig.26. Portale in marmo con il 'Trionfo' Spinola. Particolare della sovrapporta. Sec. XV. Via della Posta Vecchia 16. Foto dell'autore



drale che rappresenta un *thiasos* dionisiaco. Cfr. Boccardo, P. (1982). Per l'iconografia del «Trionfo» nella Genova del Rinascimento: i portali Doria e Spinola, *Studi di Storia delle Arti*, 4, pp. 39-54; Müller Profumo, L. (1992). *Le pietre parlanti*, cit., 138-154.

⁹⁵ Gli studiosi ritengono che l'artista potrebbe essere stato Giovanni da Campione. Cfr. Boccardo, P. (1983). Per una mappa iconografica dei portali, cit., p. 46; Müller Profumo, L. (1992). *Le pietre parlanti*, cit., pp. 119-126.

⁹⁶ Poleggi, E. (1966). Il Rinnovamento edilizio genovese, cit., pp. 53-68.

⁹⁷ Il centro urbano medievale aveva visto lentamente scomparire la sua *facies* di pietra, nascosta sotto l'intonaco, già a partire dal XVI secolo. Le campagne di scrostamento dei primi decenni del Novecento ad opera di Gaetano Poggi e altri interventi di restauro più recenti su alcuni edifici, hanno riportato alla luce parte dei paramenti murari medievali. Cfr. Napoleone L. (2012). *La scoperta della città medievale. L'attività dell'Ufficio Belle Arti e Storia del Comune di Genova (1907-1942)*. Genova: De Ferrari; Poggi, F. (1922). Elenco degli scrostamenti fatti eseguire da G. Poggi, *ASLi*, XLIX, 1, pp. 44-50.

scale indica un sostanziale cambiamento di gusti e di modi di vita cui i *magistri* Antelami sono chiamati a contribuire con soluzioni non facili, considerati gli spazi ridotti a disposizione⁹⁶. I colori tradizionali delle pietre compaiono ancora nell'atrio in una alternanza appena accennata: il marmo nella colonna caposcala e nelle balaustre e il nero nei peducci delle volte e nelle cornici delle porte, ma la stagione della bicromia può ritenersi ormai conclusa (fig. 2.28)⁹⁷.

L'Annunciazione di Giusto di Ravensburg dipinta su una parete del chiostro di Santa Maria di Castello sembra realizzare una estrema sintesi figurativa delle soluzioni coloristiche di ambientazione genovese. Il pittore di cultura fiamminga coglie di Genova la particolare caratteristica decorativa e, fondendo insieme elementi dell'edilizia sacra e dell'arredo profano, opera su due direttrici entrambe significative: da un lato recupera la bicromia del bianco e nero presente nei pilastri e nella pavimentazione del chiostro e la trasferisce nell'arco che immette negli ambienti privati alle spalle della Madonna, dall'altro arricchisce le volte con un tipo di decorazione che prelude agli effetti cromatici del secolo successivo (fig. 29).

Fig. 2.27. Portale in ardesia con la Resurrezione di Lazzaro, attribuita a Giovanni da Campione. Particolare della sovrapporta. 1475 ca. Piazza San Matteo 17. Foto dell'autore





Fig. 2.28. Atrio del Palazzo De Benedetti, piazza di San Donato. Inizio XVI secolo. Foto dell'autore



Fig. 2.29. L'Annunciazione di Giusto di Ravensburg, secondo chiostro della chiesa di Santa Maria di Castello. 1451. Foto dell'autore

BIBLIOGRAFIA

Annali genovesi di Caffaro e dei suoi continuatori. 9 voll., (1923-1930), a cura del Municipio di Genova.

Airaldi, G. (a cura di) (1969). *Le carte di Santa Maria delle Vigne di Genova (1103-1392)*. Genova: Bozzi.

Alberti, L. B. (1966). *L'architettura* (a cura di Orlandi, G., Portoghesi, P.), 2 voll., Milano: Il Polifilo.

Alizeri, F. (1847). *Guida artistica per la città di Genova*, 2 voll., Genova: Grondona.

Alizeri, F. (1875). *Guida illustrativa del cittadino e del forastiero per la città di Genova e sue adiacenze*. Genova: Sambolino.

Alizeri, F. (1870-1880). *Notizie dei professori del disegno in Liguria dalle origini al secolo sedicesimo*, 6 voll. Genova: Sambolino.

Baracchini, C., Filieri, M.T. (1992). "De ore leonis libera me domine", *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 126-129.

Bedocchi, A. (2014). Sarcofagi e marmi architettonici romani presenti a Genova, *Genova dalle Origini all'Anno Mille* (a cura di Melli, P.). Genova: Sagep, pp. 256-263.

Belgrano, L. T. (1888). Contribuzioni alla storia di Genova specialmente nella poesia, *ASLi*, XIX, pp. 653-676.

Boato, A. (2005). Costruire "alla moderna". Materiali e tecniche a Genova tra XV e XVI secolo, *Biblioteca di Archeologia dell'architettura*, 4. Firenze: All'Insegna del Giglio, pp. 48-52.

Boato, A. (2007). Organizzazione delle forniture e mercato dei materiali da costruzione a Genova (secoli XV-XVII), *Mélanges de l'école française de Rome. Italie et Méditerranée, L'Economie de la construction dans l'Italie moderne*, 119, 2, pp. 215-233.

Boato, A. (2013). Dalle cave ai cantieri : il mercato dei materiali lapidei a Genova in età medievale e moderna alla luce delle fonti d'archivio, *Archeologia Post medievale : società, ambiente, produzione*, 17. Firenze: All'Insegna del Giglio, pp. 20-32.

Boccardo, P. (1982). Per l'iconografia del «Trionfo» nella Genova del Rinascimento: i portali Doria e Spinola, *Studi di Storia delle Arti*, 4, pp. 39-54.

Boccardo, P. (1983). Per una mappa iconografica dei portali genovesi del Rinascimento, *La scultura decorativa del Primo Rinascimento*, Atti del I Convegno internazionale di studi, Pavia 16-18 settembre 1980. Roma: Viella Libreria Editrice, pp. 41-53.

Bognetti, G. P. (1938). I Magistri Antelami e la Valle d'Intelvi, *Periodico storico comense*, II, fasc. I-IV, pp. 17-71.

Bonatti F. (1992). Lunigiana: crocevia tra Genova, Pisa e Lucca, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 332-337.

Boscassi, A. (1891). La cava di pietra nera di Promontorio, *Giornale Ligustico di Archeologia, storia e letteratura*, XVIII, pp. 476-478.

Braggio, C. (1890). Giacomo Bracelli e l'umanesimo dei Liguri al suo tempo, *ASLi*, XXIII, pp. 5-296.

Cagnana, A. (2005). L'introduzione dell'opera quadrata medievale a Genova: aspetti tecnologici e contesto sociale, *Archeologia de la Arquiteutura*, 4, pp. 23-45.

Cervetto, L. A. (1903). *I Gaggini da Bissone. Loro opere in Genova ed altrove. Contributo alla storia dell'arte lombarda*. Milano: Hoepli.

Chiaudano, M., Moresco, M. (a cura di) (1935). *Il cartolare di Giovanni Scriba*, 2 voll. Torino: Lattes & C. Editori.

Chiaudano, M., Morozzo della Rocca, R. (a cura di) (1938). Oberto Scriba de mercato (1190), *Notai Liguri del secolo XII*, I. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria.

Chiaudano, M. (a cura di) (1940). Oberto Scriba de mercato (1186), *Notai Liguri del secolo XII*, IV. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria.

Conti, G. (1980). Marmi antichi di Genova: la decorazione architettonica, *Rivista di Archeologia*, 4, pp. 31-55.

Cortesogno, L., Gaggero, L. (1995). Storia Naturale dell'Ardesia, *Ardesia. Materiale Cultura Futuro* (a cura di Mannoni, T.). Genova: Sagep, pp. 9-15.

Dagnino, A. (1987). Scultura e Architettura, *La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, pp. 131-151.

Dagnino, A. (1987). Maestranze e cantieri, *La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, pp. 152-177.

Dagnino, A. (1992). Gli scultori nei cantieri dei Magistri Antelami, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 131-133.

Dagnino, A. (1992). Continuità nella produzione di cantiere: per una tipologia dei capitelli a foglie, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 136-137.

Dagnino, A. (1992). Marmo di Carrara, ardesia e pietra di Promontorio nell'arredo urbano, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 192-193.

Decri, A. (1997). La presenza degli Antelami nei documenti genovesi, *Magistri d'Europa. Eventi, relazioni, strutture della migrazione di artisti e costruttori dai laghi lombardi*, Atti del Convegno, Como 23-26 ottobre 1996. Milano: Nodo libri, pp. 407-432.

Della Torre, N. (1838). *Guida del viaggiatore alle cave delle lavagne della Liguria Orientale*, Chiavari: V. Botto Ed.

Di Fabio, C. (1981). I portali romanici della Cattedrale di Genova. Contributo alla storia del Duomo nel XII secolo, *Bollettino d'Arte*, 12, pp. 89-122.

Di Fabio, C. (1987). Geografia e forme della scultura in Liguria, *La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, pp. 87-129.

Di Fabio, C. (1992). "...i porfidi e i marmi naturali", *Niveo de Marmore. L'uso artistico*

- del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, p. 191.
- Di Fabio, C. (1992). Cantieri, scultori ed episodi di committenza nel Trecento, *Niveo de Marmore. L'uso artistico del marmo di Carrara dall'XI al XV secolo* (a cura di Castelnuovo, E.). Genova: Edizioni Colombo, pp. 223-233.
- Di Fabio, C. (2016). Genova, XII-XIII secolo. Arte in una città europea e mediterranea: percorsi e cesure, *Genova nel Medioevo. Una capitale del Mediterraneo al tempo degli Embriaci* (a cura di Pessa, L.), Catalogo della mostra, Genova, 19 marzo-26 giugno 2016. Genova: Sagep, pp. 54-69.
- Di Fabio, C. (2019). I *Magistri Antelami* a Genova fino al primo Duecento: origini ed esiti artistici di un fenomeno storico e di un monopolio, *Storia di Parma VIII, La storia dell'arte: secoli XI-XV, 1* (a cura di Quintavalle, A.C.). Parma: MUP, pp. 74-93.
- Dufour Bozzo, C. (1967). Sarcofagi romani a Genova. *Quaderni dell'Istituto di storia dell'arte dell'Università di Genova, n. 5*. Genova: F.lli Pagano.
- Dufour Bozzo, C. (1979). Il reimpiego dei marmi antichi nei monumenti medievali e l'esordio della scultura architettonica del "protoromanico" a Genova, *Bollettino d'Arte*, 3, pp. 1-58.
- Dufour Bozzo, C. (1989). *La porta urbana nel Medioevo. Porta Soprana di Sant'Andrea in Genova, immagine di una città*. Roma: «l'ERMA» di Bretschneider.
- Falcidieno, M.L. (2001). Il portico come disegno unificante della città: percorso pubblico o pertinenza privata?, *Rilievo e forma urbana. Il disegno dei portici. Il disegno della città* (contributi al Convegno). Torino: Celid, pp. 569-572.
- Fratini, F., Pecchioni, E., Cantisani, E., Antonelli, F., Giamello, M., Lezzerini, M. e Canova R. (2015). Portoro, the black and gold Italian "marble", *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 26, pp. 415-423. DOI: 10.1007/s12210-015-0420-7.
- Gavazza, E. (1983). Problemi per un rilevamento iconografico della scultura «decorativa» a Genova nel Rinascimento, *La scultura decorativa del Primo Rinascimento*, Atti del I Convegno internazionale di studi, Pavia 16-18 settembre 1980. Roma: Viella Libreria Editrice, pp. 33-39.
- Giustiniani, A. (1834). *Annali della Repubblica di Genova*, 2 voll. Genova: Editore Vincenzo Canepa.
- Grossi Bianchi, L., Poleggi, E. (1980). *Una città portuale del Medioevo. Genova nei secoli X-XVI*. Genova: Sagep.
- Grosso, O. (1933). Il restauro della torre di Palazzo, *Genova*, febbraio, pp. 101-126.
- Grosso, O., Pessagno G. (1933). *Il Palazzo del Comune di Genova*. Genova: Società Ligure di Storia Patria.
- Hall, M. W., Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1938). Guglielmo Cassinese (1190-1192), *Notai Liguri del secolo XII*, II, 2 voll. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria.
- Hall-Cole, M. W., Krueger, H. C., Reinert, R.G., Reynolds, R. L. (a cura di) (1939-1940). Giovanni di Guiberto (1200-1211), *Notai Liguri del secolo XII*, V, 2 voll. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria.
- Hughes, D.O. (1983). Sviluppo urbano e struttura familiare a Genova nel Medioevo, *Città, storia, società*, (a cura di Abrams, P., Wrigley, E. A.). Bologna: il Mulino, pp. 109-138. ISBN 88-15-00215-4.
- Imperiale di Sant'Angelo, C. (a cura di) (1936-1938). *Codice Diplomatico della Repubblica di Genova*. 2 voll. Roma: Tipografia del Senato.
- Klapisch-Zuber, C. (1973). *Carrara e i maestri del marmo (1300-1600)*. Massa: Deputazione di Storia Patria per le Antiche Province Modenesi.
- Krueger, H. C., Reynolds, R. L. (a cura di) (1951-1953). Lanfranco (1202-1226), *Notai Liguri del secolo XII*, VI, 3 voll. Genova: R. Deputazione di Storia Patria per la Liguria.
- Lazzarini, L., Sangati, C. (2004). I più importanti marmi e pietre colorati usati dagli antichi, *Pietre e marmi antichi* (a cura di Lazzarini, L.). Padova: Cedam, pp. 73-100.
- Leandri, G. (2023). *Le logge medievali di Genova. Architettura e immagine della città*. Genova: Genova University Press.
- Levati, L.M. (1926). Relazioni di San Bernardino da Siena con Genova e la Liguria. *ASLi*, LIII, pp. 221-237.
- Mannoni, L., Mannoni, T. (1984). *Il marmo. Materia e cultura*. Genova: Sagep.
- Mannoni, T., Boato, A. (2009). I paramenti murari squadrati e non squadrati. Rapporti tra la Liguria e le valli d'Intelvi, *I Magistri Comacini. Mito e realtà del medioevo lombardo*, Atti del XIX Congresso internazionale di studio sull'alto medioevo, Varese-Como, 23-25 ottobre 2008, II. Spoleto: Fondazione Centro italiano di studi sull'alto medioevo, pp. 745-779. ISBN 978-88-7988-177-7.
- Marroni, M., Monechi, S., Perilli, N., Principi, G., Treves, B. (1992). *Late Cretaceous flysch deposits of the Northern Apennines, Italy: age of inception of orogenesis-controlled sedimentation*, *Cretaceous Research*, 13, pp. 5-6, pp. 487-504.
- Montagni, C. (1993). *Costruire in Liguria. Materiali e tecniche degli antichi maestri muratori*. Genova: Sagep.
- Morozzo della Rocca, R. (1976). *Le logge medioevali di Genova. Studi per la riapertura ed il restauro*. Genova: Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Genova.
- Müller, R. (2003). Constructing Fame in a Town: The Case of Medieval Genoa, *Medium Aevum Quotidianum*, 47, pp. 8-32.
- Müller Profumo, L. (1992). *Le pietre parlanti. L'ornamento nell'architettura genovese, 1450-1600*. Genova: F.lli Pagano Editori.
- Murialdo, G., Cabella, R., Arobba, D. (a cura di) (2019). *Pietra di Finale. Una risorsa naturale e storica del Ponente ligure*. Finale Ligure: Istituto internazionale di studi liguri, Museo archeologico del Finale, Museo Diffuso del Finale, Università degli Studi di Genova. ISBN 978-88-86796-67-5.
- Napoleone, L. (2012). *La scoperta della città medievale. L'attività dell'Ufficio Belle Arti e Storia del Comune di Genova (1907-1942)*. Genova: De Ferrari.

- Pandiani, E. (1915). Vita privata genovese nel Rinascimento, *ASLi*, XLVII, pp. 1-451.
- Pavoni, R. (1983). I simboli di Genova alle origini del Comune, *Saggi e documenti*, III. Genova: Civico Istituto Colombiano, pp. 29-64.
- Petti Balbi, G. (2008). *Genova medievale vista dai contemporanei*. Genova: Compagnia dei Librai.
- Plinio il Vecchio (1988). *Storia Naturale* (a cura di Conte, G. B.) 5 voll. Torino: Einaudi Editore.
- Podestà, F. (1904). Le cave di pietra nera detta di Promontorio, *Giornale storico e letterario della Liguria*, V, pp. 188-191.
- Podestà, F. (1913). *Il porto di Genova dalle origini alla caduta della Repubblica genovese (1797)*. Genova: Spiotti Editore.
- Poleggi, E. (1965). Le contrade delle consorterie nobiliari a Genova tra il XII e il XIII secolo. *Urbanistica*, 42/43, pp. 15-20.
- Poleggi, E. (1966). Il Rinnovamento edilizio genovese e i magistri Antelami nel secolo XV, *Arte Lombarda*, 11, 2, pp. 53-68.
- Poleggi, E. (1973). *Santa Maria di Castello e il romanico a Genova*. Genova: Sagep.
- Poleggi E. (1981). Tipi abitativi ed aggregazioni urbane della nobiltà genovese, *La storia dei genovesi*, atti del I convegno di studi sui ceti dirigenti nelle istituzioni della Repubblica di Genova (Genova 7-9 novembre 1980). Genova: Associazione Nobiliare della Liguria, pp. 199-211.
- Poggi, F. (1922). Elenco degli scrostamenti fatti eseguire da G. Poggi, *ASLi*, XLIX, 1, pp. 44-50.
- Poggi, F. (1929). Nota circa il dominio dei Campofregoso in Carrara, *ASLi*, LIV, fasc. II, pp. 141-161.
- Quartino, L. (2014). Marmi romani reimpiegati a Genova: un problema aperto, *Genova dalle Origini all'Anno Mille* (a cura di Melli, P.). Genova: Sagep, pp. 245-253.
- Rovere, A. (a cura di) (1992). I Libri Iurium della Repubblica di Genova, I/1, *Fonti per la Storia della Liguria*, II, 1. Genova: Regione Liguria e Società Ligure di Storia Patria.
- Savioli, L. (1995). Tradizione e Storia della Lavagna, *Ardesia. Materiale Cultura Futuro* (a cura di Mannoni, T.). Genova: Sagep, pp. 17-51.
- Tagliaferro, L. (1987). Un secolo di marmo e di pietra: il Quattrocento, *La scultura a Genova e in Liguria. Dalle origini al Cinquecento*. Genova: Cassa di Risparmio di Genova e Imperia, pp. 215 -263.
- Trentini, A. (1971). Iconografia e simbolismo nelle sculture della facciata di S. Lorenzo in Genova, *Studi Genuensi*, VIII, pp. 69-162.
- Vitruvio Pollione (2015). *Architettura* (a cura di Maggi, S., Ferri, S.). Milano: BUR. ISBN 978-88-17-12768-4.
- Wittkower, R. (1987). *Allegoria e migrazione dei simboli*. Torino: Giulio Einaudi Editore. ISBN 88-06-59351-0.

Arcipelago paesaggio. Una nuova tassonomia per il progetto di giardino pensile

Prefazione

L'importanza della transdisciplinarietà è una lezione appresa da tempo, eppure ancora oggi, di fronte a sfide complesse, la cooperazione tra alcuni ambiti genera forme di attrito. Il contrasto è stato fecondo, e nel tempo ha dato vita a dibattiti e riflessioni sul tema e su come risolvere il suo superamento: è la separazione tra arti e scienze e, nello specifico tra quelle discipline che si trovano a dover progettare una realtà le cui regole sono spesso sfuggenti.

Ne è un esempio il cosiddetto mondo naturale, e i principi a esso connessi, quando si tratta di intervenire con un atto progettuale: le risposte, i concetti e le categorie di interpretazione acquisiscono in questo caso posizioni a volte molto distanti tra loro. La geografia, l'architettura, l'antropologia, il design, l'architettura del paesaggio, nonostante i numerosi punti in comune, sembrano avere delle discordanze quando si tratta di indagare la relazione tra mondo antropico e mondo selvatico, tra cultura e natura.

Oggi, però, di fronte a situazioni che trascendono la dimensione spaziale e temporale umana, in quello che molti definiscono post-postmodernismo, si avverte il bisogno di superare urgentemente il divario generato dalle attuali categorie di riferimento e di adottare logiche differenti.

A partire dal lavoro di ricerca¹ che ha indagato le dinamiche evolutive del giardino pensile quale tassello indicativo di un più grande mosaico nel progetto di paesaggio, con il presente contributo si intende proporre la sperimentazione della tassonomia numerica, uno strumento di classificazione mutato da altre discipline che ha l'obiettivo di porsi come diverso strumento interpretativo della fenomenologia del progetto pensile.

¹Melli, S. (2023) *Il giardino pensile - Le alterità della natura nel progetto di paesaggio*. Dottorato di Ricerca in Architettura, Nuove Politiche e Prospettive Urbane e Territoriali, XXXV ciclo. Dipartimento di Architettura e Design, Università di Genova (<https://hdl.handle.net/11567/111904>).

1. Prospettive diverse

1.1 Primavera ecologista

AS8-14-2383HR è il codice che identifica una delle immagini che, tra molte, ha giocato un ruolo significativo nel cambiare il nostro modo di vedere la Terra. L'autore fu l'astronauta William Anders, che scattò la celebre foto durante la missione



Fig. 3.1. Il sorgere della Terra @NASA

Apollo 8, più precisamente alla vigilia di Natale del 1968, e pur non rappresentando la prima foto in assoluto della Terra vista dallo spazio², resta senza dubbio una delle più influenti. La foto ritrae il globo terrestre emergere dall'oscurità del cosmo – di qui il nome con cui la foto è conosciuta, *Earthrise*, *Il sorgere della Terra* o, più poeticamente *l'Alba della Terra* – parzialmente illuminato dalla luce del Sole. Ma fu un dettaglio a rendere davvero iconica la foto della Terra: la Luna.

Il punto di vista da cui è ritratto il nostro pianeta è infatti quello di un altro corpo celeste; la superficie della Luna, un paesaggio desertico in primo piano, un grande e grigio orizzonte, e sullo sfondo, piccola, defilata, ma viva, la Terra: «un'oasi nella grande vastità dello spazio»³. La finitezza del Pianeta per le sue ridotte dimensioni apparenti, il contrasto tra il blu della Terra e il grigiore della Luna, e soprattutto l'inversione prospettica tra le due generarono un vero sconvolgimento nel senso comune: mai prima di allora l'essere umano coglieva la sua fragilità – ridimensionando l'importanza che aveva di sé – e, allo stesso tempo, l'unità e l'unicità del mondo a cui apparteneva, trascendendo limiti e confini.

Ma se bastò il cambio di prospettiva in una foto a innescare nel pensiero comune la sensazione di una maggiore interconnessione, è vero anche che nello stesso periodo l'opinione pubblica era già sensibile a tematiche ecologiche.

I '70 vengono ricordati, infatti, come gli anni della primavera del pensiero ecologista⁴: movimenti culturali di massa inneggiavano all'unione tra popoli, alimentati su tutti i fronti – scienza, letteratura, arte, musica, architettura – da iniziative a supporto dell'idea che il pianeta Terra fosse da considerare come un unico sistema.

Mercy, mercy me – The Ecology era il brano di punta dell'estate del '71, uno struggente inno alla Terra cantato da Marvin Gaye, e rimasto popolare nel tempo, tanto da essere omaggiato da altri cantanti come David Bowie e Diana Ross in un nuovo video pubblicato a distanza di vent'anni. Nello stesso periodo il chimico e scrittore britannico James Lovelock discuteva della cosiddetta *Ipotesi Gaia*, teoria secondo la quale il pianeta andava considerato come un superorganismo vivente autoregolante in cui ogni elemento – vivente o meno – rimaneva for-

² Secondo Megan Garber, la prima foto sarebbe stata scattata nel 1946 da un razzo lanciato nell'orbita terrestre. Cfr. Garber, M. (2012) 'The First Image of Earth Taken From Space (It's Not What You Think)', *The Atlantic*, 6 August.

³ Cosgrove, D.E. (2001) *Apollo's eye: a cartographic genealogy of the earth in the western imagination*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, p. 258.

⁴ Nebbia, G. (1986) 'Presentazione a Il cerchio da chiudere', in Commoner, B., *Il cerchio da chiudere; presentazione di Giorgio Nebbia; appendice di Virginio Bettini; trad. di Virginio Bettini e Gianluigi Mainardi*. Milano: Garzanti (Saggi rossi), pp. 6-20.

⁵ Lovelock, J.E. (1972) 'Gaia as seen through the atmosphere', *Atmospheric Environment* (1967), 6(8), pp. 579-580.

⁶ «1) Everything is connected to everything else; 2) Everything must go somewhere; 3) Nature knows best; 4) There is no such thing as a free lunch.» Tratto da: Commoner, B. (1980) *The Closing Circle: Nature, Man and Technology*. New York: Bantam Books.

⁷ Sighiboldi, C. (1973) 'Quando l'ecologia non è una mistificazione: Il cerchio da chiudere', *l'Unità mercoledì 3 gennaio 1973*, p. 3.

⁸ Nebbia, G. (1986), op. cit. p. 17.

⁹ Nel 1972 gli Stati Uniti convocano a Stoccolma la prima conferenza internazionale sulla protezione dell'ambiente, secondo la cui Dichiarazione, pur dovendo salvaguardare gli ecosistemi per le future generazioni, lo sviluppo è essenziale e va promosso in ogni caso.

¹⁰ Tra le soluzioni del Club di Roma, proposte ma non auspicabili, vi era il controllo di natalità della popolazione; sul tema generale del contenimento delle libertà individuali, Commoner si pronuncerà dicendo: «it would condemn most of the people of the world to the material level of the barbarian, and

temente interconnesso⁵. L'architetto e filosofo Richard Buckminster Fuller pubblica l'Operating Manual for Spaceship Earth, una guida gestionale che guarda alla Terra come ad una navicella spaziale, fornendo consigli e soluzioni per il buon mantenimento dell'"astronave", e sottolineando l'interrelazione tra gli elementi presenti sul pianeta e la finitezza delle risorse. Alcuni anni dopo avrebbe riprodotto insieme al collega Shoji Sadao una versione aggiornata della *Dymaxion Map*, un planisfero cubottaedrico che dava l'illusione che i continenti non fossero altro che un unico arcipelago.

Ma gli esempi celebri che rimarcavano il concetto secondo cui tutto fosse interconnesso non finiscono qui: nel 1972, con il suo *World3*, il *Club di Roma* propose un sistema di tracciati e itinerari che connettevano tra loro molti degli aspetti legati al funzionamento del pianeta, dai tassi di natalità alla superficie industriale pro capite, dalle risorse non rinnovabili alla rigenerazione dei suoli fertili, dall'inquinamento ai servizi, rivelando una geografia nascosta della Terra. Nel 1971, ad un anno di distanza dal primo *Earth Day*, il biologo ed ecologo statunitense Barry Commoner pubblicava *The Closing Circle*, una lucida disamina sulle caratteristiche della crisi ambientale allora riscoperta: quattro i principi che emergono dal libro⁶, riassumibili in una narrazione olistica necessaria alla comprensione del sistema ecologico.

Nella sua esplorazione emerge un forte approccio transdisciplinare: «tocca i vari aspetti della tematica ambientale – dalla chimica e dalla biologia all'economia e alla analisi dei rapporti sociali – e ne fornisce una visione d'assieme, geniale per la coerenza (...) per cui da una indagine che in un primo tempo appare strettamente inerente alle scienze naturali, sorgono successivamente e vengono in luce problemi che investono la società»⁷. Rivolgendosi a specialisti ed esperti, tanto quanto a un pubblico più generalista, Commoner riesce a offrire una visione del mondo tutt'altro che scontata, in cui non solo i singoli fenomeni vengono finalmente ricollegati tra loro, ma il cerchio di interrelazioni che sembra formarsi offre lo spunto per un'aspra critica al modello dominante. *The Closing Circle* è un testo sovversivo nel suo genere: il pregio del libro, la cui visione d'insieme si avvicina a quella tentata dal *Club di Roma*, sta, a differenza di quest'ultimo, nell'aver cercato di indagare e mettere in luce l'origine della «degradazione della natura»⁸, individuandone le cause nel funzionamento dei sistemi economici, produttivi e sociali.

Da una parte, la visione regnante – e oggi ampiamente diffusa – riconosceva come principale causa della crisi una propensione tutta umana allo sviluppo illimitato, a danno di un sistema dalle risorse finite⁹; la soluzione proposta era dunque quella di contenere, controllare e limitare le libertà individuali¹⁰, anticipando in un certo senso il concetto di sostenibilità. Dall'altra parte, il pensiero di Commoner, che denunciava invece un sistema politico cieco e inerte la cui organizzazione economica – non l'umana natura di per sé – si fondava su processi produttivi lineari che ignoravano i funzionamenti ciclici dell'ecosistema ma privilegiavano invece il rapido sfruttamento delle risorse.

La proposta di Commoner era quella di incentivare processi ciclici e virtuosi, misurabili in termini di qualità, e adottare una

visione più ampia con la quale porre a sistema i diversi fenomeni, considerato che solamente «una maggiore osmosi tra le varie discipline può permettere di dominare i problemi complessi che riguardano la condizione umana nell'ecosistema»¹¹. Non è un caso che proprio il 1970 fu l'anno in cui il termine *transdisciplinarité* fece la sua comparsa.

1.2 Transdisciplinarità e paesaggio

Per Franco Zagari¹², «il termine “Paesaggio” appartiene a molti campi del pensiero contemporaneo, con significati anche molto diversi (...). Le implicazioni estetiche del paesaggio sono sempre intimamente connesse a quelle culturali, sociali ed economiche»¹³. Avvicinarsi al paesaggio significa quindi acquisire una visione d'insieme che permetta di confrontarsi con la molteplicità dei saperi che lo interessano: architettura, urbanistica, botanica, storia, ecologia, ingegneria ambientale, così come semiotica ed estetica sono alcuni dei tanti sguardi che hanno trovato nel paesaggio un loro punto focale. L'approccio inevitabilmente interdisciplinare che riguarda il paesaggio si riflette nella sua progettazione e configura l'architettura del paesaggio come «una polifonia di tante arti e conoscenze diverse»¹⁴, capace di registrare e tracciare sincrone relazioni fra elementi materiali e immateriali, «fra espressione artistica, conoscenza delle scienze naturali, competenza tecnica, impegno sociale, sensibilità politica»¹⁵.

In tal senso, la necessità di coinvolgere non solo differenti saperi ma anche diverse sensibilità, fa sì che la figura del paesaggista sia eccezionalmente transdisciplinare: l'ampia visione progettuale che le appartiene, la sua «preparazione più specifica per la lettura e l'interpretazione di questa qualità che chiamiamo paesaggio» si sono sviluppate tanto da 'co-creare' nuovi paradigmi. Superando le frontiere dei saperi, non appartengono più a nessuna disciplina e, nel tempo, hanno finito per generare «il corpo di un'opera con un suo mondo tecnico e scientifico del tutto originale»¹⁶.

È il paradosso di quella che potrebbe essere definita una *transdisciplina*. L'architettura del paesaggio, nel generare un *corpus* teorico e pratico unico alla materia, ha avuto però l'ambizione di mantenere in relazione esplicita tutti i saperi coinvolti, con il chiaro obiettivo di reagire efficacemente alle sfide offerte dalla società. Se una maggiore osmosi tra le discipline – l'interdisciplinarità – permette infatti di affrontare i problemi complessi di quella rete che chiamiamo mondo, la transdisciplinarità dell'architettura del paesaggio, non solo offre una risposta «a una domanda della società, ma la precede, assumendo anche un ruolo di ispirazione e di regia»¹⁷. Un aspetto cruciale dei problemi complessi è infatti quello di saperne interpretare le traiettorie.

Nell'architettura del paesaggio, il progetto di una porzione di territorio in continua trasformazione rende il fattore temporale importante quanto quello spaziale: la 'porzione' di paesaggio diventa contemporaneamente «frammento» e «momento», nella misura in cui «il “frammento” restituisce del concetto di paesaggio la duttilità rispetto alla cognizione di chi lo riconosce come unità e valore (...), il “momento” esprime una qualità altrettanto importante, che il paesaggio è un processo in ininterrotta evoluzione (o involuzione), è un corpo vivente»¹⁸.

the rest, the “fortunate minorities”, to the moral level of the barbarian» (Commoner, 1980, op.cit. p. 296).

¹¹ Lombardo, E. (1973) 'Review of Il cerchio da chiudere', *Genus*, 29(1/2), pp. 223-225, cit. p. 224.

¹² Il presente paragrafo *Transdisciplinarità e paesaggio* riprende e cita abbondantemente il capitolo iniziale de *Questo è paesaggio: 48 definizioni*, di Franco Zagari – recentemente scomparso – nel timido ma necessario tentativo di omaggiare un libro che, a tutti gli effetti, ha costituito un pilastro dell'architettura del paesaggio in Italia.

¹³ Zagari, F. (2006) *Questo è paesaggio: 48 definizioni*. Roma: Mancosu, p. 15.

¹⁴ Ivi, p. 25.

¹⁵ Ivi, p. 28.

¹⁶ Ivi, p. 25.

¹⁷ Ivi, p. 28.

¹⁸ Ivi, p. 31.

¹⁹ Ivi, p. 14.

²⁰ Ivi, p. 31.

²¹ Latour, B. (2010) 'An Attempt at a "Compositionist Manifesto"', *New Literary History*, 41(3), pp. 471-490, cit. 480.

²² Descola, P. (2015) *Par-delà nature et culture*. Paris: Gallimard (Collection Folio, 607), p. 114.

²³ Morin, E. (2001) *Il metodo*. Milano: R. Cortina [ed. or. 1977], p. 9.

²⁴ McHarg, I. L. (1989) *Progettare con la natura*. Padova: Muzzio, cit. p. 248.

²⁵ McHarg, I. L. (1997) Ecology and design, in G.F. Thompson and F.R. Steiner (eds.) *Ecological design and planning*. New York: John Wiley (The Wiley series in sustainable design), pp. 321-332.

²⁶ European Commission (2022b) Green Deal: pioneering proposals to restore Europe's nature by 2050 and halve pesticide use by 2030. Bruxelles: European Commission [Comunicato Stampa].

²⁷ È la Direttiva del Consiglio 92/43 CEE del 21 maggio 1992 ed è considerato il fondamento legale della politica comunitaria sulla conservazione della biodiversità. Sul tema, cfr. <https://www.mite.gov.it/pagina/direttiva-habitat>

Al paesaggio viene perciò riconosciuta la qualità non scontata di essere «un'entità viva e mutevole nel tempo»¹⁹. È un luogo effervescente di sperimentazione che richiede un'esplorazione profonda delle complesse relazioni che insistono tra umano e non umano e, di riflesso, tra le discipline interessate. Non è un caso che attraverso la storia dei singoli progetti di giardini e paesaggio sia possibile intravedere «una puntuale espressione del pensiero umano sulla natura»²⁰.

Ma anche nell'architettura del paesaggio resiste un contrasto quasi 'atavico' tra le discipline più interessate alle espressioni creative dell'umano e quelle che indagano il funzionamento sistemico del mondo: ovvero, tra arti e scienze.

La supposta inconciliabilità tra le due si ritrova nella concezione, oggi radicata in gran parte del mondo 'occidentalizzato', che vuole cultura e natura su piani opposti: è la «biforcazione» di Bruno Latour²¹ o il «*gran partage*» di Philippe Descola²²; frutto di una ricerca della conoscenza scomposta in più parti dove lo scientismo riduzionista prende le distanze da altri campi del sapere, spesso «squalificati a priori»²³. Si tratta di una frattura insanabile – ma allo stesso tempo, da recuperare – che si manifesta compiutamente nella separazione presunta tra città, società, cultura, mondo umano in genere, e la sfera del selvatico, del vegetale, del mondo, in altre parole, non umano.

Nella continua ricerca di superare la questione con ibridazioni, sovrapposizioni, riconciliazioni, l'attrito generato ha avuto tuttavia il pregio di favorire dibattiti e riflessioni sul tema, alimentando, ad esempio, il confronto tra quelle discipline che si trovano a dover progettare una realtà dalle regole spesso sfuggenti, e altre discipline che sul meccanismo delle medesime regole hanno provato a fare chiarezza. Ne è un caso la frizione feconda che si produce fra la rappresentazione di piano e progetto fissata nelle linee di un disegno, e la complessità e l'imprevedibilità di un sistema ecologico in grado di auto-organizzarsi e che, per questo, sembra sfuggente.

Celebre, in tal senso, il pionieristico lavoro di Ian McHarg, quando, nel 1969, due anni prima dell'uscita di *The Closing Circle*, si interrogava sul ruolo dell'ecologia quale «scienza delle relazioni degli organismi e dell'ambiente, che integra le scienze e le arti liberali»²⁴, proponendo un punto di incontro tra natura e progetto. Anni dopo la pubblicazione di *Design with Nature*, McHarg ammise che più che una definizione, la sua voleva essere un'esortazione: «progettate con la natura!»²⁵.

1.3 Progettare con la natura in Europa

Il 12 luglio 2023, il Parlamento europeo ha approvato la cosiddetta *Nature Restoration Law*, la prima proposta di legge vagliata in seno al Consiglio europeo a stabilire dei target teoricamente vincolanti per gli Stati membri riguardo l'obiettivo di rinaturazione²⁶. Si tratta di un punto di svolta rispetto ad altre proposte, come ad esempio la Direttiva Habitat²⁷ – caposaldo della legislazione europea per il mantenimento della biodiversità – da sempre criticata proprio per la mancanza di vincoli²⁸.

La *Nature Restoration Law*, il cui iter burocratico, specialmente in Italia, sembra incontrare ancora diversi ostacoli, individua un'ampia gamma di ecosistemi presenti nel territorio

europeo, e stila, per ciascuno di essi, una serie di misure per il loro corretto ripristino, fissando al 2030 – *in extremis*, 2050 – il termine entro cui provvedere. La legge prende atto del ritmo allarmante con cui la crisi climatica sta danneggiando il sistema ambientale – l'Europa è la seconda regione al mondo per ecosistemi danneggiati²⁹ – economico e sociale.

Con il termine ripristino, o *restoration*, si intendono una serie di azioni di recupero della biodiversità degli ecosistemi degradati, e di salvaguardia e ampliamento delle aree naturali esistenti³⁰. L'obiettivo è quello di «riparare i danni ecologici e ricostruire un rapporto più sano tra l'uomo e il resto della natura»³¹. Un'azione, ad esempio, per raggiungere questo traguardo è «l'inverdimento delle città e delle infrastrutture»³², un concetto non nuovo e ripreso più volte da misure pregresse: tra le principali, l'*Intergovernmental Panel on Climate Change*³³, la *Convention of Biological Diversity*³⁴, e, soprattutto, la *Climate Adaptation Strategy*.

In particolare, quest'ultima, risalente al 2021, promuove l'attuazione di un adattamento «più intelligente» ai cambiamenti climatici, e riconosce nell'ispirazione ai processi naturali la via più efficace e «senza rimpianti»³⁵ per contrastare le sfide ambientali. Ed è proprio nelle «soluzioni basate sulla natura» che la *Strategy* trova, infatti, una risposta agli obiettivi previsti dal *Green Deal* europeo³⁶, il pacchetto di iniziative strategiche messo in atto dall'Unione Europea per sostenere economicamente e legalmente gli Stati membri nell'adozione di misure congiunte per ripristinare gli ecosistemi danneggiati e raggiungere la neutralità climatica³⁷. Anche in questo caso, la priorità è nel rinverdimento delle città.

Nel report finale dell'*Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities'* del 2015, uno studio condotto nell'ambito di Horizon 2020³⁸ per meglio definire e valutare le *nature based solutions*, si afferma come queste possano effettivamente «aiutare le società ad affrontare una serie di sfide ambientali, sociali ed economiche (essendo) azioni ispirate, sostenute o copiate dalla natura»³⁹.

Anche in questo caso, il report sottolinea l'importanza di privilegiare, soprattutto negli ambiti urbanizzati, tutte quelle azioni che permettano di «integrare i sistemi viventi con i sistemi costruiti attraverso combinazioni innovative»⁴⁰.

Non ultimo, nell'ambito del *NextGenerationEU*⁴¹ l'iniziativa del *New European Bauhaus*, un progetto culturale «creativo e transdisciplinare» che – parafrasando il testo della pagina ufficiale⁴² – ha l'obiettivo di co-costruire per l'Europa un futuro «bello e sostenibile», inserendosi come un ponte tra scienza, tecnologia, arte e cultura.

Come per McHarg qualche decennio prima, anche oggi la strada da percorrere sembra essere quella di una necessaria conciliazione tra arti e scienze, tra mondo umano e non umano, tra selvatico e urbano, tra natura e architettura.

Si tratta, come anticipato, di quello che nel progetto di paesaggio opera già come la «realizzazione di una riconciliazione fra leggi opposte – quelle che sono alla base della creazione degli edifici e quelle che governano la crescita delle piante»⁴³, una riconciliazione «inquietata sempre, ma vieppiù necessaria»⁴⁴. Inquietata poiché, come visto, pur nella transdisciplinarietà dell'architettura del paesaggio, l'attrito permane.

²⁸ Hoek, N. (2022) A Critical Analysis of the Proposed EU Regulation on Nature Restoration: Have the Problems Been Resolved?, *European Energy and Environmental Law Review*, 31(5).

²⁹ Paulus, J. and Sprackett, J. (2021) 'EU nature restoration law'.

³⁰ European Commission (2022a) 'Proposta di Legge 2022/195 Regulation of the European Parliament and of the Council on nature restoration'. Bruxelles: European Commission.

³¹ Gann, G.D. et al. (2019) 'International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition', *Restoration Ecology*, 27(S1), pp. S1-S46. p. 3.

³² European Commission, 2022b, op. cit. p. 1

³³ L'IPCC è un gruppo intergovernativo nato nel 1988 con lo scopo di fornire rapporti periodici di valutazione sull'emergenza climatica. Sul tema, cfr. <https://www.ipcc.ch/>

³⁴ Fondata a partire dal Summit di Rio del 1992 e firmata da 150 Stati, riconosce e promuove la conservazione della biodiversità come interesse umanitario. Sul tema, cfr. <https://www.cbd.int/>

³⁵ European Commission (2021) 'Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale Europeo e al Comitato delle Regioni, Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici – La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici, COM(2021) 82 final'. Bruxelles: European Commission, p. 13.

³⁶ Approvato nel 2020, ha oggi come obiettivo prioritario la riduzione del 55% delle emissioni entro il 2030. Sul tema, cfr. <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/zero-emissioni>

³⁷ Sul tema, cfr. <https://www.consilium.europa.eu/it/topics/climate-neutrality/>

³⁸ Il programma europeo per il finanziamento della ricerca, succeduto da Horizon Europe.

³⁹ European Commission and Directorate-General for Research and Innovation (2015) *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities': (full version)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, p. 5.

⁴⁰ Ivi, p. 14.

⁴¹ Piano di ripresa dalla pandemia. Cfr. <https://next-generation-eu.europa.eu/>

⁴² Cfr. <https://new-european-bauhaus.europa.eu/>

⁴³ Jellicoe, G.A. (1982) *L'Architettura Del Paesaggio*. 2nd edn. Milano: Edizioni di comunità (Saggi di Cultura Contemporanea), p. 24.

⁴⁴ *Ibidem*.

Il motivo, come si vedrà in seguito, è insito nell'idea stessa di riconciliazione che, sebbene fondata sull'integrazione armoniosa di artificio e natura, sebbene promossa attraverso uno strategico aumento di vegetazione in città, sebbene concretizzata attraverso il ripristino degli ecosistemi e l'aumento di biodiversità, continua a basarsi su principi che separano, anziché unire.

2. Innessi, ibridi e palinsesti

2.1 Il giardino pensile

Nelle aree urbanizzate, le superfici impermeabili e non porose, spesso senza soluzione di continuità, rappresentano una delle conseguenze più negative dell'antropizzazione: il suolo impermeabilizzato di edifici e infrastrutture alimenta il processo di degradazione di un ecosistema, che, frammentato in tasselli residui sempre più disconnessi tra loro, subisce un grave deterioramento delle sue funzionalità⁴⁵. Inoltre, il forte deflusso delle precipitazioni nelle aree impermeabilizzate, oltre ad arricchirsi di inquinanti, risulta sempre più spesso insostenibile per il sistema urbano di raccolta delle acque, specie in caso di inondazioni e di fenomeni alluvionali⁴⁶.

Per questo motivo, una delle soluzioni più ricercate e promosse tra i diversi report già menzionati come incontro tra natura e città è quella che vede la rivegetazione di superfici già impermeabilizzate attraverso la realizzazione di giardini pensili. Un giardino pensile, nella sua configurazione 'tecnologica', si presenta come un sistema multistrato ispirato alla natura ed è pensato per svolgere il ruolo di intercettazione e filtraggio delle acque meteoriche⁴⁷.

Secondo le linee guida formulate da ISPRA, a prescindere dal modello presente sul mercato, si tratta, genericamente, di qualsiasi «impianto vegetale su uno strato di supporto strutturale impermeabile, (...) in tutti quei casi in cui non vi sia continuità ecologica tra il verde ed il sottosuolo fino alla roccia madre»⁴⁸.

Sotto quest'ottica, il presente paragrafo si rivolgerà brevemente al 'giardino' pensile nella sua versione – come si vedrà a breve – parziale e impoverita, eppur comunemente accettata, di 'verde pensile' o, nelle varianti anglofone, *roof garden* o *green roof*.

Come accennato, il verde pensile è un sistema costituito da più strati (cfr. TAB 3.1) e, in quanto soluzione ispirata alla natura, provvede nel suo insieme a garantire diversi servizi ecosistemici (cfr. TAB 3.2).

Lo spessore del substrato, in particolare, segue specifiche proprietà fisiche date le condizioni particolari e l'esiguità dello spazio⁴⁹, e varia in base al tipo di vegetazione e al carico sopportabile dalla struttura, determinando esigenze manutentive ed economiche differenti.

Ogni strato ha lo specifico ruolo di intercettare, filtrare e immagazzinare le acque meteoriche urbane, rallentandone il deflusso e diminuendo il loro peso sulla rete di drenaggio urbana⁵⁰. La capacità di trattenimento dell'acqua e di evapotraspirazione sono legate principalmente alla tipologia di vegetazione presente, oltre che alla portata dell'evento meteorico,

⁴⁵ Cfr. Farina, A. (1998) *Principles and methods in landscape ecology*. 1st ed. London ; New York: Chapman & Hall; Ingegneri, V. (1993) *Fondamenti di ecologia del paesaggio: studio dei sistemi di ecosistemi*. 1. ed. Milano: CittàStudi; ISPRA (2010) 'Analisi e progettazione botanica per gli interventi di mitigazione degli impatti delle infrastrutture lineari', in: Roma: ISPRA (Manuali e Linee Guida, 63).

⁴⁶ Cfr. Moran, A., Hunt, B. e Smith, J. (2005) 'Hydrologic and water quality performance from green roofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina'.

⁴⁷ Woods Ballard, B. et al. (2007) *The SUDS manual*. London: CIRIA.

⁴⁸ ISPRA (2012), 'Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico', in *Ambiente, Paesaggio e Infrastrutture*. Roma: ISPRA (Manuali e Linee Guida, 78), p. 7.

⁴⁹ Cfr. *Ibidem*; GRO (2014) *The GRO Green Roof Code. Green Roof Code of Best Practice for the UK 2014*. Sheffield: Groundwork Sheffield.

⁵⁰ Cfr. Bates, A.J. et al. (2009) 'SWITCH in Birmingham, UK: experimental investigation of the ecological and hydrological perfor-

Strato	Criteri, particolarità ed esigenze
Strato vegetativo	Specifiche esigenze botaniche (clima, suolo, condizioni idriche)
	Resistenza alle particolari condizioni di giardini elevati (esposizione alla luce, ai venti, agli inquinanti, ecc.)
	Esigenze di manutenzione
	Ruolo delle specie legato al progetto di paesaggio
Substrato	Spessore variabile per tipologia di copertura
	Copertura estensiva: 2-15 cm
	Copertura intensiva: 15 cm +
	Copertura semi-intensiva: 10-20 cm
	Spessore variabile per principali tipologie di vegetazione
	Sedum: 8 cm
	Piccole erbacee perenni: 10 cm
	Grandi erbacee perenni, piccoli arbusti tappezzanti: 15 cm
	Piccoli arbusti: 20 cm
	Grandi arbusti: 30 cm
	Alberi di III, II, I grandezza, rispettivamente: 50 cm, 80 cm, 50 cm
	Proprietà fisiche
	Granulometria
	≤ 0,063 mm: ≤ 15-20% della massa
	< 4 mm: 40-50 % della massa
	Capacità massima di ritenzione dell'acqua: 25-65% del volume
	Contenuta d'aria alle condizioni di cui sopra: ≥ 10% del volume
	Permeabilità dell'acqua: 0,3-70 mm/min
	pH: 6-8,5
	Contenuto organico: fino a 90 g per kg di suolo
Strato filtrante	Geotessili o aggregati granulari
	Pori diametro: 0,1-0,2 mm
Strato drenante	Tipologie
	Aggregati granulari naturali o artificiali (ghiaia, pietrisco) permeabili, spessore minimo: 4 cm, granulometria variabile per spessore
	Elementi prefabbricati, preformati, geosintetici
	Presenza eventuale di elementi di trattenimento
	Eventuale strato di accumulo idrico (60% di aria libera, e 1 cm di strato d'aria tra livello massimo di acqua e strato filtrante)
Strato di fondo	Elemento anti-radice
	Barriere meccaniche o chimiche continue
	Elemento impermeabilizzante
	Membrane bituminose e sintetiche
	Eventuale strato termoisolante

TAB. 3.1. I diversi strati di un tetto verde e le relative proprietà (rielaborato a partire da: Perini, K., Magliocco, A. and Sabbion, P. (2020) Infrastrutture verdi per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Genova: ModusOperandi, pp. 133-135)

mance of extensive green roofs', *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 8(4), pp. 295–300; Morgan, S., Celik, S. and Retzlaff, B. (2013) 'Green Roof Storm-Water Runoff Quantity and Quality', *Journal of Environmental Engineering*, 139, pp. 471–478; VanWoert, N.D. et al. (2005) 'Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth', *Journal of environmental quality*, 34(3), pp. 1036–1044.

⁵¹ Cfr. Dunnett, N., Nagase, A. and Hallam, A. (2008) 'The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: influence of substrate depth', *Urban Ecosystems*, 11(4), pp. 373–384; Mentens, J., Raes, D. and Hermy, M. (2006) 'Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?', *Landscape and Urban Planning*, 77(3), pp. 217–226; Schroll, E. et al. (2011) 'The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate', *Ecological Engineering*, 37(4), pp. 595–600; VanWoert, N.D. et al. (2005) 'Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth', *Journal of environmental quality*, 34(3), pp. 1036–1044.

⁵² Köhler, M. (2006) 'Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin', *Urban Habitats*, 4.

⁵³ Cfr. Barrio, E.P.D. (1998) 'Analysis of the green roofs cooling potential in buildings', *Energy and Buildings*, 27(2), pp. 179–193; Gaffin, S. et al. (2005) 'Energy balance modeling applied to a comparison of green and white roof cooling efficiency', *Research Report* [Preprint]; Gaffin, S. et al. (2006) 'Quantifying evaporative cooling from green roofs and comparison to other land surfaces'.

il volume e la composizione del substrato⁵¹. Alcuni studi⁵² ritengono che un tetto verde possa ridurre il deflusso di circa il 70% in un anno.

L'acqua immagazzinata, insieme all'evapotraspirazione delle piante, è responsabile, inoltre, del raffrescamento della struttura nella quale è integrato il verde pensile, riducendo il flusso di calore e aumentando l'isolamento termico, anche d'inverno⁵³. In tal modo, viene a diminuire anche il consumo di energia – con un conseguente impatto ambientale ed economico positivo – per riscaldare o raffreddare l'edificio stesso⁵⁴. L'aumento di superficie permeabile e i relativi effetti appena descritti influiscono in modo decisivo, non solo sul singolo edificio o infrastruttura, ma sull'intero contesto urbano. Una distribuzione sufficiente di verde pensile è, infatti, in grado di mitigare l'isola di calore urbana⁵⁵ riducendo la temperatura complessiva, in alcuni casi, fino a 2°C⁵⁶.

La presenza di biomassa del verde pensile ha, inoltre, la capacità di intrappolare le sostanze inquinanti presenti nell'area, contribuendo alla riduzione dell'inquinamento atmosferico. Anche in questo caso, l'ampiezza dell'effetto prodotto dipende anzitutto dalle specie vegetali presenti ma, a riguardo, sono pochi gli studi ad averne valutato i risultati concreti⁵⁷. Insieme all'inquinamento del particolato atmosferico, il verde pensile riesce a mitigare anche gli effetti dell'inquinamento acustico, riducendo la trasmissione del suono attraverso i diversi strati⁵⁸. Ed è proprio la composizione del verde pensile a giocare ancora una volta un ruolo fondamentale, anche sotto l'aspetto economico. Gli strati proteggono la membrana impermeabile di un edificio dagli agenti atmosferici, radoppiandone, in molti casi, la durata e, diminuendo, al tempo stesso, i costi di *life cycle* della membrana stessa⁵⁹.

Benefici	Servizi ecosistemici			
	Approvvigionamento	Regolazione	Valori culturali	Supporto alla vita
Regolazione acque meteoriche		Acqua		
Depurazione acque meteoriche	Acqua	Purificazione		Ciclo dei nutrienti
Riduzione isola di calore		Clima		
Durata membrana				Resilienza
Risparmio energetico		Clima		
Riduzione rumore		Suono	Estetica	
Qualità dell'aria		Aria		Ciclo dei nutrienti
Biodiversità		Impollinazione	Conoscenza	Ciclo dei nutrienti
Ritardo propagazione fuoco			Benessere	
Marketing			Estetica	
Agricoltura urbana	Cibo		Educazione	Formazione del suolo
Opportunità educativa			Educazione	
Occupazione locale			Benessere	
Riduzione CO2		Aria		

TAB. 3.2. I benefici dei tetti verdi relazionati ad alcuni servizi ecosistemici (rielaborato a partire da: Sutton, R. K. (ed.) (2015) *Green Roof Ecosystems*. 1st ed. 2015. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer (Ecological Studies, Analysis and Synthesis, 223)

Nell'ambito dei benefici economici, sebbene sia difficile stabilire un costo medio di realizzazione dovuto ai numerosi fattori in gioco⁶⁰, diversi studi mostrano un recupero dell'investimento iniziale, tenuto conto del rapporto costi-benefici, della differenza tra pubblico e privato e della presenza o meno di incentivi⁶¹. Inoltre, alcuni studi⁶² sembrano rilevare un incremento del valore dell'immobile interessato fino all'11%, aumentando significativamente anche il valore delle proprietà circostanti. D'altronde, la presenza di vegetazione e spazi verdi, soprattutto in un'ottica di accessibilità e prossimità, comporta benefici economici e sociali. Numerosi gli studi⁶³ che confermano, infatti, un generale miglioramento fisico e mentale dovuto alla vicinanza e alla frequentazione di spazi verdi in contesti urbani, dove molto spesso costituiscono il primo contatto con la natura da parte di molte persone. Le aree verdi di prossimità – nel caso di spazi pubblici e comuni – sono, inoltre, fondamentali luoghi di incontro, in grado di generare connessioni tra persone e incentivare un attaccamento positivo alla propria comunità o quartiere⁶⁴.

Esaminato a una scala più ampia, il verde pensile gioca un ruolo importante anche nel funzionamento dell'ecosistema urbano. Come anticipato, in una matrice urbana le particelle meno antropizzate possono trovarsi segregate e disconnesse. Un sistema diffuso di verde pensile può, in tal caso, ripristinare una parte delle funzionalità ecosistemiche perdute⁶⁵, costituendo un'infrastruttura di *stepping stones*: una rete di habitat per avifauna, insetti impollinatori e artropodi – anche rari – così come batteri e funghi⁶⁶. Gli scambi di materia, i flussi di energia e di informazioni, renderebbero il sistema di verde pensile un efficace network di monitoraggio ambientale, oltre che uno strumento di manutenzione per la gestione, in tempo reale, del sistema stesso⁶⁷.

Come mostrato finora e confermato da ulteriori studi⁶⁸, la componente vivente – piante e altri organismi – e le sue interazioni con i fattori abiotici – precipitazioni, temperature, substrato, ecc. – sono alla base dei benefici apportati dal verde pensile al sistema urbano e, per questo, il progetto della vegetazione è fondamentale: le condizioni di stress a cui le piante sono sottoposte – escursioni termiche, intensa evaporazione dovuta al vento, polveri sottili, esigui spessori di substrato – richiedono una conoscenza elevata dei meccanismi di adattamento e delle dinamiche fitosociologiche, così come di fattori talvolta poco considerati quali il livello di diversità genetica e tassonomica, la conseguente struttura spaziale e verticale e la creazione di nuove associazioni vegetali non per forza presenti a livello spontaneo ma ottimali in ambiente urbano⁶⁹.

La creazione di soluzioni progettuali che tengano conto di tali aspetti ecologici non può prescindere dal compito di trasmettere un valore culturale ed estetico ai fruitori umani. La dimensione percettiva non è mai trascurabile, anche in taluni casi dove l'elemento pensile risulti inaccessibile ma comunque visibile. Una strategia di rinaturazione non può correre il rischio di creare paesaggi estranei alla popolazione – dunque inaccolti, rigettati – poiché per quanto si possa «credere nei benefici apportati dalla presenza della natura nelle città (...), se questa non viene accettata dal pubblico non potrà mai essere realmente sostenibile»⁷⁰. Ancor più nel caso del giardi-

⁵⁴ Theodosiou, T.G. (2003) 'Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique', *Energy and Buildings*, 35(9), pp. 909-917.

⁵⁵ T.R. (1982) 'The energetic basis of the urban heat island', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), pp. 1-24.

⁵⁶ Cfr. Bass, B. et al. (2003) 'The impact of green roofs on Toronto's urban heat island', *Proceedings of the First North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pp. 292-304; Gaffin, S.R. et al. (2008) 'Variations in New York city's urban heat island strength over time and space', *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1-2), pp. 1-11; Smith, K.R. and Robber, P.J. (2011) 'Green Roof Mitigation Potential for a Proxy Future Climate Scenario in Chicago, Illinois', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), pp. 507-522.

⁵⁷ Cfr. Currie, B.A. and Bass, B. (2008) 'Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model', *Urban Ecosystems*, 11(4), pp. 409-422; Getter, K.L. et al. (2009) 'Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs', *Environmental Science & Technology*, 43(19), pp. 7564-7570; Rowe, D.B. (2011) 'Green roofs as a means of pollution abatement', *Environmental Pollution*, 159(8-9), pp. 2100-2110.

⁵⁸ Cfr. Connelly, M. and Hodgson, M. (2015) 'Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs', *Building and Environment*, 92, pp. 335-346; Galbrun, L. and Scerri, L. (2017) 'Sound insulation of lightweight extensive green roofs', *Building and Environment*, 116, pp. 130-139; Van Renterghem, T. and Botteldooren, D. (2008) 'Numerical evaluation of sound propagating over green roofs', *Journal of Sound and Vibration*, 317(3-5), pp. 781-799.

⁵⁹ Cfr. Bianchini, F. and Hewage, K. (2012) How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials, *Building and Environment*, 48, pp. 57-65; Liu, K. and Baskaran, B. (2003) 'Thermal performance of green roofs through field evaluation', *Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Awards, and Trade Show* [Preprint].

⁶⁰ Il costo di realizzazione dipende dalla tipologia e dalle dimensioni di verde pensile e, soprattutto, varia da paese a paese: dal Canada a 130 - 165 \$/m², alla Germania - caratterizzata da un mercato ben consolidato - a 15-45 \$/m² (Cfr. Feng, H. and Hewage, K.N. (2018) Economic Benefits and Costs of Green Roofs, in *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Elsevier, pp. 307-318.

⁶¹ Cfr. Clark, C., Adriaens, P. and Talbot, F.B. (2008) 'Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits', *Environmental Science & Technology*, 42(6), pp. 2155-2161; Feng, H. and Hewage, K.N. (2018) 'Economic Benefits and Costs of Green Roofs', in *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Elsevier, pp. 307-318.

⁶² Cfr. Cabanek, A. and Newman, P. (2016) 'Biophilic urban regeneration: can biophilics

be a land value capture mechanism?', in *SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND PLANNING* 2016, Penang, Malaysia, pp. 65-74; Neonato, F., Tomasinelli, F. and Colaninno, B. (2019) *Oro verde. Quanto vale la natura in città*. Milano: Il Verde Editoriale; Peck, S.W. et al. (1999) 'Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada'.

⁶³ Cfr. Comstock, N. et al. (2010) 'Neighborhood attachment and its correlates: Exploring neighborhood conditions, collective efficacy, and gardening', *Journal of Environmental Psychology*, 30, pp. 435-442; Ghersi, A. (ed.) (2007) *Paesaggi terapeutici: come conservare la diversità per il ben-essere dell'uomo = Therapeutic landscapes, or the promotion of the diversity for human well-being*. Firenze: Alinea; Jorgensen, A., Hitchmough, J. and Calvert, T. (2002) 'Woodland spaces and edges: their impact on perception of safety and preference', *Landscape and Urban Planning*, 60(3), pp. 135-150; Takano, T. (2002) 'Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces', *Journal of Epidemiology & Community Health*, 56(12), pp. 913-918; Ulrich, R.S. et al. (1991) 'Stress recovery during exposure to natural and urban environments', *Journal of Environmental Psychology*, 11(3), pp. 201-230.

⁶⁴ Cfr. Bonaiuto, M. et al. (1999) 'MULTIDIMENSIONAL PERCEPTION OF RESIDENTIAL ENVIRONMENT QUALITY AND NEIGHBOURHOOD ATTACHMENT IN THE URBAN ENVIRONMENT', *Journal of Environmental Psychology*, 19(4), pp. 331-352; Germann-Chiari, C. and Seeland, K. (2004) 'Are urban green spaces optimally distributed to act as places for social integration? Results of a geographical information system (GIS) approach for urban forestry research', *Forest Policy and Economics*, 6(1), pp. 3-13; Jorgensen, B.S. and Stedman, R.C. (2001) 'SENSE OF PLACE AS AN ATTITUDE: LAKESHORE OWNERS ATTITUDES TOWARD THEIR PROPERTIES', *Journal of Environmental Psychology*, 21(3), pp. 233-248; Trentelman, C.K. (2009) 'Place Attachment and Community Attachment: A Primer Grounded in the Lived Experience of a Community Sociologist', *Society & Natural Resources*, 22(3), pp. 191-210; Williams, D.R. et al. (1992) 'Beyond the commodity metaphor: Examining emotional and symbolic attachment to place', *Leisure Sciences*, 14(1), pp. 29-46.

⁶⁵ Si fa riferimento specialmente alla connettività e alla circuitazione. Cfr. Russi, A., Palmeri, F. and Gibelli, G. (1996) 'Considerazioni sugli indici di ecologia del paesaggio: connettività e circuitazione'.

⁶⁶ Cfr. Baumann, N. (2006) 'Ground-Nesting Birds on Green Roofs in Switzerland: Preliminary Observations', *Urban Habitats*, 4, pp. 37-50; Braaker, S. et al. (2017) 'Habitat connectivity and local conditions shape taxonomic and functional diversity of arthropods on green roofs', *Journal of Animal Ecology*. Edited by K. Cuddington, 86(3), pp. 521-531; Brenneisen, S. (2006) 'Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland', *Urban Habitats*, 4, pp. 27-36; Gedge, D. and Kadas, G. (2004) 'Bugs, bees and spiders: green roof design for rare invertebrates'; Lundholm, J. (2006) 'Green Roofs and Facades: A

no pensile che, per sua natura, può essere innestato capillarmente anche tra le pieghe del tessuto urbano più consolidato, creando inserti diffusi, talvolta nodali, arrivando a intercettare cittadini e modi d'uso differenti. Soprattutto nel caso di spazi di uso comune o semi-pubblici, come edifici scolastici, condomini, centri di cura, biblioteche, dove l'utilizzo dello spazio è condiviso da un gruppo ristretto di persone, il giardino pensile attiva e trasforma il modo di vivere dei suoi fruitori, determinando un alto valore di aggregazione sociale⁷¹ oltre che un aumento del benessere psico-fisico, come già visto. Sono espressioni progettuali ed esperienze che, talvolta, danno anche origine a vere e proprie imprese sociali, come nel caso della *rooftop farming*, dove la coltivazione domestica si trasforma in attività economica⁷². È vero, infatti, come sostiene Kotzen, quando cita Tom Turner, che il giardino pensile è un 'multioggetto'⁷³, prospettando scenari di diversi utilizzi ancora parzialmente inesplorati, come la possibilità, attraverso ponti e passerelle, di creare un network sopraelevato che colleghi tetti e giardini pensili, una *skyway* nella città⁷⁴. Un ulteriore testimonianza della multifunzionalità del giardino pensile e delle innumerevoli possibilità offerte dalla *rooftop architecture*⁷⁵, è il recente *Rooftop Catalogue*⁷⁶ pubblicato dallo studio MVRDV che offre appunto più di un centinaio di combinazioni – zoo, cimiteri, terrazzamenti, impianti sportivi, dépendance, ecc. – da innestare sulla città esistente e accompagnate dalla rinaturazione⁷⁷.

2.2 Nomadismi semantici

Il giardino, e con esso, il progetto di paesaggio, è stato nei millenni ed è tuttora un prodotto culturale che «con materiali particolari – viventi – parla, evidentemente della Natura: la storia del suo contenuto (...) è anche per noi, come per ogni civiltà, la storia della simbolizzazione dell'idea di ambiente»⁷⁸. Partendo da questo assunto, dunque, se è vero che il giardino è quella «espressione puntuale del pensiero umano sulla natura»⁷⁹, qual è la narrazione che, attraverso le idee di rinaturazione e riconciliazione, e, con esse, le *nature based solution*, il pensile porta con sé?

Il potenziale relativo con cui il verde pensile può essere infiltrato nel tessuto urbano già consolidato, la sua multifunzionalità e i benefici di cui si fa portavoce lo rendono un oggetto di grande interesse. Allo stesso tempo, però, quanto visto finora, alimenta anche un'immagine distorta di natura: salvifica, che tutto risolve, e veicolata da una rinaturazione *tout court* interessata più a consensi e acclamazioni che non a una reale strategia di progetto⁸⁰.

E lo si evince anche dal modo in cui il pensile – 'verde', non giardino – viene visto e descritto. La stessa ISPRA nelle sue linee guida, considera infatti la normativa che regola il verde pensile troppo incentrata «sulle caratteristiche dei singoli elementi o strati»⁸¹, e, pur rispondendo alle necessità tecniche di valutazione secondo un'ottica prestazionale e di servizio, resta poco integrativa.

Non stupisce, infatti, che il pensiero contemporaneo legato al verde pensile, nello specifico – e alle *nature based solution*, in generale – sia fortemente condizionato proprio dal concetto di servizio ecosistemico, e dall'idea economico-funzionale che vi risiede.

Gli *ecosystem services* si svilupparono a partire dal 2005 con la pubblicazione dell'indagine *Millennium Ecosystem Assessment* condotta da più di 1300 scienziati provenienti da tutto il globo. Lo studio definì i servizi ecosistemici come quei «benefici che le persone ottengono dagli ecosistemi»⁸², e, in seguito, portò alla nascita di un altro progetto di ricerca, l'*Economics of Ecosystems and Biodiversity*. Quest'ultimo, considerato un vero e proprio braccio economico del *Millennium Ecosystem Assessment*⁸³, ebbe il compito di rispondere agli obiettivi individuati dall'iniziativa Potsdam⁸⁴ del 2007 in vista della *Convention of Biological Diversity* del 2010⁸⁵ e di dare, per l'appunto, un valore economico alla biodiversità. Fu avviato in tal modo un «processo di analisi dei benefici economici globali della diversità biologica, i costi della perdita di biodiversità e della mancata adozione di misure di protezione rispetto ai costi di un'efficace conservazione»⁸⁶.

Se, da un lato, l'introduzione dei servizi ecosistemici ha avuto il pregio di riconoscere all'ambiente e alle sue componenti un valore (economico), risultando efficace nel dialogo con le amministrazioni, dall'altro, l'operazione è stata aspramente criticata con l'accusa di aver monetizzato la natura sotto l'egida di un eccessivo antropocentrismo⁸⁷.

Di conseguenza, anche le *nature based solutions*, in quanto promotrici degli *ecosystem services*, non mancano di destare dubbi e critiche, a partire dagli stessi report europei che esortano a non trasformarle in uno slogan di vuote parole *trendy*⁸⁸. Infatti, c'è già chi parla di superare le stesse *nature based solutions*, troppo incentrate sull'aspetto performativo, e virare verso un più olistico *nature based thinking*, un approccio che «incarna la prospettiva della natura con le persone, piuttosto che della natura per le persone»⁸⁹, e che, a detta dei suoi sostenitori, sia transdisciplinare e post-antropocentrico.

Così, anche il verde pensile, come sineddoche rispetto alla riconciliazione, come tassello rappresentativo rispetto a un più grande programma di rinaturazione, si trova al centro di una visuale ristretta, viziata oltretutto da una scarsa attenzione al contesto culturale e alla dimensione del paesaggio che dalla sommità del costruito viene spesso tralasciata⁹⁰.

Un esempio dimostrativo è la tassonomia con cui il giardino pensile viene definito: la nomenclatura è scarsa e riduce il giardino a un generico 'verde', per cui, misurato nella retorica funzionalità di panacea prestazionale, si tende generalmente a raggrupparlo in poche classi tipologiche; le più note: estensivo e intensivo. Ancora le stesse Linee guida ISPRA confermano che «limitarsi a questa classificazione utilissima ma limitata è alquanto anacronistico. Oltretutto, la classificazione dicotomica estensivo/intensivo è stata troppo spesso banalizzata ad una questione di spessore e costo di realizzazione»⁹¹.

Quello delle definizioni non è un tema affatto banale e, anzi, la sua limitatezza riflette l'incapacità di superare le barriere richieste da un approccio davvero transdisciplinare. E lo si vede nel giardino pensile, così come nei termini stessi di 'natura' o 'verde', ancorati a uno sguardo retorico e troppo generalista. A una scarsità di vocaboli utilizzati per definire una realtà variegata e complessa – si pensi ai tipi di 'verde' esistenti, di cui non riusciamo a dare contezza se non aggettivandoli – corrisponde una conoscenza superficiale e settoria-

Habitat Template Approach', *Urban Habitats*, 4; Partridge, D.R. and Clark, J.A. (2018) 'Urban green roofs provide habitat for migrating and breeding birds and their arthropod prey', *PLOS ONE*. Edited by T. Longcore, 13(8).

⁶⁷ Cfr. Dunster, K. and Coffman, R.R. (2015) 'Placing Green Roofs in Time and Space: Scale, Recruitment, Establishment, and Regeneration', in R.K. Sutton (ed.) *Green Roof Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing (Ecological Studies), pp. 357–390; Gaffin, S., Khanbilvardi, R. and Rosenzweig, C. (2009) 'Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City', *Sensors*, 9(4), pp. 2647–2660; Kephart, P. (2005) 'Living architecture: an ecological approach'; Piana, M. and Carlisle, S. (2014) 'Green Roofs Over Time: A Spatially Explicit Method for Studying Green Roof Vegetative Dynamics and Performance', *Cities and the Environment*, 7, p. 1; Zhao, Z. et al. (2018) 'Design of a Smart Sensor Network System for Real-Time Air Quality Monitoring on Green Roof', *Journal of Sensors*, 2018, pp. 1–13.

⁶⁸ Cfr. Dunnett, N. and Nolan, A. (2004) 'THE EFFECT OF SUBSTRATE DEPTH AND SUPPLEMENTARY WATERING ON THE GROWTH OF NINE HERBACEOUS PERENNIALS IN A SEMI-EXTENSIVE GREEN ROOF', *Acta Horticulturae*, (643), pp. 305–309; Dunnett, N.P. et al. (2005) 'Vegetation composition of green roofs and its influence on runoff and biodiversity', in *Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show*, pp. 4–6; Durhman, A. et al. (2004) 'Evaluation of Crassulacean species on extensive green roofs', *Proc. of 2nd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pp. 504–517; Getter, K.L. and Rowe, D.B. (2006) 'The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development', *HortScience*, 41(5), pp. 1276–1285; Köhler, M. (2006) 'Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin', *Urban Habitats*, 4; Rezaei, F. et al. (2005) 'Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species: 2005 ASAE Annual International Meeting'.

⁶⁹ Cfr. Dunnett, N. (2010) 'People and Nature: integrating aesthetics and ecology on accessible green roofs', *Acta Horticulturae*, (881), pp. 641–652; Hitchmough, J. (2004) 'Naturalistic herbaceous vegetation for urban landscapes', in N. Dunnett and J. Hitchmough (eds.) *The Dynamic Landscape: Design, Ecology and Management of Naturalistic Urban Planting*. Taylor & Francis, pp. 172–245; Smith, R.M. et al. (2006) 'Urban domestic gardens (VI): environmental correlates of invertebrate species richness', *Biodiversity and Conservation*, 15(8), pp. 2415–2438; Wilkinson, D.M. (2001) 'Is local provenance important in habitat creation?: Local provenance and habitat creation', *Journal of Applied Ecology*, 38(6), pp. 1371–1373.

⁷⁰ Dunnett, 2010, op. cit.

⁷¹ Cfr. Ghersi, A. and Melli, S. (2021) 'Mediterranean green roofing: images and designs of urban resilience. Iconic projects for a new green roof imaginary.', in M. Gausa (ed.) *Through Resili(g)ence - Nuove sfide sociali e ambientali*. Genova: Genova University Press (Addoc Logos), pp. 121–132; Velazquez, L.S. (2005)

'Organic greenroof architecture: Sustainable design for the new millennium', *Environmental Quality Management*, 14(4), pp. 73-85.

⁷² Cfr. Baudoin, W. et al. (2017) 'Rooftop Gardening for Improved Food and Nutrition Security in the Urban Environment', in F. Orsini et al. (eds.) *Rooftop Urban Agriculture*. Cham: Springer International Publishing (Urban Agriculture), pp. 219-233; Buehler, D. and Junge, R. (2016) 'Global Trends and Current Status of Commercial Urban Rooftop Farming', *Sustainability*, 8(11), p. 1108; Sommariva, E., Canessa, N.V. and Tucci, G. (2022) 'Green actions for innovative cities. The new agri-food landscape', *Agathón* 11, p. 150; Thomaier, S. et al. (2015) 'Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming)', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(1), pp. 43-54; Whittinghill, L.J. and Rowe, D.B. (2012) 'The role of green roof technology in urban agriculture', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27(4), pp. 314-322.

⁷³ Kotzen, B. (2018) 'Green Roofs Social and Aesthetic Aspects', in *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Elsevier, pp. 273-281, cit. p. 273.

⁷⁴ Turner, T. (1995) 'Greenways, blueways, skyways and other ways to a better London', *Landscape and Urban Planning*, 33(1-3), pp. 269-282, cit. p. 279.

⁷⁵ Bellini, O. and Mocchi, M. (2019) 'Rooftop architecture and urban roofscape: designing the new vertical city', *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 17, pp. 264-277.

⁷⁶ MVRDV, Maas, W. and Rotterdam (Netherlands) (eds.) (2021) *Rooftop Catalogue: Dakencatalogus*, Rotterdam, Netherlands: Rotterdamse Dakendagen.

⁷⁷ Bologna, A., Ghersi, A. and Melli, S. (2022) 'Integrated readings for the urban green roof. Expressive codes and forms of nature', *AGATHÓN | International Journal of Architecture, Art and Design*, 11, pp. 114-123.

⁷⁸ Zagari, F. (1988) *L'architettura del giardino contemporaneo*. Milano: A. Mondadori, p. 9.

⁷⁹ Zagari, F. (2006) *Questo è paesaggio: 48 definizioni*. Roma: Mancosu, p. 14.

⁸⁰ Cfr. Marinaro, L. (2022) 'Intangibile, Emergente, Esplicito. Il progetto di paesaggio per la transizione ecologica', *Ri-Vista. Research for landscape architecture*, 19(2), pp. 82-97; Metta, A. and Olivetti, M.L. (eds.) (2019) *La città selvatica: paesaggi urbani contemporanei*. Melfi (Italia): Libria (L&scape); Ramo, B. (2011) 'O'Mighty'Green'', *Architecture+ Design*, 28(10), p. 82.

⁸¹ ISPRA, (2012), op. cit. p. 8.

⁸² Millennium Ecosystem Assessment (Program) (ed.) (2005) *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press.

⁸³ Braat, L.C. (2012) 'Ecosystem services—science, policy and practice: Introduction to the journal and the inaugural issue', *Ecosystem Services*, 1(1), pp. 1-3.

⁸⁴ I Ministri dell'ambiente dei paesi del G8 e di Brasile, Cina, India, Messico e Sud Africa, si riunirono a Potsdam, dove stilarono dieci capisaldi da proporre alla successiva *Convention of Biological Diversity*.

⁸⁵ Fondata a partire dal Summit di Rio del

le di quella stessa realtà. «I limiti del linguaggio significano i limiti del mio mondo» scriveva Ludwig Wittgenstein⁹².

Interessante, a tal proposito, l'immagine suggerita da Vera Gheno, secondo cui la conoscenza linguistica può essere visualizzata come una rete a maglie irregolari: «quando la realtà passa per il setaccio (...), chi ha una rete dai nodi belli stretti ne 'trattiene' più elementi, e così può ambire a comprenderla meglio»⁹³. In altre parole, una rete dalle maglie molto larghe avrà più probabilità di lasciarsi attraversare dalla complessità del reale senza saperne trattenere gli elementi, rispetto a una maglia più fittamente ricca di termini.

A questo punto, le possibilità sono due: da un lato, arricchire la densità della rete attraverso la ricerca e la sperimentazione di nuove definizioni del reale; dall'altro, adottare un approccio transdisciplinare e approfittare dei benefici che ne derivano. Volendo ancora utilizzare la metafora della maglia è possibile visualizzare le differenze, pur sottili, tra multidisciplinarietà, interdisciplinarietà e transdisciplinarietà.

Se la multidisciplinarietà è una giustapposizione tra le diverse reti del sapere, e l'interdisciplinarietà è un'intersezione delle stesse, si potrebbe considerare la transdisciplinarietà come una loro sovrapposizione, dove le densità di ogni rete si sommano tra loro. In tal modo, la fitta maglia generatasi permette di captare meglio – dunque, comprendere – i tanti strati che formano la complessità del reale. Non solo: nell'approccio transdisciplinare il tutto è reso maggiore della somma delle sue parti grazie alla compresenza di più saperi che alimenta interazioni continue. Ne risulta una migrazione di concetti e di modi diversi di saper leggere la realtà, che, nella propagazione da un settore all'altro, arricchiscono e influenzano l'intero sistema di conoscenza. Di fronte alla realtà – di fronte a un problema complesso – non si attingerà più dalla somma di bagagli differenti, ma da un'unica rete costruita su più maglie intrecciate.

È grazie a questo nomadismo semantico⁹⁴ e operativo che si realizza la possibilità di oltrepassare i confini che separano le discipline, così come richiesta dalla transdisciplinarietà: è un approccio multidimensionale, inclusivo, creativo e, soprattutto, consapevole, che nel rispetto della diversità restituisce al sapere umano la complessità di una visione unitaria.

Nel caso annunciato della tassonomia del giardino pensile, ridotta, come visto, a pochissime generiche combinazioni e, per questo emblematica della poca osmosi disciplinare rispetto a tale campo di studi, cosa accadrebbe se, per studiare il fenomeno, si prendesse in prestito un approccio diverso da quello tipico della disciplina architettonica?

3. Nuovi linguaggi

3.1 Tassonomie

La tassonomia può essere considerata contemporaneamente scienza e linguaggio⁹⁵: scienza, nella misura in cui si fa portatrice di un *corpus* teorico e pratico che indaga le regole della classificazione; linguaggio, poiché mentre opera per raggruppare, arriva a esprimere un significato attraverso la costruzione di un codice. Ed è proprio nel linguaggio, infatti, che l'essere umano ha saputo meglio esprimere quel suo ancestrale

bisogno di organizzare l'ignoto in «cassetti» e «scaffali»⁹⁶, categorizzando, etichettando, definendo ciò che lo circondava. Un esempio su tutti è quello del celebre naturalista Carl Linnaeus, quando, nel XVIII sec., per classificare il mondo del vivente, istituì un linguaggio universale con cui ancora oggi vengono identificati gli organismi – piante e animali. La tassonomia, dunque, fornisce soprattutto una serie di terminologie e concetti che facilitano la comunicazione scientifica⁹⁷, risultando, per questo motivo, uno strumento di fondamentale utilizzo per le discipline naturalistiche, ma non solo: l'organizzazione gerarchica offerta dalla tassonomia è una conoscenza che può migrare trasversalmente dalle scienze naturali a quelle sociali, dall'economia alla letteratura, dall'architettura al design.

Con il termine tassonomia, infatti, non ci si riferisce solamente alla disciplina che studia un procedimento logico di organizzazione ordinato e sistematico, ma anche al prodotto stesso che emerge da tale operazione⁹⁸, ovvero uno schema di classificazione che può essere utilizzato e riadattato transdisciplinariamente. In architettura, ad esempio, non si contano nei secoli le modalità di categorizzazione proposte, le classi e i raggruppamenti individuati per organizzare ora elementi costruttivi, ora intere forme di progettazione: avvicinandosi alla classificazione in modo più o meno consapevole, adottando strumenti, obiettivi e modalità operative di volta in volta differenti, studiando canoni formali o strutturali, adottando approcci esplorativi o rivoluzionari, numerosi sono gli architetti e i teorici noti per aver influenzato la disciplina attraverso la costruzione di nuovi linguaggi, strutturati attraverso ordini, pattern e tipologie; da Vitruvio ad Andrea Palladio, da Jean-Nicolas-Louis Durand a Le Corbusier, da Christopher Alexander a Rem Koolhaas, solo per citarne alcuni; così, in modo analogo, è accaduto nell'architettura del paesaggio, dove Humphry Repton, John Claudius Loudon, Gertrude Jekyll, Garrett Eckbo, Sylvia Crowe, Ian McHarg, John Dixon Hunt, Anne Whiston Spirn, tra i molti, hanno sviluppato e proposto esempi diversi per classificare il paesaggio, il progetto, gli stili, gli elementi di progetto. In particolare, per quanto riguarda l'architettura del paesaggio, è interessante notare come esista una connessione fortuita che la lega proprio alla classificazione: quest'ultima, definita come operazione e prodotto, ricorda, come accennato nel precedente capitolo, il progetto di paesaggio inteso quale momento e frammento: in entrambi i casi, processo e progetto coincidono.

Ma se, come nell'architettura del paesaggio, diversi sono i modelli di classificazione proposti, più rari quelli di tassonomie vere e proprie. Specialmente nel campo del contemporaneo, ad esempio, c'è chi ritiene che, seppur in molti abbiano provato a elaborare paradigmi diversi⁹⁹, e «sebbene ogni corso di indagine tenuto in ogni scuola di progettazione debba in qualche modo tentare di organizzare logicamente il canone [...] non esiste una tassonomia operativa dell'architettura del paesaggio moderna o contemporanea»¹⁰⁰.

In effetti, nonostante i termini siano spesso usati indistintamente, la tassonomia in realtà si distingue da altre forme di classificazione più diffuse – ad esempio la divisione o la categorizzazione – per l'importanza assunta dall'ordine di successione operato durante la suddivisione dei concetti in sottocategorie via via più specifiche.

1992 e firmata da 150 Stati, riconosce e promuove la conservazione della biodiversità come interesse umanitario. Sul tema, cfr. <https://www.cbd.int/>

⁸⁶ Potsdam Initiative – Biological Diversity 2010 (2007). Potsdam: G8, Environment Ministers Meeting.

⁸⁷ Silvertown, J. (2015) 'Have Ecosystem Services Been Oversold?', *Trends in Ecology & Evolution*, 30(11), pp. 641–648.

⁸⁸ European Commission (2015), op.cit. p. 67

⁸⁹ Randrup, T.B. et al. (2020) 'Moving beyond the nature-based solutions discourse: introducing nature-based thinking', *Urban Ecosystems*, 23(4), pp. 919–926, cit. p. 925.

⁹⁰ Bellini, O. and Mocchi, M. (2019) 'Rooftop architecture and urban roofscape: designing the new vertical city', *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 17, pp. 264–277.

⁹¹ Ispra (2012), op. cit., p. 20.

⁹² Wittgenstein, L. (2012) *Tractatus logico-philosophicus e Quaderni 1914-1916*. 3. rist. Edited by A.G. Conte. Torino: Einaudi, p. 89.

⁹³ Gheno, V. (2021) *Le ragioni del dubbio: l'arte di usare le parole*. Torino: Einaudi (Super ET Opera viva), p. 13.

⁹⁴ Cfr. Giorgianni, E. (2021) "'Dal concetto monade al concetto nomade. In cammino verso la transdisciplinarietà tra Ortega, Stengers, Morin'", *Peloro*; Stengers, I. and Andler, D. (1988) *Da una scienza all'altra: concetti nomadi*. Firenze: Hopeful Monster.

⁹⁵ Elkin, R.S. (2017) *Tiny taxonomy*. New York: Actar Publishers.

⁹⁶ Laborit, H. (1982) *Elogio della fuga*. Milano: Mondadori (Saggi).

⁹⁷ Hempel, C.G. (1965) 'Fundamentals of Taxonomy', in Hempel, C. G., *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. Glencoe: Free Press, pp. 137–154.

⁹⁸ Marradi, A. (1993) 'Classificazioni, tipologie, tassonomie', *Enciclopedia delle Scienze Sociali*. Roma: Istituto della Enciclopedia Italiana.

⁹⁹ Cfr. Raaphorst, K. and Lenzholzer, S. (2018) 'Towards a Taxonomy of Design Approaches in Landscape Architecture', in *Landscapes of Conflict. ECLAS Conference Ghent 2018*, Ghent, pp. 737–744; Zaera-Polo, A. and Fernandez Abascal, G. (2016) *Architecture's 'Political Compass': A Taxonomy of Emerging Architecture in One Diagram*, *ArchDaily*.

¹⁰⁰ Weller, R. (2019) 'Landscape Genres: Towards a Taxonomy of Contemporary Landscape Architecture', *Landscape Architecture*, 26(7), pp. 8–25, cit. p. 17.

Fundamentum divisionis			Tipologie		
Categoria generale			A	Landscape Designs	
Tipo di utilizzo			A.1.	Private Spaces	
	Uso specifico		A.1.1.	Gardens	
	Uso specifico		A.1.2.	Private Estates	
Tipo di utilizzo			A.2.	Institutional and Commercial Grounds	
	Uso specifico		A.2.1.	Recreational Grounds	
		Tipologia	A.2.1.1.		Country Club Grounds
		Tipologia	A.2.1.2.		Hotel Grounds
		Tipologia	A.2.1.3.		Recreation Camps
	Uso specifico		A.2.2.	Medical Grounds	
		Tipologia	A.2.2.1.		Hospital Grounds
		Tipologia	A.2.2.2.		Asylum Grounds
		Tipologia	A.2.2.3.		Sanatorium Grounds
	Uso specifico		A.2.3.	Educational Grounds	
		Tipologia	A.2.3.1.		College Grounds
		Tipologia	A.2.3.2.		University Grounds
		Tipologia	A.2.3.3.		Private School Grounds
	Uso specifico		A.2.4.	Religious Grounds	
		Tipologia	A.2.4.1.		Church Grounds
Tipo di utilizzo			A.3.	Industrial and Infrastructural Grounds	
	Uso specifico		A.3.1.	Factory Grounds	
	Uso specifico		A.3.2.	Railroad Grounds	
		Tipologia	A.3.2.1.		Station Grounds
		Tipologia	A.3.2.2.		Rights of Way
Tipo di utilizzo			A.4.	Public and Semi-Public Spaces	
	Uso specifico		A.4.1.	Public Building Grounds	
		Tipologia	A.4.1.1.		Capitol Grounds
		Tipologia	A.4.1.2.		City Hall Grounds
		Tipologia	A.4.1.3.		Court-House Grounds
	Uso specifico		A.4.2.	Cultural Grounds	
		Tipologia	A.4.2.1.		Library Grounds
		Tipologia	A.4.2.2.		Museum Grounds
	Uso specifico		A.4.3.	Educational Grounds	
		Tipologia	A.4.3.1.		Public School Grounds
	Uso specifico		A.4.4.	Event Grounds	
		Tipologia	A.4.4.1.		Exposition Grounds
		Tipologia	A.4.4.2.		Fair Grounds
Tipo di utilizzo			A.5.	Recreational and Leisure Spaces	
	Uso specifico		A.5.1.	Amusement Parks	
	Uso specifico		A.5.2.	Concert and Dining Gardens	
		Tipologia	A.5.2.1.		Open-Air Concert Gardens
		Tipologia	A.5.2.2.		Tea Gardens
		Tipologia	A.5.2.3.		Outdoor Restaurants
Tipo di utilizzo			A.6.	Natural Reserves and Parks	
	Uso specifico		A.6.1.	Zoological Parks	
	Uso specifico		A.6.2.	Botanical Gardens	
	Uso specifico		A.6.3.	Arboretums	
Tipo di utilizzo			A.7.	Commemorative Spaces	
			A.7.1.	Cemeteries	

Tipo di utilizzo		A.8.	Large Public and Semi-Public Reservations	
	Uso specifico	A.8.1.	General Reservations	
	Tipologia	A.8.2.1.	Forest Reservations	
	Tipologia	A.8.2.2.	Water-Supply Reservations	
	Uso specifico	A.8.2.	Scenic Reservations	
	Tipologia	A.8.2.1.	Natural Features Reservations	
	Tipologia	A.8.2.2.	Historic Interest Reservations	
	Uso specifico	A.8.3.	Wildlife and Plant Reservations	
	Tipologia	A.8.3.1.	Animal Life Reservations	
	Tipologia	A.8.3.2.	Bird Life Reservations	
	Tipologia	A.8.3.3.	Plant Life Reservations	
	Uso specifico	A.8.4.	Defense Reservations	
Tipo di utilizzo		A.9.	Urban and Suburban Parks	
	Dimensione	A.9.1.	Large Parks	
	Dimensione	A.9.2.	Small Parks	
	Dimensione	A.9.3.	Neighborhood Parks	
	Dimensione	A.9.4.	Commons	
Tipo di utilizzo		A.10.	Athletic and Recreational Facilities	
	Uso specifico	A.10.1.	Playgrounds	
	Uso specifico	A.10.2.	Athletic Fields	
	Uso specifico	A.10.3.	Special Sports Facilities	
Tipo di utilizzo		A.11.	Water-Based Recreational Areas	
	Uso specifico	A.11.1.	Water Parks	
	Uso specifico	A.11.2.	Recreational Waterfronts	

TAB. 3.3. Tipologia di progetti di paesaggio classificati secondo l'uso (rielaborato in chiave tassonomica da: Hubbard, H.V. and Kimball, T. (1920) *Landscape Architecture. A comprehensive classification scheme for books, plans, photographs, notes and other collected material.* Cambridge: Harvard University Press)

Esistono, inoltre, almeno due forme di tassonomia¹⁰¹: una più comune, cosiddetta 'intensionale', che si basa cioè su raggruppamenti di generalità decrescente a partire da uno o più aspetti che fungono da *fundamenta divisionis* (ad esempio, a partire dalle caratteristiche intrinseche di un progetto di giardino è possibile stabilire che una di queste – lo stile, la vegetazione, l'epoca, la provenienza, l'uso, ecc. – agisca da elemento discriminante e dunque di raggruppamento – cfr. TAB 3.3); un'altra, meno usata nelle discipline architettoniche, è la tassonomia 'estensionale', dove gli elementi indagati sono raggruppati secondo similarità percepite. E, come si vedrà a breve, sarà proprio questa la metodologia adottata nel presente lavoro di ricerca per la costruzione di una tassonomia pensile.

¹⁰¹Marradi, A. (1993), op. cit.

3.2 Geografie imperfette

Come visto, l'innato bisogno dell'essere umano di categorizzare ciò che lo circonda ha trovato un'espressività nelle operazioni di classificazione che risultano al contempo forme di linguaggio e scienza, processo e prodotto, e che, come tali, hanno regole e proprietà specifiche.

Sia la tassonomia intensionale che quella estensionale condividono, ad esempio, proprietà simili. Innanzitutto, come accennato, nella tassonomia la successione con cui vengono considerate le suddivisioni è fondamentale: ne è un esempio la tassonomia botanica, dove esiste un preciso ordine gerar-

¹⁰² Sandri, G. (1969) 'On the logic of classification', *Quality and Quantity*, 3(1), pp. 80-124.

¹⁰³ Hudson, H.C. (ed.) (1982) *Classifying social data*. 1st ed. San Francisco: Jossey-Bass (The Jossey-Bass social and behavioral science series).

¹⁰⁴ Marradi (1993), op.cit.

¹⁰⁵ May, R.W. (1982) 'Discriminant Analysis in Cluster Analysis', in H.C. Hudson (ed.) *Classifying social data*. 1st ed. San Francisco: Jossey-Bass (The Jossey-Bass social and behavioral science series), pp. 39-55.

chico che regola il passaggio da famiglie a generi a specie, e che non può essere alterato. Inoltre, i raggruppamenti individuati dovranno essere mutualmente esclusivi ed esaustivi¹⁰², rispettando cioè le seguenti condizioni: un oggetto può appartenere a un gruppo e a uno soltanto (secondo la TAB. 3.3 già vista, ad esempio, una 'riserva naturale pubblica' non potrà essere anche un 'giardino privato'); e nessun oggetto considerato deve rimanere escluso dai raggruppamenti creati. Ma se nella tassonomia intensionale viene utilizzata un'istanza discriminatoria per volta, in quella estensionale si usano più *fundamenta divisionis* contemporaneamente: nel primo caso i raggruppamenti sono definiti più propriamente 'classi', basati sulla condivisione di proprietà intrinseche, eccetto che per un aspetto discriminante che stabilirà la condizione di appartenenza o meno a quella classe¹⁰³; nel secondo caso i gruppi, definiti anche 'tipi', sono invece il frutto dell'intersezione di più proprietà secondo l'obiettivo di massimizzare la similarità fra i membri appartenenti alla stessa tipologia e, contemporaneamente, la diversità tra membri di tipologie diverse¹⁰⁴.

In una tassonomia intensionale, la difficoltà è quella di stabilire regole chiare che diano vita a raggruppamenti i cui *fundamenta divisionis* siano il più possibili confrontabili e non equivoci a pari livelli di generalità (sempre seguendo la TAB. 3.3., ad esempio, a parità di livello, il *fundamentum divisionis* dei parchi è la dimensione, mentre nelle altre classi è l'uso specifico, generando un minore grado di confrontabilità).

Nella tassonomia estensionale, invece, le controversie nascono circa la quantità di proprietà da considerare simultaneamente per ogni oggetto¹⁰⁵, per le quali è necessario bilanciare esigenze di massimi valori riscontrabili, da un lato, e criteri di parsimonia, dall'altro.

Viste le principali differenze, ci si concentrerà ora sulla tassonomia estensionale che, come già accennato, è quella utilizzata nel presente lavoro.

Quest'ultima, anche detta tassonomia numerica, è un tipo di operazione classificatoria utilizzata principalmente nelle scienze naturali, nella biologia e soprattutto in botanica – dove è conosciuta anche come fenetica – e che dà origine a schemi classificatori noti come dendrogrammi.

Come già visto, la tassonomia numerica basa la sua categorizzazione sul grado di somiglianza espresso simultaneamente dalle proprietà degli oggetti – o organismi – considerati. Rispetto alle altre classificazioni, infatti, l'aspetto più interessante della tassonomia numerica è proprio quello di tenere in conto un certo numero di caratteri che vanno a identificare l'oggetto di studio; per poi, confrontando la qualità di quei caratteri con gli stessi posseduti da un altro oggetto, stabilirne il grado di parentela. In altre parole, data una serie di casi studio, la tassonomia numerica permette, innanzitutto, di riconoscere una specifica identità per ogni caso, dopodiché, di confrontare tutti i casi contemporaneamente e raggrupparli per affinità.

Per operare una corretta tassonomia numerica ci sarà dunque bisogno di: una matrice di dati (gli oggetti – casi, concetti, organismi – di studio e i caratteri degli stessi, differenti tra loro per lo stato con cui si presentano; ad esempio per il carattere 'dimensione', si potrebbero osservare per i diversi casi

gli stati 'grande' e 'piccolo'); le procedure che giustificano la registrazione degli stati e i criteri con cui saranno valutati; la formula per calcolare e combinare le differenze in una matrice delle distanze o cofenetica¹⁰⁶. Il risultato è un dendrogramma, ovvero un grafo simile ad un albero che esprime la gerarchia della classificazione, la partizione delle tipologie e la distanza tra le stesse. Un tipico dendrogramma è quello che caratterizza un regno, animale o vegetale, simile in un certo senso al più celebre e artistico *Tree of life* del biologo Ernst Haeckel (cfr. Fig. 3.1).

Considerata la transdisciplinarietà già insita nella tassonomia, visto il nomadismo di saperi e concetti necessario a garantire il superamento dei confini disciplinari, e presa in considerazione l'esiguità delle categorizzazioni esistenti circa il giardino pensile utilizzato come elemento rappresentativo del rapporto tra umano e ambiente, si è deciso di sperimentare una forma di tassonomia numerica per classificare il pensile in relazione alla sua dimensione di progetto di architettura del paesaggio, in quanto momento e frammento di un contesto più grande.

¹⁰⁶ Legendre, P. and Legendre, L. (2006) *Numerical ecology*. 2. Engl. ed., reprinted. Amsterdam: Elsevier (Developments in environmental modelling, 20), p. 312.

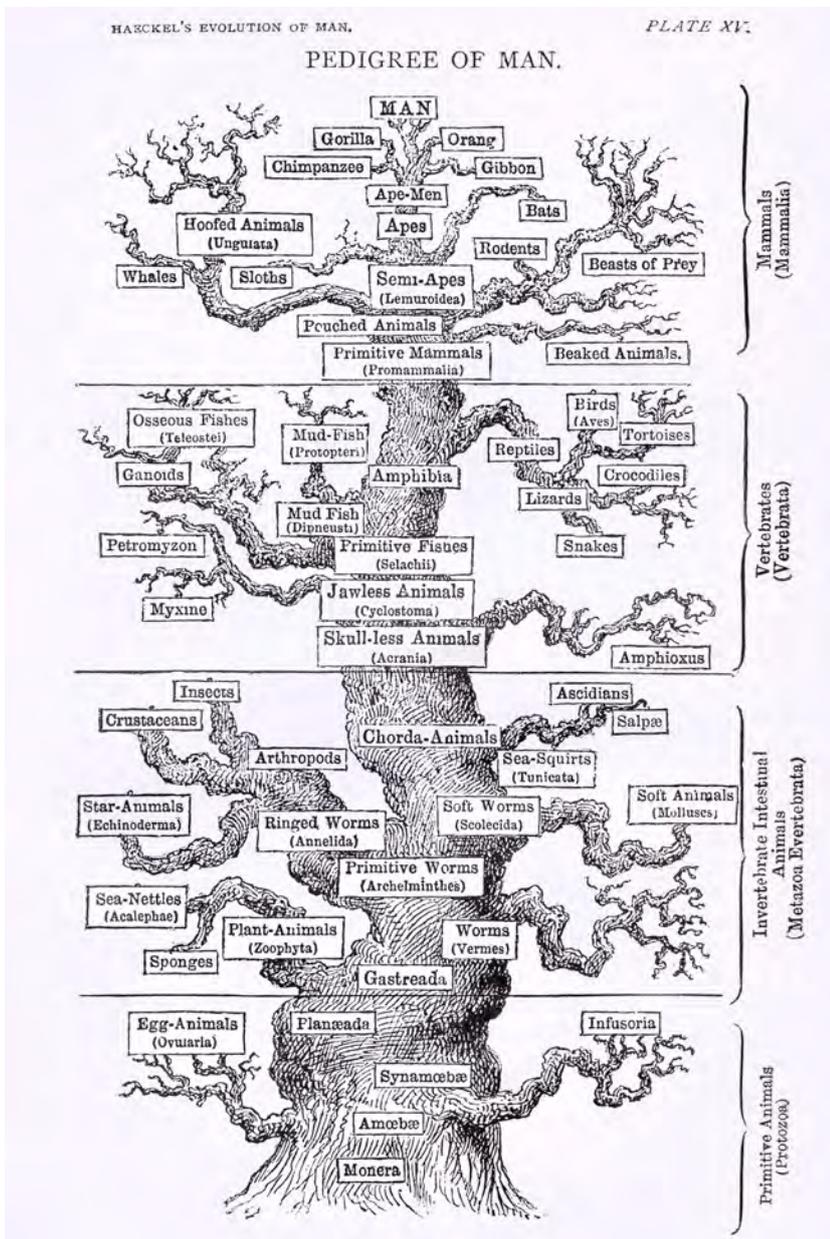


Fig. 3.2. L'albero evolutivo della vita, disegnato da Ernst Haeckel nel 1879 (© WikiCommons)

Un esperimento, seppur imperfetto, che perseguirà il tentativo di restituire una geografia di quanto visto finora. Imperfetto poiché gli elementi tracciati perseguono una moltitudine di traiettorie per la quale ciò che viene raccolto implica inevitabilmente dell'altro che rimane da parte.

Ma, nella sua incertezza, l'obiettivo è quello di condurre, con ordinata intuizione e intrecci imprevisi, il primo input di una configurazione tassonomica che possa testare in modo transdisciplinare il raggruppamento delle diversità dei casi individuati, pur consapevoli di una resistenza innata che spesso si oppone a tentativi di sistemazione ordinata¹⁰⁷.

¹⁰⁷ Hempel, C.G. (1965) 'Fundamentals of Taxonomy', in Hempel, C. G., *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*, Glencoe: Free Press, pp. 137-154.

4. Tassonomia pensile

4.1 Costruzione di una tassonomia

Seguendo quanto illustrato finora, la metodologia utilizzata per la costruzione di una tassonomia numerica del progetto di giardino pensile ha visto innanzitutto la definizione di una matrice costruita sui seguenti dati:

- la casistica degli 'oggetti' da classificare, ovvero i progetti di giardino pensile individuati sulla base di criteri di selezione;
- le proprietà e i loro stati, che, una volta attribuite a ciascun progetto, sono state poi comparate per determinare omogeneità o dissimilarità tra i casi studio.

Poiché durante questo passaggio la complessità di un progetto è frammentata nelle sue singole proprietà, si è scelto di operare una trasformazione grafica che riuscisse in qualche modo a ricomporre l'identità del caso studio secondo una propria impronta, restituendolo non più nella sua veste iconografica, ma iconologica, simbolica e, di conseguenza, più facilmente comparabile.

In seguito, attraverso la costruzione di una matrice delle distanze, è stato possibile delineare lo schema classificatorio noto come dendrogramma, nel quale sono riportate le famiglie – o tipologie – di progetti pensili della tassonomia.

L'esito è una raccolta sistematica di progetti che, attraverso la loro classificazione, costituisce il contenuto di una guida con cui leggere la relazione tra giardino pensile, progetto e paesaggio, sotto la lente del rapporto tra umano e natura.

4.1.1 I casi

Nel lavoro di raccolta dati – i casi studio – è stata scandagliata la storia del giardino pensile dalla sua comparsa fino alle manifestazioni contemporanee, fino a comporre una selezione cronologicamente ordinata di 220 progetti¹⁰⁸.

L'approccio neutrale di individuazione dei casi studio secondo un ordine cronologico non corrisponde a una altrettanta imparzialità nella selezione e, dunque, nell'esclusione, degli stessi: l'operazione di raccolta restituisce per sua natura un racconto incompleto del fenomeno, poiché composto di frammenti isolati. Ma è proprio l'azione di scelta e di omissione a introdurre l'indizio di uno specifico percorso di lettura, il quale, pur aperto a traiettorie diverse, accosta e ricompone i diversi tasselli secondo una certa visione. La scelta dei criteri

¹⁰⁸ Per un elenco esaustivo, si veda la tesi di dottorato da cui è tratto il presente lavoro: Melli, S. (2023) *Il giardino pensile - Le alterità della natura nel progetto di paesaggio*, Dottorato di Ricerca in Architettura, Nuove Politiche e Prospettive Urbane e Territoriali, XXXV ciclo. Dipartimento di Architettura e Design, Università di Genova (<https://hdl.handle.net/11567/111904>).

per mezzo dei quali includere o meno un progetto tradisce, infatti, l'intento di un gesto interpretativo, la cui chiave di lettura servirà a tracciare un percorso di riflessione che verrà esplicitato nella classificazione stessa, inevitabilmente relazionata al progetto di paesaggio.

Nello specifico, la raccolta dei casi studio è stata condotta secondo tre principi:

- Principio di esclusione: dall'indagine sono stati escluse a priori quelle forme di progetto spesso ammesse nel pensile ma poco utili ai fini della presente indagine, poiché lontane dall'idea di giardino come spazio e luogo: ad esempio, le cosiddette pareti verdi, i giardini verticali, e alcune coperture tradizionali – *sod*, *grass* e *turf roofs* – che vedono uno strato di vegetazione svilupparsi più o meno spontaneamente. Sono stati inoltre esclusi dalla selezione tutti quei giardini considerati pensili ma che, pur essendo spazi di progetto consapevole, sono stati ritenuti impropri, o per la mancanza di comprovate o sufficienti informazioni, o perché, in realtà, si tratta di terrapieni o terrazzamenti. Infine, sono stati esclusi tutti quei casi che non rientravano nei successivi criteri di selezione;
- Principio di selezione: sono stati presi in considerazione tutti quei progetti che hanno acquisito, nella storia e nella letteratura, un valore significativo in relazione al contesto storico, geografico e culturale di riferimento. In particolare: quei casi riconosciuti per uno specifico carattere primigenio, ovvero i primi a essere comparsi – secondo le fonti – in un dato luogo e periodo storico, come i celebri Giardini Pensili di Niniveh nel VII sec. AEC o i giardini Mitsukoshi a Tokyo nel 1915; quei casi che, rispetto alla tradizione e a una lettura più ampia, si sono configurati come un'eccezionalità, come la Torre Guinigi a Lucca del 1384, o l'appartamento Beistegui di Le Corbusier del 1929; i casi esemplari già noti in letteratura e ampiamente riconosciuti per l'influenza apportata al progetto pensile e non solo, dalla Villa dei Misteri di Pompei del II sec. AEC al progetto di CopenHill del 2019, passando per il Rockefeller Center di New York, attraverso le intuizioni dell'Immeuble-Villa di Le Corbusier e i giardini pittorici di Burle Marx, per arrivare al Millennium Park di Chicago; infine, sono stati selezionati anche tutti quei casi ritenuti significativi per specifiche peculiarità utili a dimostrare e a rafforzare l'ipotesi della presente indagine, come ad esempio il giardino pensile dell'Harvey's Store realizzato da Jellicoe nel 1958, la Domus Tiberiana del I sec. o il progetto Canòpia Urbana di Agence TER iniziato a Barcellona nel 2021;
- Principio di inclusione: alcuni progetti esclusi per i criteri già espressi sono stati invece reinseriti in virtù della loro forte caratterizzazione all'interno di un racconto pensile consolidato. Un caso esemplare è l'Isola Bella, un isolotto roccioso trasformato in una grande macrostruttura artificiale, i cui giardini pensili – in realtà terrazzamenti e sostruzioni – sono considerati nel complesso una delle principali icone barocche del pensile italiano¹⁰⁹.

¹⁰⁹ Vercelloni, M., Vercelloni, V. and Gallo, P. (2009) *L'invenzione del giardino occidentale*. 1. ed. italiana. Milano: Jaca book.

4.1.2 Le proprietà e gli stati

In questa fase sono stati ricercati quei caratteri – o proprietà – appartenenti ai casi studio che provassero a descrivere, quanto più possibile, l'ampia complessità del fenomeno pensile, considerando la relazione col progetto di paesaggio e con l'immagine di natura in esso contenuta.

Dall'indagine sono emersi 8 caratteri prioritari: di questi, 6 esprimono le relazioni tra il progetto pensile e il suo im-

Proprietà	Stati
01. Scala dimensionale	A. Elemento singolo
	B. Connessione tra elementi
	C. Insieme di elementi
	D. Regione
02. Verticalità	A. Massima orizzontalità
	B. Orizzontalità prevalente
	C. Verticalità prevalente
	D. Massima verticalità
03. Colonizzazione	A. Puntuale
	B. Minima
	C. Estesa
	D. Totale
04. Continuità	A. Frammenti puntuali
	B. Elementi discontinui
	C. Aree separate
	D. Superficie continua
05. Individuabilità	A. Impercettibile
	B. Percepibile
	C. Visibile
	D. Stesso piano
06. Utilizzo	A. Inaccessibile
	B. Privato
	C. Comune
	D. Pubblico
07. Dinamismo	A. Rigido
	B. Misto
	C. Morbido
	D. Indisciplinato
08. Complessità della vegetazione	A. Prato a sfalcio
	B. Erbacee prevalenti
	C. Erbacee e arbustive prevalenti
	D. Arboree prevalenti

TAB. 3.4. Le 8 proprietà individuate e, per ciascuna, i 4 stati

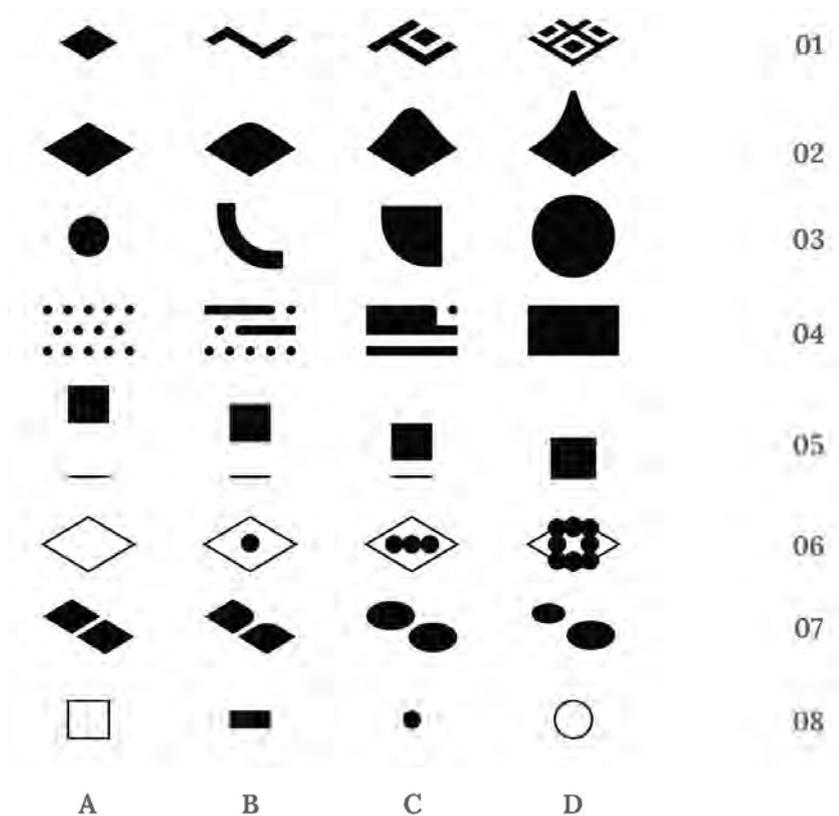


Fig. 3.3. Rappresentazione grafica di proprietà e stati

mediato intorno; e 2 costituiscono una lettura del giardino in sé, appannaggio certamente non esclusivo del fenomeno pensile ma indispensabile a una sua comprensione, specie se finalizzata agli obiettivi esplicitati dal presente lavoro di ricerca.

Ogni caso studio è stato quindi esaminato alla luce delle 8 proprietà considerate – espressione qualitativa della dimensione progettuale – a ciascuna delle quali sono stati attribuiti 4 stati differenti – espressione quantitativa – con la finalità di massimizzare le sfumature da includere nel racconto del fenomeno (cfr. TAB 3.4. e FIG. 3.3). Di seguito, una descrizione delle 8 proprietà, l'intreccio dei cui stati si propone di raccontare un giardino pensile nella sua complessità:

- **scala dimensionale:** è l'ambito spaziale di progetto nel quale si configura il giardino pensile, dal singolo elemento a un sistema composito; dall'appartamento al quartiere, dalla villa al castello, dal palazzo alla città;
- **verticalità:** indica l'estensione verticale della struttura su cui risiede il giardino pensile, secondo una morfologia che inverte i rapporti tra altezza e superficie;
- **colonizzazione:** sottolinea la relazione tra lo spazio occupato dal giardino e la restante superficie del complesso strutturale su cui è posto. Il giardino pensile è un elemento puntuale e circoscritto o si espande ricoprendo tutto lo spazio a disposizione?
- **continuità:** rispetto alla superficie occupata dal giardino pensile di cui sopra, esprime il grado di interezza del giardino o, al contrario, la sua frammentazione, indicando la presenza di aree continue o più porzioni separate;
- **individuabilità:** specifica se il giardino è visibile da un ipotetico piano di campagna nel suo intorno immediato, de-

finendo anche in modo implicito il posizionamento stesso del giardino: se, ad esempio, risulti interamente visibile e sullo stesso piano del fruitore, o al contrario, se sopraelevato e totalmente impercettibile a meno di accedervi;

- utilizzo: definisce l'ampiezza d'uso del giardino pensile, se è uno spazio tendenzialmente inaccessibile o non utilizzabile se non per fini manutentivi, se riservato a pochi, se un luogo di uso comune – privato ma aperto a una piccola collettività – oppure se dichiaratamente pubblico;
- dinamismo formale: è l'immagine di movimento apparente utilizzata nel disegno della vegetazione, che, da una configurazione più rigida e formale, passa per un formalismo più morbido e organico, fino a una aformalità indisciplinata;
- complessità strutturale della vegetazione: è la struttura verticale degli strati di vegetazione, dal più semplice prato a sfalcio fino a una presenza arborea massiva.

Alla base della definizione delle 8 proprietà, sussistono due criteri di scelta fondamentali: il primo riguarda la necessità di una rapida lettura analitica basata sull'osservazione intuitiva dello spazio di progetto, pur coadiuvata dalle informazioni raccolte; il secondo corrisponde alla volontà di ricercare quelle qualità che, relazionate tra loro, possano restituire un'immagine coerente con l'identità del progetto.

Tali intenti hanno comportato l'esclusione a priori di fattori interessanti ma non sempre rintracciabili in ogni caso studio, o per mancanza di evidenze e fonti o perché legati al rischio di un'eccessiva soggettività nella loro interpretazione¹¹⁰; e, soprattutto, hanno condotto alla ricerca di proprietà più affini, in un certo senso, a una dimensione topologica, poiché basate sulla configurazione di specifici comportamenti e relazioni – connessione, continuità, intersezione, allineamento, chiusura, prossimità¹¹¹ – piuttosto che su letture tradizionali di forme o stili predeterminati: sfumature e impronte, piuttosto che modelli e standard. Ad esempio, nelle proprietà, non viene considerato a priori lo stile 'giardino formale' o 'giardino informale', ma quelle diverse proprietà che combinate tra loro possano comporre tale tipologia.

La finalità, va ricordato, non è quella di costruire un'indagine basandosi su tipologie già descritte – nel qual caso, o non afferiscono prettamente al fenomeno pensile o non risultano esaustive della sua complessità, rimanendo limitate piuttosto a pochi aspetti (vedasi ad esempio le tipologie intensivo ed estensivo, già descritte nel par. 2.1.) – ma di provare, invece, a ricostruire nuovi gruppi basati sulla lettura di comportamenti che maggiormente esprimono il carattere del giardino pensile esaminato sotto uno sguardo più ampio. Come riuscire, altrimenti, a confrontare e classificare progetti intuitivamente tanto distanti come il Santuario della Fortuna Primigenia e il Millennium Park o il Palazzo Medici di Via Larga e CopenHill?

4.1.3 Impronte

Prima di procedere con la classificazione tassonomica vera e propria, come già accennato, le 8 proprietà e i relativi stati, nella configurazione individuata per ciascun caso, sono stati ricomposti graficamente con l'obiettivo di restituire una ver-

¹¹⁰ Ad esempio, proprietà considerate ma escluse per i motivi visti sono l'ispirazione al modello di natura, l'uso specifico del giardino, la presenza chiara di aspetti che legano o no il progetto al suo contesto economico, ecologico e culturale.

¹¹¹ Cattani, M. and Fiorini, A. (2004) 'Topologia: identificazione, significato e valenza nella ricerca archeologica', *Archeologia e Calcolatori*, 15, pp. 317-340.

sione osservabile e immediatamente confrontabile dell'identità di ciascun progetto (cfr. FIG. 3.4).

Gli stati delle proprietà sono stati ordinati secondo un gradiente scalare di relazioni, dal 'grande' al 'piccolo': dall'interpretazione del rapporto tra il giardino pensile e il suo intorno immediato, fino alla configurazione della vegetazione rispetto al giardino stesso. Ciascun caso studio ha in tal modo riacquisito una sua genetica, parametrizzata in una matrice che mette a sistema proprietà e stati nella sintetica astrazione di un codice grafico. Il codice di ogni progetto rappresenta la sua impronta, un'interpretazione simbolica da leggere intuitivamente.

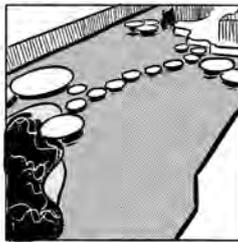
Veste iconografica

[098]



Instituto de Resseguros do Brasil

[105]



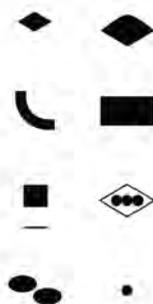
Harvey's Store

Matrice

elemento singolo	orizzontalità prevalente
colonizzazione estesa	superficie continua
individuabilità impercettibile	utilizzo comune
dinamismo morbido	erbacee e arbustive

elemento singolo	orizzontalità prevalente
colonizzazione minima	superficie continua
individuabilità percepibile	comune
dinamismo morbido	erbacee e arbustive

Veste iconologica



Impronta

098



105



Fig. 3.4. Da iconografia del progetto a iconologia

tivamente per formulare successivi schemi di indagine.
 Il risultato (cfr. FIG. 3.4) permette di osservare la complessità e gli intrecci del fenomeno pensile attraverso una comparazione degli aspetti che lo costituiscono, senza lasciarsi suggestionare da caratteri meramente formali.

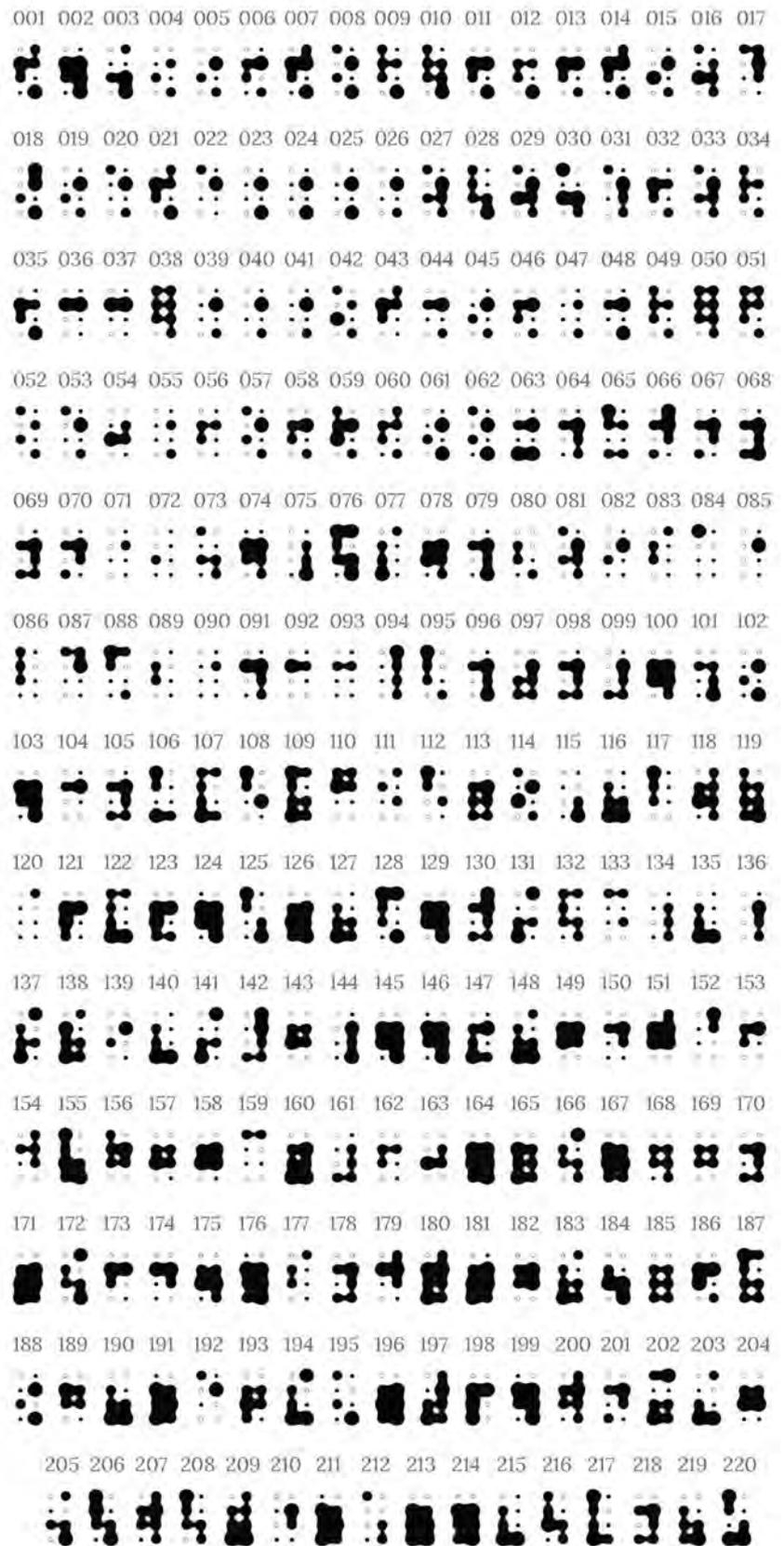


Fig. 3.5. Improntuario dei 220 progetti

Già a colpo d'occhio, infatti, è possibile accostare progetti iconograficamente anche distanti tra loro e coglierne invece le similitudini nello spazio simbolico del segno grafico (cfr. FIG. 3.5).

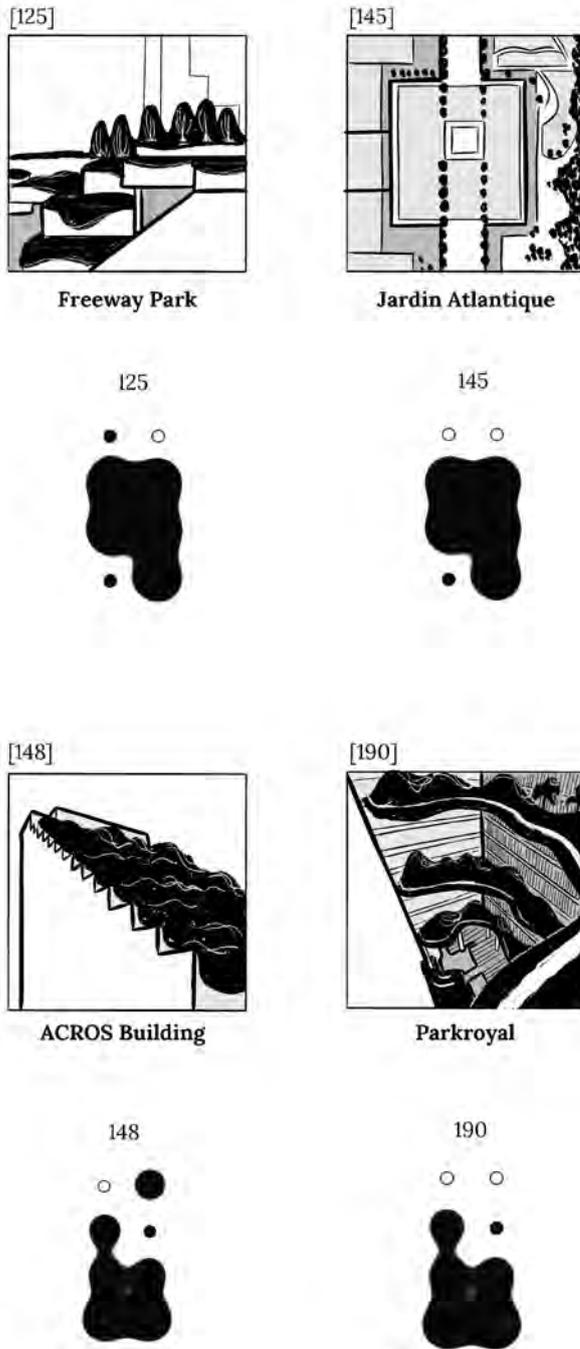


Fig. 3.6. Progetti e impronte a confronto

4.1.4 La matrice delle distanze

Con i dati ottenuti (220 progetti, ognuno rappresentato secondo i differenti stati delle sue 8 proprietà) è stata costruita la matrice delle distanze, lo strumento matematico utilizzato per determinare il grado di distanza, appunto, tra gli oggetti considerati (cfr. TAB. 3.5). Diversi sono i modi e gli indici utilizzabili per dare un'interpretazione geometrica della distanza¹¹²; nel presente caso, è stata scelta una più tradizionale distanza euclidea, ovvero la lunghezza del segmento di linea retta che collega due punti in uno spazio cartesiano, ottenuta dalla radice quadrata della somma dei quadrati delle differenze delle loro coordinate.

¹¹² Lahoz-Beltrá, R. and Pérez Soler, E. (2021) *La biodiversità e i suoi fattori matematici determinanti*. Translated by D. Tronca. Milano: RBA Italia (La matematica che trasforma il mondo, 23).

In tal modo è stato possibile confrontare tra loro tutti i casi selezionati, misurandone il grado di parentela o di dissimilarità in accordo alle proprietà degli stessi (cfr. Fig. 3.7).

	Palazzo Piccolomini	Plusiapolis	Palazzo Topkapi	Viridario di Paolo il Barbo
Palazzo Piccolomini		2,45	1,41	1,41
Plusiapolis	2,45		2,45	2,00
Palazzo Topkapi	1,41	2,45		1,73
Viridario di Paolo il Barbo	1,41	2,00	1,73	

TAB. 3.5. Matrice delle distanze (Δ): i valori nella matrice indicano la distanza (δ) tra ogni progetto espressa sulla base degli aspetti comuni; minore sarà δ , maggiore sarà la somiglianza per i caratteri indagati

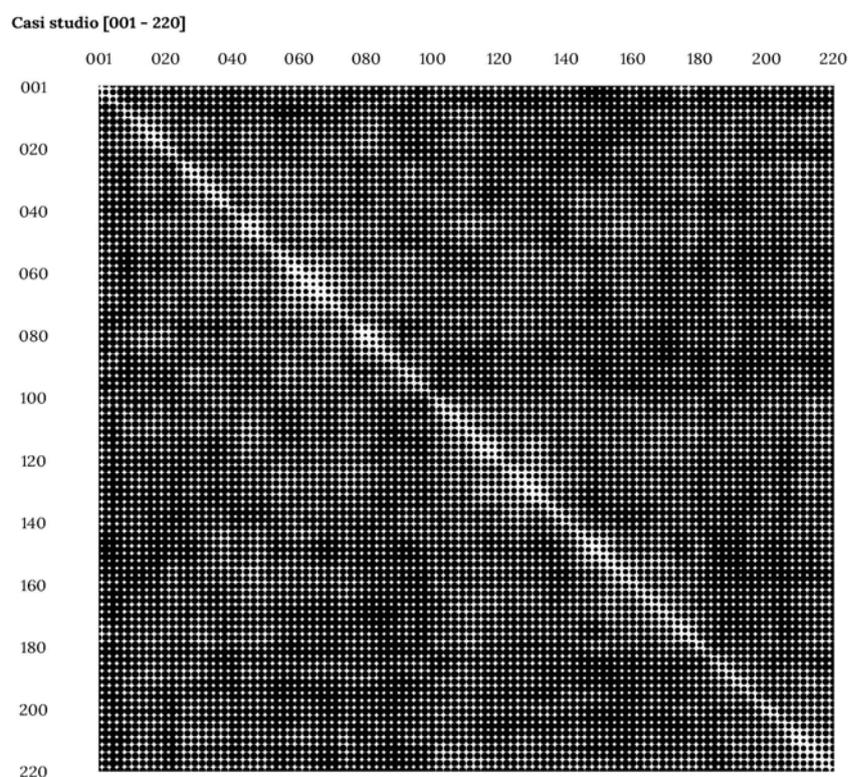


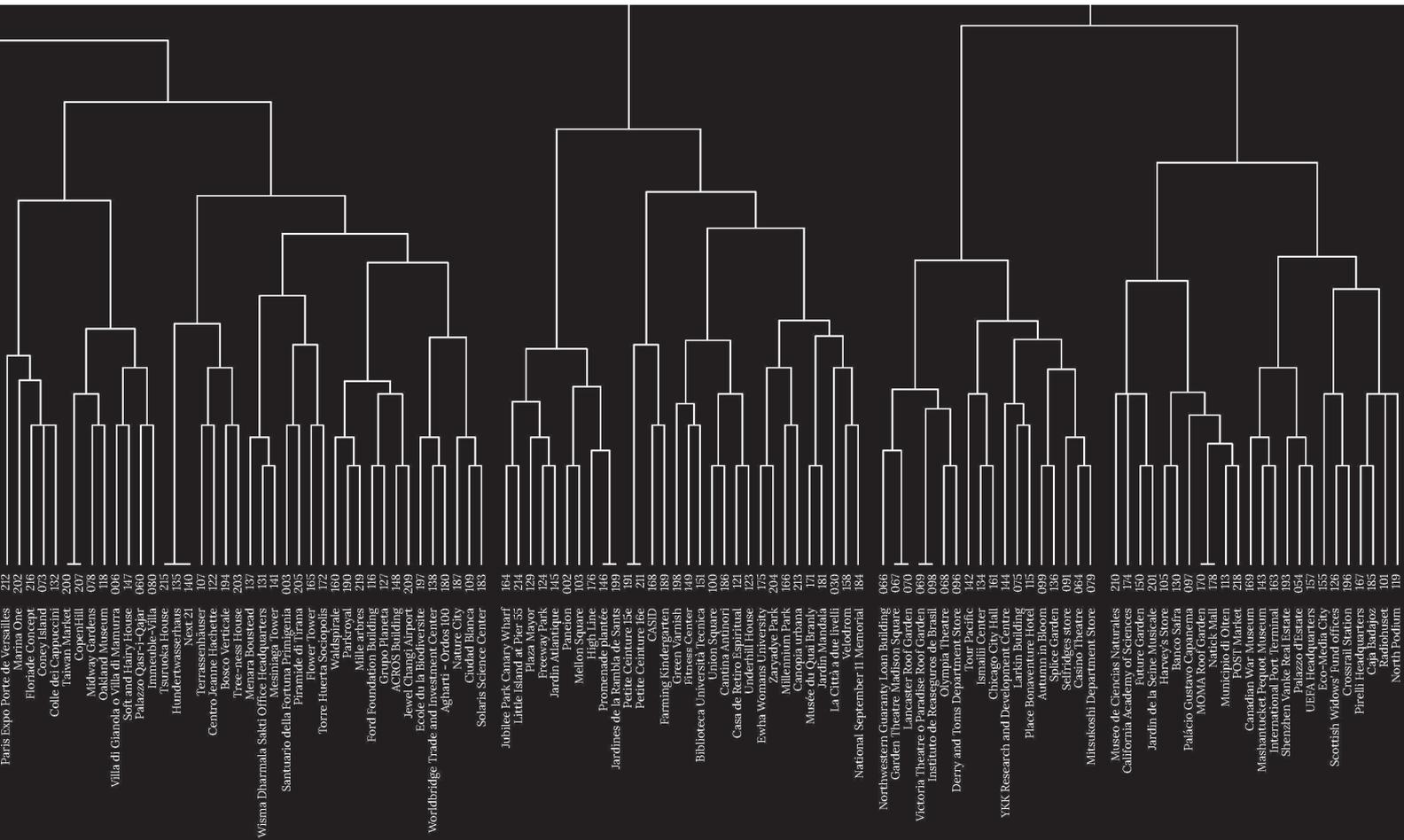
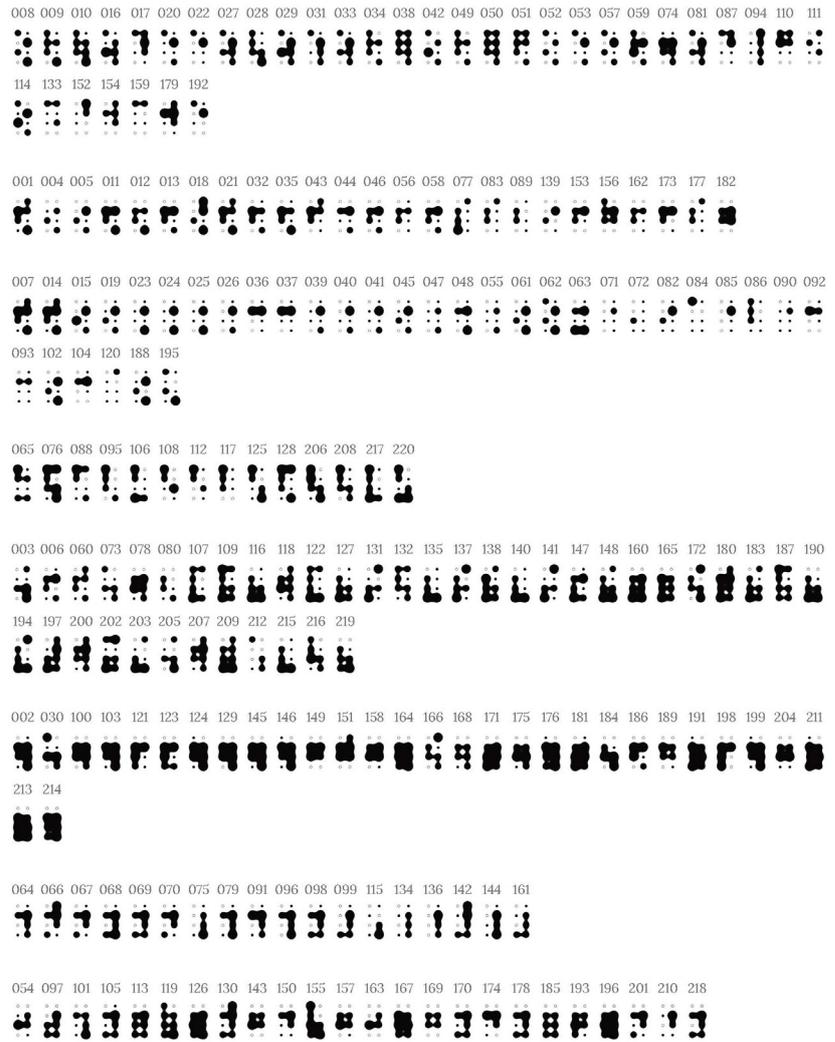
Fig. 3.7. La matrice delle distanze restituisce l'espressione geometrica del grado di affinità tra i diversi casi studio (righe e colonne). In questo caso, maggiore è la distanza tra due progetti, più scuro sarà il segno grafico. Da notare, infatti, la diagonale chiara dove un progetto viene confrontato con sé stesso risultando in una distanza nulla

4.1.5 Il dendrogramma

A partire dai valori di distanza (δ) emersi dalla matrice, i 220 progetti sono stati infine distribuiti e raggruppati secondo il reciproco grado di similarità in un sistema nidificato di famiglie: la struttura del sistema gerarchico – un albero capovolto – è caratterizzata da un graduale aumento delle similarità tra i componenti man mano che si procede verso i livelli più bassi. È un'operazione tutt'altro che innocente ed è, infatti, dettata dall'interpretazione discrezionale del ricercatore, il quale ha il compito di stabilire un limite oltre il quale raggruppare gli elementi studiati (cfr. Fig. 3.8).

Seguendo a ritroso le diramazioni dell'albero (ogni gemma apicale è rappresentata da un caso studio) è inoltre possibile ripercorrere l'evoluzione dei diversi caratteri e, soprattutto, diventa più semplice osservare la storia delle famiglie a cui i progetti appartengono. Il dendrogramma gerarchizzato, il cui esito è l'individuazione delle diverse famiglie – tipologie o *clusters* –, racconta infine l'immagine della tassonomia pensile (cfr. Fig. 3.9.).

Fig. 3.10. L'improntuario riorganizzato



nel par. 1.2., ciascuna famiglia si fa inevitabilmente portatrice di un pensiero sulla natura.

Di seguito, l'interpretazione delle 8 tipologie e l'illustrazione dei caratteri risultati più significativi:

01. La prima famiglia raccoglie giardini perlopiù funzionali, dove il concetto di natura è traslato nella sua dimensione strumentale, come bene o decorazione. Ne sono un esempio i giardini dei semplici o le coperture a verde di alcuni complessi edificati. Racconta una dimensione spaziale puntuale e frammentata rispetto alla struttura ospitante, spesso di poco impatto, quasi accessoria, tranne laddove le sue geometrie devono esporre con forza maggiore il racconto di un certo principio culturale ordinativo. Ne sono un esempio i giardini della Domus Tiberiana e di Mont-Saint-Michel, di Palazzo Piccolomini e Villa Noailles, di Palazzo Albini e del complesso Rokko Housing.

Temi chiave: paesaggio come panorama, frammenti in uno spazio composito, natura funzionale e decorativa.

Aspetti principali: Dinamismo: rigido; scala dimensionale: insieme di elementi; complessità della vegetazione: erbacee e arbustive prevalenti.

02. In questa famiglia, la dimensione ordinativa su una natura indisciplinata diviene strutturante del progetto e conferisce la legittimità di un'autorità tecnologica, ma più spesso politica e culturale. Ne deriva un tipologia di giardini pensili dalla natura razionale e geometrica; spesso, la condizione è quella di una porzione artificiale e artificiosa che viene sollevata dalla selva ed esposta quale manifesto, creando per l'essere umano un luogo sicuro da cui scrutare il legame col proprio ambiente, spazio privato ma al contempo esposto. Ne sono un esempio i Giardini Pensili di Ninive, la Torre Guinigi, il Palazzo-Giardino di Plusiapolis, Villa Heim a Neuilly, e il Tempio di Honpukuji.

Temi chiave: ricerca di una connessione con il paesaggio, spazio personale ma rivelato, natura razionale come manifesto;

Aspetti principali: Scala dimensionale: elemento singolo; indivisibilità: visibile; dinamismo: rigido; utilizzo: privato.

03. Il rigore geometrico applicato alla natura, pur presente, non è l'argomento centrale in questa famiglia di progetti, che lascia invece spazio all'idea di una natura prossima. Il giardino, difatti, non è subito visibile, spesso è da scoprire ma, sovente, si apre al paesaggio. Ne deriva un piacere riservato a pochi che genera nel fruitore una doppia scoperta – dell'interno, quanto dell'esteriore – generando un luogo di riflessione del presente ma aperto al panorama del futuro. Ne sono un esempio i Mausolei di Augusto e Adriano, alcuni giardini tradizionali Moghul, l'appartamento Beistegui, l'Ekouin Nenbutsudo e le Houses for Trees presso Ho Chi Minh.

Temi chiave: relazione interiore con il paesaggio, spazio da rivelare, natura prossima.

Aspetti principali: Utilizzo: rigido; scala dimensionale: elemento singolo; verticalità: orizzontalità prevalente; continuità: superficie continua.

04. In questo raggruppamento, il panorama del progetto si apre e si estende oltre la scala del singolo, invade la città e il paesaggio tutto. Ne nasce una seconda natura, una megastruttura totalizzante e artificiale. Il giardino pensile diviene parte della strategia di riprogettazione dell'ambiente urbano, quale genuina aspirazione di miglioramento, talvolta utopica nella sua dimensione. È un'ottimizzazione che fa sue le lezioni apprese dalla famiglia precedente, ma mira ad estendere la prossimità della natura a ogni porta; ne sono un esempio i giardini della Ville Spatiale di Friedman, l'Agricultural City di Kurokawa, la No-stop city di Archizoom, la Città Foresta di Boeri.

Temi chiave: paesaggio-architettura, spazio urbano totalizzante, seconda natura artificiale.

Aspetti principali: Scala dimensionale: regione; colonizzazione: estesa; continuità: frammenti; individuabilità: visibile.

05. La natura è narrata come epidermide vivente che ricopre e colonizza morfologie artefatte, attraverso un giardino pensile che sembra fondersi con le strutture su cui è posto in un dichiarato intento di ibridazione. La vegetazione è spesso indisciplinata, con alcune eccezioni, ma restituisce in genere la dimensione di un paesaggio artificialmente condensato. Ne sono un esempio l'Oakland Museum, il Centro Jeanne Hachette, l'Hundertwasserhaus, l'ACROS Building, il Jewel Chang Airport, la Tsuruoka House.

Temi chiave: architettura-paesaggio, spazio topografico artificiale, natura ibridante.

Aspetti principali: Individuabilità: visibile; scala dimensionale: elemento singolo; colonizzazione: estesa; continuità: elementi discontinui; utilizzo: comune.

06. Descrive un'architettura nel paesaggio che si estende con continuità nel tessuto materiale e immateriale del suo contesto, generando connessioni a scale spaziali e temporali differenti, dalle quali deriva un'espressione fortemente culturale della natura. Il giardino diviene facilmente parco nella dimensione condivisa di uno spazio spesso pubblico, aperto e accessibile, all'interno del quale è possibile ritrovare un racconto di paesaggio. Ne sono un esempio il Jardin Atlantique, la Biblioteca dell'Università Tecnica di Delft, il Jubilee Park Canary Wharf, il parco del Museo di Quai Branly a Parigi, il parco di Les Glories Catalanes a Barcellona.

Temi chiave: continuità con il paesaggio, spazio aperto di relazioni, natura culturale.

Aspetti principali: Verticalità: massima orizzontalità; scala dimensionale: elemento singolo; utilizzo: pubblico; colonizzazione: totale; continuità: superficie continua.

07. La componente culturale del paesaggio è qui estremizzata e riprodotta per l'utilizzo di pochi, importando nature volutamente insolite, non contestuali, talvolta esotiche. Sono taluni *roof gardens* elevati e nascosti che racchiudono fotografie create ad arte di luoghi e ricordi lontani, e forse mai veramente vissuti. Ne sono un esempio i *roof garden theatres* newyotkesi, alcuni *Department Stores* inglesi e giapponesi, lo Splice Garden di Marhta Schwartz. *Temi chiave: paesaggio-cartolina, spazio chiuso ed elevato, natura insolita.*

Aspetti principali: *Scala dimensionale: elemento singolo; utilizzo: comune; individuabilità: impercettibile; verticalità: orizzontalità prevalente; continuità: superficie continua.*

08: Il progetto di giardino pensile di questa famiglia è guidato dalla ricerca di una comprensione della natura, per cui il paesaggio diviene essenzialmente un campo d'indagine da cui attingere informazioni. La connessione esplorata non passa per la ricostruzione di un certo tipo di paesaggio ma è legata all'interpretazione figurativa delle sue regole, che conduce alla generazione di interessanti forme e geometrie. Ne sono un esempio il giardino di Palácio Gustavo Capanema e del Banco Safra di Burle Marx, l'Harvey Store di Jellicoe, il Natick Mall di Schwartz, il POST Market di OMA.

Temì chiave: paesaggio come riferimento formale, geometrie sinuose dello spazio, natura da interpretare.

Aspetti principali: *Utilizzo: comune; scala dimensionale: elemento singolo; verticalità: massima orizzontalità; colonizzazione: estesa; dinamismo: morbido.*

4.3 Considerazioni

Dal punto di vista "genealogico" è possibile leggere delle affiliazioni; le famiglie 02 e 03, la 04 e la 05, la 07 e la 08 hanno tra di loro una distanza inferiore rispetto agli altri gruppi, il che le colloca su un tracciato comune prima di dividersi su alcune tematiche. Ad esempio, la 07 e la 08: prevedono entrambi giardini a uso comune in cui l'intento è quello di riprodurre un certo paesaggio; ma se nella famiglia 07 la riproduzione è quasi didascalica e la percezione del giardino è per lo più nascosta, nella 08 le regole del paesaggio vengono reinterpretate e il suo utilizzo è certamente meno restrittivo.

Da un punto di vista descrittivo, si possono invece trovare delle affinità: la 01 e la 02 condividono l'idea di una natura da ordinare, ma con confini e finalità differenti; la 04 e la 05 rappresentano rispettivamente il paesaggio-architettura e l'architettura-paesaggio; nella 06 e nella 08 il giardino ha una forte relazione con il paesaggio.

Non tutti i progetti 'tipologicamente' simili appartengono alla stessa famiglia come verrebbe spontaneo pensare: ad esempio, i progetti delle città utopiche o tutti i giardini presenti su torri e grattaceli.

Per quanto riguarda il 'dinamismo' – l'immagine di movimento apparente utilizzata nel disegno della vegetazione – è curioso notare una certa affinità che vede associate: la dimensione privata ad un'immagine più rigida, la dimensione comune a forme più sinuose e la dimensione pubblica (e parzialmente, quella comune) a un aspetto più indisciplinato.

5. Arcipelago

Nel 1997, durante il secondo International Symposium on Urban Planning and the Environment, tenutosi nella città di Groningen in Olanda, il professore e urbanista Michael Neuman presentò quella che, negli anni successivi, sarebbe diventata una ricerca sulla fallacia della città compatta¹¹³. Nel suo interessante studio, il professore statunitense asserì che per

¹¹³Cfr. Neuman, M. (2005) 'The Compact City Fallacy', *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), pp. 11-26.

¹¹⁴ Mann, S. (2003) 'Decon2 (Decon Squared): Deconstructing Decontamination', *Leonardo*, 36(4), pp. 285-290.

¹¹⁵ Neuman (2005), op.cit. p. 22.

¹¹⁶ Farinelli, F. (2016) *L'invenzione della Terra*. Palermo: Sellerio Editore, p. 101.

¹¹⁷ Granata, E. (2019) *Biodiversity: città aperte, creative e sostenibili che cambiano il mondo*. Prima edizione. Firenze - Italia, Bra (CN) - Italia: Giunti ; Slow Food editore, p. 122.

superare certe problematiche del contemporaneo – in particolare, aspetti che connotano il progetto della città post-post-modernista¹¹⁴ – sarebbe stato necessario «elevare il livello del gioco»¹¹⁵, ovvero, porre le giuste domande per osservare la fenomenologia del paesaggio urbano e oltrepassare certi stereotipi. Dello stesso pensiero è il geografo Franco Farinelli, quando ribadisce la necessità di dover «urgentemente iniziare a reinventare la Terra stessa, attraverso altre logiche e altri modelli»¹¹⁶, attingendo e rimescolando categorie già emerse da più livelli di sapere.

Le difficoltà nel risolvere le problematiche complesse troverebbero, dunque, secondo molti, una radice comune nella poca osmosi disciplinare e, in particolare, nello spinoso rapporto che interessa umano e non umano, e le relative sfere di saperi. La soluzione proposta sembra allora semplice e scontata: se il problema è nella contrapposizione tra sistemi, la risposta andrebbe ricercata in una loro riconciliazione; nel caso delle città ad esempio, l'obiettivo sembra essere quello di risolvere il dualismo tra urbanizzato e natura, tra estetica e tecnologia, trovando soluzioni per integrare, accostare, ibridare, mutare. A prescindere dalle forme della riconciliazione, ciò che viene richiesto, in un modo o nell'altro, è la risoluzione del confronto. Ma la realtà è un'altra. Una soluzione del genere non farebbe che alimentare la problematica che prova a risolvere: per quanto possa apparire paradossale, infatti, la necessità di un 'dialogo' presuppone a priori che le due realtà – umano e non umano – siano divise; in tal modo, l'idea di riconciliazione proposta per risolvere le complessità attuali autoconfermerebbe la frattura che si propone di sanare, non risolvendo il problema ma perpetuandolo. Ciò che serve, è un cambio di prospettiva.

«Le città stano già attuando comportamenti ecologici anche se non sanno e non possono governare tutti i processi, anche se non hanno tutte le informazioni (...). Forse dobbiamo pensare che gli umani siano più simili di quanto credano ai non umani»¹¹⁷.

Come visto nella transdisciplinarietà non si tratta di accostare realtà apparentemente distanti, ma di ampliare il punto di vista verso un appiattimento prospettico e osservare come tutto già faccia parte di una grande maglia: consiste, in altre parole, nel sovrapporre sfere di saperi su di uno stesso piano di lettura. In tal senso l'architettura del paesaggio si è fatta maestra d'indagine, nonché portavoce di implicazioni concrete. Ne è un esempio il giardino pensile, marginale forse rispetto a espressioni più vaste e nobili del progetto di paesaggio, ma esemplare nella sua dimensione ibrida di edificio e giardino, vuoto e pieno.

Come visto, l'attuale lettura del giardino pensile, nella sua accezione diffusa di 'verde tecnologico', salvifico e risolutore, non fa che perpetrare un'immagine di natura astratta o comunque separata dalla sfera umana, restituendo una visione di progetto settoriale e superficiale.

Il giardino pensile si è dimostrato, così, un imprevisto oggetto di studio da cui mutuare riflessioni e prospettive sul progetto di paesaggio e sull'idea di natura quale alterità, avvalendosi soprattutto di strumenti disciplinari diversi.

Si è deciso, dunque, di fornire un'alternativa alla tipica classificazione operata per il giardino pensile, utilizzando uno strumento inusuale nella disciplina architettonica.

Attraverso la tassonomia numerica – trattando in un certo senso il progetto come un organismo vivente – è stato possibile offrire un’interpretazione più ricca del fenomeno, seppur non innocente nelle sue considerazioni.

220 progetti, ognuno descritto secondo 8 proprietà variabili, ciascuna in 4 possibili stati hanno formato un albero gerarchico che ha visto la nascita di 8 famiglie o raggruppamenti. Ogni famiglia racconta una specifica immagine – o alterità – di natura, e amplia lo sguardo sul progetto di paesaggio facendo luce su come viene percepito e interpretato: ora panorama e sfondo, ora cartolina, ora architettura vivente, ora spazio di riflessione.

Dalla lettura combinata dei gruppi generati emergono nuovi scenari, si osservano piccole sorprese e si allineano possibili percorsi.

Con la tassonomia pensile si è provato a restituire la configurazione di una polifonia di voci affatto semplice da guidare lungo traiettorie delineate. Ma la dimensione che lega il progetto al paesaggio e lo rende rivelatore di una certa idea di natura è rimasta la proiezione centrale lungo la quale si sono dispiegate le intenzioni della classificazione. Pertanto, nella tagliente operazione di raggruppamento non vanno dimenticate tutte le sfumature e le interpretazioni che lasciano fortunatamente al campo d’indagine un margine di azione ancora aperto: quante proprietà adottare e quanti raggruppamenti? Quali nomi utilizzare per le famiglie? Esistono delle correlazioni tra gli stati all’interno di ciascuna famiglia? È possibile espandere l’uso della tassonomia ad altri ambiti del progetto di paesaggio?

Assecondando l’immagine di uno dei giardini pensili selezionati nella classificazione – l’Anfiteatro di Citera – si descrive il giardino ideale come un’isola¹¹⁸, nella sua dimensione ancestrale ed etimologica di recinto, spazio chiuso, zona salva da un contesto ferale. In realtà,

i giardini costituiscono una serie di isole indipendenti le une dalle altre, pur facendo parte di un unico insieme. Benché ogni giardino sia stato pensato e creato (...) per un contesto specifico, ciascuno è collegato agli altri. Il legame che li unisce prescinde dalle distanze geografiche, è di ordine conscio o inconscio, formale o affettivo e ha costituito nel corso del tempo un metodo e un atteggiamento che noi stessi vediamo emergere e svilupparsi a poco a poco¹¹⁹.

Come nell’immagine di un grande arcipelago.

¹¹⁸ Colonna, F. (1499) *Hypnerotomachia Poliphili, ubi omnia non nisi somnium esse docet.* Venezia.

¹¹⁹ Archipel (2008) 'Introduzione', in Pasquali, M., *Archipel: l'arte di fare giardini.* Torino: Bollati Boringhieri, pp. 21-23, cit. p. 21.

BIBLIOGRAFIA

- Archipel (2008) 'Introduzione', in Pasquali, M., *Archipel: l'arte di fare giardini*. Torino: Bolaffi Boringhieri, pp. 21-23.
- Barrio, E.P.D. (1998) 'Analysis of the green roofs cooling potential in buildings', *Energy and Buildings*, 27(2), pp. 179-193.
- Bass, B. et al. (2003) 'The impact of green roofs on Toronto's urban heat island', *Proceedings of the First North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pp. 292-304.
- Bates, A.J. et al. (2009) 'SWITCH in Birmingham, UK: experimental investigation of the ecological and hydrological performance of extensive green roofs', *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 8(4), pp. 295-300.
- Baudoin, W. et al. (2017) 'Rooftop Gardening for Improved Food and Nutrition Security in the Urban Environment', in F. Orsini et al. (eds.) *Rooftop Urban Agriculture*. Cham: Springer International Publishing (Urban Agriculture), pp. 219-233.
- Baumann, N. (2006) 'Ground-Nesting Birds on Green Roofs in Switzerland: Preliminary Observations', *Urban Habitats*, 4, pp. 37-50.
- Bellini, O. and Mocchi, M. (2019) 'Rooftop architecture and urban roofscape: designing the new vertical city', *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 17, pp. 264-277.
- Bianchini, F. and Hewage, K. (2012) 'How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials', *Building and Environment*, 48, pp. 57-65.
- Bonaiuto, M. et al. (1999) 'MULTIDIMENSIONAL PERCEPTION OF RESIDENTIAL ENVIRONMENT QUALITY AND NEIGHBOURHOOD ATTACHMENT IN THE URBAN ENVIRONMENT', *Journal of Environmental Psychology*, 19(4), pp. 331-352.
- Braaker, S. et al. (2017) 'Habitat connectivity and local conditions shape taxonomic and functional diversity of arthropods on green roofs', *Journal of Animal Ecology*. Edited by K. Cuddington, 86(3), pp. 521-531.
- Braat, L.C. (2012) 'Ecosystem services—science, policy and practice: Introduction to the journal and the inaugural issue', *Ecosystem Services*, 1(1), pp. 1-3.
- Brenneisen, S. (2006) 'Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland', *Urban Habitats*, 4, pp. 27-36.
- Buehler, D. and Junge, R. (2016) 'Global Trends and Current Status of Commercial Urban Rooftop Farming', *Sustainability*, 8(11), p. 1108.
- Cabaneq, A. and Newman, P. (2016) 'Biophilic urban regeneration: can biophilics be a land value capture mechanism?', in *SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND PLANNING 2016*, Penang, Malaysia, pp. 65-74.
- Cattani, M. and Fiorini, A. (2004) 'Topologia: identificazione, significato e valenza nella ricerca archeologica', *Archeologia e Calcolatori*, 15, pp. 317-340.
- Clark, C., Adriaens, P. and Talbot, F.B. (2008) 'Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits', *Environmental Science & Technology*, 42(6), pp. 2155-2161.
- Colonna, F. (1499) *Hypnerotomachia Poliphili, ubi omnia non nisi somnium esse docet*. Venezia.
- Commoner, B. (1980) *The Closing Circle: Nature, Man and Technology*. New York: Bantam Books.
- Comstock, N. et al. (2010) 'Neighborhood attachment and its correlates: Exploring neighborhood conditions, collective efficacy, and gardening', *Journal of Environmental Psychology*, 30, pp. 435-442.
- Connelly, M. and Hodgson, M. (2015) 'Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs', *Building and Environment*, 92, pp. 335-346.
- Cosgrove, D.E. (2001) *Apollo's eye: a cartographic genealogy of the earth in the western imagination*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Currie, B.A. and Bass, B. (2008) 'Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model', *Urban Ecosystems*, 11(4), pp. 409-422.
- Descola, P. (2015) *Par-delà nature et culture*. Paris: Gallimard (Collection Folio, 607).
- Dunnett, N. (2010) 'People and Nature: integrating aesthetics and ecology on accessible green roofs', *Acta Horticulturae*, (881), pp. 641-652.
- Dunnett, N., Nagase, A. and Hallam, A. (2008) 'The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001-2006: influence of substrate depth', *Urban Ecosystems*, 11(4), pp. 373-384.
- Dunnett, N. and Nolan, A. (2004) 'THE EFFECT OF SUBSTRATE DEPTH AND SUPPLEMENTARY WATERING ON THE GROWTH OF NINE HERBACEOUS PERENNIALS IN A SEMI-EXTENSIVE GREEN ROOF', *Acta Horticulturae*, (643), pp. 305-309.
- Dunnett, N.P. et al. (2005) 'Vegetation composition of green roofs and its influence on runoff and biodiversity', in *Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show*, pp. 4-6.
- Dunster, K. and Coffman, R.R. (2015) 'Placing Green Roofs in Time and Space: Scale, Recruitment, Establishment, and Regeneration', in R.K. Sutton (ed.) *Green Roof Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing (Ecological Studies), pp. 357-390.
- Durhman, A. et al. (2004) 'Evaluation of Crassulacean species on extensive green roofs', *Proc. of 2nd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, pp. 504-517.
- Elkin, R.S. (2017) *Tiny taxonomy*. New York: Actar Publishers.
- European Commission (2021) 'Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale Europeo e al Comitato delle Regioni, Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici - La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici, COM(2021) 82 final'. Bruxelles: European Commission.
- European Commission (2022b) 'Green Deal: pioneering proposals to restore Europe's nature by 2050 and halve pesticide use by 2030'. Bruxelles: European Commission [Comunicato Stampa].

- European Commission (2022a) 'Proposta di Legge 2022/195 Regulation of the European Parliament and of the Council on nature restoration'. Bruxelles: European Commission.
- European Commission and Directorate-General for Research and Innovation (2015) *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities': (full version)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Farina, A. (1998) *Principles and methods in landscape ecology*. 1st ed. London; New York: Chapman & Hall.
- Farinelli, F. (2016) *L'invenzione della Terra*. Palermo: Sellerio Editore.
- Feng, H. and Hewage, K.N. (2018) 'Economic Benefits and Costs of Green Roofs', in *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Elsevier, pp. 307-318.
- Gaffin, S. et al. (2005) 'Energy balance modeling applied to a comparison of green and white roof cooling efficiency', *Research Report* [Preprint].
- Gaffin, S. et al. (2006) 'Quantifying evaporative cooling from green roofs and comparison to other land surfaces'.
- Gaffin, S., Khanbilvardi, R. and Rosenzweig, C. (2009) 'Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City', *Sensors*, 9(4), pp. 2647-2660.
- Gaffin, S.R. et al. (2008) 'Variations in New York city's urban heat island strength over time and space', *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1-2), pp. 1-11.
- Galbrun, L. and Scerri, L. (2017) 'Sound insulation of lightweight extensive green roofs', *Building and Environment*, 116, pp. 130-139.
- Gann, G.D. et al. (2019) 'International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition', *Restoration Ecology*, 27(S1), pp. S1-S46.
- Garber, M. (2012) 'The First Image of Earth Taken From Space (It's Not What You Think)', *The Atlantic*, 6 August.
- Gedge, D. and Kadas, G. (2004) 'Bugs, bees and spiders: green roof design for rare invertebrates'.
- Germann-Chiari, C. and Seeland, K. (2004) 'Are urban green spaces optimally distributed to act as places for social integration? Results of a geographical information system (GIS) approach for urban forestry research', *Forest Policy and Economics*, 6(1), pp. 3-13.
- Getter, K.L. et al. (2009) 'Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs', *Environmental Science & Technology*, 43(19), pp. 7564-7570.
- Getter, K.L. and Rowe, D.B. (2006) 'The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development', *HortScience*, 41(5), pp. 1276-1285.
- Gheno, V. (2021) *Le ragioni del dubbio: l'arte di usare le parole*. Torino: Einaudi (Super ET Opera viva).
- Gherzi, A. (ed.) (2007) *Paesaggi terapeutici: come conservare la diversità per il ben-essere dell'uomo = Therapeutic landscapes, or the promotion of the diversity for human well-being*. Firenze: Alinea.
- Gherzi, A. and Melli, S. (2021) 'Mediterranean green roofing: images and designs of urban resilience. Iconic projects for a new green roof imaginary', in M. Gausa (ed.) *Through Resili(g)ence - Nuove sfide sociali e ambientali*. Genova: Genova University Press (Adddoc Logos), pp. 121-132.
- Giorgianni, E. (2021) "'Dal concetto monade al concetto nomade. In cammino verso la transdisciplinarietà tra Ortega, Stengers, Morin'", *Peloro* [Preprint].
- Granata, E. (2019) *Biodiversity: città aperte, creative e sostenibili che cambiano il mondo*. Prima edizione. Firenze - Italia, Bra (CN) - Italia: Giunti; Slow Food editore.
- GRO (2014) *The GRO Green Roof Code. Green Roof Code of Best Practice for the UK 2014*. Sheffield: Groundwork Sheffield.
- Hempel, C.G. (1965) 'Fundamentals of Taxonomy', in Hempel, C. G., *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. Glencoe: Free Press, pp. 137-154.
- Hitchmough, J. (2004) 'Naturalistic herbaceous vegetation for urban landscapes', in N. Dunnett and J. Hitchmough (eds.) *The Dynamic Landscape: Design, Ecology and Management of Naturalistic Urban Planting*. Taylor & Francis, pp. 172-245.
- Hoek, N. (2022) 'A Critical Analysis of the Proposed EU Regulation on Nature Restoration: Have the Problems Been Resolved?', *European Energy and Environmental Law Review*, 31(5).
- Hubbard, H.V. and Kimball, T. (1920) *Landscape Architecture. A comprehensive classification scheme for books, plans, photographs, notes and other collected material*. Cambridge: Harvard University Press.
- Hudson, H.C. (ed.) (1982) *Classifying social data*. 1st ed. San Francisco: Jossey-Bass (The Jossey-Bass social and behavioral science series).
- Ingegnoli, V. (1993) *Fondamenti di ecologia del paesaggio: studio dei sistemi di ecosistemi*. 1. ed. Milano: CittàStudi.
- ISPRA (2010) 'Analisi e progettazione botanica per gli interventi di mitigazione degli impatti delle infrastrutture lineari', in Roma: ISPRA (Manuali e Linee Guida, 63).
- ISPRA (2012) 'Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico', in Ambiente, *Paesaggio e Infrastrutture*. Roma: ISPRA (Manuali e Linee Guida, 78).
- Jellicoe, G.A. (1982) *L'Architettura Del Paesaggio*. 2nd edn. Milano: Edizioni di comunità (Saggi di Cultura Contemporanea).
- Jorgensen, A., Hitchmough, J. and Calvert, T. (2002) 'Woodland spaces and edges: their impact on perception of safety and preference', *Landscape and Urban Planning*, 60(3), pp. 135-150.
- Jorgensen, B.S. and Stedman, R.C. (2001) 'SENSE OF PLACE AS AN ATTITUDE: LAKE-SHORE OWNERS ATTITUDES TOWARD THEIR PROPERTIES', *Journal of Environmental Psychology*, 21(3), pp. 233-248.
- Kephart, P. (2005) 'Living architecture: an ecological approach'.

- Köhler, M. et al. (2002) 'Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics - far beyond the aesthetics', *Environmental Management and Health*, 13(4), pp. 382-391.
- Köhler, M. (2006) 'Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin', *Urban Habitats*, 4.
- Kotzen, B. (2018) 'Green Roofs Social and Aesthetic Aspects', in *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Elsevier, pp. 273-281.
- Laborit, H. (1982) *Elogio della fuga*. Milano: Mondadori (Saggi).
- Lahoz-Beltrá, R. and Pérez Soler, E. (2021) *La biodiversità e i suoi fattori matematici determinanti*. Translated by D. Tronca. Milano: RBA Italia (La matematica che trasforma il mondo, 23).
- Latour, B. (2010) 'An Attempt at a "Compositionist Manifesto"', *New Literary History*, 41(3), pp. 471-490.
- Legendre, P. and Legendre, L. (2006) *Numerical ecology*. 2. Engl. ed., reprinted. Amsterdam: Elsevier (Developments in environmental modelling, 20).
- Liu, K. and Baskaran, B. (2003) 'Thermal performance of green roofs through field evaluation', *Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference, Awards, and Trade Show* [Preprint].
- Lombardo, E. (1973) 'Review of Il cerchio da chiudere', *Genus*, 29(1/2), pp. 223-225.
- Lovelock, J.E. (1972) 'Gaia as seen through the atmosphere', *Atmospheric Environment* (1967), 6(8), pp. 579-580.
- Lundholm, J. (2006) 'Green Roofs and Facades: A Habitat Template Approach', *Urban Habitats*, 4.
- Mann, S. (2003) 'Decon2 (Decon Squared): Deconstructing Decontamination', *Leonardo*, 36(4), pp. 285-290.
- Marinero, L. (2022) 'Intangibile, Emergente, Esplicito. Il progetto di paesaggio per la transizione ecologica', *Ri-Vista. Research for landscape architecture*, 19(2), pp. 82-97.
- Marradi, A. (1993) 'Classificazioni, tipologie, tassonomie', *Enciclopedia delle Scienze Sociali*. Roma: Istituto della Enciclopedia Italiana.
- May, R.W. (1982) 'Discriminant Analysis in Cluster Analysis', in H.C. Hudson (ed.) *Classifying social data*. 1st ed. San Francisco: Jossey-Bass (The Jossey-Bass social and behavioral science series), pp. 39-55.
- McHarg, I.L. (1989) *Progettare con la natura*. Padova: Muzzio.
- McHarg, I.L. (1997) 'Ecology and design', in G.F. Thompson and F.R. Steiner (eds.) *Ecological design and planning*. New York: John Wiley (The Wiley series in sustainable design), pp. 321-332.
- Melli, S. (2023) *Il giardino pensile - Le alterità della natura nel progetto di paesaggio*. Dottorato di Ricerca in Architettura, Nuove Politiche e Prospettive Urbane e Territoriali, XXXV ciclo. Dipartimento di Architettura e Design, Università di Genova. <https://hdl.handle.net/11567/111904>.
- Mentens, J., Raes, D. and Hermy, M. (2006) 'Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?', *Landscape and Urban Planning*, 77(3), pp. 217-226.
- Metta, A. and Olivetti, M.L. (eds.) (2019) *La città selvatica: paesaggi urbani contemporanei*. Melfi (Italia): Libria (L&scape).
- Millennium Ecosystem Assessment (Program) (ed.) (2005) *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Moran, A., Hunt, B. and Smith, J. (2005) 'Hydrologic and water quality performance from green roofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina'.
- Morgan, S., Celik, S. and Retzlaff, B. (2013) 'Green Roof Storm-Water Runoff Quantity and Quality', *Journal of Environmental Engineering*, 139, pp. 471-478.
- Morin, E. (2001) *Il metodo*. Milano: R. Cortina [ed. or. 1977].
- MVRDV (Firm), Maas, W. and Rotterdam (Netherlands) (eds.) (2021) *Rooftop Catalogue =: Dakencatalogus*. Rotterdam, Netherlands: Rotterdamse Dakendagen.
- Nebbia, G. (1986) 'Presentazione a Il cerchio da chiudere', in Commoner, B., *Il cerchio da chiudere; presentazione di Giorgio Nebbia; appendice di Virginio Bettini; trad. di Virginio Bettini e Gianluigi Mainardi*. Milano: Garzanti (Saggi rossi), pp. 6-20.
- Neonato, F., Tomasinelli, F. and Colaninno, B. (2019) *Oro verde. Quanto vale la natura in città*. Milano: Il Verde Editoriale.
- Neuman, M. (2005) 'The Compact City Fallacy', *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), pp. 11-26.
- Oke, T.R. (1982) 'The energetic basis of the urban heat island', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), pp. 1-24.
- Partridge, D.R. and Clark, J.A. (2018) 'Urban green roofs provide habitat for migrating and breeding birds and their arthropod prey', *PLOS ONE*. Edited by T. Longcore, 13(8), p. e0202298.
- Paulus, J. and Sprackett, J. (2021) 'EU nature restoration law'.
- Peck, S.W. et al. (1999) 'Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada'.
- Perini, K., Magliocco, A. and Sabbion, P. (2020) *Infrastrutture verdi per l'adattamento ai cambiamenti climatici*. Genova: ModusOperandi.
- Piana, M. and Carlisle, S. (2014) 'Green Roofs Over Time: A Spatially Explicit Method for Studying Green Roof Vegetative Dynamics and Performance', *Cities and the Environment*, 7, p. 1.
- Potsdam Initiative - Biological Diversity 2010 (2007). Potsdam: G8, Environment Ministers Meeting.
- Raaphorst, K. and Lenzholzer, S. (2018) 'Towards a Taxonomy of Design Approaches in Landscape Architecture', in *Landscapes of Conflict. ECLAS Conference Ghent 2018*, Ghent, pp. 737-744.
- Ramo, B. (2011) 'O'Mighty'Green'', *Architecture+ Design*, 28(10), p. 82.
- Randrup, T.B. et al. (2020) 'Moving beyond the nature-based solutions discourse: introducing nature-based thinking', *Urban Ecosystems*, 23(4), pp. 919-926.

- Rezaei, F. et al. (2005) 'Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species: 2005 ASAE Annual International Meeting'
- Rowe, D.B. (2011) 'Green roofs as a means of pollution abatement', *Environmental Pollution*, 159(8-9), pp. 2100-2110.
- Russi, A., Palmeri, F. and Gibelli, G. (1996) 'Considerazioni sugli indici di ecologia del paesaggio: connettività e circuitazione.'
- Sandri, G. (1969) 'On the logic of classification', *Quality and Quantity*, 3(1), pp. 80-124.
- Schroll, E. et al. (2011) 'The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate', *Ecological Engineering*, 37(4), pp. 595-600.
- Sighiboldi, C. (1973) 'Quando l'ecologia non è una mistificazione: Il cerchio da chiudere', *l'Unità mercoledì 3 gennaio 1973*, p. 3.
- Smith, K.R. and Roebber, P.J. (2011) 'Green Roof Mitigation Potential for a Proxy Future Climate Scenario in Chicago, Illinois', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), pp. 507-522.
- Smith, R.M. et al. (2006) 'Urban domestic gardens (VI): environmental correlates of invertebrate species richness', *Biodiversity and Conservation*, 15(8), pp. 2415-2438.
- Sommariva, E., Canessa, N.V. and Tucci, G. (2022) 'Green actions for innovative cities. The new agri-food landscape', *Agathòn* 11, p. 150.
- Stengers, I. and Andler, D. (1988) *Da una scienza all'altra: concetti nomadi*. Firenze: Hopeful Monster.
- Sutton, R.K. (ed.) (2015) *Green Roof Ecosystems*. 1st ed. 2015. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer (Ecological Studies, Analysis and Synthesis, 223).
- Takano, T. (2002) 'Urban residential environments and senior citizens' longevity in mega-city areas: the importance of walkable green spaces', *Journal of Epidemiology & Community Health*, 56(12), pp. 913-918.
- Theodosiou, T.G. (2003) 'Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique', *Energy and Buildings*, 35(9), pp. 909-917.
- Thomaier, S. et al. (2015) 'Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming)', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(1), pp. 43-54.
- Trentelman, C.K. (2009) 'Place Attachment and Community Attachment: A Primer Grounded in the Lived Experience of a Community Sociologist', *Society & Natural Resources*, 22(3), pp. 191-210.
- Turner, T. (1995) 'Greenways, blueways, skyways and other ways to a better London', *Landscape and Urban Planning*, 33(1-3), pp. 269-282.
- Ulrich, R.S. et al. (1991) 'Stress recovery during exposure to natural and urban environments', *Journal of Environmental Psychology*, 11(3), pp. 201-230.
- Van Renterghem, T. and Botteldooren, D. (2008) 'Numerical evaluation of sound propagating over green roofs', *Journal of Sound and Vibration*, 317(3-5), pp. 781-799.
- VanWoert, N.D. et al. (2005) 'Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth', *Journal of environmental quality*, 34(3), pp. 1036-1044.
- Velazquez, L.S. (2005) 'Organic greenroof architecture: Sustainable design for the new millennium', *Environmental Quality Management*, 14(4), pp. 73-85.
- Vercelloni, M., Vercelloni, V. and Gallo, P. (2009) *L'invenzione del giardino occidentale*. 1. ed. italiana. Milano: Jaca book.
- Weller, R. (2019) 'Landscape Genres: Towards a Taxonomy of Contemporary Landscape Architecture', *Landscape Architecture*, 26(7), pp. 8-25.
- Whittinghill, L.J. and Rowe, D.B. (2012) 'The role of green roof technology in urban agriculture', *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27(4), pp. 314-322.
- Wilkinson, D.M. (2001) 'Is local provenance important in habitat creation?: Local provenance and habitat creation', *Journal of Applied Ecology*, 38(6), pp. 1371-1373.
- Williams, D.R. et al. (1992) 'Beyond the commodity metaphor: Examining emotional and symbolic attachment to place', *Leisure Sciences*, 14(1), pp. 29-46.
- Wittgenstein, L. (2012) *Tractatus logico-philosophicus e Quaderni 1914-1916*. 3. rist. Edited by A.G. Conte. Torino: Einaudi.
- Woods Ballard, B. et al. (2007) *The SUDS manual*. London: CIRIA.
- Zaera-Polo, A. and Fernandez Abascal, G. (2016) *Architecture's 'Political Compass': A Taxonomy of Emerging Architecture in One Diagram*, ArchDaily. A
- Zagari, F. (1988) *L'architettura del giardino contemporaneo*. Milano: A. Mondadori.
- Zagari, F. (2006) *Questo è paesaggio: 48 definizioni*. Roma: Mancosu.
- Zhao, Z. et al. (2018) 'Design of a Smart Sensor Network System for Real-Time Air Quality Monitoring on Green Roof', *Journal of Sensors*, 2018, pp. 1-13.

Prefazione

Negli ultimi anni, si è assistito allo sviluppo di inediti processi e componenti finalizzati alla progressiva riduzione delle emissioni inquinanti e dei consumi energetici del settore delle costruzioni. Nonostante l'elevato livello di conoscenza raggiunto, non è stata ancora maturata una piena consapevolezza delle possibili strategie e strumenti attuabili per il raggiungimento di una maggiore sostenibilità del patrimonio edilizio. Uno dei principali limiti è la tendenza degli operatori del settore nel preferire soluzioni tradizionali, il cui uso è ampiamente consolidato, rispetto a tecniche e componenti innovativi, di cui non si è ancora acquisita una piena conoscenza. A tal riguardo, è emblematico l'attuale livello di impiego delle soluzioni a base di materiali tecnologicamente avanzati e 'intelligenti', che, nonostante siano stati oggetto di molteplici studi e sperimentazioni, non hanno conosciuto ancora un'applicazione su larga scala in edilizia.

Un esempio paradigmatico all'interno del predetto contesto è rappresentato dai materiali bidimensionali, le cui potenzialità applicative nel settore delle costruzioni sono ancora in parte sconosciute, mentre, al contrario, in altri ambiti più avanzati (elettronico, energetico, ecc.) sono impiegati per la realizzazione di prodotti già presenti sul mercato e caratterizzati da elevati livelli di prestazione rispetto a elementi tradizionali. Un campo ancora inesplorato è quello delle applicazioni del grafene nel settore delle costruzioni, le cui prime esperienze sperimentali sono documentate in maniera frammentata su brevi articoli scientifici, mentre manca a livello internazionale un lavoro monografico che analizzi le principali potenzialità d'impiego.

Con il presente contributo si intende contribuire a colmare tale lacuna, esaminando, in particolare, il ruolo che può essere ricoperto dal grafene per la realizzazione di componenti costruttivi ad alte prestazioni.

In una prima sezione introduttiva saranno esaminate le attuali dinamiche evolutive relative al concetto di materiali tecnologicamente avanzati per le costruzioni nel rispondere alle incalzanti richieste di sostenibilità del settore; la sezione sarà completata da un'introduzione ai materiali bidimensionali,

in particolar modo al grafene, definendone le proprietà e i processi di produzione.

Nelle parti seguenti saranno riportati i principali risultati dell'analisi dello stato dell'arte relativo alle applicazioni del grafene e degli altri materiali bidimensionali in architettura e in edilizia. In particolare, saranno evidenziati i principali effetti dell'impiego dell'aggiunta grafenica sulle caratteristiche di compositi cementizi e sui prodotti vernicianti per la realizzazione di componenti costruttivi 'intelligenti' ad alte prestazioni.

1. Materiali tecnologicamente avanzati per le costruzioni

1.1 Materiali intelligenti per le costruzioni

Nel contesto attuale, l'ambito delle costruzioni si conferma come uno dei principali settori energivori a livello globale, rappresentando oltre il 30% del consumo energetico mondiale. L'elevato consumo è attribuibile alla ridotta efficienza energetica del patrimonio edilizio, che contribuisce significativamente anche a un terzo delle emissioni totali dirette e indirette di CO₂ e altri gas serra. Di fronte a tale sfida, il settore delle costruzioni è impegnato nella ricerca di strumenti e soluzioni che possano innescare inediti processi di innovazione. Tra i principali ambiti di ricerca si annoverano l'industrializzazione dei processi costruttivi, la digitalizzazione, l'adozione dell'intelligenza artificiale e l'utilizzo di materiali innovativi¹. Questi ultimi rivestono un ruolo cruciale nel panorama evolutivo nel contesto edile, offrendo la possibilità di sviluppare prodotti con una struttura chimica e fisica ottimizzata per alte prestazioni, grazie all'impiego delle nanotecnologie, che permettono la produzione di materiali da costruzione all'avanguardia².

Nel suddetto ambito i materiali tecnologicamente avanzati sono definiti come elementi progettati specificatamente per possedere proprietà tecniche (sia strutturali che funzionali) o caratteristiche ambientali notevolmente migliorate rispetto ai materiali tradizionalmente impiegati nelle stesse funzioni³. In architettura ed edilizia, tali materiali sono capaci di offrire sia risposte ad alte prestazioni fisse sia comportamenti dinamici in risposta a stimoli esterni; questi ultimi caratterizzano i cosiddetti 'materiali intelligenti' (*smart materials*). Tale categoria rappresenta una delle frontiere più innovative nell'evoluzione dei materiali da costruzione, marcando una netta discontinuità rispetto al concetto tradizionale di materiale. In particolare, i materiali intelligenti sono capaci di comportamenti dinamici, reagendo a variazioni di stimoli esterni come energia elettrica, termica, magnetica, cinetica e meccanica, adattando le loro caratteristiche alle nuove condizioni ambientali⁴. Basandosi sul meccanismo di reazione agli stimoli esterni, i materiali intelligenti sono classificati in due categorie principali: materiali a proprietà mutevoli (*property changing materials*) e materiali a scambio energetico (*energy exchange materials*).

I materiali a proprietà mutevoli hanno la capacità di alterare le loro caratteristiche intrinseche in risposta a stimoli esterni⁵. Generalmente si hanno processi reversibili, permettendo al materiale di ritornare al suo stato origina-

¹ Ribeirinho M. J. et al. (2020), *The next Normal in Construction*, McKinsey.

² Leone, M.F. (2012), *Cemento nanotech: nanotecnologie per l'innovazione del costruire*, Tecnologia e progetto, Napoli: CLEAN.

³ Pacheco-Torgal F. (2019), 1 - Introduction to Nanotechnology in Eco-Efficient Construction, in *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction (Second Edition)*, ed. F. Pacheco-Torgal et al., Second Edi, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Woodhead Publishing, pp. 1-9 (<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00001-3>).

⁴ Addington, M. and Schodek, D. (2005), *Smart Materials and New Technologies - for Architecture and Design Professions*, New York: Routledge, ISBN 9780750662253.

⁵ Addington, M. and Schodek, D. (2005) op. citata.

⁶Ritter, A. (2007) Energy-Exchanging Smart Materials, in *Smart Materials: In Architecture, Interior Architecture and Design*, Basel: Birkhäuser Basel, 164-172, (https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8227-8_8).

⁷Tang, M.C. (2004), High Performance Concrete—Past, Present and Future, in *Proceedings of the International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, pp. 3-9.

⁸Muto N. et al. (1992), Design of Intelligent Materials with Self-Diagnosing Function for Preventing Fatal Fracture, *Smart Material Structures*, pp. 324-329 (<https://doi.org/10.1088/0964-1726/1/4/007>).

⁹Novoselov, K. and Benka, S.B. (2005), Two-Dimensional Atomic Crystals, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 102, No. 30, pp. 10451-10453 (<https://doi.org/10.1073/pnas.0502848102>).

¹⁰Miró, P., Audiffred, M. and Heine, T. (2014) An Atlas of Two-Dimensional Materials, *Chem. Soc. Rev.*, 43, no. 18, pp. 6537-6554 (<https://doi.org/10.1039/C4CS00102H>).

¹¹Novoselov, K. and Benka, S.B. (2005), Two-Dimensional Atomic Crystals, op. citata.

¹²Ferrari, A. C., et al. (2015), Science and Technology Roadmap for Graphene, Related Two-Dimensional Crystals, and Hybrid Systems, *Nanoscale*, 7, no. 11, pp. 4598-4810 (<https://doi.org/10.1039/c4nr01600a>).

¹³«a single-atom-thick sheet of hexagonally arranged, sp²-bonded carbon atoms» tratto da: Bianco, A. et al. (2013), All in the Graphene Family - A Recommended Nomenclature for Two-Dimensional Carbon Materials, *Carbon*, 65, pp. 1-6 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.038>).

le una volta che lo stimolo esterno termina. Al contrario, i materiali a scambio energetico rispondono agli stimoli esterni convertendo un tipo di energia in entrata in un'altra forma di energia in uscita, mediante uno scambio che avviene a livello atomico, facilitando trasformazioni energetiche significative⁶.

Il percorso verso lo sviluppo di materiali intelligenti ha influenzato anche il settore dei compositi cementizi, promuovendo l'esplorazione di prodotti noti come 'conglomerati intelligenti' (*smart concrete*)⁷; tali elementi devono le loro peculiari capacità alle aggiunte di sostanze funzionalizzanti, come ad esempio *filler* a base di carbonio o metallo, che potenziano le proprietà fisiche del materiale e accentuano caratteristiche preesistenti nel composito cementizio, come, ad esempio, le proprietà piezoresistive. L'origine dei primi calcestruzzi intelligenti si fa risalire agli anni '90, con le prime miscele auto-diagnosticanti, tipi di calcestruzzo progettati per identificare autonomamente il raggiungimento del punto critico di rottura, grazie all'integrazione di fibre di carbonio e vetro nella matrice cementizia⁸.

Le suddette innovazioni rappresentano un notevole avanzamento nel campo dei materiali da costruzione, allargando le possibilità di utilizzo e migliorando la sicurezza e l'efficienza delle strutture edilizie.

1.2 Nuove frontiere: il grafene e i materiali bidimensionali

Nel 2004, una nuova era nel campo dei materiali avanzati ha avuto inizio quando A. Geim e A. K. Novoselov dimostrarono sperimentalmente che era possibile isolare un materiale fino ad allora solo teorizzato, il grafene. Utilizzando una tecnica di produzione semplice, nota come il 'metodo del nastro adesivo', che sfrutta l'adesività di un nastro per separare strati singoli di grafene da blocchi di grafite, riuscirono a isolare uno strato di grafene, gettando le basi per lo studio dei materiali bidimensionali (2D)⁹; questi ultimi prendono il loro nome dalla loro particolare struttura atomica, avendo uno spessore pari a un singolo atomo. Tale famiglia è caratterizzata da diverse composizioni e strutture chimiche che comportano differenti proprietà (ad esempio, meccaniche, elettriche, chimiche e termiche) in quanto comprendono la maggior parte degli elementi presenti nella tavola periodica¹⁰. I materiali che possono rientrare nella categoria 2D sono centinaia (migliaia se si considerano le possibili combinazioni)¹¹, e le loro proprietà non sono ancora state completamente esplorate¹².

Il grafene, noto come «un foglio monoatomico di atomi di carbonio legati in modo sp² e disposti in una struttura esagonale»^{13 14}, è il materiale bidimensionale più conosciuto. Rappresenta l'ultimo degli allotropi del carbonio a essere stato studiato sperimentalmente. Il grafene incarna la dimensione bidimensionale (2D) e può essere considerato l'elemento base degli allotropi del carbonio di dimensione zero-dimensionale (fullereni), unidimensionale (nanotubi di carbonio) e tridimensionale (grafite) (Figura 4.1).

Il termine 'grafene' è spesso usato in modo improprio per riferirsi ad altri elementi della categoria dei materiali correlati al grafene (*graphene related materials*, GRM) che presentano una struttura multistrato. In particolare, a seconda del numero di

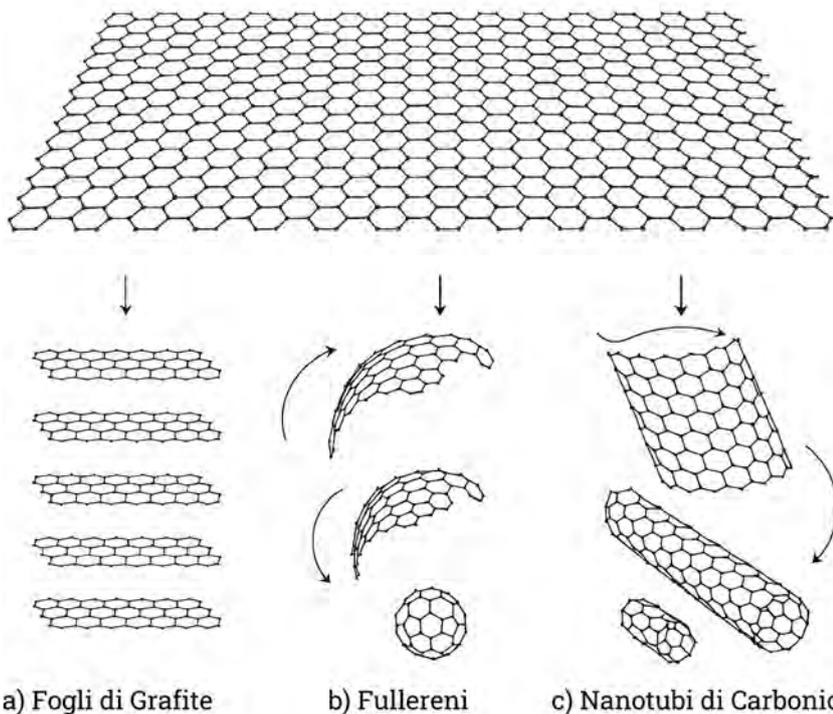


Fig. 4.1. Forme allotropiche del carbonio: a) fogli di grafite; b) fullereni; c) nanotubi di carbonio. Fonte: Elaborazione dell'autore basata su Wang Yu et al., "Progress in the Functional Modification of Graphene/Graphene Oxide: A Review," RSC Advances 10, no. 26 (2020): 15328–15345, <https://doi.org/10.1039/d0ra01068e>.

strati che compongono la struttura, gli elementi della famiglia del grafene dovrebbero essere chiamati grafene monostrato (*single layer graphene*, SLG), grafene a pochi strati (*few-layer graphene*, FLG)¹⁵, grafene multistrato (*multi-layer graphene*, MLG)^{16 17}. Tra i GRM, le nanopolveri di grafene (*graphene nanoplatelets*, GNP) sono tra i più utilizzati; questi materiali consistono in una miscela di SLG, FLG, MLG e grafite nanostrutturata, e il loro spessore può variare da 0,34 a 100 nm¹⁸.

Il grafene è riconosciuto per le sue proprietà uniche, derivanti dalla sua particolare struttura, che lo hanno portato a essere definito come un *wonder materials*¹⁹. Le principali proprietà del grafene sono riassumibili come segue: la più alta conduttività termica registrata a temperatura ambiente per il grafene monostrato è di circa 5300 W m⁻¹K⁻¹²⁰, mentre per il grafene su un supporto in SiO₂ il valore è di circa 600 W m⁻¹K⁻¹²¹; a temperatura ambiente, il grafene mostra un'elevata e notevole mobilità elettronica, risultando in una alta conducibilità elettrica, con una resistività di soli 10⁻⁷Ω cm²²; la sua resistenza ultima alla trazione²³ è di circa 130 GPa²⁴, che è considerata 325 volte superiore a quella dell'acciaio²⁵, rendendolo uno dei materiali più resistenti mai misurati, con un modulo di Young di 1,0 TPa²⁶.

I possibili campi di applicazione del grafene sono numerosi e includono settori come l'elettronica, l'energia, i compositi, l'optoelettronica e il biomedicale²⁷. Tuttavia, nonostante le straordinarie proprietà, il grafene e i materiali correlati al grafene (GRM) non sono ancora impiegati su larga scala nel settore delle costruzioni. Il principale ostacolo è rappresentato dai metodi di produzione, non ancora in grado di combinare elevati volumi di produzione, in grado di poter soddisfare le richieste del settore, con un accurato controllo della qualità²⁸. Una sintesi dei principali metodi di produzione sarà trattata nel paragrafo successivo.

¹⁴ Bianco, A. et al. (2013), All in the Graphene Family - A Recommended Nomenclature for Two-Dimensional Carbon Materials, *Carbon*, 65, pp. 1-6 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.038>).

¹⁵ Materiale che presenta dai 2 ai 5 strati di grafene.

¹⁶ Materiale che presenta dai 5 ai 10 strati di grafene.

¹⁷ Bianco, A. et al. (2013), All in the Graphene Family - A Recommended Nomenclature for Two-Dimensional Carbon Materials, op. cit.

¹⁸ Cataldi, P., Athanassiou, A. and Bayer, I. S. (2018) Graphene Nanoplatelets-Based Advanced Materials and Recent Progress in Sustainable Applications, *Applied Sciences* (Switzerland) 8, no. 9 (<https://doi.org/10.3390/app8091438>).

¹⁹ Chakraborty, M. and Hashmi, M. S. J. (2018), Wonder Material Graphene: Properties, Synthesis and Practical Applications, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 4, no. 4, pp. 573-602 (<https://doi.org/10.1080/2374068X.2018.1484998>).

²⁰ Balandin, A. A. et al. (2008), Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters*, 8, no. 3, pp. 902-907 (<https://doi.org/10.1021/nl0731872>).

²¹ Seol, J. H. et al. (2010), Two-Dimensional Phonon Transport in Supported Graphene, *Science*, 328, no. 5975, pp. 213-216 (<https://doi.org/10.1126/science.1184014>).

²² Liang, J. et al. (2009), Electromagnetic Interference Shielding of Graphene/Epoxy Composites, *Carbon*, 47, no. 3, 922-925 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.12.038>); Alemlour, B. et al. (2019), Improving the Electrical Conductivity of Carbon Fiber Reinforced

Epoxy Composite Using Reduced Graphene Oxide, *Materials Research Express*, 6, no. 6 (<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0ce5>).

²³ Per resistenza ultima si intende quello specifico valore oltre al quale si assiste alla rottura del materiale.

²⁴ Lee, C. *et al.* (2008), Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, *Science*, 321, no. 5887, pp. 385-388 (<https://doi.org/10.1126/science.1157996>).

²⁵ Si intende la resistenza media a trazione di un acciaio ordinario per realizzazioni in conglomerato cementizio armato.

²⁶ Lee, C. *et al.* (2008), Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, *op. citata*.

²⁷ Ferrari, A. C., *et al.* (2015), Science and Technology Roadmap for Graphene, Related Two-Dimensional Crystals, and Hybrid Systems, *op. citata*.

²⁸ Bonaccorso, F. *et al.* (2012), Production and Processing of Graphene and 2d Crystals, *Materials Today*, 15, no. 12, 564-589 ([https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(13\)70014-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(13)70014-2)).

²⁹ In particolare il metodo detto del 'nastro adesivo'.

³⁰ Novoselov, K. and Benka, S.B. (2005), Two-Dimensional Atomic Crystals, *op. citata*.

³¹ Emtsev, K. V. *et al.* (2009), Towards Wafer-Size Graphene Layers by Atmospheric Pressure Graphitization of Silicon Carbide, *Nature Materials*, 8, no. 3, pp. 203-207 (<https://doi.org/10.1038/nmat2382>).

³² Mishra, N. *et al.* (2016), Graphene Growth on Silicon Carbide: A Review, *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 213, no. 9, pp. 2277-2289 (<https://doi.org/10.1002/pssa.201600091>).

³³ Virojanadara, C. *et al.* (2008), Homogeneous Large-Area Graphene Layer Growth on 6H-SiC(0001), *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 78, no. 24, pp. 1-6 (<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.245403>).

³⁴ Virojanadara, C. *et al.* (2008), Homogeneous Large-Area Graphene Layer Growth on 6H-SiC(0001), *op. citata*.

³⁵ Paton, K. R. *et al.* (2014), Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids, *Nature Materials*, 13, no. 6, pp. 624-630 (<https://doi.org/10.1038/nmat3944>).

³⁶ Hernandez, Y. *et al.* (2008), High-Yield Production of Graphene by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite, *Nature Nanotechnology*, 3, no. 9, pp. 563-568 (<https://doi.org/10.1038/nnano.2008.215>).

³⁷ Zhang, Z. *et al.* (2018), Efficient Production of High-Quality Few-Layer Graphene Using a Simple Hydrodynamic-Assisted Exfoliation Method, *Nanoscale Research Letters*, 13, pp. 1-8 (<https://doi.org/10.1186/s11671-018-2830-9>).

La produzione del grafene e dei materiali correlati al grafene

Come accennato nel paragrafo precedente, la storia moderna del grafene ha avuto inizio nel 2004, quando i due premi Nobel A. Geim e A. K. Novoselov produssero grafene utilizzando il metodo identificato come 'esfoliazione meccanica'²⁹; tale processo produttivo è economico, semplice ed è in grado di produrre grafene di alta qualità, ma non è adatto alla produzione industriale³⁰.

Negli anni successivi, sono stati sviluppati nuovi metodi di produzione del grafene. Uno di questi, la crescita epitassiale su carburo di silicio (SiC), permette la produzione di grafene a pochi strati su larga scala attraverso il desorbimento di atomi da una superficie riscaldata, in questo caso un campione di SiC. A 1300 °C, la pressione di vapore del carbonio è trascurabile rispetto a quella del silicio, permettendo così la desorbizione degli atomi di Si e lasciando dietro di sé gli atomi di carbonio in una struttura a nido d'ape, che costituisce il cosiddetto grafene a pochi strati (FLG)³¹. Il FLG presenta uno spessore non uniforme, il che implica proprietà elettroniche altrettanto non uniformi. Sebbene l'uso di un alto/ultra-alto vuoto³² e di alte temperature (1650 °C) in ambiente di argon³³ sembrano migliorare la produzione industriale rendendola più controllabile, questa tecnica non è ancora adatta alla produzione su larga scala a causa della difficoltà nel controllo del processo produttivo e degli alti costi.

Oggigiorno, uno dei migliori metodi per produrre grafene di altissima qualità è il processo di deposizione chimica da vapore (CVD), basato sulla decomposizione di molecole di idrocarburi a temperature superiori ai 700 °C³⁴. Il principale limite di questa tecnica è che il materiale prodotto viene depositato su uno strato metallico, che successivamente deve essere rimosso e sostituito dallo strato su cui il grafene deve essere applicato.

Tra i processi alternativi recentemente proposti, l'esfoliazione in fase liquida (LPE) emerge come uno dei più promettenti (Figura 4.2), consentendo la produzione di grandi quantità di grafene³⁵. Il fulcro dell'LPE è la manipolazione delle forze di Van der Waals, che agiscono tra gli strati di grafite, mediante l'uso di un solvente. Questo processo si articola generalmente in tre fasi³⁶:

1. dispersione della grafite nel solvente;
2. esfoliazione mediante sonificazione;
3. separazione finale del grafene dalla grafite tramite centrifugazione.

Questa procedura permette di ottenere concentrazioni di grafene da basse a medie, fino a 5,3 mg/ml, poiché dopo la centrifugazione gli strati di grafene possono riconnettersi a causa delle forze di Van der Waals ancora attive. Inoltre, variando i livelli di energia impiegati nella centrifuga per separare gli strati di grafene, si possono definire diverse varianti del processo LPE³⁷.

Lo sviluppo della tecnica di esfoliazione in fase liquida (LPE) ha portato all'elaborazione della tecnica della macinazione a getto umido (*wet-jet milling*, WJM)³⁸, che utilizza micro-

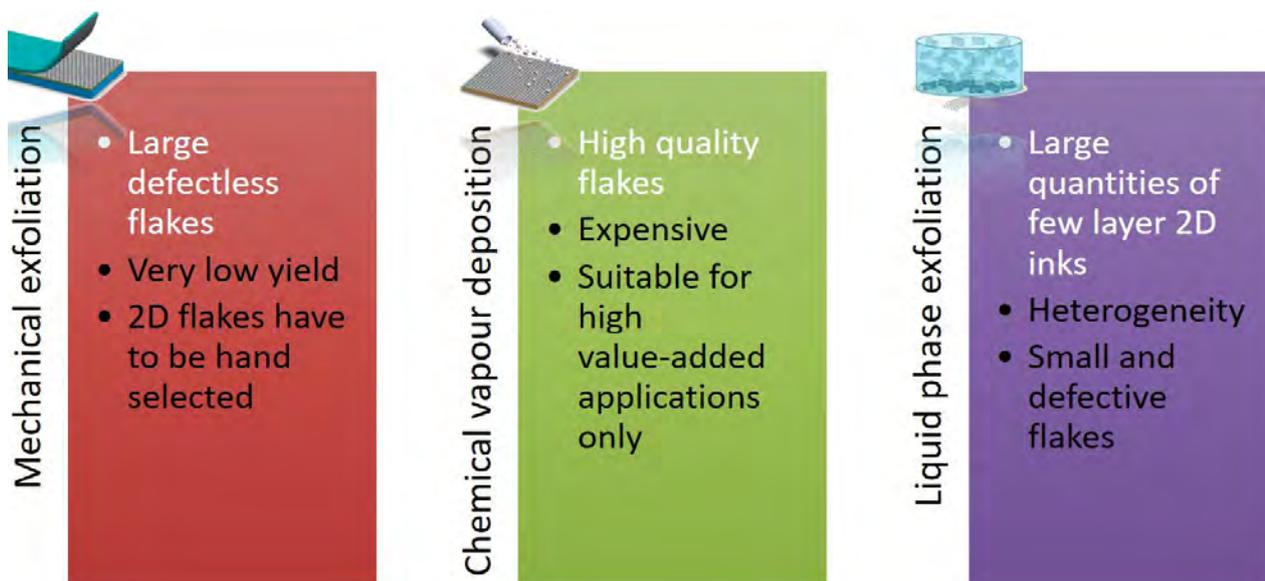


Fig. 4.2. Diagramma che mostra le principali tecniche di produzione del grafene con vantaggi (in bianco) e svantaggi (in nero). Schema dell'autore

nizzatori a getto per la micronizzazione/dispersione/omogeneizzazione di materiali in sospensione. Il processo impiega una dispersione di grafite (in un solvente) che viene pressurizzata ad alta pressione e divisa in due getti che collidono tra loro, realizzando così l'esfoliazione della grafite in grafene. Tale tecnica può produrre grandi quantità di grafene; la produzione con WJM può generare 1 g di grafene in 150 secondi, rappresentando uno dei tempi più brevi per la produzione con tecniche LPE³⁹. In tale processo un solvente ideale dovrebbe avere una tensione superficiale di 40 mN/m², per questo sono spesso impiegati il N-metil-2-pirrolidone (NMP) e la dimetilformammide (DMF)⁴⁰; quest'ultimo presenta alcuni problemi: un alto punto di ebollizione ($T > 150$ °C), che ne rende difficile la rimozione, oltre ad alta infiammabilità e tossicità⁴¹. A causa della loro pericolosità, questi solventi hanno un grande impatto sull'ambiente durante il loro uso e smaltimento⁴². Una possibile soluzione per ridurre l'impatto ambientale della produzione di grafene è il riutilizzo del solvente tramite distillazione o pervaporazione⁴³. Una soluzione più radicale e sostenibile prevede l'uso di un altro solvente non tossico con un impatto minore sull'ambiente a causa delle sue caratteristiche⁴⁴. Nel caso della tecnica WJM, i solventi possono essere sostituiti con acqua distillata con l'aggiunta di un tensioattivo per prevenire il riasssemblaggio dei fiocchi di grafene⁴⁵. Un'altra strategia per ridurre i passaggi del processo e il loro impatto sull'ambiente consiste nell'esfoliare la grafite direttamente nella matrice del materiale o in un componente del prodotto finale, ad esempio mescolandola con l'acqua per compositi di cemento. In tal modo è possibile garantire una maggiore uniformità della dispersione del grafene nella struttura finale del materiale; infine, quando il grafene deve essere applicato a ceramica o compositi, l'esfoliazione può essere eseguita direttamente nel polimero⁴⁶.

³⁸ Del Rio Castillo, A. E. *et al.* (2018), High-Yield Production of 2D Crystals by Wet-Jet Milling, *Materials Horizons*, 5, no. 5, pp. 890-904 (<https://doi.org/10.1039/c8mh00487k>).

³⁹ Del Rio Castillo, A. E. *et al.* (2018), High-Yield Production of 2D Crystals by Wet-Jet Milling, *op. citata*.

⁴⁰ Bonaccorso, F. *et al.* (2012), Production and Processing of Graphene and 2d Crystals, *op. citata*.

⁴¹ Henderson, R. K. *et al.* (2011), Expanding GSK's Solvent Selection Guide – Embedding Sustainability into Solvent Selection Starting at Medicinal Chemistry, *Green Chemistry*, 13, no. 4, pp. 854-862 (<https://doi.org/10.1039/c0gc00918k>).

⁴² Tozzi, P. V. *et al.* (2018), Life Cycle Assessment of Solvent Extraction as a Low-Energy Alternative to Distillation for Recovery of N-Methyl-2-Pyrrolidone from Process Waste, *Green Processing and Synthesis*, 7, no. 4, pp. 277-286 (<https://doi.org/10.1515/gps-2017-0030>).

⁴³ Slater, C. S. and Savelski, M. J. (2009), Towards a Greener Manufacturing Environment, *Innovations in Pharmaceutical Technology*, no. 29, pp. 78-83.

⁴⁴ Henderson, R. K. *et al.* (2011), Expanding GSK's Solvent Selection Guide – Embedding Sustainability into Solvent Selection Starting at Medicinal Chemistry, *op. citata*.

⁴⁵ Lotya, M. *et al.* (2010), High-Concentration, Surfactant-Stabilized Graphene Dispersions, *ACS Nano*, 4, 6, pp. 3155-3162, (<https://doi.org/10.1021/nn1005304>); Wang, S. *et al.* (2016), The Effect of Surfactants and Their Concentration on the Liquid Exfoliation of Graphene, *RSC Advances*, 6, no. 61,

pp. 56705-56710 (<https://doi.org/10.1039/c6ra10933k>); Xu, Y. et al. (2018), Liquid-Phase Exfoliation of Graphene: An Overview on Exfoliation Media, Techniques, and Challenges, *Nanomaterials*, 8, no. 11 (<https://doi.org/10.3390/nano8110942>).

⁴⁶ Liu, Z. et al. (2013), Preparation of Graphene/Polymer Composites by Direct Exfoliation of Graphite in Functionalised Block Copolymer Matrix, *Carbon*, 51, no. 1, pp. 148-155 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.023>).

⁴⁷ Hodge, S. et al. (2021), Graphene for the Construction Sector, Cheltenham; Lu, Z., Li, Z. and Ma, H. (2016), The Perspective Applications of Graphene Oxide in Construction and Building Materials, *Advanced Materials-TechConnect Briefs*, 1, pp. 197-200; Graphene Flagship (2018), Graphene Flagship - Annual Report 2018.

⁴⁸ Gopalakrishnan, R. and Jeyalakshmi, R. (2020), The Effects on Durability and Mechanical Properties of Multiple Nano and Micro Additive OPC Mortar Exposed to Combined Chloride and Sulfate Attack, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 106, no. April 2019, 104772 (<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104772>).

⁴⁹ Robalo, K. et al. (2021), Efficiency of Cement Content and of Compactness on Mechanical Performance of Low Cement Concrete Designed with Packing Optimization, *Construction and Building Materials*, 266, 121077 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121077>); Chakraborty, S. et al. (2019), Development of Nano Cement Concrete by Top-down and Bottom-up Nanotechnology Concept, in *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*, Elsevier, pp. 183-213 (<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00007-6>); Norhasri, M. S. M., Hamidah, M. S. and Fadzil, A. M. (2019), Inclusion of Nano Metaclay as Additive in Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Construction and Building Materials*, 201, pp. 590-598 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.006>); Alrekabi, S. et al. (2017), Mechanical Performance of Novel Cement-Based Composites Prepared with Nano-Fibres, and Hybrid Nano- and Micro-Fibres, *Composite Structures*, 178, pp. 145-156 (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.045>).

⁵⁰ Makar, J. M. and Beaudoin, J. J. (2003), Carbon Nanotubes and Their Application in the Construction Industry, in *Proc., 1st Int. Symposium on Nanotechnology in Construction*, National Research Council Canada, Ottawa, Ontario, vol. 331, p. 341.

2. Compositi cementizi a base di elementi bidimensionali

2.1 Introduzione

Le applicazioni del grafene e dei materiali correlati al grafene (GRM) nel settore delle costruzioni sono attualmente limitate a lavori sperimentali in laboratorio⁴⁷. Nonostante le enormi potenzialità applicative persiste una carenza di metodi di produzione compatibili con le esigenze del settore delle costruzioni. In questo contesto, uno degli ambiti del settore edile più coinvolti nella sperimentazione del grafene sono i compositi cementizi.

Il presente capitolo si concentra sulle applicazioni di GRM non ossidati (ad esempio, nanopolveri di grafene (GNP), grafene multistrato (MLG) e grafene a pochi strati (FLG)) nel campo dei conglomerati cementizi. L'analisi mira a esplorare come queste forme di grafene possano migliorare le proprietà meccaniche, la durabilità e la resistenza degli elementi costruttivi, potenzialmente rivoluzionando i materiali tradizionali utilizzati nel settore.

2.2 Applicazione dei GRM nei compositi cementizi

L'uso di nano-additivi ha permesso di ottenere alte prestazioni (ad esempio, meccaniche e fisiche) per i compositi cementizi. In particolare, l'inclusione di nanoparticelle riduce la degradazione della miscela di cemento, evitando il degrado della costruzione finale e limitando il consumo di materiali utilizzati per la sua manutenzione o rigenerazione⁴⁸. In alternativa, i nano-additivi vengono anche utilizzati per migliorare le prestazioni meccaniche del calcestruzzo, producendo compositi cementizi ad alta resistenza⁴⁹.

Questa strategia non solo migliora la durabilità e la resistenza delle strutture, ma contribuisce anche a un approccio più sostenibile nel settore delle costruzioni, ottimizzando l'uso delle risorse e riducendo l'impiego di nuovi materiali.

Fin dagli inizi del secolo⁵⁰, l'applicazione di nano-additivi a base di carbonio nei compositi cementizi è sempre di più aumentata⁵¹, includendo elementi come le nanografite e i nanotubi di carbonio (*carbon nanotubes*, CNTs)⁵². In particolare, l'aggiunta di CNTs nei compositi cementizi può avere un effetto migliorativo soprattutto sulle proprietà meccaniche e di durabilità⁵³. A tal proposito, un carico di CNTs dello 0,1% in rapporto al peso del cemento impiegato può portare a un miglioramento della resistenza a compressione del 21% rispetto a un campione non additivato e può comportare una riduzione della permeabilità del materiale agli agenti degradanti (ad esempio, cloruri e anidride carbonica)⁵⁴. In particolare, la sola aggiunta dello 0,1% causa una riduzione del coefficiente di assorbimento d'acqua del 12% rispetto al campione di controllo; inoltre relativamente alla carbonatazione e ai coefficienti di diffusione dei cloruri l'impiego di CNT comporta riduzioni rispettivamente del 16% e del 12% rispetto al campione di riferimento⁵⁵. Gli effetti sinergici dei CNTs sulle proprietà meccaniche e di durabilità sono principalmente dovuti all'effetto di riempimento dei pori che riduce la porosità dei compositi cementizi⁵⁶.

Negli ultimi anni sono state riportate le prime applicazioni dei materiali correlati al grafene relativi ai compositi cementizi; ad

esempio, tra queste si ricordano l'ossido di grafene (GO), ossido di grafene ridotto (rGO), nanopolveri di grafene (GNP), grafene esfoliato elettricamente (EEG), grafene multistrato (MLG), grafene a pochi strati (FLG) e grafene monostrato (SLG)⁵⁷.

I compositi cementizi a base di GO rappresentano la prima classe studiata di materiali da costruzione basati su GRM, grazie alla facilità di dispersione del GO all'interno della matrice cementizia; infatti, diversamente da altri GRM, il GO è idrofilo e si lega facilmente all'acqua di impasto. In particolare, l'uso di ossido di grafene (GO) modifica il meccanismo di idratazione del cemento, migliorando la resistenza meccanica e la durabilità del composito⁵⁸. Ad esempio, aggiungendo un carico di GO dello 0,02% in peso del cemento impiegato (*by weight of cement*, bwoc) nelle malte cementizie, la resistenza a compressione può essere migliorata di oltre il 25% rispetto al campione di controllo⁵⁹. Nel contempo, un'aggiunta di GO allo 0,03% bwoc può avere effetti migliorativi sulla resistenza a flessione del 22% rispetto al campione di controllo. Il miglioramento delle prestazioni meccaniche è principalmente attribuito all' 'effetto ponte' (*bridging effect*) dei fiocchi di GO, che favorisce una migliore interazione tra i componenti dell'idratazione del cemento (ad esempio, silicato di calcio idrato e alluminio di calcio idrato) e la sabbia⁶⁰. Inoltre, impiegando altre tipologie di ossido di grafene, come l'rGO⁶¹, si ha un effetto accelerante sullo sviluppo delle proprietà meccaniche grazie alla formazione di siti di nucleazione sulla superficie dei fiocchi di GO, che comportano una riduzione dei tempi di idratazione⁶². Tuttavia, al contempo, l'impiego di GO non implica un miglioramento della conducibilità elettrica del composito, limitandone così l'impiego quale *smart concrete*⁶³.

Nel presente capitolo saranno presentati i principali risultati documentati nella letteratura riguardo agli effetti dei GRM *pristine* (puri) sui compositi cementizi, ovvero il termine *pristine* indica che la composizione chimica è solo di carbonio. Inoltre, tali materiali presentano caratteristiche molto diverse da GO e rGO (ad esempio, a livello molecolare la presenza di ossigeno) che li differenziano dai FLG che costituiscono il caso studio del presente lavoro.

I principali obiettivi che giustificano l'utilizzo di GRM *pristine* in un composito cementizio possono essere collegati alle seguenti esigenze costruttive (Figura 4.3)⁶⁴:

- utilizzo di meno cemento a parità di prestazioni meccaniche nei compositi cementizi standard;
- miglioramento della durabilità dei compositi cementizi in ambienti aggressivi;
- conseguimento di una migliore conducibilità elettrica e di capacità piezoresistive dei compositi cementizi per la progettazione di strutture intelligenti con capacità di rilevamento di deformazioni/danni;
- prevenzione di quadri fessurativi nella struttura di calcestruzzo massiccio e miglioramento della resistenza al fuoco dell'edificio attraverso una superiore diffusione termica;
- realizzazione di applicazioni antighiaccio per pavimentazioni stradali a base di cemento per migliorare la sicurezza del traffico.

⁵¹ Yoo, D. Y. *et al.* (2017), Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers, *Sensors*, (Switzerland) 17, no. 5 (<https://doi.org/10.3390/s17051064>).

⁵² Carriço, A. *et al.* (2018), Durability of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials*, 164, pp. 121-133 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>).

⁵³ Kumar, S. *et al.* (2015), Effect of Multiwalled Carbon Nanotube in Cement Composite on Mechanical Strength and Freeze-Thaw Susceptibility, *Advances in Civil Engineering Materials*, 4, no. 1, pp. 257-274 (<https://doi.org/10.1520/ACEM20150006>).

⁵⁴ Carriço, A. *et al.* (2018), Durability of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Concrete, *op. citata*.

⁵⁵ Carriço, A. *et al.* (2018), Durability of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Concrete, *op. citata*.

⁵⁶ Gao, F. *et al.* (2020), Effect of Diameter of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Mechanical Properties and Microstructure of the Cement-Based Materials, *Construction and Building Materials*, 260, 120452 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120452>).

⁵⁷ Catania, F. *et al.* (2021), A Review on Recent Advancements of Graphene and Graphene-Related Materials in Biological Applications, *Applied Sciences* (Switzerland) 11, no. 2, pp. 1-21 (<https://doi.org/10.3390/app11020614>).

⁵⁸ Zhao, L. *et al.* (2020), An Intensive Review on the Role of Graphene Oxide in Cement-Based Materials, *Construction and Building Materials*, 241, 117939 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117939>).

⁵⁹ Li, X. *et al.* (2018), Improvement of Mechanical Properties by Incorporating Graphene Oxide into Cement Mortar, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 25, no. 15-16, pp. 1313-1322 (<https://doi.org/10.1080/15376494.2016.1218226>).

⁶⁰ Peng, H. *et al.* (2019), Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Oxide Cement-Based Composites, *Construction and Building Materials*, 194, pp. 102-109 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.234>).

⁶¹ L'ossido di grafene ridotto (rGO) è un materiale GRM che si differenzia dal GO per le proprietà strutturali e chimiche, ad esempio il rapporto C/O è diverso in quanto è molto basso per il GO e significativamente alto per l'rGO a causa del basso contenuto di ossigeno (Lawal, A. T. (2019) Graphene-Based Nano Composites and Their Applications. A Review, *Biosensors and Bioelectronics*, 141, 111384 (<https://doi.org/10.1016/j.BIOS.2019.111384>).

⁶² Jing, G. *et al.* (2020), Introducing Reduced Graphene Oxide to Enhance the Thermal Properties of Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, 109, no. February, 103559 (<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103559>).

⁶³ Xu, Y. *et al.* (2018), A Holistic Review of Cement Composites Reinforced with Graphene Oxide, *Construction and Building Materials*, 171, pp. 291-302 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.147>).

⁶⁴ Lin, Y. and Du, H. (2020), Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, *Construction and Building Materials*, 265, 120312 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312>).

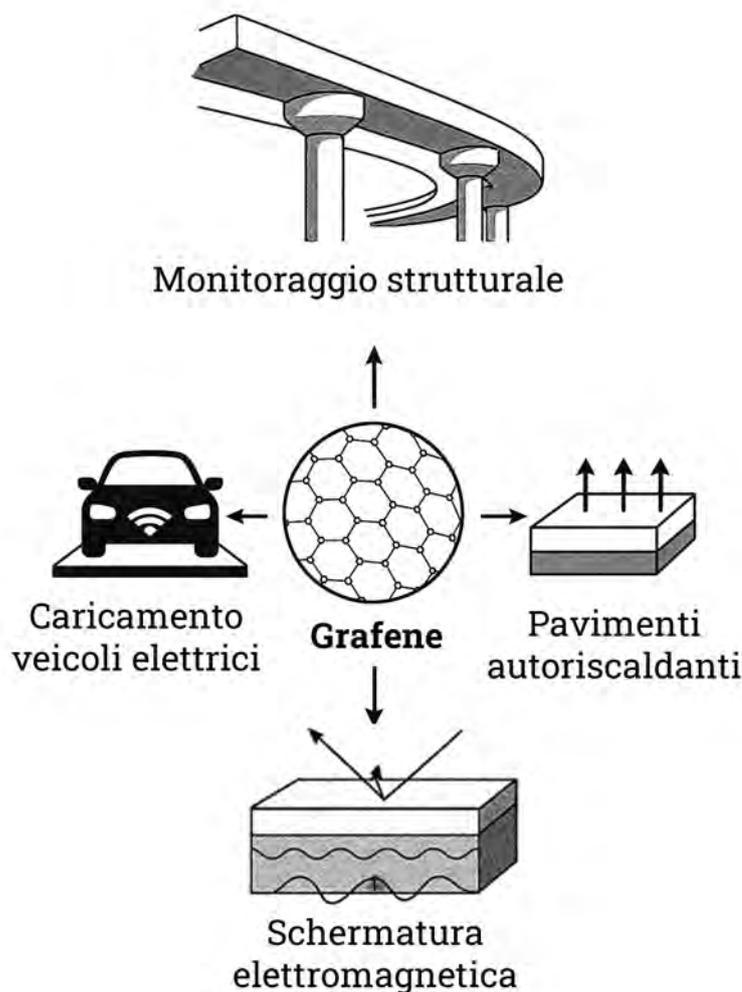


Fig. 4.3. Diagramma schematico della multifunzionalità di compositi cementizi rinforzati con GRM non modificati. Fonte: Elaborazione dell'autore basata su Lin L. and Du H. (2020), *Graphene Reinforced Cement Composites: A Review*, *Construction and Building Materials* 265: 120312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312>

2.3 Effetti sulle proprietà allo stato fresco

Per proprietà allo stato fresco dei compositi cementizi si intendono quelle caratteristiche del composito cementizio come la lavorabilità, il calore di idratazione e il ritiro. Dalle esperienze documentate in letteratura emerge come l'aggiunta di GRM influenzi negativamente le proprietà reologiche dei compositi cementizi; infatti, sebbene sia più limitata rispetto ai materiali a base di GO, l'aumento del carico di GRM può causare una diminuzione della lavorabilità della miscela cementizia. La riduzione della lavorabilità può essere attribuita alla grande area superficiale specifica del grafene, che può assorbire in parte l'acqua di miscelazione, e alla formazione di agglomerati (*clusters*) nel composito, che intrappolano parte del componente liquido⁶⁵. Una possibile soluzione alla riduzione della lavorabilità è l'uso di un superfluidificante o l'aumento del tempo di sonicazione; quest'ultima opzione è valida se il grafene è introdotto tramite l'acqua di miscelazione, in quanto favorisce una sua migliore dispersione nell'acqua di impasto⁶⁶.

Nel processo di idratazione, l'aggiunta di GRM può avere un effetto accelerante per lo sviluppo delle proprietà meccaniche nei primi giorni, grazie all'alta area superficiale specifica (*specific surface area*, SSA). Nel contempo l'aggiunta di mag-

⁶⁵ Wang, B. *et al.* (2016), Investigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite, *Nanomaterials*, 6, no. 11 (<https://doi.org/10.3390/nano6110200>).

⁶⁶ Du, H. and Pang, S. D. (2018), Dispersion and Stability of Graphene Nanoplatelet in Water and Its Influence on Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 167, pp. 403-413 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.046>).

giori quantità di GRM o grafene con una SSA più elevata non implicano una maggiore idratazione del composito di cemento, ovvero maggiori quantità aumentano il rischio di formazione di agglomerati a causa delle forze di Van der Waals tra i singoli fiocchi, limitando i possibili siti di idratazione per il cemento⁶⁷. I principali test impiegati per analizzare l'effetto dell'aggiunta di GRM sono la calorimetria isoterma e l'analisi termogravimetrica: basandosi sul calore emesso, è possibile identificare il numero di processi di idratazione sviluppati nel materiale⁶⁸.

Analizzando l'effetto catalizzante dei GRM *pristine*, si può vedere come questo dipenda dalla presenza di piani di carbonio legati sp² che agiscono come punti di nucleazione, reagendo estensivamente con i prodotti di idratazione⁶⁹. In particolare, i FLG possono anche ridurre i fenomeni di ritiro all'interno del composito cementizio durante la presa e il processo di indurimento in quanto fiocchi di GRM possono intrappolare l'acqua all'interno della struttura⁷⁰. Ad esempio, Zhao *et al.*⁷¹ hanno ottenuto una riduzione del ritiro dopo 30 giorni del 27,4% rispetto a un campione semplice, grazie a un carico di FLG dello 0,06% in peso del legante utilizzato.

Un altro interessante aspetto per analizzare gli effetti dei GRM sui compositi cementizi è dato dall'analisi attraverso la microscopia elettronica a scansione (SEM) della microstruttura del materiale (Figura 4.4). Dalle immagini SEM presenti in letteratura è possibile evincere come i prodotti di idratazione che si formano sulla superficie del composito cementizio e che c'è una minore formazione di pori e microfessure rispetto ai composti di cemento semplici⁷². In particolare, i GRM all'interno della matrice cementizia costituiscono siti per l'idratazione dei prodotti del cemento, agendo come un legante tra i diversi costituenti del composito, promuovendo il trasferimento degli sforzi meccanici e limitando la propagazione delle microfessure (*bridging effect*)⁷³.

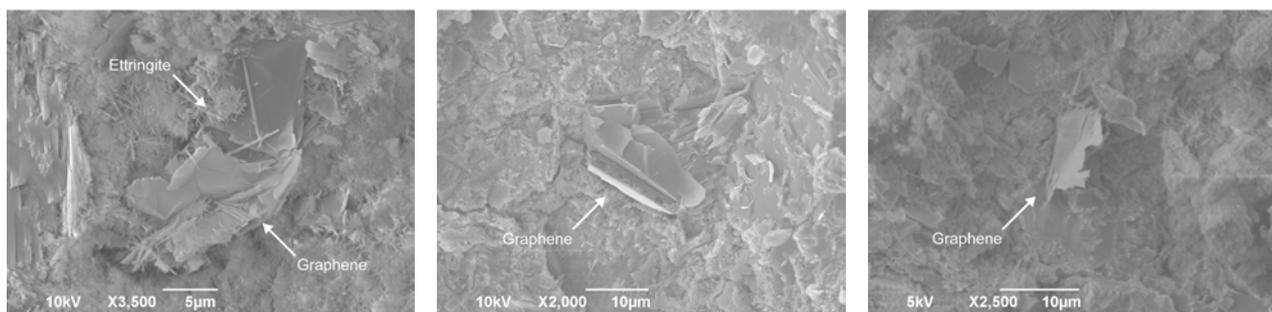


Fig. 4.4. Immagini al microscopio elettronico a scansione di paste cementizie additivate con grafene. Immagini dell'autore

2.4 Gli effetti dei GRM sulle proprietà meccaniche

I *graphene-related materials* hanno dimostrato di esercitare un notevole impatto sulle proprietà meccaniche dei compositi cementizi, come ben documentato nella letteratura scientifica; tali materiali migliorano significativamente sia la resistenza a flessione sia quella a compressione. In particolare, si è osservato che nelle paste cementizie, dove non sono presenti aggregati, i GRM fungono da struttura interna, facilitando la distribuzione del carico esterno⁷⁴. Gli studi riportano un aumento della resistenza a flessione fino all'82% e

⁶⁷ Meng, W. and Khayat, K. H. (2018), Effect of Graphite Nanoplatelets and Carbon Nanofibers on Rheology, Hydration, Shrinkage, Mechanical Properties, and Microstructure of UHPC, *Cement and Concrete Research*, 105, no. November 2017, pp. 64-71 (<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.001>).

⁶⁸ Wang, B. *et al.* (2016), Investigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite, *op. citata*.

⁶⁹ Qureshi, T. S. and Panesar, D.K. (2020), Nano Reinforced Cement Paste Composite with Functionalized Graphene and Pristine Graphene Nanoplatelets, *Composites Part B: Engineering*, 197, September 15 2020, 108063 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063>).

⁷⁰ Krystek, M. *et al.* (2021), Graphene-Based Cementitious Composites: Toward Next-Generation Construction Technologies, *Advanced Functional Materials*, 2101887, pp. 1-16 (<https://doi.org/10.1002/adfm.202101887>).

⁷¹ Zhao, Y. *et al.* (2020), Study of Mechanical Properties and Early-Stage Deformation Properties of Graphene-Modified Cement-Based Materials, *Construction and Building Materials*, 257, 119498 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119498>).

⁷² Wang, B. and Shuang, D. (2019), Effect and Mechanism of Graphene Nanoplatelets on Hydration Reaction, Mechanical Properties and Microstructure of Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 228, 116720 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116720>).

⁷³ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, *op. citata*.

⁷⁴ Li, X. *et al.* (2017), Effects of Graphene Oxide Agglomerates on Workability, Hydration,

Microstructure and Compressive Strength of Cement Paste, *Construction and Building Materials*, 145, pp. 402-410 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.058>).

⁷⁵ Wang, B. and Shuang, D. (2018), Effect of Graphene Nanoplatelets on the Properties, Pore Structure and Microstructure of Cement Composites, *Materials Express*, 8, no. 5, pp. 407-416 (<https://doi.org/10.1166/mex.2018.1447>).

⁷⁶ Sun, S. et al. (2017), Multi-Layer Graphene-Engineered Cementitious Composites with Multifunctionality/Intelligence, *Composites Part B: Engineering*, 129, pp. 221-232 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.063>).

⁷⁷ Bai, S. et al. (2018), Enhancement of Mechanical and Electrical Properties of Graphene/Cement Composite Due to Improved Dispersion of Graphene by Addition of Silica Fume, *Construction and Building Materials*, 164, pp. 433-441 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.176>).

⁷⁸ Qureshi, T. S. and Panesar, D.K. (2020), Nano Reinforced Cement Paste Composite with Functionalized Graphene and Pristine Graphene Nanoplatelets, op. citata.

⁷⁹ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, op. citata.

⁸⁰ Tragazikis, I. et al. (2019), Acoustic Emission Investigation of the Effect of Graphene on the Fracture Behavior of Cement Mortars, *Engineering Fracture Mechanics*, 210, no. November 2017: pp. 444-451 (<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.01.004>).

⁸¹ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, op. citata.

della resistenza a compressione del 27% rispetto ai campioni di controllo⁷⁵.

Tuttavia, quando i GRM sono integrati in malte e calcestruzzi, i miglioramenti, pur essendo apprezzabili, sono meno marcati, con incrementi di poco superiori al 20% per entrambe le resistenze rispetto ai campioni non additivati⁷⁶. L'efficacia dei GRM dipende in modo cruciale dalla tecnica di dispersione utilizzata. A tal riguardo, si segnala l'impiego di fumi di silice che può esaltare l'effetto di riempimento dei GRM, migliorando la trasmissione degli sforzi meccanici all'interno del composito. Tuttavia, dosaggi eccessivi possono avvolgere i granuli di cemento, ostacolando il processo di idratazione e quindi compromettendo le proprietà meccaniche del materiale⁷⁷.

Dall'analisi delle esperienze documentate in letteratura emerge come esista un valore soglia di carico dei GRM, variabile tra lo 0,02% e l'1% del peso del legante utilizzato, per ottenere un miglioramento delle proprietà meccaniche dei compositi cementizi. Superato il limite di carico dell'1% rispetto al peso del cemento, si osserva una diminuzione delle proprietà meccaniche a causa della formazione di agglomerati di GRM all'interno del composito cementizio, che favoriscono la formazione di vuoti aumentando la macroporosità (ovvero un diametro > 200 nm)⁷⁸. La variabilità del valore massimo utilizzabile di GRM può dipendere da diversi fattori, come la metodologia di dispersione impiegata, il tipo e le caratteristiche dei GRM utilizzati, ecc.⁷⁹

Infine, l'aggiunta di GRM può anche influenzare l'elasticità strutturale del materiale; infatti, Tragazikis et al.⁸⁰ hanno dimostrato che l'aggiunta di nanopolveri di grafene (GNP) può modificare la rigidità del materiale. In particolare, i test di flessione a tre punti hanno mostrato un aumento dell'energia di frattura del 1700% con l'aggiunta di GRM pari allo 0,4% in peso del cemento. Questo aumento dell'energia indica che si è verificato un cambiamento nel comportamento meccanico, da estremamente fragile, tipico dei compositi di cemento, a più duttile.

In conclusione, i GRM influenzano le proprietà meccaniche dei compositi cementizi attraverso tre principali effetti⁸¹:

- effetto di riempimento: i GRM si inseriscono nella struttura cementizia rendendola più compatta e riducendo il volume dei vuoti, aumentando così la quantità di pori piccoli e compattando la struttura;
- effetto di nucleazione: grazie alla loro ampia area superficiale specifica, i GRM possono promuovere il processo di idratazione del cemento e la conseguente formazione di quantità maggiori di gel di silicato di calcio idratato (C-S-H), che sono i principali responsabili delle proprietà meccaniche del composito cementizio;
- effetto ponte (*bridging effect*): dovuto alla loro conformazione di materiale bidimensionale, i fiocchi di GRM favoriscono la distribuzione dei carichi esterni all'esterno del materiale e agiscono come un legante, prevenendo la propagazione di microfessure all'interno del materiale (Figura 4.5).

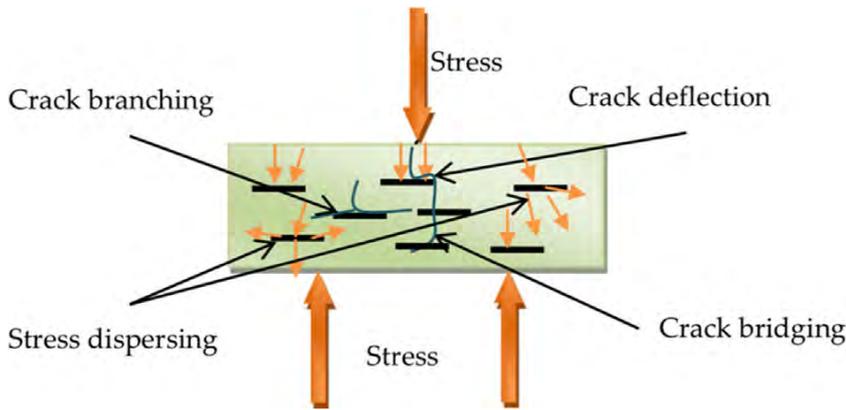


Fig. 4.5. Effetto ponte esercitato dai fiocchi di GRM all'interno della struttura cementizia. Fonte: Wang B. et al., *Investigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite*, op. citata.

2.5 Porosità e durabilità dei compositi cementizi additivati con GRM

Dall'analisi delle esperienze documentate in letteratura emerge come i GRM hanno un notevole effetto sulla porosità dei compositi cementizi, riducendo la porosità totale e il diametro dei pori. Tale azione è dovuta principalmente all'effetto di riempimento (*filling effect*) che satura i pori più grandi o li trasforma in elementi più piccoli⁸². Ad esempio, Du *et al.*⁸³, aggiungendo un quantitativo di nanopolveri di grafene del 1,6% del peso in cemento impiegato, hanno ottenuto una riduzione della porosità totale, del diametro medio e della dimensione dei pori rispettivamente pari al 14%, 40% e 20% rispetto ai campioni non trattati. Nel contempo, l'effetto di riduzione della porosità può essere ottenuto solo con una dispersione efficiente dei GRM all'interno della matrice cementizia; alte quantità di additivi o una dispersione inefficace possono innescare la formazione di agglomerati che limitano l'effetto di riempimento dei GRM⁸⁴.

⁸² Wang, B. and Shuang, D. (2018), *Effect of Graphene Nanoplatelets on the Properties, Pore Structure and Microstructure of Cement Composites*, op. citata.

⁸³ Du, H. *et al.* (2016), *Improvement in Concrete Resistance against Water and Chloride Ingress by Adding Graphene Nanoplatelet*, *Cement and Concrete Research*, 83, pp. 114-123 (<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.005>).

⁸⁴ Lin, Y. and Du, H. (2020) *Graphene Reinforced Cement Composites: A Review*, op. citata.

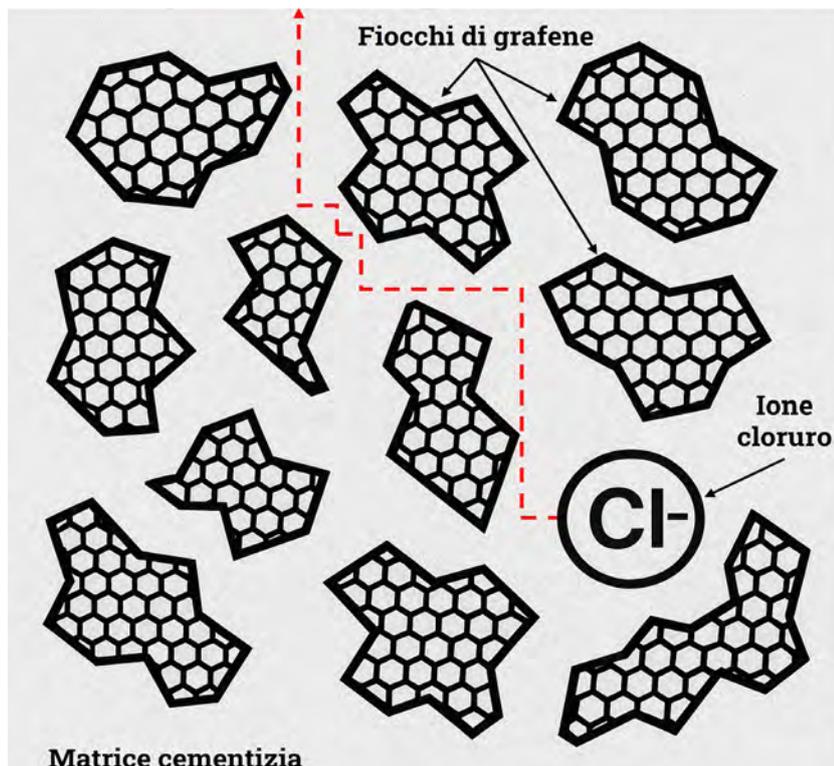


Fig. 4.6. Influenza di GRM orientati casualmente sulla creazione di un percorso tortuoso nella matrice cementizia. Fonte: elaborazione dell'autore basata su Du, H. and Pang, S. D. (2015), *Enhancement of Barrier Properties of Cement Mortar with Graphene Nanoplatelet*, *Cement and Concrete Research* 76: pp. 10-19, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.007>

⁸⁵ Du, H. and Pang, S. D. (2015), Enhancement of Barrier Properties of Cement Mortar with Graphene Nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, 76, pp. 10-19 (<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.007>).

⁸⁶ Du, H. et al. (2016), Improvement in Concrete Resistance against Water and Chloride Ingress by Adding Graphene Nanoplatelet, op. cit.

⁸⁷ Rhee, I. et al. (2017), Thermal Performance, Freeze-and-Thaw Resistance, and Bond Strength of Cement Mortar Using Rice Husk-Derived Graphene, *Construction and Building Materials*, 146, pp. 350-359 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.109>).

⁸⁸ Tong, T. et al. (2016), Investigation of the Effects of Graphene and Graphene Oxide Nanoplatelets on the Micro- and Macro-Properties of Cementitious Materials, *Construction and Building Materials*, 106, pp. 102-114 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.092>).

⁸⁹ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, op. citata.

⁹⁰ Matalkah, F. and Soroushian, P. (2020), Graphene Nanoplatelet for Enhancement the Mechanical Properties and Durability Characteristics of Alkali Activated Binder, *Construction and Building Materials*, 249, 118773 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118773>).

⁹¹ Sedaghat, A. et al. (2014), Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications, *Open Journal of Composite Materials*, 04, no. 01, pp. 12-21 (<https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>).

⁹² Krystek, M. et al. (2021), Graphene-Based Cementitious Composites: Toward Next-Generation Construction Technologies, op. citata.

⁹³ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, op. citata.

Come noto una riduzione della porosità del materiale comporta anche un miglioramento della durabilità del composito cementizio. In tale ambito i GRM generano una struttura tortuosa all'interno della matrice cementizia (Figura 4.6), ostacolando la penetrazione di sostanze esterne nel composito cementizio⁸⁵. Du et al.⁸⁶ hanno raggiunto una riduzione nella profondità di penetrazione dell'acqua, nella diffusione e nella migrazione dei cloruri rispettivamente dell'80%, 80% e 40%, aggiungendo un carico di GRM dell'1,5% rispetto alla quantità del legante impiegato.

La riduzione della penetrazione dell'acqua può anche migliorare il comportamento del materiale nei cicli di gelo-disgelo. A questo proposito, Rhee et al.⁸⁷, aggiungendo un carico di GRM (derivante da lolla di riso) pari all'1% del peso in cemento utilizzato, dopo 300 cicli di gelo-disgelo, hanno registrato una perdita della resistenza meccanica del 9% invece di una perdita del 17% riscontrata nel campione di malta di cemento standard.

Inoltre, gli effetti dei GRM si manifestano anche su altri aspetti legati alla durabilità del materiale, come l'attacco acido. In particolare, Tong et al.⁸⁸, impiegando un carico di GRM dello 0,1% del peso in cemento usato, hanno ottenuto una perdita delle proprietà meccaniche inferiore al 30% rispetto al campione di controllo. Questo comportamento è dovuto, oltre alla tortuosità interna dei compositi cementizi, anche alla capacità dei compositi cementizi a base di GRM di raggiungere prestazioni meccaniche migliori rispetto a quelli non trattati⁸⁹.

Un'altra caratteristica migliorata dall'aggiunta di GRM è la resistenza all'abrasione superficiale. In particolare, Matalkah et al.⁹⁰ hanno ottenuto un miglioramento del 30% nella resistenza all'abrasione superficiale rispetto al campione originale, grazie all'aggiunta di GRM dello 0,08% in peso del legante utilizzato; tale importante risultato è dovuto all'effetto di riempimento e al miglioramento della resistenza nella zona di transizione interfacciale (ITZ).

Infine i GRM possono anche essere utilizzati per migliorare la durabilità delle strutture massicce in calcestruzzo. L'aggiunta di GRM aumenta la diffusività termica del materiale limitando la formazione di microfessure dovute al gradiente di temperatura nel materiale, eliminando così possibili punti di ingresso per agenti degradanti⁹¹. Questo contribuisce significativamente a estendere la vita utile delle strutture in calcestruzzo, rendendole più resistenti agli stress termici e agli impatti ambientali che possono compromettere l'integrità strutturale nel tempo.

2.6 Proprietà termiche ed elettriche

Grazie alla loro particolare struttura atomica, l'aggiunta di GRM nei compositi cementizi può significativamente aumentare le loro proprietà elettriche e termiche, elementi fondamentali per la produzione di un calcestruzzo intelligente (*smart concrete*). La resistività elettrica del calcestruzzo generalmente varia tra 10^3 e 10^4 k Ω cm, influenzata in modo significativo dal contenuto di umidità e acqua nella matrice cementizia, il che si traduce in una conduttività di tipo ionico⁹². Per ottimizzare la conduttività elettrica del calcestruzzo, è fondamentale che la quantità di GRM superi la soglia di percolazione, il valore minimo necessario affinché si instauri un meccanismo di conduzione per *tunneling* o contatto all'interno del materiale⁹³. Questo valore può variare a seconda di molti fattori, come i metodi di disper-

sione scelti e il tipo di GRM utilizzato. Le *et al.*⁹⁴, ad esempio, hanno identificato che per i compositi cementizi a base di GNP la soglia di percolazione è posizionata tra il 2,4% e il 3,6% del volume del composito prodotto (cioè il 10-15% in peso del cemento utilizzato); gli autori infatti hanno ottenuto una riduzione della conduttività elettrica da 10^4 a 1 kΩcm. Di conseguenza, un carico di GRM superiore a tale soglia può incrementare la conduttività elettrica del materiale fino a un valore massimo, oltre il quale la formazione di agglomerati di GRM limita la corretta propagazione della corrente elettrica nel materiale⁹⁵. Oltre alle proprietà elettriche, l'aggiunta di GRM può migliorare anche le proprietà termiche del materiale. Chu *et al.* hanno ottenuto, aggiungendo il 4% in peso del legante utilizzato, un miglioramento della diffusività termica fino al 27,7% rispetto al campione originale senza l'aggiunta di grafene⁹⁶. Inoltre, in merito alla conduttività termica, Cui *et al.*⁹⁷ hanno raggiunto, aggiungendo il 5% bwoc di GRM al mix, un miglioramento della diffusività termica fino al 77% rispetto al campione di controllo.

2.7 Smart concrete a base di GRM

L'inclusione di materiali correlati al grafene (GRM) nei compositi cementizi può essere utilizzata per produrre calcestruzzi intelligenti (*smart concrete*), compositi cementizi in grado di reagire a stimoli esterni (come le sollecitazioni meccaniche e il passaggio di corrente elettrica)⁹⁸; al contrario tale comportamento è difficilmente ottenibile con l'ossido di grafene, il quale, a causa del suo contenuto di ossigeno, non è adatto alla costruzione del percorso conduttivo all'interno del materiale⁹⁹.

Dall'analisi della letteratura emerge come l'aggiunta di nanopolveri di grafene (GNP) migliori le proprietà piezoresistive del composito cementizio, consentendo l'utilizzo del conglomerato additivato per il rilevamento delle variazioni di intensità delle sollecitazioni meccaniche agenti sul manufatto edilizio¹⁰⁰. La sensibilità piezoresistiva del composito cementizio è strettamente legata alla conducibilità elettrica e alla soglia di percolazione del materiale. In questo contesto, lo stress meccanico causa deformazioni del composito che allontanano o avvicinano i fiocchi di GRM presenti, causando un cambiamento della resistenza elettrica; tale variazione di valori può essere sfruttata per il monitoraggio strutturale. Al contrario, quando il carico di GRM è inferiore al valore di percolazione, non si verifica alcun cambiamento nella resistenza elettrica poiché non si forma un percorso conduttivo all'interno del materiale¹⁰¹. A tal proposito, Sun *et al.* hanno dimostrato che un contenuto di FLG del 5% del peso del legante usato, comporta una sensibilità maggiore del 15,6% rispetto al campione originale, facilitando così la rilevazione dei cambiamenti nella resistenza elettrica da parte dei sensori esterni impiegati per il monitoraggio strutturale¹⁰². Oltre al monitoraggio strutturale, le funzionalità auto-sensibili (*self-sensing*) del composito hanno altre possibili applicazioni, come il monitoraggio della diffusione dei cloruri all'interno della matrice cementizia. Tale applicazione si basa sull'analisi della relazione tra la conducibilità elettrica dei compositi cementizi a base di GRM e i cloruri contenuti¹⁰³.

⁹⁴ Le, J. L. *et al.* (2014), Use of 2-D Graphene Nanoplatelets (GNP) in Cement Composites for Structural Health Evaluation, *Composites Part B: Engineering*, 67, pp. 555-563 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.005>).

⁹⁵ Bai, S. *et al.* (2020), Research on Electrical Conductivity of Graphene/Cement Composites, *Advances in Cement Research*, 32, no. 2, pp. 45-52 (<https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00170>).

⁹⁶ Chu, H. *et al.* (2017), Effects of Graphene Sulfonate Nanosheets on Mechanical and Thermal Properties of Sacrificial Concrete during High Temperature Exposure, *Cement and Concrete Composites*, 82, pp. 252-264 (<https://doi.org/10.1016/j.cemcomp.2017.06.007>).

⁹⁷ Cui, X. *et al.* (2017), Mechanical, Thermal and Electromagnetic Properties of Nanographite Platelets Modified Cementitious Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 93, pp. 49-58 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.017>).

⁹⁸ Han, B. *et al.* (2017), *Smart and Multifunctional Concrete Towards Sustainable Infrastructures*, Springer Singapore (<https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>).

⁹⁹ Zhao, L. *et al.* (2020), An Intensive Review on the Role of Graphene Oxide in Cement-Based Materials, op. citata.

¹⁰⁰ L'aggiunta di nano-additivi conduttivi diminuisce la resistenza elettrica e amplifica la sua correlazione con il carico applicato, segnalando la rottura del materiale.

¹⁰¹ Li, H. *et al.* (2020), A Comparative Experimental Investigation on Radiant Floor Heating System and Stratum Ventilation, *Sustainable Cities and Society*, 52, no. August 2019, 101823 (<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101823>).

¹⁰² Sun, S. *et al.* (2017), Nano Graphite Platelets-Enabled Piezoresistive Cementitious Composites for Structural Health Monitoring, *Construction and Building Materials*, 136, pp. 314-328 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.006>).

¹⁰³ Jin, M. *et al.* (2017), Monitoring Chloride Ion Penetration in Concrete Structure Ba-

sed on the Conductivity of Graphene/Cement Composite, *Construction and Building Materials*, 136, pp. 394-404 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.054>).

¹⁰⁴ Ghosh, S. *et al.* (2019), Graphene Enhanced Thermoelectric Properties of Cement Based Composites for Building Energy Harvesting, *Energy and Buildings*, 202, 109419 (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109419>).

¹⁰⁵ Liu, Y. *et al.* (2018), Electric Induced Curing of Graphene/Cement-Based Composites for Structural Strength Formation in Deep-Freeze Low Temperature, *Materials and Design*, 160, pp. 783-793 (<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.008>).

¹⁰⁶ Wang, P. *et al.* (2020), A Superhydrophobic/Electrothermal Synergistically Anti-Icing Strategy Based on Graphene Composite, *Composites Science and Technology*, 198, no. June, 108307 (<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108307>).

¹⁰⁷ Tamaki, Y. *et al.* (2006), Direct Observation of Reactive Trapped Holes in TiO₂ Undergoing Photocatalytic Oxidation of Adsorbed Alcohols: Evaluation of the Reaction Rates and Yields, *Journal of the American Chemical Society*, 128, no. 2, pp. 416-417 (<https://doi.org/10.1021/ja055866p>).

¹⁰⁸ Guidetti, G. *et al.* (2019), Photocatalytic Activity of Exfoliated Graphite-TiO₂ Nanoparticle Composites, *Nanoscale*, 11, no. 41, pp. 19301-19314 (<https://doi.org/10.1039/c9nr06760d>).

¹⁰⁹ Du, H. and Pang, S. D. (2018), Dispersion and Stability of Graphene Nanoplatelet in Water and Its Influence on Cement Composites, op. citata.

¹¹⁰ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, op. citata.

Un'altra applicazione dei compositi cementizi a base di GRM consiste nel loro impiego come materiali termoelettrici, in grado quindi di convertire il calore ambientale assorbito dalle superfici degli edifici in energia elettrica. Ad esempio, Ghosh *et al.*¹⁰⁴, con un carico di GNP del 15% in peso rispetto al cemento impiegato, hanno ottenuto una elevata conducibilità elettrica di 16,2 S/cm e un coefficiente di Seebeck di 34 μVK^{-1} . L'alta conducibilità elettrica di un composito cementizio a base di GRM può essere impiegata anche per il processo inverso ovvero per la produzione di calore (*self-heating*) partendo dal passaggio di corrente elettrica. Ad esempio, Yushi *et al.*¹⁰⁵ hanno impiegato materiali auto-riscaldanti per migliorare la stagionatura di strutture cementizie in ambienti freddi. In alternativa, l'effetto Joule nel calcestruzzo può essere utilizzato per funzioni di *de-icing* o riscaldamento interno, comportamento studiato da Italcementi S.p.A. per la realizzazione del suo calcestruzzo intelligente a base di grafene. Tuttavia, a differenza delle applicazioni di auto-percezione, dove il *filler* funzionalizzante è preferibilmente integrato all'interno del materiale, nelle applicazioni di auto-riscaldamento basate su GRM è preferibile uno strato esterno¹⁰⁶. In questo caso, il sistema è un calcestruzzo auto-riscaldante non intrinseco, che indica una combinazione di elementi in cui il substrato è un composito cementizio e sulla superficie esterna viene applicato un rivestimento elettricamente conduttivo.

Infine, negli ultimi anni sono state sviluppate applicazioni di miscele di GRM e biossido di titanio (TiO₂) con il cemento. L'inserimento di nanoparticelle di biossido di titanio induce l'assorbimento della luce che promuove l'ossidazione degli inquinanti¹⁰⁷, ma tale processo fotocatalitico è attivato solo per uno spettro ristretto, ossia le nanoparticelle di TiO₂ (*bandgap* di 3,25 eV) assorbono solo la parte UV dello spettro solare. L'aggiunta di grafene migliora l'attività fotocatalitica, ampliando il range di assorbimento spettrale delle nanoparticelle di TiO₂¹⁰⁸.

2.8 Limiti e potenzialità dell'applicazione dei GRM nel settore dei compositi cementizi

Dall'analisi dell'esperienza sperimentale relativa all'applicazione dei GRM nei compositi cementizi emergono diverse sfide. Innanzitutto, la capacità di disperdere un alto dosaggio di GRM nei compositi cementizi deve essere ulteriormente sviluppata e indagata, sfida fondamentale per garantire il miglioramento delle proprietà tradizionali dei compositi cementizi (ad esempio, meccaniche e di durabilità) e, al contempo, lo sviluppo di capacità intelligenti¹⁰⁹. A ciò si collega la necessità di favorire la creazione di un processo industriale volto alla prefabbricazione di manufatti edilizi realizzati con conglomerati cementizi a base di GRM; infatti, grazie a una produzione in stabilimento si andrebbe a ridurre notevolmente i costi di produzione e si andrebbe a garantire una migliore dispersione e stabilità della soluzione di grafene¹¹⁰.

Inoltre, è essenziale migliorare le proprietà reologiche del materiale, trovando valide alternative all'uso di superfluidificanti, i quali, se impiegati in eccesso, possono avere un effetto dannoso sui compositi cementizi. A tal proposito, è necessario impiegare altre sostanze che assistano la dispersione dei GRM (ad esempio, fumi di silice, cenere volante) e che pos-

sano contribuire allo sviluppo delle proprietà meccaniche¹¹¹. Un altro aspetto fondamentale è lo sviluppo di processi che non coinvolgano polveri di GRM, dato che la valutazione del suo effetto sulla salute umana è ancora in corso¹¹². L'ideale è ottenere processi che si svolgano interamente in liquido per facilitare l'inclusione di FLG nel processo di miscelazione del calcestruzzo. Inoltre, occorre un maggiore approfondimento sull'impatto ambientale dei compositi cementizi a base di GRM. Dai primi incoraggianti studi si è visto come l'aggiunta di GRM possa comportare un miglioramento delle prestazioni meccaniche dei compositi cementizi, diminuendo così un utilizzo del clinker di Portland e di conseguenza le emissioni legate al loro ciclo produttivo. A questo proposito, Papanikolaou *et al.*¹¹³ hanno stimato che la produzione di 1 kg di grafene corrisponde a 0,17 kg di CO_{2eq}, mentre la produzione di 1 kg di cemento Portland ordinario (OPC) corrisponde a 0,86 kg di CO_{2eq}. Infine, un elemento fondamentale che emerge dallo stato dell'arte è il costo degli additivi e aggiunte a base di GRM. A tal riguardo, considerando la natura economica dei compositi cementizi, al fine di un ingresso dei prodotti grafenici sul mercato dei prodotti per conglomerati, è necessario trovare nuovi processi produttivi che consentano l'ottenimento di elevati volumi di GRM combinando un'elevata qualità a un basso costo di produzione¹¹⁴.

3. Rivestimenti intelligenti a base di grafene

3.1 Vernici elettricamente conduttive

I materiali *smart* a scambio energetico sono molteplici e fondano il loro funzionamento sulla trasformazione di una forma di energia in ingresso in un'altra in uscita; all'interno di tale categoria vi sono i materiali elettrotermici o auto-riscaldanti, che producono calore mediante il passaggio di corrente elettrica. I sistemi elettrotermici tradizionali si basano prevalentemente sull'uso di elementi metallici, comunemente noti come elementi resistenti e trovano applicazione in diversi ambiti, come ad esempio impedire la formazione di ghiaccio sulle ali degli aerei nel settore aeronautico, per funzioni anti-condensa e disgelanti, come nei resistori per specchietti retrovisori e lunotti nell'industria automobilistica, e per scaldabagni elettrici in ambito idraulico, così come in forni elettrici e forni in vetroceramica¹¹⁵. Nel settore delle costruzioni, i materiali elettrotermici sono impiegati principalmente nei sistemi di riscaldamento a pavimento per ambienti interni o superfici esterne, dove il loro uso consente di prevenire la formazione di ghiaccio. Negli ultimi anni i recenti avanzamenti nell'ambito delle nanotecnologie hanno portato allo sviluppo di soluzioni innovative ad alta efficienza termica; infatti, grazie all'utilizzo di aggiunte a base di carbonio, è possibile impiegare nei sistemi di riscaldamento alcuni materiali elettrotermici non metallici, offrendo vantaggi rispetto alle tecnologie tradizionali basate su metallo. Il suddetto contesto evidenzia uno dei più rilevanti esempi di materiali da costruzione intelligenti basati sul grafene, come dimostrano le prime applicazioni promettenti di GRM. Nei prossimi paragrafi, dopo aver esplorato le caratteristiche distintive, l'evoluzione e le principali applicazioni dei ma-

¹¹¹ Li, X. *et al.* (2016), Incorporation of Graphene Oxide and Silica Fume into Cement Paste: A Study of Dispersion and Compressive Strength, *Construction and Building Materials*, 123, pp. 327-335 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.022>); Alaka, H. A. *et al.* (2016), Effect of Excess Dosages of Superplasticizer on the Properties of Highly Sustainable High-Volume Fly Ash Concrete, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7, no. 2, pp. 73-86 (<https://doi.org/10.1080/2093761X.2016.1167643>).

¹¹² Papanikolaou, I., Al-Tabbaa, A. and Goisis, M. (2019), An Industry Survey on the Use of Graphene-Reinforced Concrete for Self-Sensing Applications, *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making 2019*, pp. 3-22 (<https://doi.org/10.1680/icsic.64669.613>).

¹¹³ Papanikolaou, I., Arena, N. and Al-Tabbaa, A. (2019), Graphene Nanoplatelet Reinforced Concrete for Self-Sensing Structures - A Lifecycle Assessment Perspective, *Journal of Cleaner Production*, 240, 118202 (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118202>).

¹¹⁴ Lin, Y. and Du, H. (2020) Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, *op. citata*.

¹¹⁵ Fang, S. *et al.* (2020), A Review of Flexible Electric Heating Element and Electric Heating Garments, *Journal of Industrial Textiles*, no. 399, pp. 1-36 (<https://doi.org/10.1177/1528083720968278>); Yang, H. (2017), Research on Application of Carbon Fiber Heating Material in Clothing, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 81, no. 1 (<https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012042>).

teriali auto-riscaldanti, verranno presentati i primi risultati presenti in letteratura basati sull'impiego di GRM in componenti elettrotermici.

3.2 Evoluzione dei sistemi di riscaldamento elettrotermici

Nel XX secolo, i sistemi elettrotermici per il riscaldamento sono stati impiegati principalmente nel settore edile a partire dalla Seconda Guerra Mondiale, quando i primi esempi consistevano in elementi riscaldanti metallici incorporati in massetti di calcestruzzo prodotti in opera o applicati in elementi prefabbricati, quale opzione disponibile per componenti orizzontali nei sistemi in calcestruzzo per l'edilizia industrializzata, sviluppatasi con impeto a partire dal secondo dopoguerra¹¹⁶; a tal riguardo, si evidenzia l'esperienza francese dell'azienda Saint Gobain e del centro di sviluppo di Électricité de France (EDF). Questi ultimi, infatti, a partire dagli anni '60, hanno sviluppato dei sistemi prefabbricati a parete che prevedono l'applicazione di sistemi elettrotermici in cui la resistenza metallica era inglobata in un pannello di poliestere rinforzato¹¹⁷.

Una variazione tecnologica è stata utilizzata nell'edilizia pubblica sovietica, con la costruzione di elementi prefabbricati in cui una resistenza elettrica era incorporata in lastre di calcestruzzo armato¹¹⁸.

Contemporaneamente, nel contesto americano, sono state realizzate le prime esperienze applicative di sistemi di riscaldamento elettrotermici, grazie a diversi fattori, ad esempio, la maggiore flessibilità d'uso e la semplicità dei sistemi rispetto agli impianti termici tradizionali a combustione; infatti, uno dei vantaggi maggiormente evidenziati dalla letteratura dell'epoca consisteva nell'assenza di tubature e di installazione di una caldaia (individuale o condivisa) per riscaldare gli elementi radianti, risultando in costi di manutenzione ridotti¹¹⁹ (Figura 4.7a). Anche nel contesto statunitense, come visto precedentemente in Europa, i principali sistemi elettrotermici prodotti potevano essere sia assemblati *in loco*, sia prefabbricati in pannelli. In quest'ultimo caso rientra un modello di soffitto radiante del 1971, denominato *Electric ceiling cable system* (Figura 4.7b); tale sistema poteva essere installato *in loco* posizionando una bobina metallica tra due strati di cartonges-

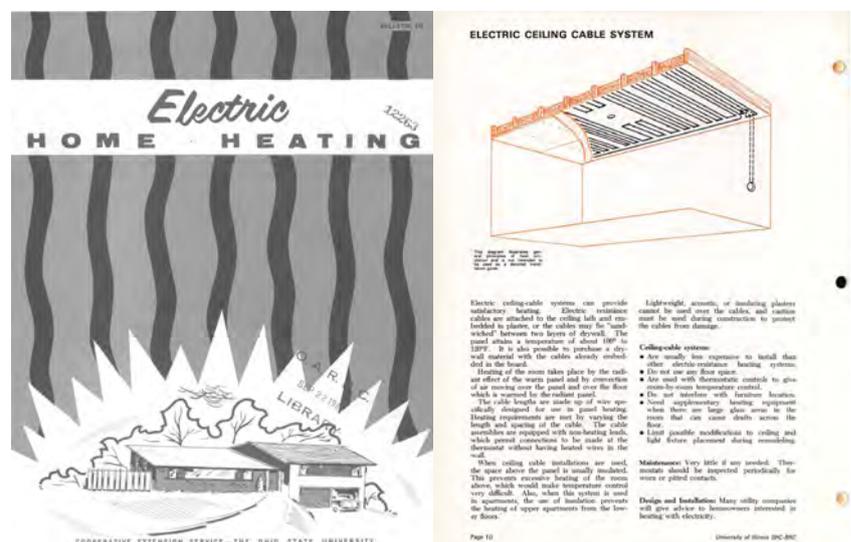
¹¹⁶ Dryden, I.G.C. (1982), "Chapter 7 - Electrical Heating Fundamentals, in *The Efficient Use of Energy (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, pp. 94-114 (<https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01250-8.50016-7>).

¹¹⁷ Marino, G. (2018), Built-in, Exposed or Concealed Comfort Services. Attempts to Industrialise Collective Housing after 1945, *Building Knowledge, Constructing Histories*, 2, 7, pp. 894-901.

¹¹⁸ Han, B. et al. (2017), *Smart and Multifunctional Concrete Towards Sustainable Infrastructures*, op. citata.

¹¹⁹ Parks, E.E. (1951), Electric Home Heating, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 1, pp. 828-831 (<https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1951.5060487>).

Fig. 4.7. Sistemi elettrotermici di produzione statunitense: copertina report informativo pubblicato dall'Università dell'Ohio sui sistemi radianti, 1951 (a) fonte: Parks, E.E. (1951) "Electric Home Heating", vol. 70, ; sistema electric cable, 1971 (b) fonte: Martine J. F., "Heating the Home", University of Illinois Bulletin 68, no. 131, pp. 2-12



so o essere incorporata in pannelli per soffitti prefabbricati, dove la resistenza era inglobata nella matrice dell'elemento¹²⁰. Fin dalle prime applicazioni nel XX secolo è emerso come una delle principali limitazioni alla diffusione dei sistemi elettrotermici è stata la disponibilità e il costo dell'elettricità¹²¹; infatti tali tecnologie hanno preso piede in Europa soprattutto in quegli stati europei (ad esempio, Francia, Germania e Regno Unito), dove i costi energetici sono stati relativamente contenuti grazie alla costruzione di centrali termonucleari¹²². Negli ultimi anni si è assistito a una rivalutazione dei sistemi elettrotermici grazie alla sempre più crescente sensibilità verso tematiche inerenti agli effetti del cambiamento climatico. Oggigiorno, circa il 32% delle emissioni di gas serra (*green house gases*, GHG) globali nel settore residenziale è riconducibile al riscaldamento degli ambienti¹²³. In questo contesto, i sistemi basati su materiali elettrotermici rappresentano valide alternative ai sistemi tradizionali basati sull'energia da combustibili fossili¹²⁴, in quanto possono essere alimentati con elettricità proveniente da fonti rinnovabili (ad esempio solare, eolico, geotermico, ecc.); in tal modo, i sistemi elettrotermici costituiscono uno strumento utile per ridurre la produzione di gas serra e l'impronta di carbonio legata al settore delle costruzioni. Inoltre, l'uso di elettricità da fonti rinnovabili, considerando la loro attuale diffusione e la crescita prevista nei prossimi anni, con la conseguente riduzione dei loro costi¹²⁵, può compensare il maggiore consumo domestico di elettricità derivante dall'alimentazione del sistema.

Verso la fine del XX secolo, è emersa un'ulteriore applicazione dei sistemi elettrotermici nel settore civile, ovvero il loro uso per il disgelamento per le pavimentazioni stradali, come alternativa ai sali disgelanti tradizionali. In questo modo, è possibile limitare il degrado delle strutture in calcestruzzo armato e l'inquinamento ambientale derivanti dall'uso del sale¹²⁶. Inoltre i sistemi per le infrastrutture (ad esempio, ponti e piste aeroportuali) prevedono il posizionamento di materiali elettrotermici non solo per prevenire la formazione di ghiaccio superficiale, ma anche proteggere l'infrastruttura da un eccessivo accumulo di acqua¹²⁷. Attualmente, i sistemi elettrotermici utilizzano principalmente resistori metallici lineari o a spirale collegati direttamente a una fonte di alimentazione elettrica e presentano elementi funzionali, come sensori di temperatura, termostati, ecc. I principali tipi di metallo impiegati possono variare e la loro scelta dipende dall'uso finale: si va dalle applicazioni a bassa temperatura per il riscaldamento domestico dove sono impiegati generalmente elementi a base di alluminio, fino a forni industriali che impiegano leghe speciali (ad esempio, nichel, cromo, rame o platino) capaci di raggiungere temperature superiori ai 1000 °C¹²⁸.

L'impiego dei sistemi basati su materiali metallici è spesso limitato da caratteristiche che ne ridimensionano l'uso; tra queste si ricordano una limitata resistenza meccanica alle sollecitazioni e una scarsa omogeneità di riscaldamento lungo la loro estensione; tali limitazioni hanno portato allo studio di sistemi basati su lamine metalliche per passare così da elementi radiativi lineari a bidimensionali, garantendo un riscaldamento più uniforme delle superfici¹²⁹. Inoltre, un'ulteriore limitazione comune a tutti i sistemi metallici è la necessità di impiegare dispositivi tecnologici e strumentali atti a garantire il loro cor-

¹²⁰ Martine, J. F. (1971), Heating the Home, *University of Illinois Bulletin*, 68, no. 131, pp. 2-12 (<https://doi.org/10.1038/scientificamerican04151911-378>).

¹²¹ Jaber, J. O et al. (2008), Evaluation of Conventional and Renewable Energy Sources for Space Heating in the Household Sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pergamon (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.004>).

¹²² Bertelsen, N. et al. (2020), EU-28 Residential Heat Supply and Consumption: Historical Development and Status, *Energies*, 13, no. 8 (<https://doi.org/10.3390/en13081894>).

¹²³ Ürge-Vorsatz, D. et al. (2014), Buildings. In: Mitigation. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, pp. 671-738.

¹²⁴ Bertelsen, N. et al. (2020), EU-28 Residential Heat Supply and Consumption: Historical Development and Status, op. citata.

¹²⁵ Káberger, T. (2018), Progress of Renewable Electricity Replacing Fossil Fuels, *Global Energy Interconnection*, 1, no. 1, pp. 48-52 (<https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.006>).

¹²⁶ Jain, J. et al. (2012), Effects of Deicing Salt Solutions on Physical Properties of Pavement Concretes, *Transportation Research Record*, 2290, no. 1, pp. 69-75 (<https://doi.org/10.3141/2290-09>).

¹²⁷ Chung, D. D.L. (2004), Self-Heating Structural Materials, *Smart Materials and Structures*, 13, no. 3, pp. 562-565 (<https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>).

¹²⁸ "Wire Heating Element Materials," accessed March 12, 2021 (<https://www.heating-element-alloy.com/article/wire-heating-element-materials.html>).

¹²⁹ Cox, D. B. et al. (1952), Metal foil heating device, US2600485A (USA, issued 1952).

¹³⁰ Kurnitski, J. et al. (2004), Efficiency of Electrically Heated Windows, *Energy and Buildings*, 36, no. 10 SPEC. ISS, pp. 1003-1010 (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.007>).

¹³¹ Lee, S. Y. et al. (2020), Transparent Heater with Meshed Amorphous Oxide/Metal/Amorphous Oxide for Electric Vehicle Applications, *Scientific Reports*, 10, no. 1, pp. 1-9 (<https://doi.org/10.1038/s41598-020-66514-8>).

¹³² Mennechez, F. et al. (2007), Radiant panel comprising a radiating glass substrate, WO2007088308A1, issued January 31, 2007.

¹³³ Baldwin, K. (1998), Electrically Conductive Concrete: Properties and Potential, *Construction Canada*, 98, no. 1, pp. 28-29.

¹³⁴ Tuan, C. Y. (2004), Electrical Resistance Heating of Conductive Concrete Containing Steel Fibers and Shavings, *ACI Materials Journal* 101, no. 1 (<https://doi.org/10.14359/12989>); Lee, H. et al. (2020), Self-Heating and Electrical Performance of Carbon Nanotube-Enhanced Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 250, 18838 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118838>); Xu, J. C. et al. (2014), Experimental Study on the Electrothermal Effect of Concrete Reinforced with Hybrid Carbon and Steel Fiber, *Applied Mechanics and Materials*, 490-491, pp. 94-98 (<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.94>).

¹³⁵ Sakr, M. and Liu, S. (2014), A Comprehensive Review on Applications of Ohmic Heating (OH), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.061>).

¹³⁶ Wu, X. and Luo, T. (2015), Effect of Electron-Phonon Coupling on Thermal Transport across Metal-Nonmetal Interface - A Second Look, *Epl*, 110, no. 6, pp. 0-6 (<https://doi.org/10.1209/0295-5075/110/67004>).

¹³⁷ Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2017), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Eighth Edi, John Wiley & Sons.

retto funzionamento, costituendo spesso un ingombro notevole che spesso ha favorito la preferenza per l'installazione dei sistemi di riscaldamento tradizionali a combustione.

Negli ultimi anni l'evoluzione dei sistemi elettrotermici si è quindi concentrata sullo sviluppo di tipologie innovative caratterizzate da una maggiore 'dematerializzazione' della resistenza elettrica. Tale tendenza è testimoniata dalla produzione, tra la fine del XX secolo e l'inizio del XXI secolo, delle prime finestre con superficie riscaldata elettricamente¹³⁰, dove è stato utilizzato un rivestimento metallico conduttivo trasparente (ad esempio, a base di ossidi e indio) applicato su un supporto in vetro e caratterizzato da un'elevata conducibilità elettrica¹³¹. Nell'industria edile, tali sistemi sono stati utilizzati per realizzare finestre riscaldate elettricamente, dove un vetro precedentemente trattato in superficie con il rivestimento conduttivo viene fissato al telaio e collegato al sistema elettrico tramite elettrodi. Il principale vantaggio dei prodotti sul mercato che utilizzano questi materiali è l'eliminazione dell'effetto parete fredda, tipico della superficie del vetro, con la conseguente eliminazione della condensa superficiale¹³².

Negli ultimi anni, la tendenza alla dematerializzazione dei sistemi ha riguardato anche gli elementi opachi dell'organismo edilizio. A questo proposito, sono stati condotti esperimenti nella progettazione e utilizzo di miscele di calcestruzzo elettrotermico¹³³, cioè materiali compositi in cui elementi funzionali (*filler*) vengono aggiunti alla miscela tradizionale di calcestruzzo per aumentarne la conducibilità elettrica¹³⁴. Attualmente, questi sistemi non possono competere con i sistemi tradizionali basati su metallo, che sono ancora più efficienti dal punto di vista termico, e al contempo sono ancora nelle loro fasi iniziali ma la ricerca in tale campo ha portato progressivamente alla volontà di ridurre ulteriormente lo spessore complessivo dei sistemi elettrotermici fino a uno strato funzionale di soli pochi millimetri. Un esempio di questa tendenza sono i materiali elettrotermici non metallici, i cui principi di funzionamento e una sintesi delle prime applicazioni sono forniti nei paragrafi seguenti.

3.3 Principi di funzionamento e requisiti dei sistemi elettrotermici non metallici

Analogamente agli impianti tradizionali i sistemi di riscaldamento elettrotermici non metallici trasformano il flusso di corrente elettrica in calore sfruttando l'effetto Joule¹³⁵. Il processo di conversione può essere interpretato utilizzando la teoria quantistica dei fononi, secondo la quale il calore viene generato in un materiale conduttore attraverso il flusso di corrente, che perde parte della sua energia creando uno stato di vibrazione della struttura atomica tramite interazione elettrone-fonone¹³⁶. La relazione tra la corrente elettrica e il calore prodotto è teorizzata dalla prima legge di Joule¹³⁷: dove il calore generato (Q) è correlato alla tensione applicata (V), al tempo di riscaldamento (t) e alla resistenza elettrica (R) secondo l'espressione $Q=V^2t/R$, scritta anche nella forma $Q=Pt=VI t$, con I pari all'intensità della corrente e P alla potenza termica emessa.

Dall'equazione sopraenunciata, emerge che il calore generato dal sistema è inversamente proporzionale alla resistenza elettrica del circuito. Allo stesso tempo, è direttamente proporzionale all'intensità della corrente elettrica. Di conseguenza,

per aumentare l'efficienza del sistema, a parità di differenza di potenziale, è necessario che si abbiano elementi caratterizzati da valori bassi di resistenza elettrica in modo da massimizzare la corrente del sistema. Teoricamente, il sistema ha un'efficienza vicina al 100%, poiché l'intero flusso di corrente elettrica viene trasformato in calore attraverso l'elemento noto come resistore¹³⁸. Il dispositivo è costituito principalmente da due elementi: un resistore non metallico, responsabile della trasformazione della corrente elettrica in calore, e gli elettrodi, che forniscono l'alimentazione al sistema.

Il tipo di elettrodi da utilizzare è di fondamentale importanza poiché devono garantire un'ottima conducibilità termica nel tempo, essere elettrochimicamente stabili (ad esempio, non ossidarsi) e resistenti a stress meccanici. Per le applicazioni elettrotermiche, i materiali principalmente utilizzati possono essere metallici (rame, titanio, acciaio inossidabile, alluminio) o non metallici (fogli a base di grafite)¹³⁹.

Il resistore deve possedere un'elevata conducibilità elettrica per garantire il massimo flusso di corrente elettrica attraverso il sistema e operare in modo sicuro. A tal proposito, i dispositivi elettrotermici devono lavorare a tensioni operative basse, che non risultino pericolose per uomini e animali. Le normative tecniche nel settore dell'ingegneria elettrica identificano intervalli di valori di corrente elettrica e tempi di esposizione utilizzando curve caratteristiche e le loro sottoaree¹⁴⁰. Il valore limite per il passaggio di corrente elettrica attraverso il corpo umano dipende dalla resistenza del corpo umano¹⁴¹, che è funzione di molti fattori (ad esempio, punto di contatto, umidità della pelle, presenza o assenza di acqua, presenza di soluzioni saline, ecc.). Generalmente, le tensioni che possono essere considerate non dannose per gli esseri umani devono essere inferiori a 50 V in corrente alternata¹⁴² e 100 V in corrente continua¹⁴³.

Un'altra caratteristica dei sistemi elettrotermici non metallici è legata alla necessità di garantire una distribuzione omogenea della temperatura sull'elemento elettrotermico o resistore (lineare o superficiale) e possedere un elevato coefficiente di diffusione del calore¹⁴⁴ per limitare l'uso di elementi aggiuntivi (ad esempio, rivestimenti tecnicamente conduttivi, sistemi di ventilazione, ecc.). L'elemento utilizzato come resistore deve anche essere compatibile con gli elementi circostanti, ed è fondamentale la resistenza all'acqua. Infatti, nelle applicazioni di tipo *de-icing*, la superficie a contatto con il ghiaccio sciolto deve essere fortemente idrofobica e garantire una rapida rimozione dell'acqua dall'area riscaldata¹⁴⁵. Infine, il rivestimento conduttivo deve essere caratterizzato da stabilità chimica, buona resistenza alle temperature operative e proprietà fisiche adeguate. Ad esempio, il rivestimento deve garantire un funzionamento corretto anche sotto stress meccanico, permettendo una corretta installazione senza correre il rischio di danneggiarsi, compromettendo il suo utilizzo futuro¹⁴⁶.

3.4 Rivestimenti conduttivi elettrotermici polimerici

Nei sistemi elettrotermici non metallici con matrice polimerica, il resistore generalmente consiste in un rivestimento conduttivo applicato su un substrato. Una bassa tensione fornita dagli elettrodi crea una corrente elettrica attraverso la su-

¹³⁸ Sakr, M. and Liu, S. (2014), A Comprehensive Review on Applications of Ohmic Heating (OH), op. citata.

¹³⁹ Ibidem.

¹⁴⁰ International Electrotechnical Commission (2018), IEC 60479-1:2018: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 1: General Aspects.

¹⁴¹ Virdag, A. et al. (2017), Recommendations for Standardization of Voltage Level in LVDC Networks Based on IEC 60479-1 Guidelines, *Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 134, no. 4-5, pp. 267-275 (<https://doi.org/10.1007/s00502-017-0509-z>).

¹⁴² Maialetti, R. and Panaro, P. (2019), Conoscere Il Rischio - Rischio Elettrico, INAIL.

¹⁴³ Wang, Z. et al. (2018), The Rated Voltage Determination of DC Building Power Supply System Considering Human Beings Safety, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 108, no. 5 (<https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/5/052094>); ABB (2013), Electrical Hazards and Human Safety, *Technical Journal*, no. March 2012, 2.

¹⁴⁴ Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2017), Fundamentals of Heat and Mass Transfer, op. citata.

¹⁴⁵ Liu, Y. et al. (2015), Research of Carbon Fibre Grille Reinforced Composites in Airport Pavement Snowmelt, *Materials Research Innovations*, 19, 49-54 (<https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000002086>).

¹⁴⁶ Prolongo, S. G. et al. (2016), Joule Effect Self-Heating of Epoxy Composites Reinforced with Graphitic Nanofillers, *Journal of Polymer Research*, 23, no. 9 (<https://doi.org/10.1007/s10965-016-1092-4>).

¹⁴⁷ Yao, X. *et al.* (2018), An Advanced Anti-Icing/de-Icing System Utilizing Highly Aligned Carbon Nanotube Webs, *Carbon*, 136, pp. 130-138 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.039>).

¹⁴⁸ Chung, D. D.L. (2004), Self-Heating Structural Materials, *op. cit.*

¹⁴⁹ Holman, J. P., *Heat Transfer*, ed. McGraw-Hill Education, tenth edit (Boston, 2010) (<https://doi.org/10.1080/01973762.1999.9658510>).

¹⁵⁰ Xie, H. *et al.* (2018), Necklace-Like Silicon Carbide and Carbon Nanocomposites Formed by Steady Joule Heating, *Small Methods*, 2, no. 4, 1700371 (<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/smt.201700371>).

¹⁵¹ Yao, X. *et al.* (2018), An Advanced Anti-Icing/de-Icing System Utilizing Highly Aligned Carbon Nanotube Webs, *op. citata.*

¹⁵² Rao, R. *et al.* (2018), Carbon Nanotubes and Related Nanomaterials: Critical Advances and Challenges for Synthesis toward Mainstream Commercial Applications, *ACS Nano* (<https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b06511>).

¹⁵³ Rasheed Atif and Fawad Inam, "Reasons and Remedies for the Agglomeration of Multilayered Graphene and Carbon Nanotubes in Polymers," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2016 (<https://doi.org/10.3762/bjnano.7.109>).

¹⁵⁴ Sassani, A. *et al.* (2019), Polyurethane-Carbon Microfiber Composite Coating for Electrical Heating of Concrete Pavement Surfaces, *Heliyon*, 5, no. 8. e02359 (<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02359>).

¹⁵⁵ Phillips, C. *et al.* (2017), The Effect of Graphite and Carbon Black Ratios on Conductive Ink Performance, *Journal of Materials Science*, 52, no. 16, pp. 9520-9530 (<https://doi.org/10.1007/s10853-017-1114-6>).

¹⁵⁶ Sassani, A. *et al.* (2019), Polyurethane-Carbon Microfiber Composite Coating for Electrical Heating of Concrete Pavement Surfaces, *op. citata.*

¹⁵⁷ Janas, D. and Koziol, K. K. (2014), A Review of Production Methods of Carbon Nanotube

perficie senza costituire un pericolo per uomini e animali¹⁴⁷. In generale, i rivestimenti polimerici conduttivi sono composti principalmente da tre componenti: un additivo conduttivo, un legante e un solvente.

L'additivo conduttivo, o *filler*, ha il ruolo di aumentare la conducibilità elettrica del rivestimento, creando una rete conduttiva all'interno del materiale, promuovendo il passaggio della corrente e la conseguente produzione di calore. I *filler* più comunemente utilizzati sono a base di carbonio a causa della loro bassa resistenza elettrica e della compatibilità chimico-fisica con i materiali leganti¹⁴⁸.

Un altro aspetto che ha favorito l'uso dei materiali a base di carbonio è relativo alle loro proprietà in relazione al meccanismo di trasmissione del calore per radiazione. In particolare, la loro emissività (ϵ) è molto alta e varia da 0,8 a 1, valore molto superiore a quello dei metalli utilizzati nei sistemi elettrotermici tradizionali, eliminando così la necessità di accessori aggiuntivi per ottimizzare il trasferimento di calore¹⁴⁹.

Le prime applicazioni di rivestimenti polimerici elettricamente conduttivi erano caratterizzate dall'uso combinato di materiali in scala macroscopica (fibre di carbonio) con aggiunte a dimensione minore come grafite o nerofumo¹⁵⁰.

Negli ultimi anni, il campo dei rivestimenti polimerici elettricamente conduttivi ha visto le prime interessanti applicazioni dei nanotubi di carbonio, un materiale unidimensionale caratterizzato da proprietà fisiche notevoli (ad esempio, alta resistenza meccanica ed eccellente conducibilità elettrica)¹⁵¹. L'aggiunta di nanotubi di carbonio ha migliorato le proprietà meccaniche e garantito una diffusione del calore omogenea sulla superficie del resistore, rispetto ai rivestimenti in fibra di carbonio precedentemente impiegati. D'altra parte, l'uso dei nanotubi di carbonio presenta significative limitazioni, tra cui l'alto costo¹⁵² e la difficoltà di disperdere l'aggiunta nanometrica all'interno del composito, rendendo il processo produttivo considerevolmente complesso¹⁵³.

Il legante è un elemento fondamentale che combina gli additivi conduttivi del rivestimento, formandone la struttura portante. In questa categoria di rivestimenti elettricamente conduttivi, il legante è generalmente a base polimerica ed è in grado di conferire le proprietà meccaniche al resistore per affrontare le sollecitazioni esterne (ad esempio, tensione, abrasione superficiale, perforazione, ecc.) garantendo al contempo una flessibilità compatibile con il substrato¹⁵⁴. La scelta del tipo e della quantità di legante per preparare il rivestimento conduttivo è di grande importanza per facilitare la corretta posa del prodotto ed evitare la formazione di micro-lesioni dovute al ritiro post-applicazione¹⁵⁵. Sono importanti anche i fattori associati alle condizioni di uso del polimero; in particolare, deve essere garantito che possa essere lavorato a basse temperature (ad esempio, temperatura ambiente), che sia compatibile con i materiali di supporto ai quali verrà applicata la vernice conduttiva e, infine, che garantisca una corretta adesione al substrato¹⁵⁶. I polimeri generalmente utilizzati nella letteratura scientifica sono quelli di natura poliuretanic, acrilica e vinilica¹⁵⁷. Infine altra componente fondamentale per la realizzazione di un rivestimento conduttivo è rappresentata dal solvente; tali componenti sono aggiunte alla miscela per garantire una maggiore omogeneità del rivestimento, evitare la formazione

di agglomerati e assicurare una sufficiente lavorabilità del materiale. I solventi utilizzati possono essere di diversi tipi e dipendono dal polimero usato come legante; solitamente sono a base acquosa o organica¹⁵⁸.

3.5 Sistemi di riscaldamento elettrotermico a base di polimeri

Negli ultimi anni, i sistemi elettrotermici basati su polimeri hanno suscitato l'interesse degli operatori economici nel settore delle costruzioni, come dimostrato dalla comparsa di nuovi prodotti di questo tipo sul mercato europeo. In questo contesto, esistono due principali categorie di prodotti basati su rivestimenti polimerici conduttivi per il riscaldamento interno o esterno: vernici da applicare in opera sugli edifici o rivestimenti incorporati in prodotti prefabbricati; questi ultimi, a loro volta, possono essere suddivisi in elementi serigrafati su supporto o pannelli con rivestimento elettrotermico integrato. Le vernici elettricamente conduttive sono generalmente a base di nerofumo e polimeri, che possono essere lavorate a temperatura ambiente. I rivestimenti conduttivi sono generalmente applicati con un rullo o un pennello sulla superficie da riscaldare, sulla quale vengono posizionate preliminarmente le strisce di materiale conduttivo utilizzate come elettrodi ai fini dell'alimentazione del sistema (ad esempio, rame, Figura 4.8a).

Una volta applicato lo strato resistivo, questo viene poi coperto da una prima mano protettiva di *primer* seguita dall'applicazione del materiale di rivestimento, utilizzando elementi ad alta conducibilità termica per favorire il meccanismo radiante del sistema elettrotermico¹⁵⁹. Prima di preparare gli elettrodi, il substrato può essere trattato con un primer per garantire un'adesione sufficiente tra la vernice conduttiva e il substrato. Questa operazione è essenziale quando l'elemento al quale vie-

and Graphene Thin Films for Electrothermal Applications, *Nanoscale*, 6, no. 6, pp. 3037-3045 (<https://doi.org/10.1039/c3nr05636h>).

¹⁵⁸ Pang, B. *et al.* (2019), 5S Multifunctional Intelligent Coating with Superdurable, Superhydrophobic, Self-Monitoring, Self-Heating, and Self-Healing Properties for Existing Construction Application, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11, no. 32, pp. 29242-29254 (<https://doi.org/10.1021/acsami.9b08303>).

¹⁵⁹ Sistema Carbon4, n.d. (<https://www.carbonheatingcyprus.com/revolutionary-heating-system.html>).



Fig. 4.8. Sistemi elettrotermici non metallici: a) installazione di elettrodi di rame; b) applicazione di vernice polimerica per parete radiante; c) applicazione per un soffitto radiante; d) applicazione per pavimento radiante. Fonte: Carbon4

¹⁶⁰ Roth, K. *et al.* (2007), *Infrared Radiant Heaters*, *Ashrae Journal*, no. June, 0-2.

¹⁶¹ www.yshield.com, accessed March 17, 2024 (<https://www.yshield.com/>).

¹⁶² www.carbon-film.com, accessed March 17, 2024 (<https://www.carbon-film.com/blog/innovativni-technologie-ve-vyrobe-lar-x-uhlikovych-folii/>).

¹⁶³ www.carbon-film.com, op. citata.

¹⁶⁴ Dempsey, S. (2019), *A radiant heater and method of manufacture*, US20210048198A1 (USA, issued 2019).

¹⁶⁵ CeP Heating System | EcoVolt - Innovation in Energy, accessed April 15, 2024 (<https://ecovolt.ie/products/cep-heating-system/>).

¹⁶⁶ Sakr, M. and Liu, S. (2014), *A Comprehensive Review on Applications of Ohmic Heating (OH)*, op. cit.

¹⁶⁷ Zhou, Y. *et al.* (2020), *A Review on Cooling Performance Enhancement for Phase Change Materials Integrated Systems—Flexible*

ne applicata la vernice conduttiva presenta un'elevata porosità superficiale che può assorbire il solvente utilizzato nel rivestimento. In questo caso, si creerebbe una forte disomogeneità del solvente, con porzioni del film aventi una alta concentrazione di additivi conduttivi e altre carenti, portando così a un riscaldamento eterogeneo della superficie (effetto di *hot-spot*)¹⁶⁰. Le vernici elettrotermiche possono essere utilizzate per soffitti, pavimenti e pareti radianti (Figura 4.8b, 4.8c, 4.8d) e, a differenza dei sistemi prefabbricati elettro-conduttivi, sono compatibili anche con elementi curvi o con spigoli vivi. Le tensioni operative sono generalmente tra 24 e 48 V, che permettono di ottenere una temperatura variabile da 45 a 80 °C, a seconda del carico di additivi conduttivi¹⁶¹. Infine, lo spessore totale del sistema è di circa 0,4-0,6 mm.

Per le applicazioni serigrafate, la vernice conduttiva viene depositata su supporti in plastica (PET), formando un sistema di strisce conduttive parallele a cui sono applicati due elementi metallici (ad esempio, in rame) come elettrodi, utilizzando collanti quali la pasta d'argento per favorirne la connessione. Gli elementi stampati costituiscono i resistori del sistema, di conseguenza, a differenza dei sistemi in opera, il sistema radiante non è un singolo elemento ma è costituito da più parti, in modo da garantire una distribuzione più uniforme del calore sulla superficie del resistore. Gli inchiostri da stampare devono avere una bassa viscosità e sono generalmente a base di nanotubi di carbonio e grafite¹⁶². Il sistema sopra enunciato forma un 'tappetino' elettrotermico (larghezza circa 10-50 cm e lunghezza fino a 10 m) che può essere utilizzato per massetti o soffitti radianti: una volta installato, viene collegato al sistema elettrico e separato dagli strati superiori mediante fogli di polietilene¹⁶³. Un altro sistema elettrotermico non metallico attualmente in uso prevede l'applicazione di rivestimenti polimerici elettricamente conduttivi per costruire pannelli prefabbricati in cartongesso¹⁶⁴ al fine di assemblare pareti radianti in grado di raggiungere temperature di 50 °C in 15 minuti con una tensione a corrente alternata pari a 24 V. Le dimensioni del pannello possono variare in lunghezza da 800 mm a 1200 mm con un'altezza variabile tra 1200 mm e 2400 mm, per uno spessore totale di 12,5 mm. Inizialmente, la superficie esterna del pannello è poi generalmente trattata con un intonaco a base di gesso e infine con un comune prodotto verniciante¹⁶⁵.

Generalmente, i sistemi di riscaldamento basati su materiali elettrotermici, sia nel caso di vernici applicate *in loco* sia per elementi prefabbricati, sono completati con accessori che consentono la gestione e la regolazione del sistema (termostati, trasformatori, alimentazioni elettriche, ecc.).

Infine, negli ultimi anni, sono state condotte attività sperimentali su sistemi che combinano rivestimenti auto-riscaldanti con sistemi di accumulo di energia termica (*thermal energy storage*, TES) per immagazzinare l'energia termica prodotta e così ottimizzare i costi operativi¹⁶⁶. I materiali TES includono materiali a cambio di fase (PCM), che possono catturare parte del calore prodotto dalla transizione da uno stato solido a uno liquido e poi rilasciarlo solidificandosi quando la temperatura ambiente diminuisce¹⁶⁷. Questa combinazione può portare a notevoli risparmi di energia elettrica, poiché l'uso congiunto delle due tecnologie ridurrebbe il tempo di utilizzo del sistema elettrotermico, limi-

tandolo alle fasi di carica termica dell'elemento basato su PCM. In questo contesto, Barzin *et al.*¹⁶⁸ hanno stimato un risparmio energetico di circa il 44% rispetto a un sistema standard invece del 35% di risparmio nel caso di funzionamento del sistema elettrotermico senza PCM. Attualmente, nonostante l'enorme potenziale del sistema combinato, l'applicazione di materiali elettrotermici polimerici con elementi PCM è ancora limitata.

3.6 Rivestimenti elettricamente conduttivi a base di grafene

Nel presente paragrafo sono illustrate le prime esperienze sperimentali inerenti all'impiego di rivestimenti conduttivi a base di materiali correlati al grafene (GRM) per applicazioni auto-riscaldanti. Uno dei primi GRM utilizzati nei rivestimenti elettricamente conduttivi sono stati i nanonastri di grafene (*graphene nanoribbons*, GNR), che hanno mostrato un comportamento elettrotermico a basse temperature per applicazioni disgelanti¹⁶⁹. Tuttavia, questo additivo a base di grafene ha mostrato significative limitazioni nell'uso ed è stato abbandonato a favore di altre soluzioni¹⁷⁰.

Inoltre, le prime applicazioni basate sull'impiego di nanopolveri di grafene hanno visto un loro primo uso in inchiostri senza aggiunta polimerica¹⁷¹. Tuttavia, questi sistemi presentavano limitazioni come la fragilità e la difficoltà di installazione, annullando i vantaggi che caratterizzano un rivestimento implicando la predisposizione sull'elemento riscaldante di spessi strati protettivi.

I GRM sono stati spesso testati anche con altri nano-additivi a base di carbonio come i nanotubi di carbonio. Questo effetto sinergico aiuta a costruire una rete di percolazione all'interno del materiale migliorando le sue proprietà elettriche e termiche e potenziando quelle meccaniche¹⁷².

Per quanto riguarda la tipologia di legante, le resine epossidiche sono state tra i primi polimeri testati con i GRM per applicazioni auto-riscaldanti. Questi materiali sono stati scelti per le loro qualità, ad esempio, l'elevata capacità di adesione al substrato, l'utilizzo come strato protettivo e l'eccellente resistenza alle alte temperature¹⁷³. In particolare, Campo *et al.*¹⁷⁴ hanno realizzato sistemi a base di epossidica con GNP e CNT per un effetto sinergico degli additivi carbonici; mentre Prolongo *et al.*¹⁷⁵ hanno impiegato GNP e CNT in resine epossidiche induribili agli UV.

Altra classe di polimeri utilizzata per la produzione di rivestimenti auto-riscaldanti è rappresentata dalle resine poliuretatiche¹⁷⁶. Tian *et al.*¹⁷⁷ hanno realizzato rivestimenti in poliuretano impiegando la tecnica dello *spray coating* su substrati tessili utilizzando ossido di grafene.

Infine, un'altra classe di polimeri il cui impiego è documentato in letteratura è rappresentata dal silicone (ad esempio, il polidimetilsilossano (PDMS)) per la produzione di rivestimenti auto-riscaldanti e idrorepellenti¹⁷⁸; in tale ambito si segnala l'esperienza sperimentale condotta da Zhang *et al.*¹⁷⁹ che hanno utilizzato GNPs per produrre sistemi auto-riscaldanti basati su PDMS e fibre di carbonio, combinando nano e macroelementi.

3.6.1 Proprietà termiche ed elettriche

Le proprietà elettriche e termiche dei rivestimenti a base di GRM sono cruciali per le applicazioni elettrotermiche. Nei compositi epossidici, è stato ottenuto un miglioramento

Design and Smart Control with Machine Learning Applications, *Building and Environment*, Elsevier Ltd, May 1 (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106786>).

¹⁶⁸ Barzin, R. *et al.* (2015), Application of PCM Underfloor Heating in Combination with PCM Wallboards for Space Heating Using Price Based Control System, *Applied Energy*, 148, 39-48 (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.027>).

¹⁶⁹ Raji, A. R. O. *et al.* (2016), Composites of Graphene Nanoribbon Stacks and Epoxy for Joule Heating and Deicing of Surfaces, *ACS Applied Materials and Interfaces* (<https://doi.org/10.1021/acsami.5b11131>).

¹⁷⁰ Korhonen, T. and Koskinen, P. (2016), Limits of Stability in Supported Graphene Nanoribbons Subject to Bending, *Phys. Rev. B*, 93, no. 24, 245405 (<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.245405>).

¹⁷¹ Zhang, Q. *et al.* (2017), Mechanically Robust and Electrically Conductive Graphene-Paper/Glass-Fibers/Epoxy Composites for Stimuli-Responsive Sensors and Joule Heating Deicers, *Carbon*, 124, pp. 296-307 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.001>).

¹⁷² Bagotia, N. *et al.* (2019), Synergistic Effect of Graphene/Multiwalled Carbon Nanotube Hybrid Fillers on Mechanical, Electrical and EMI Shielding Properties of Polycarbonate/Ethylene Methyl Acrylate Nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 159, no. March 2018, pp. 378-388 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.009>).

¹⁷³ Redondo, O. *et al.* (2018), Anti-Icing and de-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets, *Composites Science and Technology*, 164, pp. 65-73 (<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.031>).

¹⁷⁴ Campo, M. *et al.* (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *Journal of Applied Polymer Science*, 137, no. 42, pp. 1-8 (<https://doi.org/10.1002/app.49281>).

¹⁷⁵ Prolongo, S. G. *et al.* (2020), Printable Self-Heating Coatings Based on the Use of Carbon Nanoreinforcements, *Polymer Composites*, 41, no. 1, pp. 271-278 (<https://doi.org/10.1002/pc.25367>).

¹⁷⁶ Doblas, A. *et al.* (2019), Electric Heating Performance of Nanodoped Polyurethane Coatings, *Progress in Organic Coatings* (<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.048>).

¹⁷⁷Tian, M. *et al.* (2019), Enhanced Electrothermal Efficiency of Flexible Graphene Fabric Joule Heaters with the Aid of Graphene Oxide, *Materials Letters*, 234, pp. 101-104 (<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.078>).

¹⁷⁸Pang, B. *et al.* (2019), 5S Multifunctional Intelligent Coating with Superdurable, Superhydrophobic, Self-Monitoring, Self-Heating, and Self-Healing Properties for Existing Construction Application, *op. citata*.

¹⁷⁹Zhang, X. F. *et al.* (2019), Flexible Graphene-Coated Carbon Fiber Veil/Polydimethylsiloxane Mats as Electrothermal Materials with Rapid Responsiveness, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2, no. 3, pp. 241-249 (<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.04.002>).

¹⁸⁰Redondo, O. *et al.* (2018), Anti-Icing and de-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets, *op. citata*.

¹⁸¹Petech, I. *et al.* (2015), Current-Voltage Characteristics of the Composites Based on Epoxy Resin and Carbon Nanotubes, *Journal of Nanomaterials* (<https://doi.org/10.1155/2015/405345>).

¹⁸²Campo, M. *et al.* (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *op. citata*.

¹⁸³Prolongo, S. G. *et al.* (2020), Printable Self-Heating Coatings Based on the Use of Carbon Nanoreinforcements" *op. citata*.

¹⁸⁴Zeng, Z. *et al.* (2015), Low-Voltage and High-Performance Electrothermal Actuator Based on Multi-Walled Carbon Nanotube/Polymer Composites, *Carbon*, 84, no. 1, pp. 327-334 (<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.012>).

della conducibilità elettrica attraverso l'aggiunta di GNP. In particolare, Redondo *et al.*¹⁸⁰, con un carico di GNP del 12% in peso del rivestimento, hanno ottenuto una conducibilità elettrica di 0,01 S/m. Inoltre, è stata osservata una riduzione esponenziale della resistenza elettrica che non segue la legge di Ohm. Questo fenomeno si verifica solo quando vengono applicate alte tensioni (ad esempio, superiori a 100 V) a causa dell'effetto Joule: il passaggio di corrente riscaldando il campione provoca un miglioramento della conducibilità elettrica e una conseguente riduzione della resistenza. In particolare, questo fenomeno può essere ancora più pronunciato per i campioni con una bassa concentrazione di GRM¹⁸¹.

Nel caso di composti epossidici, è stata testata anche una composizione GNP/CNT. I CNT migliorano le proprietà elettriche più dei GNP, ma la loro combinazione può formare sinergicamente percorsi conduttivi all'interno del materiale (Figura 4.9). Pertanto, il solo GNP potrebbe non essere sufficiente a migliorare la resistenza elettrica¹⁸². Prolongo *et al.*¹⁸³, hanno utilizzato composti epossidici indurenti agli UV con CNT e GNP senza combinarli. Come previsto, i campioni con un carico di CNT dello 0,3% in peso del rivestimento hanno mostrato valori di conducibilità superiori rispetto ai campioni con solo GNP. Come già osservato, ciò è dovuto principalmente alla maggiore capacità dei CNT di formare un percorso conduttivo all'interno della matrice polimerica. Inoltre, in questo caso, per basse tensioni applicate (ad es. max 15 V), non vi era differenza di comportamento tra i diversi campioni, nonostante un contenuto di additivi di carbonio (CNT e GNP) superiore alla soglia di percolazione. Come visto in precedenza, ciò è dovuto al coefficiente di temperatura della resistenza, che, a causa dell'aumento della temperatura interna provocato dall'effetto Joule, varia diminuendo la resistenza elettrica all'aumentare della temperatura¹⁸⁴.

Un altro effetto positivo dell'aggiunta di GNP sulla conducibilità elettrica è stato osservato con rivestimenti a base di PDMS. In particolare, Zhang *et al.*¹⁸⁵ hanno ottenuto una riduzione della resistenza elettrica volumetrica di oltre l'80% con l'impiego di GNP. Generalmente il miglioramento delle proprietà elettriche è

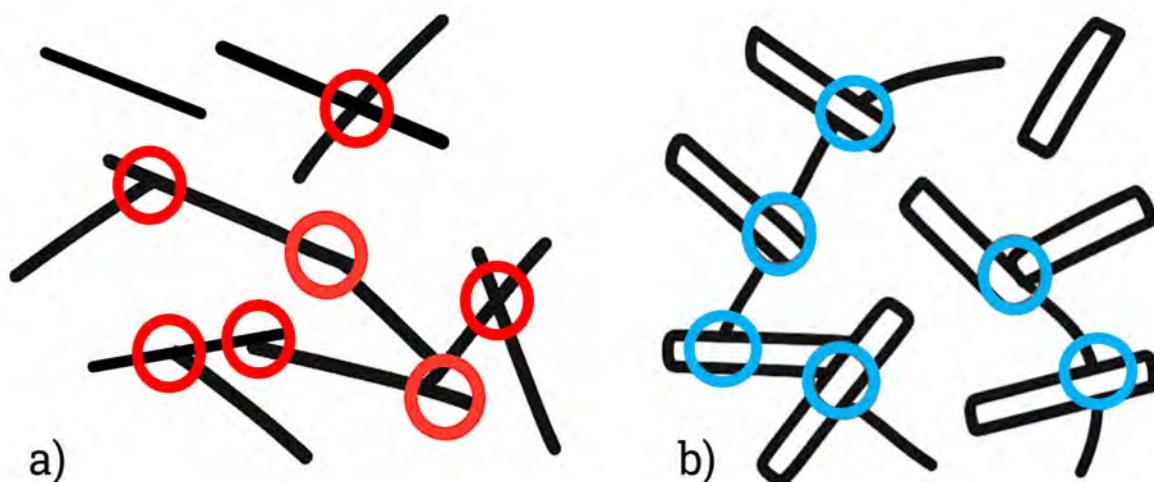


Fig. 4.9. Percorso conduttivo elettrico in un rivestimento auto-riscaldante diagramma relativo ai punti di contatto del percorso conduttivo per i CNT (a) e la composizione GNP/CNT (b). I cerchi in rosso indicano i contatti tra i CNT mentre in blu sono indicati i punti di contatto tra GNP e CNT. Fonte: elaborazione dell'autore basata su Campo M., Redondo O., and Prolongo S. G. (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *Journal of Applied Polymer Science* 137, no. 42: 1-8, <https://doi.org/10.1002/app.49281>

accompagnato anche da un significativo aumento della conducibilità termica dei rivestimenti polimerici. Campo *et al.* hanno ottenuto un miglioramento del 100% nella conducibilità termica aggiungendo un carico di GNP del 12% in peso del rivestimento ai compositi epossidici. Allo stesso tempo, utilizzando solo GNP e non CNT, hanno ottenuto un elemento altamente conduttivo termicamente ed elettricamente isolante¹⁸⁶. Inoltre, in questo contesto, Bustero *et al.*¹⁸⁷ hanno ottenuto un miglioramento della conducibilità termica con una concentrazione di GNP del 30% della parte solida con un valore di conducibilità termica di 20 W/mK, partendo dal valore di resina epossidica pura di 0,25 W/mK. Una elevata conducibilità termica spesso non è richiesta per le applicazioni di auto-riscaldamento, ma è necessaria per garantire un calore uniforme sulla superficie¹⁸⁸.

3.6.2 Proprietà elettrotermiche

Il comportamento elettrotermico rappresenta la principale capacità *smart* dei polimeri conduttivi a base di grafene. Come visto nei precedenti paragrafi, i campi di applicazione riportati in letteratura possono essere molteplici, ad esempio sistemi *de-icing*, tessuti indossabili, sensori, elementi per il processo di indurimento delle resine termoindurenti, ecc.¹⁸⁹ Anche per la suddetta finalità l'impiego di GNP in combinazione con CNT ha portato a interessanti risultati documentati in letteratura. A questo proposito, Doblaz *et al.*¹⁹⁰ hanno analizzato la prestazione elettrotermica di composti a base di poliuretano con GNPs e CNTs. Il sistema analizzato era alimentato con alte tensioni (ad es. 250 V), presentando un modesto aumento della temperatura (ad es. massimo +7 °C) registrato solo per alte concentrazioni di additivo a base di carbonio (carico di GNP dell'8% e carico di CNT dello 0,2% in peso del rivestimento). Per tensioni più alte è stato ottenuto un maggiore incremento di temperatura, ma anche se efficaci per il *de-icing* presenterebbero come principale limitazione di impiego l'applicazione di un'alta tensione¹⁹¹. Inoltre, altri lavori hanno identificato diversi parametri che possono influenzare le capacità di auto-riscaldamento dei rivestimenti poliuretanicici a base di grafene, ad esempio lo spessore del rivestimento applicato, la distanza tra gli elettrodi e la tensione applicata. In particolare, strati più sottili e una minore distanza a tensioni elevate consentono un significativo aumento della temperatura massima raggiunta dal rivestimento e una distribuzione uniforme del calore¹⁹².

Un'altra applicazione elettrotermica con rivestimenti a base poliuretanicica è stata realizzata da Tian *et al.*¹⁹³, testando soluzioni basate su poliuretano e ossido di grafene. In particolare, applicando una tensione di soli 12 V, è stato ottenuto un riscaldamento di 162 °C con un tasso di aumento della temperatura di 8,4 °C/s. Tuttavia, questo risultato è stato ottenuto con un carico di ossido di grafene del 5% in peso del rivestimento. Inoltre, un carico maggiore di GO può deteriorare le proprietà elettrotermiche a causa di una composizione del rivestimento meno omogenea. Allo stesso tempo, il GO nel polimero migliora le proprietà elettriche, ma è un isolante dal punto di vista termico, favorendo un rilascio più graduale del calore all'ambiente esterno quando il sistema

¹⁸⁵ Zhang, X. F. *et al.* (2019), Flexible Graphene-Coated Carbon Fiber Veil/Polydimethylsiloxane Mats as Electrothermal Materials with Rapid Responsiveness, op. citata.

¹⁸⁶ Campo, M. *et al.* (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, op. cit.

¹⁸⁷ Bustero, I. *et al.* (2020), Free-Standing Graphene Films Embedded in Epoxy Resin with Enhanced Thermal Properties, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3, no. 1, pp. 31-40 (<https://doi.org/10.1007/s42114-020-00136-6>).

¹⁸⁸ Sánchez-Romate, X. X. F. *et al.* (2020), Smart Coatings with Carbon Nanoparticles, in Intech, ed. Alberto Jiménez Suárez, IntechOpen, Rijeka, Ch. 12 (<https://doi.org/10.5772/intechopen.92967>).

¹⁸⁹ Moriche, R. *et al.* (2020), Graphene Nanoplatelets Electrical Networks as Highly Efficient Self-Heating Materials for Glass Fiber Fabrics, *Journal of Industrial Textiles*, 2020 (<https://doi.org/10.1177/1528083720931482>).

¹⁹⁰ Doblaz, A. *et al.* (2019), Electric Heating Performance of Nanodoped Polyurethane Coatings, op. citata.

¹⁹¹ *Ibidem*.

¹⁹² *Ibidem*.

¹⁹³ Tian, M. *et al.* (2019), Enhanced Electrothermal Efficiency of Flexible Graphene Fabric Joule Heaters with the Aid of Graphene Oxide, op. cit.

¹⁹⁴ Pang, B. *et al.* (2019), 5S Multifunctional Intelligent Coating with Superdurable, Superhydrophobic, Self-Monitoring, Self-Heating, and Self-Healing Properties for Existing Construction Application, op. citata.

¹⁹⁵ Prolongo, S. G. *et al.* (2020), Printable Self-Heating Coatings Based on the Use of Carbon Nanoreinforcements, op. citata.

¹⁹⁶ *Ibidem.*

¹⁹⁷ Zhang, X. F. *et al.* (2019), Flexible Graphene-Coated Carbon Fiber Veil/Polydimethylsiloxane Mats as Electrothermal Materials with Rapid Responsiveness, op. citata.

¹⁹⁸ Redondo, O. *et al.* (2018), Anti-Icing and de-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets, op. citata.

è spento. Nell'ambito delle applicazioni del GO sono riportate in letteratura anche le prime interessanti esperienze in merito all'integrazione con PDMS in sistemi compositi. Per esempio, Bo *et al.*¹⁹⁴ hanno raggiunto un aumento di temperatura di 40 °C (da -20 °C) in 10 minuti e 80 °C dopo 60 minuti sottoponendo il campione a 50 V durante un test di *de-icing*. Inoltre, grazie alla natura idrofobica del PDMS, l'acqua risultante dal ghiaccio sciolto può essere rapidamente rimossa dalla superficie.

Inoltre, in letteratura sono documentate anche le interessanti prime esperienze di sistemi elettrotermici a base di GRM stampati utilizzando la deposizione su substrato con resine indurenti con sorgente UV¹⁹⁵. In questo caso, l'applicazione di GNP all'interno ha un effetto limitato nel migliorare la conducibilità elettrica del materiale. Se la quantità di GNP è insufficiente, si ottiene un miglioramento trascurabile della conducibilità elettrica e, di conseguenza, uno scarso sviluppo delle proprietà auto-riscaldanti. Al contrario, Prolongo *et al.*, utilizzando solo CNT, hanno raggiunto un aumento di temperatura del 600% contro un incremento del 50% di GNP con tensioni di 1000 V¹⁹⁶. Nonostante l'interessante risultato ottenuto, sembra evidente che la principale limitazione di questa esperienza sperimentale sia l'alta tensione applicata, che può essere pericolosa per gli esseri umani.

Inoltre, quando combinato con PDMS, il GNP può migliorare le proprietà termoelettriche di fogli di fibra di carbonio aumentando la temperatura media massima e il tasso di riscaldamento. In particolare, Zhang *et al.*¹⁹⁷ hanno dimostrato che è possibile raggiungere oltre 300 °C applicando una tensione di 65 V. D'altra parte, utilizzando tensioni più basse (ad esempio 35 V), si può ottenere una temperatura superficiale di circa 200 °C in soli 40 secondi a un tasso di riscaldamento di 5 °C al secondo e un riscaldamento uniforme della superficie (ovvero l'80% della superficie viene riscaldata). Inoltre, combinando GNP e velo di fibra di carbonio con PDMS si garantisce che il sistema termoelettrico abbia una buona resistenza allo stress meccanico e mantenga le sue prestazioni anche dopo numerosi cicli.

Altri autori hanno verificato gli effetti dell'aggiunta grafenica sulle capacità disgelanti delle superfici elettrotermiche. A tal proposito, Redondo *et al.*¹⁹⁸ hanno dapprima ottenuto resine epossidiche a base di GNP che mostrano comportamento elettrotermico a tensioni elettriche di 800 V, raggiungendo incrementi di temperatura di 7,2 °C/s, 10,3 °C/s e 13,6 °C/s con carichi di GNP dell'8%, 10% e 12% in peso della resina epossidica utilizzata. In seguito è stato dimostrato come tali caratteristiche possano essere sfruttate sia per produrre sistemi di *de-icing* che *anti-icing*; in particolare partendo da una temperatura di -15 °C, è possibile ottenere un riscaldamento superficiale omogeneo e sciogliere uno strato di ghiaccio di 4 ml di acqua distillata sulla superficie. Rispetto a un campione non trattato, il tempo di scongelamento del campione è ridotto del 62% grazie all'aggiunta di GNP. Inoltre, le resine epossidiche con additivi di GNP funzionano meglio quando hanno una funzione anti-icing, ovvero non agiscono sullo strato di ghiaccio ma ne evitano la formazione. In questo caso, sono necessarie solo basse tensioni rispetto al test di fusione, e il

comportamento dei campioni con minor carico di GNP è equivalente a quello dei campioni con maggiori concentrazioni¹⁹⁹. Infine, Ba *et al.*²⁰⁰ hanno testato un rivestimento a base di grafene a pochi strati per applicazioni di *de-icing* nel settore aerospaziale. In particolare, hanno creato un elemento stampato in 3D a base di grafene e ABS aggiungendo FLG e, partendo da una temperatura di -40 °C, hanno ottenuto un aumento di +78 °C in 180 s, dimostrando l'efficacia di una soluzione basata su polimeri e FLG per sistemi di *de-icing*.

3.6.3 Effetto dei GRM sulle altre proprietà dei rivestimenti polimerici

Altre caratteristiche dei rivestimenti polimerici che possono essere influenzate dall'aggiunta di GRM sono l'effetto barriera e le proprietà meccaniche.

Negli ultimi anni, l'effetto barriera è stato di fondamentale importanza, specialmente per l'applicazione di rivestimenti intelligenti con compositi di cemento; infatti, tali conglomerati assorbono acqua a causa della loro porosità superficiale, che è spesso un veicolo per l'ingresso di sostanze degradanti, rendendoli vulnerabili alla degradazione causata da cicli di gelo e disgelo e attacchi chimici o da cloruri²⁰¹. Pertanto, negli anni sono state numerose le esperienze sperimentali volte alla creazione di rivestimenti protettivi superidrofobici per prevenire l'ingresso di sostanze esterne nella matrice cementizia del calcestruzzo²⁰². La superidrofobicità di tali rivestimenti è dovuta principalmente alla ruvidità superficiale, che aumenta l'angolo di contatto tra le gocce di liquido e la superficie²⁰³. In tale ambito di ricerca, Campo *et al.*²⁰⁴, utilizzando GNP (ovvero un carico del 12% in peso del rivestimento), hanno ottenuto un effetto barriera riducendo la quantità di acqua assorbita del 30% rispetto a un campione senza additivi 2D. Questo comportamento è dovuto alla formazione di una tortuosità interna nel materiale che limita l'assorbimento dell'acqua.

Nei rivestimenti in poliuretano, l'aggiunta di grafene può migliorare l'idrofobicità superficiale. Doblas *et al.*²⁰⁵ hanno riscontrato un angolo tra la goccia d'acqua e il materiale piano di 74,2°, che aumenta a 81° con l'aggiunta di GNP. Al contrario, l'aggiunta di CNT non migliora l'idrofobicità superficiale. L'aggiunta di GRM può anche migliorare le proprietà meccaniche. In particolare, Campo *et al.*²⁰⁶ utilizzando GNP hanno incrementato fino al 50% la rigidità del rivestimento rispetto al campione originale. In particolare, poiché i GRM derivano dal grafite, che è un eccellente lubrificante, l'additivo migliora la resistenza all'abrasione della superficie²⁰⁷. Infine, grazie agli additivi grafenici, il campione mostra una migliore adesione su un substrato, come dimostrato da Campo *et al.*²⁰⁸ che hanno analizzato l'adesione su fibre di vetro, ottenendo risultati migliori del 20% nel test di *pull-off* rispetto al campione originale.

¹⁹⁹ *Ibidem*.

²⁰⁰ Ba, H. *et al.* (2021), Lightweight, Few-Layer Graphene Composites with Improved Electro-Thermal Properties as Efficient Heating Devices for de-Icing Applications, *Carbon*, 182, 655-668, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.041>.

²⁰¹ Jain, J. *et al.* (2012), Effects of Deicing Salt Solutions on Physical Properties of Pavement Concretes, *op. citata*.

²⁰² Pang, B. *et al.* (2019), 5S Multifunctional Intelligent Coating with Superdurable, Superhydrophobic, Self-Monitoring, Self-Heating, and Self-Healing Properties for Existing Construction Application, *op. citata*.

²⁰³ Simpson, J. T. *et al.* (2015), Superhydrophobic Materials and Coatings: A Review, *Reports on Progress in Physics*, 78, no. 8, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/8/086501>.

²⁰⁴ Campo, M. *et al.* (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *op. citata*.

²⁰⁵ Doblas, A. *et al.* (2019), Electric Heating Performance of Nanodoped Polyurethane Coatings, *op. citata*.

²⁰⁶ Campo, M. *et al.* (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *op. citata*.

²⁰⁷ Zhang, Y. *et al.* (2018), Enhanced Tribological Properties of Polymer Composite Coating Containing Graphene at Room and Elevated Temperatures, *Coatings*, 8, no. 3, <https://doi.org/10.3390/coatings8030091>.

²⁰⁸ Campo, M. *et al.* (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *op. citata*.

4. Conclusioni

Negli ultimi anni, il settore delle costruzioni ha assistito a notevoli innovazioni nel campo dei materiali, che hanno permesso lo sviluppo di elementi ad alte prestazioni, trasformando così il panorama architettonico e costruttivo. Tali avanzamenti sono stati possibili grazie all'impiego delle nanotecnologie, che hanno introdotto materiali con proprietà uniche, capaci di soddisfare i moderni requisiti prestazionali. Tra questi spiccano i materiali intelligenti, in grado di reagire dinamicamente a stimoli esterni. Nel frattempo, il grafene, esplorato per la prima volta agli inizi del XXI secolo, è emerso come un materiale rivoluzionario con eccezionali proprietà, anche se il suo impiego nel settore edile rimane limitato.

I compositi cementizi sono stati tra i primi ambiti di applicazione dei materiali grafenici. Recenti esperienze sperimentali hanno dimostrato che l'integrazione del grafene migliora significativamente le proprietà fisiche dei compositi, grazie al suo effetto riempitivo e alla capacità di formare percorsi conduttivi che ne potenziano la conducibilità elettrica; tale effetto ha aperto la strada a nuove applicazioni smart nei compositi cementizi, come il monitoraggio strutturale e la gestione dei livelli di cloruri. Tuttavia, l'uso dei GRM per creare calcestruzzi auto-riscaldanti è limitato dalla necessità di un elevato carico di materiali bidimensionali.

Contemporaneamente, si sono osservate le prime applicazioni dei materiali grafenici nei compositi polimerici auto-riscaldanti. In particolare, l'uso di GRM migliora la conducibilità elettrica del materiale e ottimizza l'effetto elettrotermico, favorendo una vasta applicabilità di tali rivestimenti.

Dall'analisi della letteratura emergono diverse sfide per i compositi cementizi a base di GRM e per i rivestimenti polimerici; infatti, per una maggiore diffusione dei prodotti grafenici è necessario sviluppare nuovi metodi di produzione che garantiscano volumi elevati di produzione e ingente qualità attraverso processi a limitato impatto ambientale. Inoltre, una possibile soluzione per la realizzazione di sistemi basati su calcestruzzi intelligenti consiste nell'utilizzare elementi altamente conduttivi che rappresentano la componente intelligente del sistema, lavorando in sinergia con il substrato di calcestruzzo. La principale sfida per i rivestimenti polimerici auto-riscaldanti consiste nel raggiungere alte conducibilità elettriche, limitando al contempo i costi di produzione. In questo modo, tensioni basse e non pericolose per gli esseri umani possono massimizzare l'effetto elettrotermico riducendo i consumi del sistema. In questo processo, GRM di alta qualità possono contribuire in modo sostanziale, aumentando notevolmente le proprietà fisiche del rivestimento senza alterarne lo spessore.

BIBLIOGRAFIA

- ABB (2013), Electrical Hazards and Human Safety. *Technical Journal*, no. March 2012, 2.
- Addington, M. and Schodek, D. (2005), *Smart Materials and New Technologies - for Architecture and Design Professions*, New York, Routledge.
- Alaka, H. A., Oyedele, L. O. and Toriola-Coker O. L. (2016), Effect of Excess Dosages of Superplasticizer on the Properties of Highly Sustainable High-Volume Fly Ash Concrete, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7, no. 2, pp. 73-86, <https://doi.org/10.1080/2093761X.2016.1167643>
- Alemour, B., Lim, H. N., Yaacob, M. H., Badran, O. and Hassan M. R. (2019), Improving the Electrical Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite Using Reduced Graphene Oxide, *Materials Research Express*, 6, no. 6, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0ce5>
- Alrekabi, S., Cundy, A. B., Lampropoulos, A., Whitby, R. L. D. and Savina, I. (2017), Mechanical Performance of Novel Cement-Based Composites Prepared with Nano-Fibres, and Hybrid Nano- and Micro-Fibres, *Composite Structures*, 178, pp. 145-56, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.045>
- Atif, R. and Inam, F. (2016), Reasons and Remedies for the Agglomeration of Multi-layered Graphene and Carbon Nanotubes in Polymers, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.109>
- Ba, H., Truong-Phuoc, L., Romero, T., Sutter, C., Nhut, J.M., Schlatter, G., Giambastiani, G. and Pham-Huu C. (2021), Lightweight, Few-Layer Graphene Composites with Improved Electro-Thermal Properties as Efficient Heating Devices for de-Icing Applications, *Carbon*, 182, pp. 655-68, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.041>
- Bagotia, N., Choudhary, V. and Sharma, D. K. (2019), Synergistic Effect of Graphene/Multiwalled Carbon Nanotube Hybrid Fillers on Mechanical, Electrical and EMI Shielding Properties of Polycarbonate/Ethylene Methyl Acrylate Nanocomposites, *Composites Part B: Engineering* 159, no. March 2018, pp. 378-88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.009>
- Bai, S., Jiang, L., Jiang, Y., Jin, M., Jiang, S. and Tao, D. (2020), Research on Electrical Conductivity of Graphene/Cement Composites, *Advances in Cement Research*, 32, no. 2, pp. 45-52, <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00170>
- Bai, S., Jiang, L., Xu, N., Jin, M. and Jiang, S. (2018), Enhancement of Mechanical and Electrical Properties of Graphene/Cement Composite Due to Improved Dispersion of Graphene by Addition of Silica Fume, *Construction and Building Materials*, 164, pp. 433-441, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.176>
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. and Lau, C. N. (2008), Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters*, 8, no. 3, pp. 902-907, <https://doi.org/10.1021/nl0731872>
- Baldwin, K. (1998), Electrically Conductive Concrete: Properties and Potential, *Construction Canada*, 98, no. 1, pp. 28-29.
- Barzin, R., Chen, J. J. J., Young, B. R. and Farid, M. M. (2015), Application of PCM Underfloor Heating in Combination with PCM Wallboards for Space Heating Using Price Based Control System, *Applied Energy*, 148, pp. 39-48, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.027>
- Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2017), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Eighth Edi, John Wiley & Sons.
- Bertelsen, N. et al. (2020), EU-28 Residential Heat Supply and Consumption: Historical Development and Status, *Energies*, 13, no. 8, <https://doi.org/10.3390/en13081894>
- Bianco, A. et al. (2013), All in the Graphene Family - A Recommended Nomenclature for Two-Dimensional Carbon Materials, *Carbon*, 65, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.038>
- Bonaccorso, F., Lombardo, A., Hasan, T., Sun, Z., Colombo, L. and Ferrari, A. C. (2012), Production and Processing of Graphene and 2d Crystals, *Materials Today*, 15, no. 12, pp. 564-89, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(13\)70014-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(13)70014-2)
- Bustero, I., Gaztelumendi, I., Obieta, I., Mendizabal, M. A., Zurutuza, A., Ortega, A. and Alonso, B. (2020), Free-Standing Graphene Films Embedded in Epoxy Resin with Enhanced Thermal Properties, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3, no. 1, pp. 31-40, <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00136-6>
- Campo, M., Redondo, O. and Prolongo S. G. (2020), Barrier Properties of Thermal and Electrical Conductive Hydrophobic Multigraphitic/Epoxy Coatings, *Journal of Applied Polymer Science*, 137, no. 42, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1002/app.49281>
- Carriço, A., Bogas, J. A., Hawreen, A. and Guedes, M. (2018), Durability of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials*, 164, pp. 121-33, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>
- Cataldi, P., Athanassiou, A. and Bayer, I. S. (2018) Graphene Nanoplatelets-Based Advanced Materials and Recent Progress in Sustainable Applications, *Applied Sciences* (Switzerland) 8, no. 9, <https://doi.org/10.3390/app8091438>
- Catania, F., Marras, E., Giorcelli, M., Jagdale, P., Lavagna, L., Tagliaferro, A. and Bartoli M. (2021), A Review on Recent Advancements of Graphene and Graphene-Related Materials in Biological Applications, *Applied Sciences* (Switzerland) 11, no. 2, pp. 1-21, <https://doi.org/10.3390/app11020614>
- CeP Heating System | EcoVolt - Innovation in Energy. Accessed April 15, 2021. <https://ecovolt.ie/products/cep-heating-system/>
- Chakraborty, M. and Hashmi, M. S. J. (2018), Wonder Material Graphene: Properties, Synthesis and Practical Applications, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 4, no. 4, pp. 573-602, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2018.1484998>
- Chakraborty, S., Jo, B. J. and Yoon, Y. S. (2019), Development of Nano Cement Concrete by Top-down and Bottom-up Nanotechnology Concept, in *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials: Properties, Modelling and Applications*, Elsevier, pp. 183-213, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00007-6>

- Chu, H., Yan, H., Jiang, J. Y., Sun, W. and Zhang, M. *et al.* (2017), Effects of Graphene Sulfonate Nanosheets on Mechanical and Thermal Properties of Sacrificial Concrete during High Temperature Exposure, *Cement and Concrete Composites*, 82, pp. 252-264, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.007>
- Chung, D. D. L. (2004), Self-Heating Structural Materials, *Smart Materials and Structures*, 13, no. 3, pp. 562-65, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/3/015>
- Cox, D. B. and Woodbury, N. Y. (1952), Metal foil heating device, US2600485A (USA, issued 1952).
- Cui, X., Sun, S., Han, B., Yu, X., Ouyang, J., Zeng, S. and Ou, J. (2017), Mechanical, Thermal and Electromagnetic Properties of Nanographite Platelets Modified Cementitious Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 93, pp. 49-58, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.017>
- Del Rio Castillo, A. E. *et al.* (2018), High-Yield Production of 2D Crystals by Wet-Jet Milling, *Materials Horizons*, 5, no. 5, pp. 890-904, <https://doi.org/10.1039/c8mh00487k>
- Dempsey, S. (2019), A radiant heater and method of manufacture, US20210048198A1 (USA, issued 2019).
- Doblas, A., Del Rosario, G., Prolongo, M. G. and Prolongo, S. G. (2019), Electric Heating Performance of Nanodoped Polyurethane Coatings, *Progress in Organic Coatings*, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.048>
- Dryden, I.G.C. (1982), Chapter 7 - Electrical Heating Fundamentals, in *The Efficient Use of Energy (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, pp. 94-114, <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01250-8.50016-7>
- Du, H., Gao, H. J., and Pang, S. D. (2016), Improvement in Concrete Resistance against Water and Chloride Ingress by Adding Graphene Nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, 83, pp. 114-123, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.005>
- Du, H. and Pang, S. D. (2018), Dispersion and Stability of Graphene Nanoplatelet in Water and Its Influence on Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 167, pp. 403-413, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.046>
- Du, H. and Pang, S. D. (2015), Enhancement of Barrier Properties of Cement Mortar with Graphene Nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, 76, pp. 10-19, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.007>
- Emtsev, K. V. *et al.* (2009), Towards Wafer-Size Graphene Layers by Atmospheric Pressure Graphitization of Silicon Carbide, *Nature Materials*, 8, no. 3, pp. 203-207, <https://doi.org/10.1038/nmat2382>
- Fang, S., Wang, R., Ni, H., Liu, H. and Liu, L. (2020), A Review of Flexible Electric Heating Element and Electric Heating Garments, *Journal of Industrial Textiles*, no. 399, pp. 1-36, <https://doi.org/10.1177/1528083720968278>
- Ferrari, A. C., *et al.* (2015), Science and Technology Roadmap for Graphene, Related Two-Dimensional Crystals, and Hybrid Systems, *Nanoscale*, 7, no. 11, pp. 4598-4810, <https://doi.org/10.1039/c4nr01600a>
- Gao, F., Tian, W., Wang, Z. and Wang, F. (2020), Effect of Diameter of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Mechanical Properties and Microstructure of the Cement-Based Materials, *Construction and Building Materials*, 260, 120452, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120452>
- Ghosh, S., Harish, S., Rocky, K. A., Ohtaki, M. and Saha, B. B. (2019), Graphene Enhanced Thermoelectric Properties of Cement Based Composites for Building Energy Harvesting, *Energy and Buildings*, 202, 109419, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109419>
- Gopalakrishnan, R. and Jeyalakshmi, R. (2020), The Effects on Durability and Mechanical Properties of Multiple Nano and Micro Additive OPC Mortar Exposed to Combined Chloride and Sulfate Attack, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 106, no. April 2019, 104772, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104772>
- Graphene Flagship (2018), Graphene Flagship - Annual Report 2018.
- Guidetti, G. *et al.* (2019), Photocatalytic Ac-
- tivity of Exfoliated Graphite-TiO₂ Nanoparticle Composites, *Nanoscale*, 11, no. 41, 19301-14, <https://doi.org/10.1039/c9nr06760d>
- Han, B., Zhang, L. and Jinping, O. (2017), *Smart and Multifunctional Concrete Towards Sustainable Infrastructures*, Springer Singapore, <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>
- Henderson, R. K., Jiménez-González, C., Constable, D. J.C., Alston, S. R., Inglis, G. G.A., Fisher, G., Sherwood, J., Binks, S. P. and Curzons, A. D. (2011), Expanding GSK's Solvent Selection Guide - Embedding Sustainability into Solvent Selection Starting at Medicinal Chemistry, *Green Chemistry*, 13, no. 4, pp. 854-862, <https://doi.org/10.1039/c0gc00918k>
- Hernandez, Y., Nicolosi, V., Lotya, M., Blighe, F. M., Sun, Z., De, S., McGovern, I.T., *et al.* (2008), High-Yield Production of Graphene by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite, *Nature Nanotechnology*, 3, no. 9, pp. 563-568, <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.215>
- Hodge, S., Galhena, T., Annicchiarico, D., Barnett, J., Denney, P. and Ricketts, N. (2021), Graphene for the Construction Sector, Cheltenham.
- Holman, J. P., *Heat Transfer*, ed. McGraw-Hill Education, tenth edit (Boston, 2010), <https://doi.org/10.1080/01973762.1999.9658510>
- International Electrotechnical Commission (2018), IEC 60479-1:2018: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 1: General Aspects.
- Jaber, J. O., Jaber, Q. M., Sawalha, S. A. and Mohsen, M. S. (2008), Evaluation of Conventional and Renewable Energy Sources for Space Heating in the Household Sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pergamon, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.004>
- Jain, J., Olek, J., Janusz, A. and Jozwiak-Niedzwiedzka, D. (2012), Effects of Deicing Salt Solutions on Physical Properties of Pavement Concretes, *Transportation Research Record*, 2290, no. 1, pp. 69-75, <https://doi.org/10.3141/2290-09>
- Janas, D. and Koziol, K. K. (2014), A Review of Production Methods of Carbon Nanotube and Graphene Thin Films for Electrothermal

- Applications, *Nanoscale*, 6, no. 6, pp. 3037-3045, <https://doi.org/10.1039/c3nr05636h>
- Jin, M., Jiang, L., Lu, M. and Bai, S. (2017), Monitoring Chloride Ion Penetration in Concrete Structure Based on the Conductivity of Graphene/Cement Composite, *Construction and Building Materials*, 136, pp. 394-404, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.054>
- Jing, G., Ye, Z., Wu, J., Wang, S., Cheng, X., Strokova, V. and Nelyubova, V. (2020), Introducing Reduced Graphene Oxide to Enhance the Thermal Properties of Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, 109, no. February, 103559, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103559>
- Káberger, T. (2018), Progress of Renewable Electricity Replacing Fossil Fuels, *Global Energy Interconnection*, 1, no. 1, pp. 48-52, <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.006>
- Korhonen, T. and Koskinen, P. (2016), Limits of Stability in Supported Graphene Nanoribbons Subject to Bending, *Phys. Rev. B*, 93, no. 24, 245405, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.245405>
- Krystek, M., Ciesielski, A. and Samori, P. (2021), Graphene-Based Cementitious Composites: Toward Next-Generation Construction Technologies, *Advanced Functional Materials*, 2101887, pp. 1-16, <https://doi.org/10.1002/adfm.202101887>
- Kumar, S., Kolay, P., Malla, S. and Mishra, S. (2015), Effect of Multiwalled Carbon Nanotube in Cement Composite on Mechanical Strength and Freeze-Thaw Susceptibility, *Advances in Civil Engineering Materials*, 4, no. 1, pp. 257-274, <https://doi.org/10.1520/ACEM20150006>
- Kurnitski, J., Jokisalo, J., Palonen, J., Jokiranta, K. and Seppänen, O. (2004), Efficiency of Electrically Heated Windows, *Energy and Buildings*, 36, no. 10 SPEC. ISS, pp. 1003-1010, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.007>
- Lawal, A. T. (2019) Graphene-Based Nano Composites and Their Applications. A Review, *Biosensors and Bioelectronics*, 141, 111384, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111384>
- Le, J. L., Du, H. and Pang, S. D. (2014), Use of 2-D Graphene Nanoplatelets (GNP) in Cement Composites for Structural Health Evaluation, *Composites Part B: Engineering*, 67, pp. 555-563, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.005>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. and Hone, J. (2008), Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, *Science*, 321, no. 5887, pp. 385-388, <https://doi.org/10.1126/science.1157996>
- Lee, H., Yu, W., Loh, K. J. and Chung H. (2020), Self-Heating and Electrical Performance of Carbon Nanotube-Enhanced Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 250, 18838, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118838>
- Lee, S. Y. and Hwanget, J. Y. (2020), Transparent Heater with Meshed Amorphous Oxide/Metal/Amorphous Oxide for Electric Vehicle Applications, *Scientific Reports*, 10, no. 1, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66514-8>
- Leone, M.F. (2012), *Cemento nanotech: nanotecnologie per l'innovazione del costruire*, Tecnologia e progetto, Napoli: CLEAN, ISBN 9788884971807.
- Li, H., Xi, C., Kong, X., Lin, Z. and Wang, L. (2020), A Comparative Experimental Investigation on Radiant Floor Heating System and Stratum Ventilation, *Sustainable Cities and Society*, 52, no. August 2019, 101823, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101823>
- Li, X., Korayem, A. H., Li, C., Liu, C., He, H., Sanjayan, J. G. and Duan W. H. (2016), Incorporation of Graphene Oxide and Silica Fume into Cement Paste: A Study of Dispersion and Compressive Strength, *Construction and Building Materials*, 123, pp. 327-335, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.022>
- Li, X., Li, C., Liu, Y., Chen, S. J., Wang, C. M., Sanjayan, J. G. and Duan, W. H. (2018), Improvement of Mechanical Properties by Incorporating Graphene Oxide into Cement Mortar, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 25, no. 15-16, pp. 1313-1322, <https://doi.org/10.1080/15376494.2016.1218226>
- Li, X., Liu, Y. M., Li, W. G., Li, C. Y., Sanjayan, J. G., Duan, W. H. and Li, Z. (2017), Effects of Graphene Oxide Agglomerates on Workability, Hydration, Microstructure and Compressive Strength of Cement Paste, *Construction and Building Materials*, 145, pp. 402-410, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.058>
- Liang, J., Wang, Y., Huang, Y., Ma, Y., Liu, Z., Cai, J., Zhang, C., Gao, H. and Chen, Y. (2009), Electromagnetic Interference Shielding of Graphene/Epoxy Composites, *Carbon*, 47, no. 3, pp. 922-925, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.12.038>
- Lin, Y. and Du, H. (2020), Graphene Reinforced Cement Composites: A Review, *Construction and Building Materials*, 265, 120312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120312>
- Liu, Y., Lai, Y. and Ma, D. X. (2015), Research of Carbon Fibre Grille Reinforced Composites in Airport Pavement Snowmelt, *Materials Research Innovations*, 19, pp. 49-54, <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000002086>
- Liu, Y., Wang, M. and Wang, W. (2018), Electric Induced Curing of Graphene/Cement-Based Composites for Structural Strength Formation in Deep-Freeze Low Temperature, *Materials and Design*, 160, pp. 783-793, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.008>
- Liu, Z., Liu, J., Cui, L., Wang, R., Luo, X., Barrow, C. J. and Yang, W. (2013), Preparation of Graphene/Polymer Composites by Direct Exfoliation of Graphite in Functionalised Block Copolymer Matrix, *Carbon*, 51, no. 1, pp. 148-155, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.023>
- Lotya, M., King, P. J., Khan, U., De, S. and Coleman, J. N. (2010), High-Concentration, Surfactant-Stabilized Graphene Dispersions, *ACS Nano*, 4, 6, pp. 3155-3162, <https://doi.org/10.1021/nn1005304>
- Lu, Z., Li, Z. and Ma, H. (2016), The Perspective Applications of Graphene Oxide in Construction and Building Materials, *Advanced Materials- TechConnect Briefs*, 1, pp. 197-200.
- Maielletti, R. and Panaro, P. (2019), Conoscere Il Rischio - Rischio Elettrico, INAIL.

- Makar, J. M. and Beaudoin, J. J. (2003), Carbon Nanotubes and Their Application in the Construction Industry, in *Proc., 1st Int. Symposium on Nanotechnology in Construction*, National Research Council Canada, Ottawa, Ontario, vol. 331, p. 341.
- Marino, G. (2018), Built-in, Exposed or Concealed Comfort Services. Attempts to Industrialise Collective Housing after 1945, *Building Knowledge, Constructing Histories*, 2, 7, pp. 894-901.
- Martine, J. F. (1971), Heating the Home, *University of Illinois Bulletin*, 68, no. 131, pp. 2-12, <https://doi.org/10.1038/scientificamerica04151911-378>
- Matakah, F. and Soroushian, P. (2020), Graphene Nanoplatelet for Enhancement the Mechanical Properties and Durability Characteristics of Alkali Activated Binder, *Construction and Building Materials*, 249, 118773, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118773>
- Meng, W. and Khayat, K. H. (2018), Effect of Graphite Nanoplatelets and Carbon Nanofibers on Rheology, Hydration, Shrinkage, Mechanical Properties, and Microstructure of UHPC, *Cement and Concrete Research*, 105, no. November 2017, pp. 64-71, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.001>
- Mennechez, F., Odile, J.P. and Bousquet, V. (2007), Radiant panel comprising a radiating glass substrate, WO2007088308A1, issued January 31, 2007.
- Miró, P., Audiffred, M. and Heine, T. (2014) An Atlas of Two-Dimensional Materials, *Chem. Soc. Rev.*, 43, no. 18, pp. 6537-6554, <https://doi.org/10.1039/C4CS00102H>
- Mishra, N., Boeckl, J., Motta, N. and Iacopi, F. (2016), Graphene Growth on Silicon Carbide: A Review, *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 213, no. 9, pp. 2277-2289, <https://doi.org/10.1002/pssa.201600091>
- Moriche, R., Moreno-Avilés, M. A., Jiménez-Suárez, A., Prolongo, S. G. and Ureña, A. (2020), Graphene Nanoplatelets Electrical Networks as Highly Efficient Self-Heating Materials for Glass Fiber Fabrics, *Journal of Industrial Textiles*, 2020, <https://doi.org/10.1177/1528083720931482>
- Muto N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Su-gita, M., Ohtsuka, Y. and Arai, Y. (1992), Design of Intelligent Materials with Self-Diagnosing Function for Preventing Fatal Fracture, *Smart Material Structures*, pp. 324-329, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/1/4/007>
- Norhasri, M. S. M., Hamidah, M. S. and Fadzil, A. M. (2019), Inclusion of Nano Metaclayed as Additive in Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Construction and Building Materials*, 201, pp. 590-598, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.006>
- Novoselov, K. and Benka, S.B. (2005), Two-Dimensional Atomic Crystals, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 102, No. 30, pp. 10451-10453 <https://doi.org/10.1073/pnas.0502848102>
- Pacheco-Torgal F. (2019), 1 - Introduction to Nanotechnology in Eco-Efficient Construction, in *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction (Second Edition)*, ed. F. Pacheco-Torgal et al., Second Edi, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Woodhead Publishing, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00001-3>
- Pang, B. et al. (2019), 5S Multifunctional Intelligent Coating with Superdurable, Superhydrophobic, Self-Monitoring, Self-Heating, and Self-Healing Properties for Existing Construction Application, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11, no. 32, 29242-54, <https://doi.org/10.1021/acsami.9b08303>
- Papanikolaou, I., Al-Tabbaa, A. and Goisis, M. (2019), An Industry Survey on the Use of Graphene-Reinforced Concrete for Self-Sensing Applications, *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019, ICSIC 2019: Driving Data-Informed Decision-Making 2019*, pp. 3-22, <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.613>
- Papanikolaou, I., Arena, N. and Al-Tabbaa, A. (2019), Graphene Nanoplatelet Reinforced Concrete for Self-Sensing Structures - A Lifecycle Assessment Perspective, *Journal of Cleaner Production*, 240, 118202, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118202>.
- Parks, E.E. (1951), Electric Home Heating, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 1, pp. 828-831, <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1951.5060487>
- Paton, K. R. et al. (2014), Scalable Production of Large Quantities of Defect-Free Few-Layer Graphene by Shear Exfoliation in Liquids, *Nature Materials*, 13, no. 6, pp. 624-630, <https://doi.org/10.1038/nmat3944>
- Petech, I., Kaczmarek, A. and Petech, R. (2015), Current-Voltage Characteristics of the Composites Based on Epoxy Resin and Carbon Nanotubes, *Journal of Nanomaterials*, <https://doi.org/10.1155/2015/405345>
- Peng, H., Ge, Y., Cai, C. S., Zhang, Y. and Liu, Z. (2019), Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Oxide Cement-Based Composites, *Construction and Building Materials*, 194, pp. 102-109, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.234>
- Phillips, C., Al-Ahmadi, A., Potts, S.J., Claypole, T. and Degan-ello, D. (2017), The Effect of Graphite and Carbon Black Ratios on Conductive Ink Performance, *Journal of Materials Science*, 52, no. 16, pp. 9520-9530, <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1114-6>
- Prolongo, S. G., Moriche, R., Del Rosario, G., Jiménez-Suárez, Prolongo, M. G. and Ureña, A. (2016), Joule Effect Self-Heating of Epoxy Composites Reinforced with Graphitic Nanofillers, *Journal of Polymer Research*, 23, no. 9, <https://doi.org/10.1007/s10965-016-1092-4>
- Prolongo, S. G., Moriche, R., Jiménez-Suárez, A., Delgado, A. and Ureña, A. (2020), Printable Self-Heating Coatings Based on the Use of Carbon Nanoreinforcements, *Polymer Composites*, 41, no. 1, pp. 271-278, <https://doi.org/10.1002/pc.25367>
- Qureshi, T. S. and Panesar, D.K. (2020), Nano Reinforced Cement Paste Composite with Functionalized Graphene and Pristine Graphene Nanoplatelets, *Composites Part B: Engineering*, 197, September 15 2020,108063, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063>
- Raji, A. R. O. et al. (2016), Composites of Graphene Nanoribbon Stacks and Epoxy for Joule Heating and Deicing of Surfaces, *ACS Applied Materials and Interfaces*, <https://doi.org/10.1021/acsami.5b11131>
- Rao, R. et al. (2018), Carbon Nanotubes and Related Nanomaterials: Critical Advances and Challenges for Synthesis toward Main-

- stream Commercial Applications, *ACS Nano*, <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b06511>
- Redondo, O., Prolongo, S. G., Campo, M., Sbarufatti, C. and Giglio, M. (2018), Anti-Icing and de-Icing Coatings Based Joule's Heating of Graphene Nanoplatelets, *Composites Science and Technology*, 164, pp. 65-73, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.031>
- Rhee, I., Lee, J. S., Kim, J. H. and Kim, Y. A. (2017), Thermal Performance, Freeze-and-Thaw Resistance, and Bond Strength of Cement Mortar Using Rice Husk-Derived Graphene, *Construction and Building Materials*, 146, pp. 350-359, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.109>
- Ribeirinho, M. J., Mischke, J., Strube, G., Sjödin, E., Blanco, J. L., Pal-ter, R., Biörck, J., Rockhill, D. and Andersson, T., (2020), The next Normal in Construction, McKinsey.
- Ritter, A. (2007) Energy-Exchanging Smart Materials, in *Smart Materials: In Architecture, Interior Architecture and Design*, Basel: Birkhäuser Basel, pp. 164-172, https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8227-8_8
- Robalo, K., Soldado, E., Costa, H., do Carmo, R., Alves, H. and Júlio, E. (2021), Efficiency of Cement Content and of Compactness on Mechanical Performance of Low Cement Concrete Designed with Packing Optimization, *Construction and Building Materials*, 266, 121077, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121077>
- Roth, K., Dieckmann, J. and Brodrick, J. (2007), Infrared Radiant Heaters, *Ashrae Journal*, no. June, 0-2.
- Sakr, M. and Liu, S. (2014), A Comprehensive Review on Applications of Ohmic Heating (OH), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.061>
- Sánchez-Romate, X. X. F. et al. (2020), Smart Coatings with Carbon Nanoparticles, in Intech, ed. Alberto Jiménez Suárez, IntechOpen, Rijeka, Ch. 12, <https://doi.org/10.5772/intechopen.92967>
- Sassani, A. et al. (2019), Polyurethane-Carbon Microfiber Composite Coating for Electrical Heating of Concrete Pavement Surfaces, *Heliyon*, 5, no. 8. e02359, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02359>
- Sedaghat, A., Ram, M. K., Zayed, A., Kamal, R. and Shana-han, N. (2014), Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications, *Open Journal of Composite Materials*, 04, no. 01, pp. 12-21, <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>
- Seol, J. H. et al. (2010), Two-Dimensional Phonon Transport in Supported Graphene, *Science*, 328, no. 5975, pp. 213-216, <https://doi.org/10.1126/science.1184014>
- Simpson, J. T., Hunter, S. R. and Aytug, T. (2015), Superhydrophobic Materials and Coatings: A Review, *Reports on Progress in Physics*, 78, no. 8, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/8/086501>
- Sistema Carbon4, n.d. <https://www.carbonheatingcyprus.com/revolutionary-heating-system.html>
- Slater, C. S. and Savelski, M. J. (2009), Towards a Greener Manufacturing Environment, *Innovations in Pharmaceutical Technology*, no. 29, pp. 78-83.
- Sun, S., Ding, S., Han, B., Dong, S., Yu, X., Zhou, D. and Ou, J. (2017), Multi-Layer Graphene-Engineered Cementitious Composites with Multifunctionality/Intelligence, *Composites Part B: Engineering*, 129, pp. 221-232, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.063>
- Sun, S. et al. (2017), Nano Graphite Platelets-Enabled Piezoresistive Cementitious Composites for Structural Health Monitoring, *Construction and Building Materials*, 136, pp. 314-28, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.006>
- Tamaki, Y. et al. (2006), Direct Observation of Reactive Trapped Holes in TiO₂ Undergoing Photocatalytic Oxidation of Adsorbed Alcohols: Evaluation of the Reaction Rates and Yields, *Journal of the American Chemical Society*, 128, no. 2, pp. 416-417, <https://doi.org/10.1021/ja055866p>
- Tang, M.C. (2004), High Performance Concrete—Past, Present and Future, in *Proceedings of the International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, pp. 3-9.
- Tian, M., Hao, Y., Qu, L., Zhu, S., Zhang, X. and Chen, S. (2019), Enhanced Electrothermal Efficiency of Flexible Graphene Fabric Joule Heaters with the Aid of Graphene Oxide, *Materials Letters*, 234, pp. 101-104, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.078>
- Tong, T., Fan, Z., Liu, Q., Wang, S., Tan, S., and Yu, Q. (2016), Investigation of the Effects of Graphene and Graphene Oxide Nanoplatelets on the Micro- and Macro-Properties of Cementitious Materials, *Construction and Building Materials*, 106, pp. 102-114, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.092>
- Tozzi, P. V. et al. (2018), Life Cycle Assessment of Solvent Extraction as a Low-Energy Alternative to Distillation for Recovery of N-Methyl-2-Pyrrolidone from Process Waste, *Green Processing and Synthesis*, 7, no. 4, pp. 277-286, <https://doi.org/10.1515/gps-2017-0030>
- Tragazikis, I. et al. (2019), Acoustic Emission Investigation of the Effect of Graphene on the Fracture Behavior of Cement Mortars, *Engineering Fracture Mechanics*, 210, no. November 2017: pp. 444-451, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.01.004>
- Tuan, C. Y. (2004), Electrical Resistance Heating of Conductive Concrete Containing Steel Fibers and Shavings, *ACI Materials Journal* 101, no.1, <https://doi.org/10.14359/12989>.
- Ürge-Vorsatz, D. et al. (2014), Buildings. In: Mitigation. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, pp. 671-738.
- Virdag, A., Hager, T. and De Doncker R. W. (2017), Recommendations for Standardization of Voltage Level in LVDC Networks Based on IEC 60479-1 Guidelines, *Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 134, no. 4-5, pp. 267-275, <https://doi.org/10.1007/s00502-017-0509-z>
- Virojanadara, C. et al. (2008), Homogeneous Large-Area Graphene Layer Growth on 6H-SiC(0001), *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 78, no. 24, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.245403>

- Wang, B., Jiang, R. and Wu, Z. (2016), Investigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite, *Nanomaterials*, 6, no. 11, <https://doi.org/10.3390/nano6110200>
- Wang, B. and Shuang, D. (2018), Effect of Graphene Nanoplatelets on the Properties, Pore Structure and Microstructure of Cement Composites, *Materials Express*, 8, no. 5, pp. 407-416, <https://doi.org/10.1166/mex.2018.1447>
- Wang, B. and Shuang, D. (2019), Effect and Mechanism of Graphene Nanoplatelets on Hydration Reaction, Mechanical Properties and Microstructure of Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 228, 116720, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116720>
- Wang, P. et al. (2020), A Superhydrophobic/Electrothermal Synergistically Anti-Icing Strategy Based on Graphene Composite, *Composites Science and Technology*, 198, no. June, 108307, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108307>
- Wang, S., Yi, M. and Shen, Z. (2016), The Effect of Surfactants and Their Concentration on the Liquid Exfoliation of Graphene, *RSC Advances*, 6, no. 61, pp. 56705-56710, <https://doi.org/10.1039/c6ra10933k>
- Wang, Z., Yu, K., Xie, G. and Zou, J. (2018), The Rated Voltage Determination of DC Building Power Supply System Considering Human Beings Safety, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108, no. 5, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/5/052094>
- Wire Heating Element Materials. Accessed March 12, 2021. <https://www.heating-element-alloy.com/article/wire-heating-element-materials.html>
- Wu, X. and Luo, T. (2015), Effect of Electron-Phonon Coupling on Thermal Transport across Metal-Nonmetal Interface - A Second Look, *Epl*, 110, no. 6 0-6, <https://doi.org/10.1209/0295-5075/110/67004>
- Xie, H. et al. (2018), Necklace-Like Silicon Carbide and Carbon Nanocomposites Formed by Steady Joule Heating, *Small Methods*, 2, no. 4, 1700371, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/smt.201700371>
- Xu, J. C. et al. (2014), Experimental Study on the Electrothermal Effect of Concrete Reinforced with Hybrid Carbon and Steel Fiber, *Applied Mechanics and Materials*, 490-491, pp. 94-98, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.94>
- Xu, Y. et al. (2018), Liquid-Phase Exfoliation of Graphene: An Overview on Exfoliation Media, Techniques, and Challenges, *Nanomaterials*, 8, no. 11, <https://doi.org/10.3390/nano8110942>
- Xu, Y. et al. (2018), A Holistic Review of Cement Composites Reinforced with Graphene Oxide, *Construction and Building Materials*, 171, pp. 291-302, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.147>
- Yang, H. (2017), Research on Application of Carbon Fiber Heating Material in Clothing, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 81, no. 1, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012042>
- Yao, X., Hawkins, S. C. and Falzon, B. G. (2018), An Advanced Anti-Icing/de-Icing System Utilizing Highly Aligned Carbon Nanotube Webs, *Carbon*, 136, pp. 130-138, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.039>
- Yoo, D. Y., You, I. and Lee, S. J. (2017), Electrical Properties of Cement-Based Composites with Carbon Nanotubes, Graphene, and Graphite Nanofibers, *Sensors*, (Switzerland) 17, no. 5, <https://doi.org/10.3390/s17051064>
- Zeng, Z. et al. (2015), Low-Voltage and High-Performance Electrothermal Actuator Based on Multi-Walled Carbon Nanotube/Polymer Composites, *Carbon*, 84, no. 1, pp. 327-334, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.012>
- Zhang, Q. et al. (2017), Mechanically Robust and Electrically Conductive Graphene-Paper/Glass-Fibers/Epoxy Composites for Stimuli-Responsive Sensors and Joule Heating Deicers, *Carbon*, 124, pp. 296-307, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.001>
- Zhang, X. F. et al. (2019), Flexible Graphene-Coated Carbon Fiber Veil/Polydimethylsiloxane Mats as Electrothermal Materials with Rapid Responsiveness, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2, no. 3, pp. 241-249, <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.04.002>
- Zhang, Y. et al. (2018), Enhanced Tribological Properties of Polymer Composite Coating Containing Graphene at Room and Elevated Temperatures, *Coatings*, 8, no. 3, <https://doi.org/10.3390/coatings8030091>
- Zhang, Z., Jin, H., Wu, C. and Ji, J. (2018), Efficient Production of High-Quality Few-Layer Graphene Using a Simple Hydrodynamic-Assisted Exfoliation Method, *Nanoscale Research Letters*, 13, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2830-9>
- Zhao, L. et al. (2020), An Intensive Review on the Role of Graphene Oxide in Cement-Based Materials, *Construction and Building Materials*, 241, 117939, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117939>
- Zhao, Y. et al. (2020), Study of Mechanical Properties and Early-Stage Deformation Properties of Graphene-Modified Cement-Based Materials, *Construction and Building Materials*, 257, 119498, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119498>
- Zhou, Y., Zheng, S. and Zhang, G. (2020), A Review on Cooling Performance Enhancement for Phase Change Materials Integrated Systems—Flexible Design and Smart Control with Machine Learning Applications, *Building and Environment*, Elsevier Ltd, May 1, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106786>

SITOGRAFIA

www.carbon-film.com. Accessed March 17, 2021. <https://www.carbon-film.com/blog/inovativni-technologie-ve-vyrobe-larx-uhlikovych-folii/>

www.yshield.com. Accessed March 17, 2021. <https://www.yshield.com/>

Collana ADDDOC Logos - Monografie di Dottorato

1. *Towards Resili(g)ence. Città intelligenti, paesaggi resilienti*, a cura di Manuel Gausa, 2020; ISBN 978-88-3618-018-9, e-ISBN (pdf) 978-88-3618-019-6.
2. *Creative Food Cycles Experience. Goa CFC-festinar: a virtual banquet for an innovating research celebration*, a cura di Silvia Pericu, Manuel Gausa, Alessia Ronco Milanaccio, Giorgia Tucci, 2021; e-ISBN (pdf) 978-88-3618-066-0.
3. *Through Resili(g)ence. Nuove sfide sociali e ambientali*, a cura di Manuel Gausa, 2021; ISBN 978-88-3618-064-6, e-ISBN (pdf) 978-88-3618-065-3.
4. Martina Castaldi, Gaia Leandri, Stefano Melli, Salvatore Polverino, *TransDis Researches: note verso una transdisciplinarietà dei saperi - vol. I*, 2025; e-ISBN (pdf) 978-88-3618-340-1.

Martina Castaldi è dottoranda in Architettura e Design presso l'Università di Genova. Svolge attività di ricerca nel campo del rilievo architettonico e cromatico approfondendo le nuove metodologie UAV per la fotogrammetria indoor.

Gaia Leandri, PhD in Architettura e PhD in Neuroscienze, è ricercatrice presso il Dipartimento Architettura e Design dell'Università di Genova. Conduce ricerche in campo storico-architettonico, con approfondimenti sulle architetture genovesi di epoca medievale.

Stefano Melli, architetto paesaggista e PhD in Architettura del Paesaggio. Orienta la sua ricerca sullo studio delle interrelazioni antropiche e anantropiche nel progetto di paesaggio.

Salvatore Polverino, PhD in Architettura e Design, attualmente ricercatore presso l'Università di Genova in Architettura Tecnica. Svolge attività di ricerca su tematiche inerenti le tecniche costruttive e le applicazioni dei materiali tecnologicamente avanzati.

Negli ultimi anni, anche nell'ambito architettonico, la ricerca scientifica si sta indirizzando verso un approccio di tipo transdisciplinare. Questo lavoro, condotto presso la Scuola di Dottorato in Architettura e Design dell'Università di Genova, esplora quattro casi studio in cui la ricerca architettonica si fonde con discipline quali il rilievo integrato, la storia, l'ecologia del paesaggio e la scienza dei materiali. Il testo dimostra l'efficacia della transdisciplinarietà, mediante approcci innovativi, nel superare i limiti della ricerca tradizionale promuovendo uno scambio fertile tra i professionisti di differenti settori.

Rivolto a un pubblico universitario, questo lavoro vuole offrire stimolanti esempi di ricerca transdisciplinare, sottolineando la sua rilevanza e applicabilità in contesti accademici e professionali.