

ARTICLE INFO

Received	17 March 2023
Revised	27 April 2023
Accepted	09 May 2023
Published	30 June 2023

GEOPOLIMERI PER L'ECO-ARCHITETTURA

Approcci integrati per l'attivazione di strategie green

GEOPOLYMERS FOR ECO-ARCHITECTURE

Integrated approaches for green strategies activation

Raffaella Aversa, Rossella Franchino, Caterina Frettoloso, Nicola Pisacane, Laura Ricciotti

ABSTRACT

Il settore delle costruzioni è responsabile a livello globale del 30% dei consumi energetici, del 40% delle emissioni di CO₂, del 50% delle estrazioni di materie prime, pertanto, si comprende l'urgenza di introdurre azioni per migliorare la sostenibilità attraverso il controllo degli impatti indotti. Al fine di apportare tale cambiamento è importante sia l'introduzione di materiali innovativi, quanto più possibile a matrice naturale sia l'utilizzo di processi costruttivi che ottimizzino il quantitativo di materie prime impiegate e ne agevolino la riciclabilità. Il lavoro presentato illustra i primi esiti di una ricerca interdisciplinare focalizzata sullo studio dell'applicazione dei geopolimeri per la produzione di componenti edilizi che evidenzia il ruolo strategico del connubio sostenibilità e digitalizzazione dalle infrastrutture digitali nel miglioramento delle performance ecologico-ambientali.

The construction industry is responsible for 30% of energy consumption, 40% of CO₂ emissions, and 50% of raw material extraction. Introducing actions to improve the sustainability of induced impacts is urgently necessary, and it is essential to bring about this change by using innovative materials with a natural matrix and construction processes that optimise the raw materials and allow their recyclability. The article introduces the first outcomes of an interdisciplinary research project focused on applying geopolymers for building components. The research highlights the strategic role of sustainability combined with digitisation in order to improve ecological-environmental performance.

KEYWORDS

geopolimeri, materiali innovativi, processi sostenibili, infrastrutture digitali, prototipazione

geopolymers, innovative materials, sustainable processes, digital infrastructure, prototyping

Raffaella Aversa, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy). She carries out research activities mainly in Materials Science and Technology. E-mail: raffaella.aversa@unicampania.it

Rossella Franchino, Engineer and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy). She carries out research activities mainly in the field of reading and controlling the quality and characteristics of the environment. E-mail: rossella.franchino@unicampania.it

Caterina Frettoloso, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy). She carries out research activities mainly on the qualification of settlement and environmental system. E-mail: caterina.frettoloso@unicampania.it

Nicola Pisacane, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy). He carries out research on landscape and architecture representation and survey. E-mail: nicola.pisacane@unicampania.it

Laura Ricciotti, Chemist and PhD, is a Researcher at the Department of Architecture and Industrial Design, 'Luigi Vanvitelli' University of Campania (Italy). She carries out research activities in Materials Science and Technology. E-mail: laura.ricciotti@unicampania.it



La letteratura scientifica in materia di edilizia sostenibile, nel delinearne i caratteri distintivi, pone l'accento sull'utilizzo di soluzioni progettuali e costruttive che tengono conto delle risorse naturali e dell'ambiente circostante fin dalla fase di ideazione (Sinopoli and Tatano, 2002; Raiteri, 2012; Colajanni and Valenza, 2021). Tale settore, però, pur fregiandosi spesso di muoversi nell'ottica della sostenibilità, opera ancora nella maggior parte dei casi in maniera tradizionale, impiega molto materiale ed è responsabile di un grande quantitativo di rifiuti. Al fine di supportare un cambio di direzione si avverte la necessità di lavorare secondo approcci orientati alla riduzione degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio attraverso l'introduzione sia di materiali innovativi, quanto più possibile a matrice naturale, sia di processi costruttivi che ottimizzano il quantitativo di materie prime impiegate e ne agevolino la riciclabilità (Sposito and Scalisi, 2019).

Bisogna tenere conto, inoltre, che attualmente un ruolo strategico nel miglioramento delle performance ecologico-ambientali del settore edilizio (AEC – Architecture Engineering Construction) è svolto dalle infrastrutture digitali per cui sostenibilità e digitalizzazione si stanno sempre più imponendo come un binomio imprescindibile. La tecnologia digitale contribuisce, infatti, a concretizzare la transizione verso modelli circolari declinati tenendo conto delle specificità del contesto di applicazione e consentendo una maggiore trasparenza relativamente ai prodotti, ai flussi di materiali e alle soluzioni adottate (Azhar, 2011; Wang and Liu, 2020). Sostenibilità e digitalizzazione sono alla base del lavoro presentato che illustra i primi esiti di una ricerca interdisciplinare sviluppata nell'ambito di un progetto finanziato a seguito di Bando competitivo¹. Obiettivo del progetto è lo studio dell'applicazione dei geopolimeri come materiali per la stampa 3D di componenti edilizi eco-orientati.

Nell'ambito dei materiali innovativi e sostenibili i geopolimeri presentano potenzialità sia per la loro matrice naturale sia perché possono essere utilizzati nella fabbricazione digitale che può costituire un input importante per il miglioramento della sostenibilità anche nell'ambito dei processi costruttivi. In tal modo i processi digitali, utilizzando software parametrici e progettazioni avanzate, forniscono un apporto non soltanto per la riduzione di tempi e costi rispetto all'edilizia tradizionale, ma anche per l'ottimizzazione e la riduzione delle quantità di materiale adoperato e per la possibilità di utilizzare materiali riciclati e riciclabili successivamente.

Il principale obiettivo del contributo consiste nell'indagare il potenziale della tecnologia dei geopolimeri nell'ambito di approcci circolari applicati all'edilizia. Tali potenzialità saranno illustrate attraverso il percorso di ricerca sviluppato e, tenendo conto dello stato dell'arte anche in relazione al mondo produttivo, il contributo illustrerà le fasi e i risultati della sperimentazione condotta. Gli esiti, se pure parziali, evidenziano il raggiungimento di importanti obiettivi riguardanti sia le proprietà dei materiali sperimentati sia le implicazioni in termini di impatti ambientali relativamente ai campioni ottenuti aggregando diverse percentuali in peso dei rifiuti ceramici. I dati emersi e riportati all'interno del contributo non solo hanno consentito una prima simulazione digitale del prodotto attraverso

la modellazione parametrica, ma costituiscono un avanzamento che può supportare la comunità scientifica impegnata nello studio delle potenzialità dei geopolimeri soprattutto nell'ottica della valorizzazione delle diverse filiere produttive.

Gli scenari della circolarità nel settore delle costruzioni | La sperimentazione di approcci progettuali incentrati sulle logiche della circolarità, consente di ripensare sistemi e prodotti secondo una visione integrata e inter-scalare che supporti la transizione verso ambienti di vita più resilienti ed ecologicamente performanti (Dufourmont, Pappi Carrone and Haigh, 2020). Le città e gli edifici sono, in stretta analogia con gli organismi viventi, sistemi complessi e dinamici caratterizzati da un proprio metabolismo (Princetl, Bunje and Holmes, 2012; Pollo, Trane and Giovanardi, 2021) che si alimenta di beni e risorse i quali solo in parte vengono assimilati per il corretto funzionamento dei sistemi stessi.

Infatti come ogni sistema di tipo lineare producono da un lato servizi e prodotti dall'altro impatti ambientali sull'ecosistema urbano in termini di emissioni e rifiuti. Lavorare su metodologie finalizzate alla riduzione ed eliminazione di tali disfunzioni metaboliche significa supportare la transizione verso l'uso di energie e materiali rinnovabili² attraverso strategie e soluzioni scalabili che affrontino le sfide più attuali. Sfide che, come emerso anche da un recente seminario scientifico nell'ambito della Progettazione Ambientale (Tucci et alii 2021), riguardano i cambiamenti climatici (e la neutralità climatica), la circolarità delle risorse e la qualità ambientale (anche in relazione alla salute).

Il lavoro di ricerca che si presenta condivide tale premessa così come un approccio metodologico sistemico e interdisciplinare ed è fortemente interconnesso con i tre principi che orientano il progetto circolare: l'eliminazione dei rifiuti e dell'inquinamento, la circolazione di prodotti e materiali (al loro massimo valore) e la rigenerazione della natura: una interconnessione che si rileva non solo a livello strategico ma anche sul piano più operativo. Esaminando il Circular Buildings Toolkit³ di Arup, uno strumento concepito come supporto progettuale per l'edilizia, emergono una serie di aspetti che confermano il ruolo strategico dei materiali innovativi quanto più possibile a matrice naturale, a bassa emissione e che evitino le sostanze inquinanti, così come l'utilizzo di processi costruttivi che ottimizzano il quantitativo di materie prime impiegate e ne agevolino la riciclabilità.

In particolare le azioni prioritarie individuate nel Toolkit, soprattutto in riferimento alle strategie del 'costruire in modo efficiente' e 'costruire con i materiali giusti', trattano alcuni aspetti chiave che riguardano proprio la riduzione sia dell'uso di materiali vergini e non rinnovabili, sia di materiali ad alta intensità di carbonio, così come la progettazione di materiali non pericolosi/inquinanti. Aspetti questi che sono fortemente connessi con il progetto di ricerca, il cui obiettivo principale è quello di approfondire il potenziale della tecnologia dei geopolimeri, in termini di utilizzo di rifiuti e di sottoprodotti industriali, per produrre nuovi componenti edilizi. Tali indicazioni operative sono confluite all'interno del modello digitale oggetto di sperimentazione, andando così ad arricchire il sistema informativo che orienterà le successive scelte di progetto nell'ottica della circolarità.

L'attività di ricerca opera in sintonia anche con Level(s), quadro europeo di riferimento per gli edifici sostenibili, uno strumento volontario che individua una serie di macro-obiettivi per la valutazione e la rendicontazione delle prestazioni di sostenibilità degli edifici. In particolare, risponde al macro-obiettivo 2 – Cicli di Vita dei Materiali Circolari ed Efficienti nell'Uso delle Risorse (Dodd, Donatello and Cordella, 2021) il cui focus riguarda la riduzione degli sprechi, l'ottimizzazione dell'uso dei materiali e la riduzione degli impatti ambientali dei progetti e delle scelte dei materiali lungo l'intero ciclo di vita. Un obiettivo che si può raggiungere facilitando il futuro uso circolare dei componenti degli edifici, con particolare attenzione alla produzione di meno rifiuti e al potenziale di riutilizzo o di riciclo di alta qualità dei principali elementi edilizi dopo la decostruzione (European Commission, 2020).

Tali aspetti, evidenziano di fatto l'importanza di lavorare sulla valorizzazione delle filiere in modo tale che la maggior parte del valore del materiale sia conservato e recuperato alla fine della vita dell'edificio anche grazie all'adozione di approcci costruttivi con un elevato grado di industrializzazione che favoriscano il recupero per il riutilizzo o il riciclo.

Geopolimeri: nuovi materiali per la sostenibilità

| Un possibile processo chiave per il riutilizzo e la valorizzazione di un'ampia varietà di rifiuti metallurgici, industriali, urbani e agricoli, potrebbe essere rappresentato dalla produzione di materiali ad attivazione alcalina e geopolimeri (Provis, 2014; Shen et alii, 2022; Ricciotti et alii, 2020). I geopolimeri sono materiali ceramici amorfi ottenuti attraverso l'attivazione alcalina di polveri alluminosilicatiche di diversa natura, sia di origine naturale (come la caolinite) sia come sottoprodotti di altri processi industriali, quali ceneri volanti e ceneri pesanti di centrali termoelettriche a carbone, scorie di altoforno, fanghi di potabilizzazione delle acque, rifiuti da demolizione e costruzione e così via (Provis, 2014; Roviello et alii, 2020). La reazione di attivazione alcalina di materie prime alluminosilicatiche produce un reticolo tridimensionale amorfo, costituito da legami Si-O-Al-O (Fig. 1; Ricciotti et alii, 2023). Tali sistemi sono considerati una valida alternativa ai materiali a base di cemento grazie alle loro caratteristiche di elevata stabilità termica, basso ritiro, resistenza al gelo e al disgelo, agli agenti chimici e al fuoco, possibilità di essere riciclati e durabilità a lungo termine.

Applicazioni e potenzialità | Secondo Medri (2009, p. 6) «[...] i geopolimeri, sia usati puri o con cariche o rinforzati, trovano già applicazioni in molti campi dell'industria: industria aerospaziale e dell'automobile e dei loro accessori, fonderie dei metalli non ferrosi e metallurgia, ingegneria civile, industrie plastiche, trattamento dei rifiuti, restauro, arte e decorazione, biomateriali, eccetera». Alcuni particolari aspetti che li caratterizzano stanno facendo sì che i geopolimeri acquistino un ruolo di rilievo come materiali emergenti nell'ambito di quelli innovativi e sostenibili anche nel settore AEC. Ciò innanzitutto per la matrice naturale e il riuso di sottoprodotti di altri processi, ma anche perché la reazione di consolidamento del materiale dopo la formatura non necessita di alte temperature, ma ha luogo a temperatura significati-

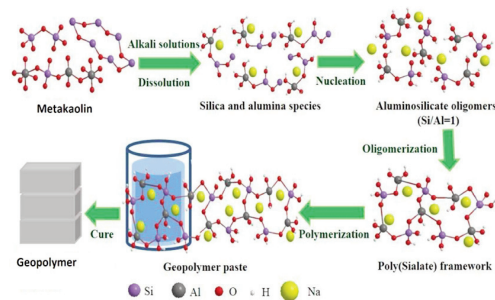


Fig. 1 | Reaction mechanism of a metakaolin-based geopolymer system (source: Ricciotti et alii, 2023).

vamente più basse attraverso un processo chimico fortemente rispettoso dell'ambiente che rende possibile anche la produzione di materiale direttamente in cantiere.

Un altro aspetto di particolare importanza è quello che i geopolimeri possono essere utilizzati nella fabbricazione digitale che può costituire una caratteristica notevole non soltanto per la riduzione di tempi e costi rispetto all'edilizia tradizionale, ma anche per l'ottimizzazione e la riduzione delle quantità di materiale adoperato che viene messo solo dove serve e viene tolto dove non serve e per la possibilità di utilizzare materiali riciclati e riciclabili successivamente. Secondo recenti studi, infatti, «[...] nowadays, the using geopolymers for 3D printing in the large-format printer is a great challenge. It offers a new perspective for the construction industry» (Korniejko et alii, 2020, p. 1). L'uso dei geopolimeri attualmente «[...] gained increasing attention because of their eco-friendly and superior mechanical characteristics and their ability to utilize numerous wastes as precursors» (Shehata et alii, 2022, p. 1).

Le attuali maggiori applicazioni dei geopolimeri nel settore delle costruzioni riguardano in particolare la produzione di mattoni, piastrelle per pavimentazione e pannelli e pareti multistrato. Il ricorso ai geopolimeri nel settore edile è attualmente al centro di numerose attività di ricerche internazionali; in particolare con applicazione sui pannelli multistrato si evidenzia la ricerca svolta nell'ambito del progetto INNOWEE⁴ riguardante lo sviluppo di pannelli isolanti per facciate e pannelli radianti per pareti e soffitti prodotti incorporando rifiuti da demolizione e costruzione in una matrice geopolimerica, il tutto sviluppato con un approccio di design integrato che tiene conto dell'intero ciclo di vita dei materiali.

Una interessante prospettiva è anche quella della produzione di conglomerati in cui il geopolimero costituisce il legante che sostituisce il tradizionale cemento. Questo potrebbe aprire scenari molto interessanti soprattutto per le potenzialità del geopolimero di porsi come «[...] a new environment-friendly cementitious material, and the development of geopolymer can reduce the carbon dioxide emission caused by the development of cement industry» (Cong and Cheng, 2021, p. 283). Da ciò deriverebbe un notevole vantaggio in termini ambientali sia per l'utilizzo di materiali riciclati e sia perché si eviterebbero i trattamenti ad alte temperature necessari per la produzione del cemento con una notevole riduzione dell'emissione di CO₂ che costituisce attualmente una notevole problematica per l'industria edile.

Dalla sperimentazione al prodotto | In linea con le attuali ricerche sulle potenzialità dei geopolimeri nel settore edilizio uno sviluppo dello studio proposto prevede la sperimentazione futura di un pannello concepito come modulo base con connessioni multiple per consentire la costruzione a secco di sistemi di involucro strutturale prefabbricati. Tale pannello si configura come monomateriale in quanto costituito da due strati esterni di geopolimero strutturale che racchiudono uno strato interno di geopolimero espanso. Rispetto a un pannello realizzato con materiali tradizionali quello in oggetto presenta notevoli vantaggi dal punto di vista dell'impatto ambientale lungo tutto il suo ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino alla gestione del fine vita.

Già nella prima fase, il consumo di risorse è molto limitato, anzi quasi nullo perché per tutti gli strati del pannello si riutilizzano scarti provenienti da altre filiere produttive. Anche la fase dell'assemblaggio non genera particolari impatti in quanto la giunzione avviene a secco e il cantiere diventa esclusivamente il luogo di assemblaggio in situ di sistemi altamente tecnologici. Il ricorso a tali pannelli, quindi, riduce notevolmente anche i tempi della costruzione. Per quanto riguarda il fine vita, un'alta propensione alla riciclabilità è sicuramente riscontrabile sia nel complesso che nei singoli strati che compongono il pannello.

Nella ricerca malte a base di geopolimeri ottenute attraverso la valorizzazione di scarti derivanti dalla produzione e dal 'fine vita' di prodotti in gres porcellanato sono proposte come materiali eco-compatibili performanti da utilizzare nel settore dell'AEC. Gli obiettivi di questo studio sono consistiti sia nell'indagare il potenziale utilizzo di grandi quantità di scarti ceramici in malte a base di geopolimeri, poiché si tratta di un'opzione interessante per le industrie ceramiche, oggi sempre più focalizzate al riciclo e alla produzione di materiali sostenibili, sia nel suggerire l'applicazione di questi materiali nel settore AEC.

Metodologia e fasi | La reazione di geopolimerizzazione si basa sull'attivazione alcalina di una materia prima alluminosilicata utilizzando una soluzione fortemente alcalina. In questo lavoro NaOH in pellet è stato sciolto nella soluzione di silicato di sodio per preparare la soluzione alcalina attivante. La soluzione così preparata è stata raffreddata e lasciata equilibrare per 24 ore. La composizione chimica della soluzione attivante alcalina è Na₂O 1,55 SiO₂ 12,14 H₂O. Il metacaolino BASF Matamax[®] è stato quindi incorporato nella soluzione attivante con un rapporto liquido-solido di 1,4:1 in peso e miscelato con un miscelatore meccanico per 10 minuti a 800 giri/min. La composizione dell'intero sistema geopolimerico può essere espressa come Al₂O₃ 3,48 SiO₂ 1,0 Na₂O 12,14 H₂O, come rivelato dall'analisi EDS effettuata sui campioni polimerizzati.

Nel presente lavoro il campione di Geopolimero ottenuto è indicato come MK e la Tabella 1 mostra la composizione delle malte a base di geopolimeri impiegate. I campioni sono stati ottenuti aggiungendo diverse percentuali in peso dei rifiuti ceramici (nell'intervallo 6-45% in peso) alla sospensione geopolimerica fresca, preparata come sopra descritto e incorporata rapidamente mediante miscelazione meccanica controllata (5 minuti a 800 giri/min). Le percentuali in massa dei

rifiuti ceramici sono state scelte in modo da non modificare significativamente la lavorabilità, i tempi di presa e le proprietà fisico-meccaniche. I rifiuti ceramici sono stati macinati prima dell'uso per ottenere una polvere fine (dimensioni delle particelle nell'intervallo 5-80 μm).

L'impasto è risultato ben lavorabile per diverse ore (la reticolazione e l'indurimento completi sono avvenuti in 5-7 ore a temperatura ambiente, 20 °C). I campioni sono di seguito indicati come GP-MK, dove GP si riferisce a rifiuti ceramici in gres porcellanato, DC-MK, dove DC si riferisce ai rifiuti ceramici pressati crudi (disco crudo), DC_{dry}-MK, dove DC_{dry} si riferisce a rifiuti ceramici pressati crudi ricotti a 450 °C per 5 ore in aria, Ge-MK, dove Ge si riferisce a rifiuti di gesso, e MIX-MK, che si riferisce a malte geopolimeriche ottenute dall'aggiunta di tutti i rifiuti ceramici.

Tutte le miscele geopolimeriche preparate sono state colate in stampi cubici (50x50x50 mm³) e fatte polimerizzare in condizioni di umidità relativa > 95% a 60 °C per 24 h. Successivamente i provini sono stati tenuti a temperatura ambiente per altri 6 giorni in condizioni di umidità relativa > 95% e poi per altri 21 giorni all'aria. Le resistenze a compressione sono state misurate secondo la norma EN 196-1 impiegando provini cubici di dimensioni 40x40x40 mm³. Le prove sono state eseguite dopo 28 giorni di maturazione a temperatura ambiente e i valori riportati sono le medie di cinque valori di resistenza a compressione. Le prove di compressione sono state eseguite fino all'addensamento e/o alla rottura del campione a una velocità di spostamento costante di 2 kN/s.

Discussione e risultati | In dettaglio sono stati preparati diversi tipi di malte geopolimeriche utilizzando tutti i tipi di sottoprodotti del processo di produzione del gres porcellanato (gres porcellanato di scarto, scarti ceramici pressati crudi, scarti ceramici pressati attivati termicamente e gesso derivante da stampi esausti). I materiali ottenuti sono stati caratterizzati dal punto di vista microstrutturale e fisico-meccanico. La composizione delle malte geopolimeriche è riportata in Tabella 1 mentre la composizione chimica delle materie prime utilizzate, in termini dei principali ossidi, descritta nel paragrafo precedente, è riportata in Tabella 2. Per evidenziare la microstruttura dei campioni nella Figura 2 sono riportate le micrografie SEM delle superfici di frattura dei campioni geopolimerici dopo indurimento.

Il campione di geopolimero privo di aggregati (Fig. 2A) mostra una struttura amorfa omogenea con la presenza di alcune fratture (che potrebbero essere state prodotte durante il taglio del campione per ottenere la superficie di frattura da analizzare). La microstruttura ampiamente omogenea suggerisce che la reazione di geopolimerizzazione è andata a buon fine. Nel caso del campione GP-MK (Fig. 2B), la morfologia è caratterizzata dalla presenza di particelle di riempimento GP ben incorporate nella matrice geopolimerica omogenea e compatta e fortemente adesiva ad essa; non sono state rilevate fratture. Per quanto riguarda la morfologia e la microstruttura dei campioni DC-MK e DC_{dry}-MK (Figg. 2C, 2D), esse appaiono molto simili e per entrambi i campioni non è possibile riconoscere gli aggregati di scarto. Tale osservazione permette di affermare che gli aggregati trattati termicamente siano stati convertiti nella fase

metacaolinica reattiva e abbiano reagito in condizioni di attivazione alcalina. Le malte di cui ai campioni DC-MK e DCdry-MK mostrano una microstruttura più coerente rispetto alla pasta geopolimerica, con una quantità ridotta di microfessure.

Una morfologia diversa è stata osservata nel caso del campione Ge-MK (Fig. 2F), in cui è possibile individuare la presenza di cristalli di carbonato di calcio e solfato di sodio distribuiti nella matrice geopolimerica. Infine, anche il campione MIX-MK (Fig. 2E) mostra una morfologia piuttosto omogenea, dove, come nel caso del campione GP-MK, è possibile riconoscere particelle aggregate di GP con dimensioni di circa 100 µm fortemente compenstrate nella matrice geopolimerica.

Le proprietà fisico-meccaniche sono descritte nella Tabella 3 che riporta i valori di resistenza a compressione, densità e assorbimento d'acqua dei campioni geopolimerici preparati. Tutte le malte geopolimeriche presentano valori di densità superiore al campione geopolimerico di riferimento (MK). Ciò è dovuto alla presenza di una quantità significativa (cfr. Tab. 1 per il mix design) di aggregati di scarto costituiti da materiali di densità superiore rispetto al campione MK (la densità tipica del gres porcellanato e delle argille pressate è di circa 2,6 g/cm³). L'unica eccezione è rappresentata dalla malta Ge-MK, in cui è possibile notare che il valore di densità è molto simile a quello del campione MK. Questo dato è in linea con l'elevata capacità di assorbimento d'acqua del campione, dovuta all'alta affinità del solfato di calcio con l'acqua. Tale caratteristica diminuisce la lavorabilità dell'impasto geopolimerico, riducendo fortemente il tempo di presa e causando così l'incorporazione di una maggiore quantità di aria rispetto alle altre malte, ottenendo un prodotto finale con il valore di densità più basso (1.335 kg/m³).

Una tendenza simile si può evidenziare anche esaminando i valori di resistenza a compressione dei diversi campioni (terza riga della Tab. 3). Come si può notare, ad eccezione della malta Ge-MK, tutti gli altri campioni mostrano una resistenza a compressione paragonabile o addirittura superiore a quella del geopolimero puro, con un aumento dei valori di resistenza a compressione fino al 40%, a indicare che l'aggiunta degli aggregati ha un notevole effetto migliorativo sulle proprietà meccaniche dei materiali. Il miglioramento più evidente delle proprietà meccaniche è stato registrato per il campione DC_{dry}-MK. Questo importante incremento della resistenza a compressione è probabilmente dovuto alla presenza nel campione di partenza di una maggiore quantità di fase reattiva (metakaolino aggiuntivo prodotto dalla calcinazione della caolinite a 450 °C).

A differenza di questo campione la malta Ge-MK mostra proprietà meccaniche più modeste, con una riduzione di circa l'85% del valore di resistenza a compressione rispetto al geopolimero puro (MK). In sostanza, la presenza di gesso all'interno della pasta influisce negativamente sulle proprietà meccaniche del prodotto finale, in quanto il gesso è una fonte di ioni Ca, competitivi con la reazione di geopolimerizzazione (Provis and van Deventer, 2009; Botti et alii, 2020). Al fine di valorizzare gli scarti in gesso è stata realizzato il campione MIX-MK che ha permesso di includere fino al 7% in peso di gesso senza compromettere significativamente le proprietà meccaniche del prodotto finale, un risultato che, a nostra conoscenza,

non era mai stato ottenuto in precedenza utilizzando aggregati con un'alta concentrazione di calcio reattivo (Tab. 1). È importante sottolineare che il materiale ottenuto presenta buone proprietà meccaniche nonostante la sua elevata capacità di assorbimento d'acqua (> 25% in peso), piuttosto superiore a quella del geopolimero puro (18% in peso).

LCA per il controllo degli impatti ambientali |

Un'analisi comparativa del ciclo di vita (LCA) con metodo 'cradle to grave' tra i processi produttivi di prodotti in gres porcellanato e materiali geopolimerici a base di scarti ceramici ha confermato l'efficacia dell'approccio di eco-design che rappresenta un forte contributo alla sostenibilità ambientale ed economica dell'industria ceramica italiana. Gli impatti ambientali generati dal ciclo di vita di 1 mc di prodotti in gres porcellanato artistico sono stati confrontati con quelli di 1 mc delle malte geopolimeriche ottenute a partire da scarti e sottoprodotti del gres porcellanato: GP-MK; DC-MK; DC_{dry}-MK; Ge-MK e MIX-MK (Fig. 3). Per ogni sistema analizzato sono stati considerati gli impatti ambientali delle materie prime e del consumo energetico del processo produttivo.

Per quanto riguarda le malte geopolimeriche, gli impatti derivanti dall'uso del silicato di sodio commerciale (barre blu scuro della Fig. 3A) sono stati confrontati con quelli del silicato di sodio pro-

dotto da rifiuti (barre blu chiaro della Fig. 3A). È importante evidenziare che, per le malte geopolimeriche, il consumo energetico per il processo produttivo è stato stimato in precedenti studi degli autori (Ricciotti et alii, 2020): 2 kWh per la miscelazione della pasta; 12 kWh per il processo di curing termico in camera climatica a 60 °C per 12 ore, 1 kWh per il taglio dei campioni. Per quanto riguarda il processo di produzione del gres porcellanato, i dati sul consumo energetico sono stati forniti direttamente dall'azienda: circa 1950 kWh per l'intero processo produttivo.

È importante evidenziare che il processo di produzione dei geopolimeri permette di riciclare e valorizzare gli scarti industriali e di risparmiare circa il 97% dell'energia rispetto al gres porcellanato (Fig. 3B). Pertanto la tecnologia basata sul gres porcellanato risulta essere più dipendente dai costi di fornitura di gas naturale rispetto a quello dei geopolimeri: la tecnologia impiegata ottenere i materiali geopolimerici risulta molto vantaggiosa sia da un punto di vista ambientale che economico in Paesi come l'Italia (non produttori di petrolio) dove il costo dell'energia è molto elevato.

In termini di Potenziale di Riscaldamento Globale (GWP) il gres porcellanato mostra i valori più alti tra i sistemi studiati (circa il 37% in più rispetto alle malte geopolimeriche); il materiale che mostra il contributo GWP più basso è MIX-MK (41% in meno rispetto al gres porcellanato). Inoltre l'analisi

Materials (wt%)	GP-MK	DC-MK	DCdry-MK*	Ge-MK	MIX-MK
Metakaolin	10-20	10-20	10-20	10-15	10-20
NaOH	5-10	5-10	5-10	7-10	5-10
Sodium silicate	30-40	30-40	30-40	46-56	30-40
Porcelain stoneware waste	30-40	-	-	-	20-30
Raw pressed	-	30-40	30-40	-	16-32
Gypsum	-	-	-	12-22	6-12

* The raw disc was treated in an oven at 450 °C for 5 hours before use

Tab. 1 | Mix design of geopolymer mortars and their physical and mechanical properties (MK: metakaolin; Ge: gypsum; DC: raw disc; and GP: porcelain stoneware).

Compound	Metakaolin	Sodium silicate
Al ₂ O ₃	45.20	-
SiO ₂	52.30	23.50
K ₂ O	0.15	-
Al ₂ O ₃	0.42	-
Na ₂ O	-	11.75
MgO	0.04	-
H ₂ O	-	64.75

Tab. 2 | Chemical composition (% by weight) in terms of main oxides of the metakaolin and sodium silicate solution used in this work; other oxides (e.g., CaO, TiO₂, SO₃) with a relative abundance of less than 1% by weight were not explicitly stated.

dei risultati mostra che, a differenza del gres porcellanato, per le malte geopolimeriche (Fig. 3B) la maggior parte degli impatti ambientali sono attribuibili alle materie prime di partenza: solo l'1% circa del GWP è dovuto al consumo di energia del processo produttivo; la parte restante è attribuibile agli impatti delle materie prime (Fig. 3B).

Validazione attraverso modellazione BIM | Le recenti sperimentazioni e applicazioni nella modellazione parametrica del costruito rivolgono il loro interesse all'impiego di dati ambientali e tecnici degli elementi da costruzione per agevolare la valutazione delle prestazioni in chiave sostenibile di una costruzione durante il suo ciclo di vita (ISO, 2022). Nell'ambito della modellazione parametrica il Building Information Modeling (BIM) costituisce la piattaforma di archiviazione e gestione della ampia mole di informazioni connessa a ciascun componente edilizio anche in relazione ai materiali che lo costituiscono al fine di definire parametri e indicatori validi per la definizione dei comportamenti degli edifici. Le applicazioni della modellazione parametrica computerizzata alla progettazione architettonica hanno permesso l'integrazione non solo delle informazioni geometriche e formali dell'edificio, ma anche delle relative informazioni provenienti da tutte le aree e competenze coinvolte nel processo di costruzione. Nell'ambito delle attività condotte, coerentemente sia con gli obiettivi generali del progetto di ricerca discusso in tale sede che con quelli specifici connessi alla modellazione parametrica, la fase successiva alla caratterizzazione dei mix design ha interessato anche l'impiego del BIM per la replica in digitale dei materiali a base geopolimerica studiati. La costruzione di un gemello digitale attraverso piattaforma BIM ha come obiettivo la verifica e la validazione delle scelte progettuali e nel caso specifico permetterà nelle successive fasi del progetto di valutare in digitale le applicazioni dei mix geopolimerici a componenti edilizi.

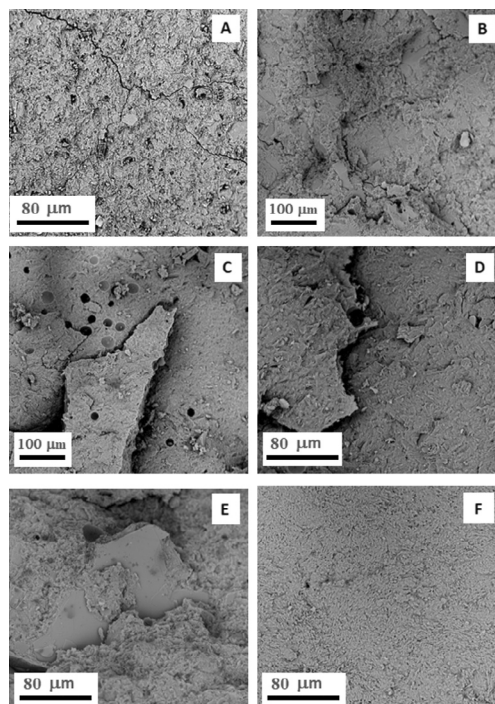


Fig. 2 | SEM micrographs of (A) geopolymer without aggregates; (B) GP-MK; (C) DC-MK; (D) DC_{dry}-MK; and (F) Ge-MK at 10000x and 15000x magnifications.

È noto che le piattaforme di BIM permettono la costruzione di un gemello digitale di un edificio e di ogni suo componente edilizio, registrando per ciascuno di essi non solo le caratteristiche geometrico-dimensionali ma anche quelle fisico-mecchaniche. È stato pertanto possibile trasferire all'interno del database dei materiali del modellatore parametrico i dati emersi dalle prove sperimentali sui geopolimeri. Lo studio in oggetto si è avvalso della piattaforma Autodesk Revit® anche per i vantaggi offerti nella classificazione dei parametri connessi ai singoli materiali non solo in relazione ad aspetti grafici e di visualizzazione delle scelte formali, ma anche in rapporto a caratteristiche fisiche e termiche oltre che per i tool per la personalizzazione dei parametri.

In particolare il processo di ricerca è articolato secondo un particolare flusso di lavoro che prevede specifiche fasi operative legate a: digitalizzazione dei mix design di malte geopolimeriche e relative proprietà; modellazione parametrica di un pannello modulare multistrato; verifica circa l'applicabilità delle scelte progettuali. In tale fase del progetto di ricerca sono stati registrati per le diverse composizioni delle malte geopolimeriche prodotte sperimentalmente i valori relativi alla densità, alla resistenza a compressione e alla percentuale di assorbimento di acqua. L'archiviazione di tali dati è stata effettuata trasferendo i dati in un foglio di calcolo e programmando uno script per il trasferimento automatico al modellatore parametrico dei dati di caratterizzazione delle malte geopolimeriche (Fig. 4). Tale processo è stato favorito da Dynamo, un linguaggio di programmazione visuale interno alla stessa piattaforma di Autodesk Revit® (Jayasinghe and Waldmann, 2020).

La sperimentazione è proseguita attraverso una prima validazione circa l'applicabilità dei materiali a base geopolimerica a un pannello modulare multistrato precedentemente illustrato sui cui definire i primi dati di verifica sui diversi mix. La modellazione della stereometria del pannello si è basata su geometrie parametriche che definissero i due strati strutturali esterni e di uno strato espanso intermedio. La scelta dei parametri geometrici e dimensionali ha permesso la definizione delle caratteristiche metriche da modificare (spessori e dimensioni dei pannelli, nonché tipo di mix impiegato) e dei dati invarianti del modello (vincoli geometrici tra gli strati e tra pannelli).

La parametricità del modello permette la sperimentazione in digitale di differenti possibili alternative anche in relazione alla combinazione dei diversi mix per le parti componenti il pannello. Le variazioni di tali parametri e l'associazione delle diverse malte di geopolimeri nella stratigrafia del pannello validerà nelle successive fasi della ricerca le scelte effettuate (Figg. 5, 6). Gli esiti delle verifiche sperimentali condotte attraverso modello parametrico non sono ancora disponibili e i risultati saranno discussi a conclusione del progetto di ricerca.

Nello specifico, nell'ambito di nuovi scenari basati sulla simulazione digitale del progetto attraverso la modellazione parametrica, tali informazioni possono costituire anche parametri condivisi per le applicazioni a modelli BIM sviluppati per edifici di nuova costruzione o già esistenti, così come per la sperimentazione di elementi autoportanti da produrre attraverso processi di stampa 3D, validando non solo le caratteristiche del singolo elemento costruttivo ma anche la performance

globale dell'edificio (Raza, Zhong and Khan 2022). Tali valutazioni potranno essere orientate anche nella direzione della settima dimensione del BIM relativa alla rispondenza delle scelte tecnologico-progettuali con i principi di sostenibilità (UNI, 2017; Wang and Liu, 2020).

Conclusioni | Il presente lavoro, anche attraverso applicazioni sperimentali, illustra il potenziale tecnologico derivante dall'impiego dei geopolimeri, soprattutto dal punto di vista degli approcci orientati alla riduzione degli impatti ambientali sia per quanto riguarda il risparmio di materia prima che l'utilizzo della fabbricazione digitale, input importante per aumentare la sostenibilità nell'ambito dei processi di costruzione e dismissione. In particolare, sono descritte la preparazione e la caratterizzazione di nuove malte geopolimeriche ottenute dal riciclo di scarti derivanti dal processo produttivo e dal 'fine vita' di prodotti in gres porcellanato.

Tali malte geopolimeriche sono state ottenute utilizzando metacaolino, una soluzione alcalina attivante e diversi tipi di sottoprodotti della dismissione di materiali ceramici. I dati emersi dalla sperimentazione dei campioni ottenuti in relazione alle specifiche proprietà fisico-meccaniche e all'analisi del ciclo di vita hanno consentito un primo approfondimento relativo al loro impiego nella modellazione di un pannello multistrato.

Il pannello oggetto di sperimentazione è un sistema che ottimizza le potenzialità del materiale geopolimero, costituito da due strati strutturali esterni in geopolimero che racchiudono un layer interno in geopolimero schiumato. Pertanto, a differenza di altri prodotti sperimentati in cui si aggiungono altri materiali, ad esempio il polistirene espanso (EPS) per le sue proprietà di peso ridotto e isolamento termico, il pannello risulta monomaterico e tale caratteristica influisce positivamente sulla fase di dismissione del componente.

Il pannello, la cui definizione progettuale e prototipazione costituirà il punto di partenza di uno sviluppo scientifico successivo, è strutturato come un modulo base per consentire la realizzazione a secco di sistemi strutturali prefabbricati che, consentendo il disassemblaggio, favoriscono il riuso e il riciclo a fine vita di molti degli elementi utilizzati implementando l'applicazione di logiche circolari. Il tutto mirando al perseguimento di percorsi innovativi per fornire un contributo chiave all'economia circolare nel contesto del pacchetto e degli obiettivi Next Generation EU e degli obiettivi delle più recenti direttive UE. Si evidenzia infine che i limiti della ricerca sono prevalentemente riconducibili alla necessità di ampliare e diversificare la campionatura e alle barriere legislative connesse all'impiego dei geopolimeri e dei relativi prodotti rallentandone in tal modo la diffusione e commercializzazione.

The scientific literature on sustainable building, in outlining its distinctive features, emphasises the use of design and construction solutions that consider natural resources and the surrounding environment from the conception stage (Sinopoli and Tatano, 2002; Raiteri, 2012; Colajanni and Valenza, 2021). This sector, however, while often boasting of moving toward sustainability, still traditionally operates in most cases, uses a lot of material, and

Sample Properties	MK	GP-MK	DC-MK	DC _{dry} -MK	Ge-MK	MIX-MK
Density (kg/m ³)	1370	1773±95	1718±80	1687±90	1335±99	1627±77
Water absorption (%)	18±1	16±1	18±1	19±1	>25	>25
Compressive strength (MPa)	25±2	30±1	25±3	41±3	4.0±0.5	38±2

The water absorption value for samples containing gypsum, which exceeds 25%, is not reported

Tab. 3 | Physical and mechanical properties of geopolymeric sample (MK) and geopolymeric mortars made from porcelain stoneware waste (GP-MK), crude pressed waste (DC-MK), calcined pressed waste (DC_{dry}-MK), gypsum (Ge-MK), and geopolymeric mortar obtained by mixing the waste (MIX-MK).

is responsible for a large amount of waste. To support a change of direction, there is a need to work according to approaches geared toward reducing environmental impacts throughout the building life cycle through the introduction of both innovative materials, as much as possible with a natural matrix, and construction processes that optimise the number of raw materials used and facilitate their recyclability (Sposito and Scalisi, 2019).

It must also be considered that currently a strategic role in improving the ecological-environmental performance of the construction sector (AEC – Architecture Engineering Construction) is played by digital infrastructures for which sustainability and digitisation are increasingly emerging as an indispensable pair. Indeed, digital technology is helping to materialise the transition to circular models declined considering the specificities of the application context and allowing for greater transparency with regard to products, material flows, and solutions adopted (Azhar, 2011; Wang and Liu, 2020). Sustainability and digitisation are the basis of the work presented, which illustrates the first outcomes of interdisciplinary research developed as part of a project funded following a competitive call for proposals¹. The project's objective is to study the application of geopolymers as materials for the 3D printing of eco-oriented building components.

In the field of innovative and sustainable materials, geopolymers have potential both because of their natural matrix and because they can be used in digital fabrication, which can be an essential input for improving sustainability in construction processes as well. In this way, digital processes, using parametric software and advanced designs, provide input not only for the reduction of time and costs compared to traditional construction, but also for the optimisation and reduction of the quantities of material used and for the possibility of using recycled and subsequently recyclable materials.

The main aim of the contribution is to investigate the potential of geopolymer technology in the context of circular approaches applied to construction. This potential will be illustrated through the research path developed and, therefore, considering the state-of-the-art also about production world, the contribution will report the phases and results of the experimentation conducted. Although partial, the results highlight the achievement of important objectives concerning the properties of the materials tested and the implications in terms of environmental impacts in relation to the samples obtained by integrating different weight percentages of ceramic waste. The data that emerged and are reported within the contri-

bution not only allowed a first digital simulation of the product through parametric modeling but also constitute an advancement that can support the scientific community engaged in the study of the potential of geopolymers, especially with a view to the valorisation of different production chains.

Circularity scenarios in the construction field |

By experimenting with design approaches centred on the logic of circularity, systems and products can be rethought according to an integrated, inter-scalar vision that supports the transition to more resilient and ecologically performing living environments (Dufourmont, Papú Carrone and Haigh, 2020). Cities and buildings are, in close analogy to living organisms, complex and dynamic systems characterised by their own metabolism (Princetl, Bunje and Holmes, 2012; Pollo, Trane and Giovanardi, 2021) that feed on goods and resources which are only partially assimilated for the proper functioning of the systems themselves.

Indeed, like any linear-type system, they produce services and products on the one hand and environmental impacts on the urban ecosystem in terms of emissions and waste on the other. Working on methodologies aimed at reducing and eliminating these metabolic dysfunctions means supporting the transition to renewable energies and materials² through scalable strategies and solutions that address the most current challenges. Challenges that, as also emerged from a recent scientific seminar in Environmental Design (Tucci et alii 2021), concern climate change (and climate neutrality), resource circularity, and environmental quality (also in relation to health).

The research work that is presented shares this premise as well as a systemic and interdisciplinary methodological approach and is strongly interconnected with the three principles that guide circular design: the elimination of waste and pollution, the circulation of products and materials (at their highest value) and the regeneration of nature. An interconnection that is detected not only at the strategic level but also at the operational level. Examining Arup's Circular Buildings Toolkit³, a tool designed as design support for construction, several aspects emerge that confirm the strategic role of innovative materials as much as possible with a natural matrix, low emissions and that avoid pollutants, as well as the use of construction processes that optimise the number of raw materials used and facilitate their recyclability.

In particular, the priority actions identified in the Toolkit, especially concerning the strategies of 'building efficiently' and 'building with the right materials', deal with some key aspects that relate precisely to reducing both the use of virgin and

non-renewable materials and carbon-intensive materials, as well as the design of non-hazardous / polluting materials. These aspects are strongly connected with the research project, whose main objective is to investigate the potential of geopolymer technology in terms of using waste and industrial by-products to produce new building components. Therefore, these operational indications are incorporated within the tested digital model, thus enriching the information system that will guide subsequent project choices from the perspective of circularity.

The research activity also operates in line with Level(s), the European Framework for Sustainable Buildings, a voluntary tool that identifies a set of macro-objectives for assessing and reporting on the sustainability performance of buildings. Specifically, it responds to macro-Objective 2 – Resource Efficient and Circular Material Life Cycles (Dodd, Donatello and Cordella, 2021), whose focus is on reducing waste, optimising the use of materials, and minimising the environmental impacts of projects and material choices throughout the life cycle. A goal can be achieved by facilitating the future circular use of building components, focusing on producing less waste and the potential for reuse or high-quality recycling of key building elements after deconstruction (European Commission, 2020).

These aspects highlight the importance of working on the valorisation of supply chains in such a way that most of the value of the material is retained and recovered at the end of the building's life also through the adoption of construction approaches with a high degree of industrialisation that encourage recovery for reuse or recycling.

Geopolymers: new materials for sustainability |

One possible key process for reuse and valorisation of a wide variety of metallurgical, industrial, municipal, and agricultural wastes could be the production of alkaline-activated materials and geopolymers (Provis, 2014; Shen et alii, 2022; Ricciotti et alii, 2020). Geopolymers are amorphous ceramic materials obtained through the alkaline activation of aluminosilicate powders of different kinds, either of natural origin (such as kaolinite) or as by-products of other industrial processes, such as fly ash and bottom ash from coal-fired power plants, blast furnace slag, water purification sludge, demolition and construction waste, and so on (Provis, 2014; Roviello et alii, 2020). The alkaline activation reaction of aluminosilicate raw materials produces an amorphous three-dimensional network consisting of Si-O-Al-O bonds (Fig. 1; Ricciotti et alii, 2023). Such systems are considered a suitable alternative to cement-based materials

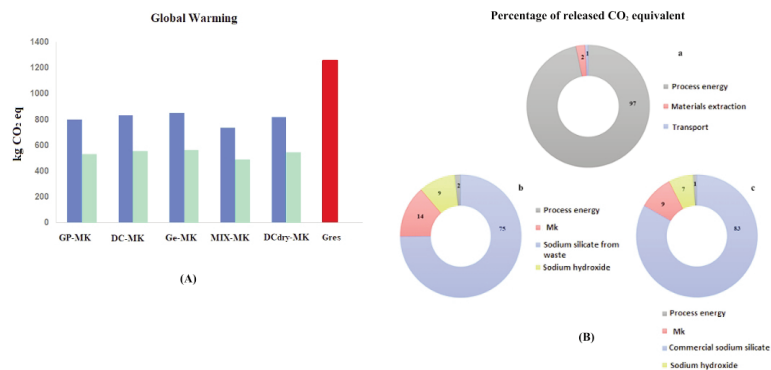


Fig. 3 | LCA results of material production expressed with EPD impact categories. In the image on the left, the blue bars refer to the use of commercial sodium silicate, while the green bars refer to the use of waste-produced sodium silicate (A); in the figure on the right, the percentage of CO₂ equivalent released as a function of the material production process is shown, in terms of comparing the production process of stoneware (a), geopolymer mortar with waste-produced sodium silicate (b) and geopolymer mortar with commercial sodium silicate (c).

because of their characteristics of high thermal stability, low shrinkage, resistance to freezing and thawing, chemicals and fire, ability to be recycled, and long-term durability.

Applications and potential | According to Medri (2009), geopolymers, whether used pure or with fillers or reinforced, already have applications in many fields of industry, such as aerospace and automotive industries and their accessories, non-ferrous metal foundries and metallurgy, civil engineering, plastics industries, waste treatment, restoration, art and decoration, and biomaterials. Furthermore, some particular aspects that characterise them are causing geopolymers to acquire an important role as emerging materials in the context of innovative and sustainable ones also in the AEC sector. This is primarily due to the natural matrix and the reuse of by-products from other processes, but also because the consolidation reaction of the material after forming does not require high temperatures, but takes place at significantly lower temperatures through a highly environmentally friendly chemical process which also makes it possible to produce material directly on site.

Another aspect of particular importance is that geopolymers can be used in digital manufacturing, which can constitute a significant characteristic not only for the reduction of time and costs compared to traditional construction but also for the optimisation and reduction of the quantities of material used that is placed only where it is needed and is removed where it is not required and for the possibility of using recycled and subsequently recyclable materials. In fact, according to recent studies, «[...] nowadays, the using geopolymers for 3D printing in the large-format printer is a great challenge. It offers a new perspective for the construction industry» (Korniejenko et alii, 2020, p. 1). The use of geopolymers currently «[...] gained increasing attention because of their eco-friendly and superior mechanical characteristics and their ability to utilise numerous wastes as precursors» (Shehata et alii, 2022, p. 1).

The current significant applications of geopolymers in the construction sector are mainly in producing bricks, floor tiles, and multilayer panels and walls. The use of geopolymers in the construction sector is currently the focus of several international research activities; in particular, with regard to the application to multilayer panels, we highlight the research carried out as part of the INNOWEE⁴ project concerning the development of insulating facade panels and radiant wall and ceiling panels produced by incorporating demolition and construction waste into a geopolymer ma-

trix, all developed using an integrated design approach that takes into account the entire life cycle of the materials.

An interesting prospect is also the production of conglomerates in which geopolymer constitutes the binder that replaces traditional cement. This could open up very interesting scenarios mainly because of the potential of geopolymer to stand as «[...] a new environment-friendly cementitious material, and the development of geopolymer can reduce the carbon dioxide emission caused by the development of cement industry» (Cong and Cheng, 2021, p. 283). This would result in a significant advantage in environmental terms for using recycled materials because the high-temperature treatments necessary to produce cement would be avoided with a considerable reduction in CO₂ emissions, which currently constitutes a significant problem to the construction industry.

From experimentation to product | In line with current research on the potential of geopolymers in the building sector, a development of the proposed study, foresees the future experimentation of a panel conceived as a basic module with multiple connections to allow the dry construction of prefabricated structural envelope systems. This panel is configured as a single material consisting of two outer layers of structural geopolymer enclosing an inner layer of expanded geopolymer. Compared to a panel made with traditional materials, the one in question has significant advantages in terms of environmental impact throughout its life cycle, from raw material extraction to end-of-life management.

Even in the first phase, resource consumption is minimal, almost zero, because all the panel layers reuse waste from other production chains. Even the assembly phase does not generate any particular impacts because the joining takes place dry, and the construction site becomes exclusively the place for the in-situ assembly of highly technological systems. The use of such panels, therefore, also significantly reduces construction time. As far as end-of-life is concerned, a high propensity for recyclability can certainly be found both in the whole and the individual layers that make up the panel.

The research proposes geopolymer-based mortars obtained through waste valorisation from the production and the 'end-of-life' of porcelain stoneware as eco-friendly performance materials for use in the AEC sector. The objectives of this study were both to investigate the potential use of large quantities of ceramic waste in geopolymer-based mortars, as this is an attractive option for

ceramic industries, now increasingly focused on recycling and production of sustainable materials and to suggest the application of these materials in the AEC sector.

Methodology and phases | The geopolymerisation reaction is based on the alkaline activation of an aluminosilicate raw material using a highly alkaline solution. In this paper, NaOH pellets were dissolved in the sodium silicate solution to prepare the alkaline activating solution. The solution thus prepared was cooled and allowed to equilibrate for 24 hours. The chemical composition of the alkaline activating solution is Na₂O 1.55 SiO₂ 12.14 H₂O. BASF Matamax[®] metakaolin was then incorporated into the activating solution with a liquid-to-solid ratio of 1.4:1 by weight and mixed with a mechanical mixer for 10 minutes at 800 rpm. The composition of the whole geopolymer system can be expressed as Al₂O₃ 3.48 SiO₂ 1.0 Na₂O 12.14 H₂O, as revealed by EDS analysis performed on the cured samples.

In the present work, the obtained Geopolymer sample is referred to as MK. Table 1 shows the composition of the geopolymer-based mortars used. The samples were obtained by adding different weight percentages of the ceramic wastes (in the range of 6-45% by weight) to the fresh geopolymer suspension, prepared as described above and incorporated rapidly by controlled mechanical mixing (5 minutes at 800 rpm). The mass percentages of the ceramic wastes were chosen not significantly to change the workability, setting time and physical-mechanical properties. The ceramic wastes were ground before use to obtain a fine powder (particle size in the range of 5-80 μm).

The mixture was found to be well workable for several hours (complete cross-linking and curing occurred in 5-7 hours at room temperature, 20 °C). The samples are hereafter referred to as GP-MK, where GP refers to porcelain ceramic waste, DC-MK, where DC refers to raw pressed ceramic waste (raw disc), DC_{dry}-MK, where DC_{dry} refers to raw pressed ceramic waste annealed at 450 °C for 5 hours in the air, Ge-MK, where Ge refers to gypsum waste, and MIX-MK, which refers to geopolymeric mortars obtained by the addition of all ceramic waste.

All prepared geopolymer mixtures were poured into cubic moulds (50×50×50 mm³) and cured under > 95% relative humidity at 60 °C for 24 hours. Subsequently, the specimens were kept at room temperature for another six days at > 95% relative humidity and then for another 21 days in the air. Compressive strengths were measured

according to EN 196-1 using cubic specimens of dimensions 40x40x40 mm³. The tests were performed after 28 days of curing at room temperature, and the values reported are the averages of five compressive strength values. Compressive tests were performed until the specimen densified and / or broke at a constant displacement rate of 2 kN/s.

Discussion and results | In detail, different types of geopolymer mortars were prepared using all kinds of by-products of the porcelain stoneware production process (waste porcelain stoneware, raw pressed ceramic waste, gypsum from exhausted moulds and heat-activated pressed ceramic waste). The obtained materials were characterised microstructurally and physico-mechanically. The composition of the geopolymer mortars is shown in Table 1, while the chemical composition of the raw materials used, in terms of the main oxides, described in the previous section, is reported in Table 2. To highlight the microstructure of the samples, SEM micrographs of the fracture surfaces of the geopolymer samples after curing are shown in Figure 2.

The aggregate-free geopolymer sample (Fig. 2A) shows a homogeneous amorphous structure with some fractures (which might have been produced during the sample cutting to obtain the fracture surface for analysis). The largely homogeneous microstructure suggests that the geopolymerisation reaction was successful. In the case of the GP-MK sample (Fig. 2B), the morphology is characterised by the presence of GP filler particles well embedded in the homogeneous and compact geopolymer matrix and strongly adhered to

it. No fractures appear to be present. As for the morphology and microstructure of the DC-MK and DC_{dry}-MK samples (Fig. 2C, 2D), they appear to be very similar, and for both samples it is impossible to recognise waste aggregates.

This observation allows us to affirm that the heat-treated aggregates were converted to the reactive metakaolin phase and reacted under alkaline activation conditions. The mortars DC-MK and DC_{dry}-MK show a more consistent microstructure than the geopolymer paste, with a reduced amount of micro-cracks.

A different morphology was observed in the case of sample Ge-MK (Fig. 2F), in which the presence of calcium carbonate and sodium sulfate crystals distributed in the geopolymer matrix can be detected. Finally, the MIX-MK sample (Fig. 2E) also shows a rather homogeneous morphology, where, as in the case of the GP-MK sample, it is possible to recognise aggregated GP particles with a size of about 100 µm strongly interpenetrated in the geopolymer matrix.

The physical-mechanical properties are described in Table 3, which reports the compressive strength, density and water absorption values of the prepared geopolymer samples. All geopolymer mortars show density values higher than the reference geopolymer sample (MK). This is due to a significant amount (see Tab. 1 for mix design) of waste aggregates of higher-density materials than the MK sample (the typical density of porcelain stoneware and pressed clays is about 2.6 g/cm³). The only exception is the Ge-MK mortar, where it can be seen that the density value is very similar to that of the MK sample. This finding is in line with the high water absorption capacity of the sample

due to the high affinity of calcium sulfate with water. This characteristic decreases the workability of the geopolymer mixture, significantly reducing the setting time and thus causing the incorporation of more air than other mortars, resulting in a final product with the lowest density value (1,335 kg/m³).

A similar trend can also be seen by examining the compressive strength values of the different samples (third row of Tab. 3). As can be noticed, except the Ge-MK mortar, all other samples show comparable or even higher compressive strength than the pure geopolymer, with an increase in compressive strength values of up to 40 %, indicating that the addition of the aggregates has a significant improving effect on the mechanical properties of the materials. The most noticeable improvement in mechanical properties was recorded for the DC_{dry}-MK sample. This significant increase in compressive strength is probably due to a more reactive phase (additional metakaolin produced by calcination of kaolinite at 450 °C) in the starting sample.

In contrast to this sample, the Ge-MK mortar shows more modest mechanical properties, with a reduction of about 85% in compressive strength value compared to the pure geopolymer (MK). In essence, the presence of gypsum within the paste negatively affects the mechanical properties of the final product, as gypsum is a source of Ca ions, which are competitive with the geopolymerisation reaction (Provis and van Deventer, 2009; Botti et alii, 2020). To enhance the value of gypsum waste, the MIX-MK sample was made, which allowed the inclusion of up to 7% by weight of gypsum without significantly compromising the

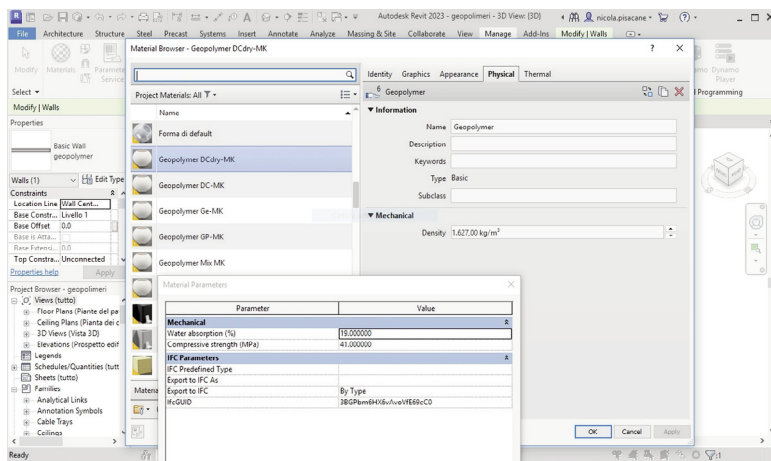


Fig. 4 | Geopolymer mortars mix designs digital modeling and parameters related to physical and mechanical properties.

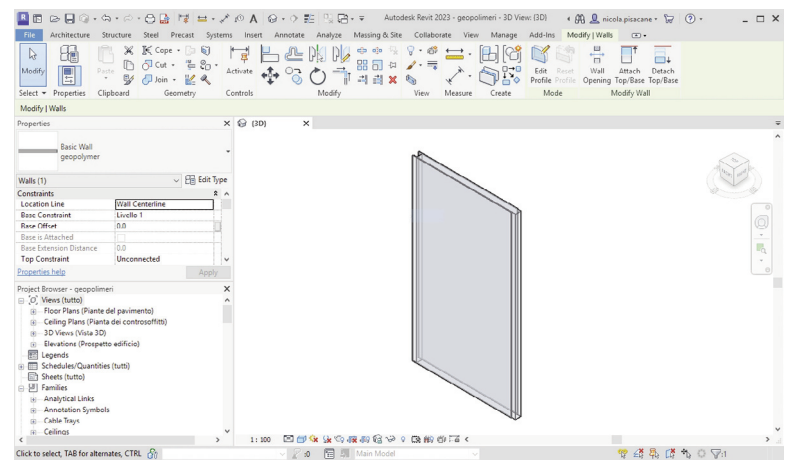


Fig. 5, 6 | Geopolymer mortars multilayer modular panel parametric modeling: geometric structure; stratigraphy.

mechanical properties of the final product, a result that, to our knowledge, had never been previously achieved using aggregates with a high concentration of reactive calcium (Tab. 1). Significantly, the obtained material exhibits good mechanical properties despite its high water absorption capacity (> 25% by weight), which is rather higher than that of pure geopolymers (18% by weight).

LCA for the control of environmental impacts

A comparative life cycle analysis (LCA) using a 'cradle to grave' method between the production processes of porcelain stoneware products and geopolymeric materials made from ceramic waste confirmed the effectiveness of the eco-design approach as a strong contribution to the environmental and economic sustainability of the Italian ceramic industry. The environmental impacts generated by the life cycle of 1 cubic meter of artistic porcelain stoneware products were compared with those of 1 cubic meter of geopolymeric mortars made from porcelain stoneware waste and by-products: GP-MK; DC-MK; DCdry-MK; Ge-MK and MIX-MK (Fig. 3). For each system analysed, the environmental impacts of raw materials and energy consumption of the production process were considered.

For geopolymer mortars, the impacts from the use of commercial sodium silicate (dark blue bars in Fig. 3A) were compared with those of waste-produced sodium silicate (light blue bars in Fig. 3A). It is important to point out that, for geopolymer mortars, the energy consumption for the production process has been estimated in previous studies by the authors (Ricciotti et alii, 2020): 2 kWh for mixing the paste; 12 kWh for the thermal curing process in a climatic chamber at 60 °C for 12 hours; 1 kWh for cutting the samples. As for the porcelain stoneware production process, the company provided energy consumption data: about 1950 kWh for the whole production process.

It is important to point out that the geopolymer production process allows for the recycling and valorisation of industrial waste and saves about 97% of energy compared to porcelain stoneware (Fig. 3B). Therefore, the technology based on porcelain stoneware turns out to be more dependent on natural gas supply costs than that of geopolymers. The technology enabling geopolymer materials is very advantageous both from an environmental and economic point of view in countries such as Italy (non-oil producing), where the energy cost is very high.

In terms of Global Warming Potential (GWP), porcelain stoneware shows the highest values among the systems studied (about 37% higher than geopolymer mortars). In particular, the material showing the lowest GWP contribution is MIX-MK (41% less than porcelain stoneware). In addition, analysis of the results shows that, unlike porcelain stoneware, for geopolymer mortars (Fig. 3B) most of the environmental impacts are attributable to the starting raw materials. Only about 1% of the GWP is due to the energy consumption of the production process; the remainder is attributable to the impacts of the raw materials (Fig. 3B).

Validation through BIM modeling | Recent experiments and applications in building parametric

modeling are turning their interest in using environmental and technical data of construction elements to facilitate sustainable performance assessment of a building during its life cycle (ISO, 2022). In the context of parametric modeling, Building Information Modeling (BIM) constitutes the platform for storing and managing the large amount of information related to each building component and also in relation to its constituent materials in order to define valid parameters and indicators for analysing building behaviours. Parametric computer modeling applications to architectural design have enabled the integration of geometric and formal building information and related information from all areas and skills involved in the construction process.

As part of the activities carried out, consistent with both the general objectives of the research project discussed here and the specific objectives related to parametric modeling, the phase following the characterisation of mix designs also involved using BIM for digital replication of the geopolymer-based materials studied. The construction of a digital twin through the BIM platform aims to verify and validate design choices and, in this specific case, will allow the subsequent project phases to digitally evaluate the applications of geopolymer mixes to building components.

It is known that BIM platforms allow the construction of a digital twin of a building and each of its building components, recording for each of them not only geometric-dimensional characteristics but also physical-mechanical ones. It was, therefore, possible to transfer the data that emerged from experimental tests on geopolymers within the materials database of the parametric modeller. The study in question also used the Autodesk Revit® platform because of the advantages offered in classifying parameters related to individual materials, not only in relation to graphic aspects and visualisation of formal choices but also about physical and thermal characteristics as well as tools for customising parameters.

In particular, the research process is articulated according to a detailed workflow involving specific operational phases related to the digitisation of geopolymer mortar mix designs and related properties, parametric modeling of a multilayer modular panel, and verification regarding the applicability of design choices. At this research project stage, density, compressive strength, and water absorption percentage values were recorded for different compositions of experimentally produced geopolymer mortars. The storage of these data was done by transferring the data into a spreadsheet and programming a script for automatic transfer to the parametric modeler of the geopolymer mortar characterisation data (Fig. 4). This process was aided by Dynamo, a visual programming language internal to the Autodesk Revit® platform itself (Jayasinghe and Waldmann, 2020).

Experimentation continued through initial validation of the applicability of geopolymer-based materials to a previously illustrated multilayer modular panel on which to define initial verification data on different mixes. Modeling of the panel's stereometry was based on parametric geometries defining the two outer structural layers and an intermediate foam layer. The choice of geometric and dimensional parameters allowed the definition of the metric characteristics to be changed (panel

thicknesses and sizes, as well as the type of mix used) and the model invariant data (geometric constraints between layers and panels).

The parametric nature of the model allows for digital experimentation with different possible alternatives, including the combination of different mixes for the panel's components. Variations in these parameters and the association of the different geopolymer mortars in the panel stratigraphy will validate in the subsequent stages of research the choices made (Fig. 5, 6). The outcomes of the experimental verifications conducted through the parametric model are not yet available, and the results will be discussed at the conclusion of the research project.

Specifically, in the context of new scenarios based on digital design simulation through parametric modeling, such information may also constitute shared parameters for applications to BIM models developed for new or existing buildings, as well as for experimentation with self-supporting elements to be produced through 3D printing processes, validating not only the characteristics of the individual building element but also the overall performance of the building (Raza, Zhong and Khan 2022). Such assessments could also be oriented toward the seventh dimension of BIM related to the compliance of technological-design choices with sustainability principles (UNI, 2017; Wang and Liu, 2020).

Conclusions | Thanks to practical applications, this work shows the technological potential of geopolymers, especially from the point of view of reducing environmental impacts. On the one hand, this can be done by reducing raw materials and, on the other hand, by using digital fabrication, which is important to increase the sustainability of construction and decommissioning processes. This article shows the preparation and characterisation of new geopolymeric mortars obtained by recycling waste from the production process and the 'end of life' of porcelain stoneware products.

These geopolymeric mortars have been obtained using metakaolin, an activating alkaline solution, and different kinds of by-products of ceramic materials disposal. The data that emerged from the experimentation of the samples obtained about specific physical-mechanical properties and life-cycle analysis allowed an initial investigation related to their use in modelling a multilayer panel.

The panel being tested is a system that optimises the potential of the geopolymer material, consisting of two external geopolymer structural layers enclosing a foamed geopolymer internal layer. Therefore, unlike other tested products in which other materials are added, such as expanded polystyrene (EPS) for its low weight and thermal insulation properties, the panel is made of a monolayer, and this characteristic positively affects the component disposal phase.

The panel, whose design definition and prototyping will constitute the starting point for subsequent scientific development, is structured as a basic module to allow the dry construction of prefabricated structural systems which, by allowing disassembly, favour reuse and recycling at the end life of many of the elements used by implementing the application of circular logic. All this is aimed at pursuing innovative paths to make a key

contribution to the circular economy in the context of the Next Generation EU package and objectives of the most recent EU directives. Finally,

it should be noted that the research limitations are mainly attributable to the need to broaden and diversify the sampling and the legislative barriers re-

lated to the use of geopolymers and related products, thus slowing down their diffusion and commercialisation.

Acknowledgements

The article is the result of joint research by the Authors. Nevertheless, the paragraph ‘Circularity scenarios in the construction field’ is by C. Frettoloso, the paragraphs ‘Geopolymers: new materials for sustainability’, ‘Methodology and phases’, ‘Discussion and results’, ‘LCA for the control of environmental impacts’ are by R. Aversa and L. Ricciotti, the paragraphs ‘Applications and potential’ and ‘From experimentation to product’ are by R. Franchino and the paragraph ‘Validation through BIM modeling’ is by N. Pisacane. The introduction and ‘Conclusions’ are edited by all the Authors.

Notes

1) ‘GEA – Geopolymers for Eco-Architecture: a chemoreological and thermokinetic survey for developing 3D printable formulations’; Scientific Responsible: Prof. L. Ricciotti. Project funded by ‘Luigi Vanvitelli’ University, D.R. 509/22 (University Call for Fundamental and Applied Research Projects dedicated to Young Researchers).

2) For more information, see the webpage: ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview [Accessed 22 April 2023].

3) For more information, see the webpage: arup.com/services/climate-and-sustainability-services/circular-economy-services/circular-buildings-toolkit [Accessed 22 April 2023].

4) INNOWEE project ‘Innovative pre-fabricated components including different waste construction materials reducing building energy and minimising environmental impacts’ (2016-2020) – HORIZON 2020; Project Coordinator: A. Bernardi, CNR-ISAC. For more information, see the webpage: icmate.cnr.it/it/progetti-accordi-icmate/progetti-icmate/innowee [Accessed 22 April 2023].

References

- Azhar, S. (2011), “Building Information Modeling (BIM) – Trends, benefits, risks and challenges for the AEC industry”, in *Leadership and Management in Engineering*, vol. 11, issue 3, pp. 241-252. [Online] Available at: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127) [Accessed 22 April 2023].
- Botti, R. F., Innocentini, M. D. M., Faleiros, T. A., Mello, M. F., Flumignan, D. L., Santos, L. K., Franchin, G. and Colombo, P. (2020), “Biodiesel Processing Using Sodium and Potassium Geopolymer Powders as Heterogeneous Catalysts”, in *Molecules*, vol. 25, issue 12, article 2839, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3390/molecules25122839 [Accessed 22 April 2023].
- Colajanni, S. and Valenza, A. (2021), *Materiali e tecniche innovative per l’edilizia sostenibile*, FrancoAngeli, Milano.
- Cong, P. and Cheng, Y. (2021), “Advances in geopolymer materials – A comprehensive review”, in *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 8, issue 3, pp. 283-314. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004 [Accessed 22 April 2023].
- Dodd, N., Donatello, S. and Cordella M. (2021), *Level(s) – Un quadro di riferimento comune dell’UE per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio – Manuale utente 2 – Creazione di un progetto per l’utilizzo del quadro di riferimento comune Level(s) (versione 1.1)*. [Online] Available at: susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-11/ENV-2020-00021-02-01-IT-TRA-00.pdf [Accessed 22 April 2023].

Dufourmont, J., Papú Carrone, N. and Haigh, L. (2020), *Resilience & the Circular Economy – Opportunities and Risks*, Circle Economy. [Online] Available at: assets.website-files.com/5d26d80e8836af2d12ed1269/5f55fe6a1294188a3073a730_20200907%20-%20CJI%20-%20Resilience%20-%20297x210mm.pdf [Accessed 22 April 2023].

European Commission (2020), *Circular Economy – Principles for Building Design*. [Online] Available at: ec.europa.eu/docsroom/documents/39984 [Accessed 22 April 2023].

ISO 22057 (2022), *Sustainability in buildings and civil engineering works – Data templates for the use of Environmental Product Declarations (EPDs) for construction products in building information modelling (BIM)*. [Online] Available at: iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22057:ed-1:v1:en [Accessed 22 April 2023].

Jayasinghe, L. B. and Waldmann, D. (2020), “Development of a BIM-Based Web Tool as a Material and Component Bank for a Sustainable Construction Industry”, in *Sustainability*, vol. 12, issue 5, article 1766, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12051766 [Accessed 22 April 2023].

Korniejenko, K., Łach, M., Mikula, J., Hebdowska-Krupa, M., Mierzwiński, D., Gadek, S. and Hebda, M. (2020), “Development of 3D Printing Technology for Geopolymers”, in Serrat, C., Casas, J. R. and Gibert, V. (eds), *Proceedings of the XV edition of the International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020) Barcelona, Spain 20-23 October 2020*, pp. 1-6. [Online] Available at: scipedia.com/public/Korniejenko_et_al_2020a [Accessed 22 April 2023].

Medri, V. (2009), “Geopolimeri – Ceramiche per uno sviluppo sostenibile”, in *L’Industria dei Laterizi*, vol. 115, pp. 48-53. [Online] Available at: core.ac.uk/download/pdf/37835916.pdf [Accessed 22 April 2023].

Pollo, R., Trane, M., and Giovanardi, M. (2021), “Urban Metabolism, modelli interdisciplinari e progetto a scala micro-urbana | Urban Metabolism, interdisciplinary models and design at micro-urban scale”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 21, pp. 154-164. [Online] Available at: doi.org/10.13128/techne-9857 [Accessed 22 April 2023].

Princetl, S., Bunje, P. and Holmes, T. (2012), “An expanded urban metabolism method – Toward a system approach for assessing urban energy processes and causes”, in *Landscape and Urban Planning*, vol. 107, n. 3, pp. 193-202. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.006 [Accessed 22 April 2023].

Provis, J. L. (2014), “Green concrete or red herring? Future of alkali-activated materials”, in *Advanced in Applied Ceramics*, vol. 113, issue 8, pp. 472-477. [Online] Available at: doi.org/10.1179/1743676114Y.0000000177 [Accessed 22 April 2023].

Provis, J. L. and van Deventer, J. S. J. (eds) (2009), *Geopolymers, structure, processing, properties and application*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.

Raiteri, R. (ed.) (2012), *Trasformazioni dell’ambiente costruito – La diffusione della sostenibilità*, Gangemi Editore, Roma.

Raza, M. H., Zhong, R. Y. and Khan, M. (2022), “Recent advances and productivity analysis of 3D printed geopolymers”, in *Additive Manufacturing*, vol. 52, article 102685, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2022.102685 [Accessed 22 April 2023].

Ricciotti, L., Apicella, A., Perrotta, V. and Aversa, R. (2023), “Geopolymer Materials for Bone Tissue Applications – Recent Advances and Future Perspectives”, in *Polymers*, vol. 15, issue 5, article 1087, pp. 1-25. [Online] Avail-

able at: doi.org/10.3390/polym15051087 [Accessed 22 April 2023].

Ricciotti, L., Occhicone, A., Petrillo, A., Ferone, C., Cioffi, R. and Roviello, G. (2020), “Geopolymer-based hybrid foams – Lightweight materials from a sustainable production process”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 250, article 119588, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119588 [Accessed 22 April 2023].

Roviello, G., Ricciotti, L., Molino, A. J., Menna, C., Ferone, C., Asprone, D., Cioffi, R., Ferrandiz-Mas, V., Russo, P. and Tarallo, O. (2020), “Hybrid fly ash-based geopolymeric foams – Microstructural, thermal and mechanical properties”, in *Materials*, vol. 13, issue 13, article 2919, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ma13132919 [Accessed 22 April 2023].

Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A. and Olabi, A. G. (2022), “Geopolymer concrete as green building materials – Recent applications, sustainable development and circular economy potentials”, in *Science of The Total Environment*, vol. 836, article 155577, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155577 [Accessed 22 April 2023].

Shen, S., Tian, J., Zhu, Y., Zhang, X. and Hu, P. (2022), “Explore the synergic and coupling relationships of multiple industrial solid wastes in the preparation of alkali-activated materials under different curing regimes”, in *Materials Today Sustainability*, vol. 19, article 100169, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100169 [Accessed 22 April 2023].

Sinopoli, N. and Tatano, V. (eds) (2002), *Sulle tracce dell’innovazione – Tra tecniche e architettura*, FrancoAngeli, Milano.

Sposito, C. and Scalisi, F. (2019), “Innovazione di Materiali Naturali – Terra e Nanotubi di Argilla per una sfida sostenibile | Natural Material Innovation – Earth and Halloysite Nano clay for a sustainable challenge”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 59-72. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/572019 [Accessed 22 April 2023].

Tucci, F. et alii (2021), *Verso la neutralità climatica delle Green City – Approcci, indirizzi, strategie, azioni*. [Online] Available at: greencitynetwork.it/wp-content/uploads/stati_generali_green_economy_La_neutralita_climatica_delle_citta.pdf [Accessed 22 April 2023].

UNI 11337-1 (2017), *Building and civil engineering works – Digital management of the informative processes – Part 1 – Models, documents and informative objects for products and processes*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-11337-1-2017 [Accessed 22 April 2023].

Wang, Z. and Liu, J. (2020), “A Seven-Dimensional Building Information Model for the Improvement of Construction Efficiency”, in *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, article 8842475, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1155/2020/8842475 [22 April 2023].