

# Vivere l'Antropocene: un punto di vista mineralogico

LUCA VALENTINI\*

**Abstract.** *Despite the still ongoing fierce debate on whether the formalisation of a new geological epoch is acceptable or not, the term Anthropocene has become a universal symbol of the increasing, large-scale impact of human activities on the environment. Huge amounts of raw materials are required to feed such activities, and the amount of resources extracted from the Earth's crust and biosphere is increasing year by year, proportionally to demographic growth and associated phenomena, such as urbanisation. Among the industrial sectors fed by material streams, building and construction represent the elephant in the room, since they incorporate over 40% of the raw materials extracted each year. Moreover, the production of cement and concrete is responsible for a significant portion of the anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. On the other hand, these materials literally represent the “foundations of society”, and are necessary to sustain demographic, urban and infrastructural growth, especially in the emerging economies. This contribution explores the role of mineralogy in tackling these issues, in an attempt of reconciling two apparently opposing needs: ensuring safe and durable infrastructures, and decent houses to the entire world population, and minimising the impact on the environment, for the new generations to inherit a more sustainable planet.*

## 1. Introduzione

Il termine ‘Antropocene’ (*epoca umana*) è stato coniato nel 2000 e, da allora, un gruppo di ricercatori (*Anthropocene Working Group*) raccoglie dati ed evidenze scientifiche finalizzate a istituire formalmente una nuova unità, denominata per l'appunto Antropocene, all'interno della scala dei tempi geologici. Questa proposta è motivata da una serie di osservazioni, secondo le quali il progressivo impatto delle attività umane sul Pianeta Terra, e sulle dinamiche

---

\* Professore associato, Dip. di Geoscienze, Università di Padova, Via Gradenigo, 6, 35131 Padova; e-mail: luca.valentini@unipd.it.

che ne governano l'ecosistema, è diventato paragonabile a quello delle forze geologiche<sup>1</sup>. Al netto del dibattito in corso, atto a valutare l'opportunità di formalizzarne l'inserimento all'interno della scala dei tempi geologici, il termine Antropocene è ormai divenuto di comune utilizzo nell'ambito della discussione, accademica e non, riguardante le tematiche di sostenibilità ambientale. Ciò è avvenuto anche grazie al fondamentale contributo del progetto documentaristico di Burtynsky, Baichwal e de Pencier<sup>2</sup>.

L'inizio dell'Antropocene viene convenzionalmente posto a metà del ventesimo secolo, in corrispondenza del fenomeno comunemente noto come *Great Acceleration*, ovvero la rapida espansione delle attività socioeconomiche globali, associata alla crescita esponenziale della popolazione mondiale. Un fenomeno strettamente correlato alla crescita demografica è quello dell'urbanizzazione, che ha raggiunto tassi estremamente elevati nelle economie emergenti, particolarmente in Africa e Asia. Gli elevati tassi di urbanizzazione hanno creato una forte pressione sui centri abitati, accompagnata ad un drastico fabbisogno di unità abitative, considerando che, ad oggi, circa un miliardo di persone vive in insediamenti informali e baraccopoli<sup>3</sup>.

Ci troviamo quindi di fronte ad una formidabile sfida sociale e tecnologica, che ci obbliga a cercare di soddisfare la enorme domanda di abitazioni e infrastrutture minimizzando al contempo l'impatto sul pianeta ed il suo ecosistema. Da questo punto di vista, le scienze mineralogiche possono svolgere un ruolo primario nell'affrontare queste tematiche, strettamente correlate agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delineati nell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite.

## **2. Garantire modelli sostenibili di produzione e consumo**

L'Obiettivo 12 di Agenda 2030 ambisce a raggiungere una gestione sostenibile delle risorse naturali, minimizzando il consumo di materie prime ed ottimizzando il riutilizzo di rifiuti e scarti di produzione secondo un modello di economia circolare.

---

<sup>1</sup> J. Zalasiewicz, C.N. Waters, M. Williams, C.P. Summerhayes, *The Anthropocene as a geological time unit: a guide to the scientific evidence and current debate*, Cambridge University Press 2019, 362 pp.

<sup>2</sup> E. Burtynsky, J. Baichwal, N. de Pencier, *Anthropocene*, Goose Lane Editions 2018, 256 pp.

<sup>3</sup> UN-Habitat, *State of World's Cities 2012/2013: Prosperity of Cities. United Nations Human Settlements Programme 2013*.

Sostenere la crescita socioeconomica globale impone un enorme dispendio di risorse. Per fornire un quadro d'insieme, è utile riportare alcuni dati disponibili nell'ultimo rapporto della serie "The Circularity Gap Report"<sup>4</sup>, secondo il quale si stima che, attualmente, la massa di materie prime utilizzate annualmente nei processi produttivi ammonti a quasi 100 miliardi di tonnellate (circa il 50% delle quali classificabili come "minerali industriali"). Oltre il 90% di queste sono estratte come materie vergini dalla crosta terrestre e dalla biosfera, e meno del 10% proviene da processi di riciclo. Infine, oltre il 40% di queste materie prime alimenta il settore delle costruzioni, che risulta quindi di primaria importanza, sia nella gestione sostenibile degli alti tassi di urbanizzazione, sia nella definizione di strategie e ricerche atte a mitigare il dispendio di risorse minerarie e l'impatto ambientale.

L'intima relazione tra minerali ed insediamenti umani è testimoniata anche dalle numerose "città minerarie" diffuse in tutto il mondo, costruite per ospitare comunità di minatori, e che prendono il nome da specifici minerali (Tab. 1).

Tab. 1. Alcuni esempi di centri abitati che prendono il nome da minerali

Actinolite (Canada)	Diamantina (Brasile)	Quartzsite (USA)
Apatity (Russia)	Gypsumville (Canada)	Stibnite (USA)
Aragonite (USA)	Kaolinovo (Bulgaria)	Taleville (USA)
Asbest (Russia)	Nikel (Russia)	Turmalina (Brasile)

I materiali da costruzione, in particolare cemento e calcestruzzo, e le risorse minerarie ed essi connesse, ricoprono quindi un ruolo di primaria importanza nel determinare modelli di produzione sostenibili. A tal fine, è necessario incrementare il volume di materie secondarie (cioè ottenute da scarti e sottoprodotti di altri processi) usate nella produzione di materiali da costruzione così da minimizzare l'impatto associato all'estrazione di risorse primarie. Dal punto di vista delle matrici cementizie, in linea di principio, tutti i materiali secondari arricchiti in silicio e alluminio lisciviabili in soluzione acquosa rappresentano dei candidati ideali, poiché la nucleazione e crescita di alluminio-silicati in soluzione satura fornisce proprietà coesive nei leganti minerali.

I materiali secondari, provenienti da processi industriali, più comunemente utilizzati per la produzione di cementi alternativi, sono rappresentati da loppe d'altoforno (sottoprodotto della produzione di ghisa) e ceneri volanti

<sup>4</sup> *Circle Economy, The Circularity Gap Report 2022, 26 pp.*

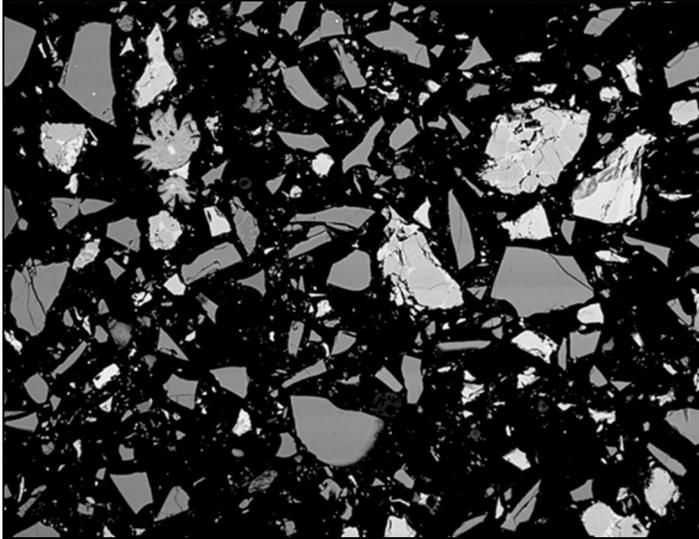


Fig. 1. Immagine SEM-BSE di una polvere di cemento composito alla loppa, dispersa in una matrice di resina epossidica (in nero). Le porzioni di immagine con tono di grigio scuro sono granuli di loppa d'altoforno granulata e macinata, mentre quelle con tono di grigio più chiaro sono granuli di cemento Portland.



Fig. 2. Campioni di loppa di riso, ottenuti dopo il processo di sbramatura (sinistra), in seguito a combustione (destra) e dopo la rimacinazione finale (centro).

da combustione di carbone in centrali termoelettriche. Il rapido raffreddamento, seguito da granulazione e macinazione delle loppe d'altoforno induce la formazione di una polvere (Fig. 1) reattiva in ambiente alcalino, costituita primariamente da vetro allumino-silicatico e da alcune fasi cristalline minori, come merwinite ( $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ ) e termini della soluzione solida åkermanite–gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ – $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ).

La cenere volante è costituita da particelle arrotondate, talvolta sferiche (cenosfere), di vetro allumino-silicatico, con concentrazioni minori di fasi cristalline quali mullite e magnetite. Si tratta di polveri altamente reattive in soluzione alcalina che, tuttavia, sul medio-lungo termine non possono essere individuate come candidate come ingredienti di base per cementi sostenibili, dati gli impegni globali al progressivo abbandono della combustione di carbone come fonte di energia.

Vetri silicatici altamente reattivi possono inoltre essere ottenuti da scarti di produzione agricola. Particolarmente rilevanti (specie nelle economie emergenti del continente africano, dove le disponibilità di loppe d'altoforno e di ceneri volanti sono altamente limitate) sono le ceneri ottenute da sbramatura e combustione della lolla di riso (Fig. 2). I fitoliti presenti nella lolla sono ricchi di silice, ed il processo di combustione elimina la frazione organica, lasciando un residuo di silice amorfa. Al fine di ottimizzare la reattività di questo materiale in soluzione acquosa, è opportuno controllare la temperatura di combustione della lolla, per evitare la formazione di fasi cristalline poco reattive, come la cristobalite.

Alla scala del calcestruzzo, approcci di economia circolare sono utili a sostituire gli inerti costituiti da ghiaia, roccia frantumata e sabbia, legati dalla matrice cementizia, con materiale ottenuto da processi di riciclo. Secondo le stime del Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP), la domanda annua dei suddetti inerti da parte dell'industria delle costruzioni ha raggiunto circa 30 miliardi di tonnellate<sup>5</sup>. L'incremento della domanda, accompagnato dal depauperamento delle risorse, ha innescato il proliferare di attività illegali di approvvigionamento di sabbia, controllate da gruppi criminali, particolarmente diffusi in India, noti come *sand mafias*<sup>6</sup>. Inerti riciclati possono essere ottenuti da detriti derivanti da attività di costruzione e demolizione (*Construction and Demolition Waste* – C&D) in seguito ad opportuna

<sup>5</sup> UNEP, *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources 2019*, 56 pp.

<sup>6</sup> E.S. Rentier, L.H. Cammeraat, *The environmental impacts of river sand mining. Science of the Total Environment 2022*, 838, 155877.

caratterizzazione, selezione e trattamento. Ogni anno vengono prodotte all'incirca tre miliardi di tonnellate di rifiuti di tipo C&D, che inoltre rappresenta la categoria di rifiuto maggiormente prodotta in Unione Europea (circa 500 milioni di tonnellate annue)<sup>7</sup>.

### 3. Promuovere azioni per combattere il cambiamento climatico

Il contributo antropico alle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera è associato, per circa il 75%, alla generazione di energia per diverse finalità (Fig. 3). Anche in questo caso, un ruolo primario è ricoperto dall'industria delle costruzioni, che abbiamo visto essere un elemento fondante dell'Antropocene, in quanto la costruzione di edifici e infrastrutture è necessaria a sostenere la spinta demografica e urbanizzativa. Per quanto riguarda le suddette emissioni di CO<sub>2</sub> direttamente

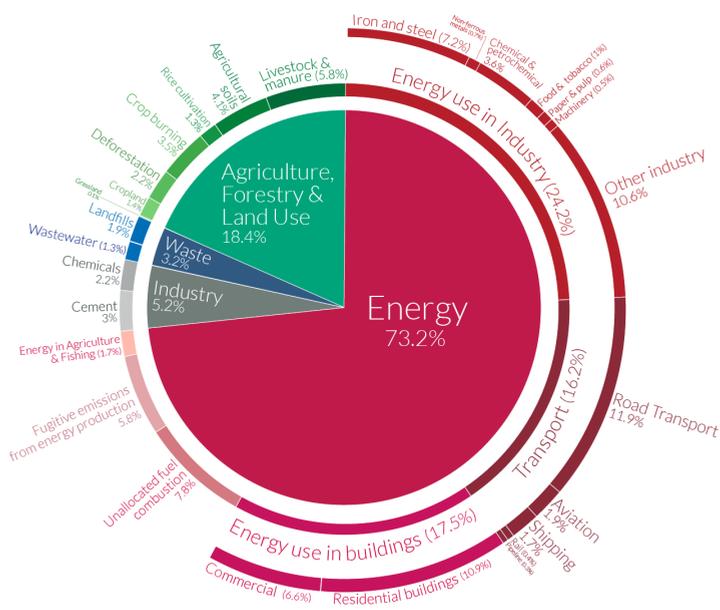


Fig. 3. Emissioni di CO<sub>2</sub> per settore. Immagine tratta da *Our World in Data* ([ourworldindata.org](https://ourworldindata.org), consultato in data 13-12-2022).

<sup>7</sup> A. Akhtar, A.K. Sarmah, *Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective*, in «Journal of Cleaner Production», 2018, 186, pp. 262-281.

associate alla produzione di energia, oltre il 20% di questa è allocato alla quota di energia utilizzata all'interno di edifici. Un altro 10% è allocato alla produzione di ferro e acciaio, un settore strettamente connesso all'industria delle costruzioni, la quale incorpora oltre il 50% dell'acciaio prodotto globalmente. Circa il 5% delle emissioni antropogeniche di  $\text{CO}_2$  sono allocate all'insieme dei processi industriali, ed oltre la metà di questo contributo è dovuta alla produzione di cemento Portland. Questa fetta di emissioni va considerata al netto del dispendio energetico che, per quanto riguarda la produzione di cemento, contribuisce ad un ulteriore 2%. Tuttavia, il maggior contributo in termini di emissioni di  $\text{CO}_2$ , per quanto riguarda la produzione di cemento, deriva dal processo di decarbonatazione della roccia calcarea, che costituisce la materia prima principale per produrre cemento Portland. Durante la cottura della roccia calcarea, la fugacità di  $\text{CO}_2$  nella calcite diviene maggiore di quella in aria quando la temperatura supera i  $550\text{ }^\circ\text{C}$ , e la completa decarbonatazione avviene ad una temperatura di circa  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , con formazione di una mole di  $\text{CaO}$  ed una mole di  $\text{CO}_2$  per ogni mole di  $\text{CaCO}_3$  decomposta. Il processo di cottura della miscela di roccia calcarea e argilla (in proporzione di circa 85%-15%) per produrre cemento Portland avviene ad una temperatura di circa  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , con formazione di nuove fasi cristalline, che consistono in silicati di calcio, alluminati di calcio e alluminati di calcio e ferro. La quantità di  $\text{CO}_2$  integrata sulla frazione prodotta per decarbonatazione di  $\text{CaCO}_3$  e quella prodotta dai combustibili utilizzati per alimentare il processo, corrisponde a circa una tonnellata di  $\text{CO}_2$  per ogni tonnellata di cemento.

Al fine di mitigare le emissioni di  $\text{CO}_2$  associate alla produzione di cemento, è fondamentale implementare strategie atte a minimizzare la decarbonatazione di roccia calcarea durante il processo produttivo, prevedendo l'utilizzo di materie prime alternative, preferibilmente secondarie (secondo quanto esposto nella sezione precedente), in maniera tale che la riduzione di  $\text{CO}_2$  emessa sia accompagnata da un minore dispendio di materie prime vergini, oltre che da una diminuzione dei flussi di rifiuti in discarica.

Sono attualmente in fase di studio e implementazione diverse strategie atte a sostituire il comune cemento Portland con altri tipi di leganti, ottenuti miscelando quest'ultimo con argille calcinate, polveri inerti (come carbonato di calcio non trattato termicamente), o sottoprodotti e rifiuti industriali o agricoli. In alternativa, leganti privi di cemento Portland possono essere prodotti mediante la reazione di queste materie prime alternative in soluzioni alcaline. In particolare, il trattamento termico di argille caolinitiche a temperatura di circa  $700\text{ }^\circ\text{C}$  induce il collasso strutturale della caolinite

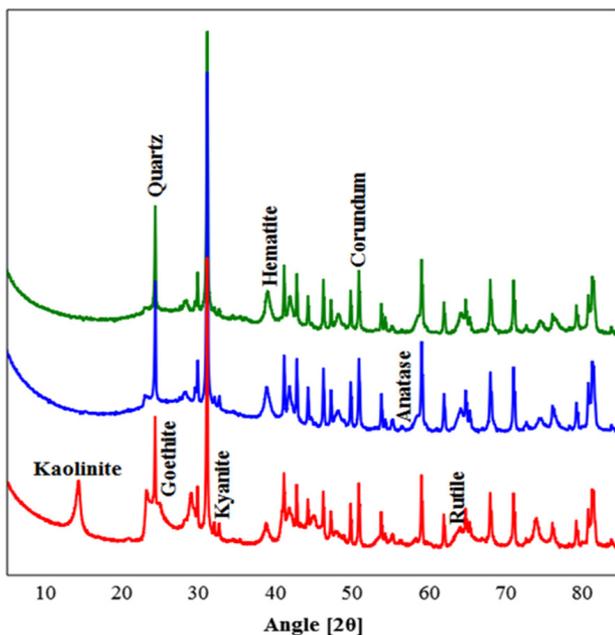


Fig. 4. Pattern di diffrazione di un suolo lateritico (a) privo di trattamento termico (in rosso) e in seguito a trattamento termico a temperatura di (b) 700 °C (blu) e (c) 800 °C (verde). Il processo di calcinazione induce il collasso strutturale delle caolinite (oltre alla conversione di goethite in ematite), come si evince dalla scomparsa del picco basale a basso angolo.

(Fig. 4), con la formazione di una fase amorfa (metacaolinite,  $Al_2Si_2O_7$ ) in cui si ha una parziale variazione della coordinazione di alluminio, da  $Al^{VI}$  a  $Al^V$  e  $Al^{IV}$ , con la frazione di alluminio penta-coordinato particolarmente reattiva in soluzione alcalina<sup>8</sup>. Un trattamento esaustivo della mineralogia e cristallografica di cementi alternativi al Portland esula dall'ambito di questo contributo, per cui si rimandano i lettori interessati ad articoli specifici disponibili in letteratura<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> B. Walkley, J. Provis, *Solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy of cements*, in «Materials Today Advances», 2019, 1, 100007.

<sup>9</sup> K.L. Scrivener, B. Lothenbach, N. De Belie, E. Gruyaert, J. Skibsted, R. Snellings, A. Vollpracht, *TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs*, in «Materials and Structures», 2015, 48, pp. 835-862; C. Shi, B. Qu, J.L. Provis, *Recent progress in low-carbon binders*, in «Cement and Concrete Research», 2019, 122, pp. 227-250.

#### 4. Realizzare città ed insediamenti umani sostenibili

L'Obiettivo 11 di Agenda 2030 contempla la realizzazione di centri urbani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili. Di particolare interesse è il *Target 11.c*, che prevede di fornire supporto ai paesi meno sviluppati, nell'ambito della costruzione di edifici sostenibili, basati sull'utilizzo di materiali locali.

Ciò si interseca alla perfezione con quanto previsto dagli Obiettivi 12 e 13, esaminati nelle due sezioni precedenti. In definitiva, il quadro complessivo prevede la coesistenza delle seguenti esigenze: a) produrre materiali da costruzione a basso costo, facendo affidamento su materie prime locali, per favorire lo sviluppo delle economie emergenti, in particolare nel continente africano, caratterizzato dal più alto tasso di urbanizzazione al mondo e che, secondo le stime, dovrà ospitare un miliardo di nuovi residenti nelle aree urbane entro il 2050<sup>10</sup>; b) mitigare le emissioni di CO<sub>2</sub> associate alla produzione di leganti cementizi; c) minimizzare il dispendio e l'estrazione di materie prime vergini, implementando politiche che favoriscano il riutilizzo di materie prime di riciclo. Da questo punto di vista, il continente africano potrà rappresentare un perfetto laboratorio per la ricerca di soluzioni sostenibili alla produzione di materiali da costruzione, in particolare leganti cementizi. Attualmente, l'industria del cemento africana è fortemente condizionata dalla scarsa reperibilità, in Africa Subsahariana, di roccia calcarea per la produzione di cemento Portland. Molti degli affioramenti presenti nel continente sono caratterizzati da un alto tenore di dolomite che, sottoposta al processo di cottura, induce la formazione di periclasio che, durante il processo di idratazione, induce stress espansivi in seguito a conversione in brucite. La geologia del continente influenza dunque l'industria locale dei leganti, attualmente fortemente dipendente da importazioni di cemento Portland, in particolare dal Sud-Est asiatico. Questa situazione ha un forte impatto, sia dal punto di vista del costo finale del materiale, sia dal punto di vista delle emissioni di CO<sub>2</sub> associate al trasporto di merci. Per uscire da questo circolo vizioso, è necessario promuovere un approccio che faccia affidamento su risorse locali, per la produzione di cementi a basso costo e basse emissioni.

La strategia più facilmente attuabile è quella di fare affidamento sull'utilizzo di suoli argillosi, che costituiscono una risorsa abbondante e ubiquitaria in Africa, con costi altamente competitivi (circa un decimo rispetto al costo medio del cemento Portland nel continente). L'uso di suoli argillosi ha una

---

<sup>10</sup> OECD/SWAC, *Africa's Urbanisation Dynamics 2020: Africapolis, Mapping a New Urban Geography*. Organisation for Economic Co-operation and Development 2020, 204 pp.

secolare tradizione nell'*architettura vernacolare*, tuttavia la «terra cruda» risente di una percezione negativa da parte della popolazione locale, trattandosi di un materiale con scarsa resistenza ad abrasione, erosione e dilavamento, e che pertanto viene associato a condizioni di povertà. Per poter fornire un'immagine rinnovata dell'argilla come materiale da costruzione, diviene fondamentale dimostrare che cementi a base di suoli argillosi possono avere prestazioni simili, o addirittura superiori a quelle del cemento Portland.

Come menzionato nella sezione precedente, il trattamento termico dell'argilla induce la formazione di allumino-silicati particolarmente reattivi in soluzioni alcaline, e capaci di sviluppare proprietà idrauliche (cioè di fare presa e indurire in ambiente umido).

L'approccio più semplice alla produzione di leganti idraulici a base di argilla prevede la miscelazione di argille calcinate con cemento Portland. L'idratazione di queste miscele conferisce proprietà ottimali in termini di prestazioni meccaniche ed impermeabilizzazione, dovute allo sviluppo della «reazione pozzolanica». Questa avviene per reazione della portlandite,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , uno dei prodotti di idratazione del cemento Portland, con il silicio presente in soluzione acquosa in seguito alla dissoluzione della fase allumino-silicatica amorfa presente nell'argilla calcinata. Il prodotto di questa reazione è un silicato di calcio idrato nano-strutturato, la cui precipitazione conferisce proprietà coesive.

Tali cementi di miscela, oltre ad essere caratterizzati da eccellenti proprietà ingegneristiche, possiedono una ridotta impronta ecologica, proporzionale alla frazione di cemento Portland sostituito da argilla calcinata. Allo stato attuale, i cementi di miscela a base di argilla calcinata prevedono un grado di sostituzione di cemento Portland che va dal 30% al 45%. Questi cementi tendono ad avere resistenze meccaniche più basse di quelle del cemento Portland durante i primi giorni di maturazione, per via della lenta cinetica della reazione pozzolanica. Tuttavia, a partire da circa 14 giorni di maturazione, i cementi di miscela a base di argilla sviluppano valori di resistenza meccanica paragonabili o superiori a quelli del cemento Portland (Fig. 5), in funzione della precipitazione del prodotto di reazione pozzolanica e conseguente riduzione di porosità<sup>11</sup>.

Una possibilità alternativa è quella di produrre cementi a base di argilla calcinata che siano totalmente privi di cemento Portland. Poiché le argille calcinate non sono reattive in soluzione acquosa a pH neutro, è necessario utilizzare opportuni attivatori alcalini, comunemente soluzioni di idrossido o

---

<sup>11</sup> M. Bediako, L. Valentini, *Strength performance and life cycle assessment of high-volume low-grade kaolin clay pozzolan concrete: A Ghanaian scenario*, Case Studies in Construction Materials 2022, 17, e01679.

silicato di sodio (meno comunemente di potassio). Questi «cementi ad attivazione alcalina» sviluppano proprietà coesive in seguito alla precipitazione di allumino-silicati sodici idrati (comunemente denominati N-A-S-H), caratterizzati da una struttura zeolitica difettiva. Rispetto al cemento Portland, sono dotati di elevate resistenze alla compressione e di microstrutture molto compatte. Al contrario, per quanto concerne le proprietà allo stato fresco, tendono ad essere meno lavorabili ed a fare presa in tempi più brevi, per cui lo studio delle proprietà reologiche dei cementi ad attivazione alcalina richiede approfondimenti al fine di garantirne un uso appropriato a larga scala<sup>12</sup>.

Nonostante che i cementi ad attivazione alcalina eliminino integralmente le emissioni di CO<sub>2</sub> associate alla calcinazione di roccia calcarea, va tenuto presente che permane una frazione residua di emissioni incorporate, dovute ai processi di produzione industriale degli attivatori alcalini. Alcune stime recenti, basate su metodi di *Life Cycle Assessment*, prevedono una riduzione netta delle emissioni di CO<sub>2</sub> dell'ordine del 50%, rispetto al cemento Portland, a parità di resistenza meccanica<sup>13</sup>.

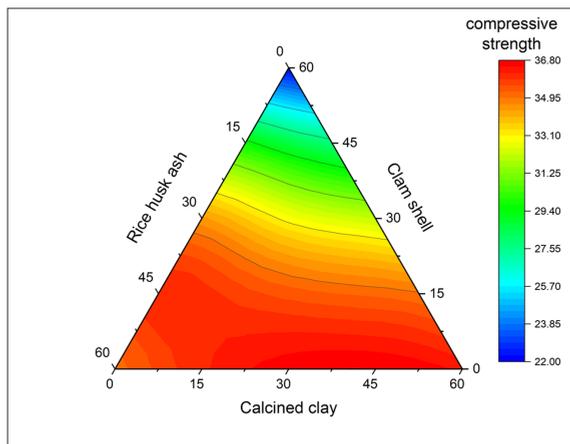


Fig. 5. Resistenze a compressione (dopo 28 giorni di maturazione), ottenute mediante tecnica di *experimental design*, di cementi quaternari con un contenuto di 40% di cemento Portland e quantità variabili di argilla calcinata, cenere di lolla di riso e carbonato di calcio ottenuto dalla macinazione di conchiglie. Le resistenze di alcune formulazioni (colori dal giallo al rosso) sono compatibili con la classe di resistenza 32.5 prevista dalla normativa europea EN197-1.

<sup>12</sup> J. Provis, *Alkali-activated materials*, in «Cement and Concrete Research», 2018, 114, pp. 40-48.

<sup>13</sup> F. Lolli, K.E. Kurtis, *Life Cycle Assessment of alkali activated materials: preliminary investigation for pavement applications*, in «RILEM Technical Letters», 2021, 6, pp. 124-130.

## 5. Conclusioni

Uno dei sottoprodotti dell'Antropocene è il sensibile incremento dell'utilizzo di materie prime pro-capite. Gli ultimi anni sono stati caratterizzati da forte instabilità delle filiere di approvvigionamento e volatilità dei prezzi delle materie prime, a causa di eventi globali come pandemie e crisi geopolitiche, che hanno reso tangibile la dipendenza globale dalla disponibilità di queste risorse. L'insieme di questi scenari mette in evidenza l'importanza di razionalizzare sia l'utilizzo delle materie prime sia i processi produttivi associati alla loro trasformazione e, a fine ciclo di vita, del corretto smaltimento e recupero dei residui. In questo contributo si è posto in evidenza il ruolo dei materiali da costruzione, poiché questi incorporano una porzione estremamente rilevante di materie prime ed emissioni di CO<sub>2</sub>, oltre ad essere associati a flussi di rifiuti di volume considerevole (ad esempio, rifiuti classificati come C&D).

La ricerca scientifica dovrà svolgere un ruolo prominente affinché l'Antropocene sia vissuto in maniera sostenibile. Alcuni dei contributi a queste tematiche, da parte delle scienze mineralogiche, potranno essere i seguenti: a) fornire le conoscenze e competenze necessarie per una caratterizzazione adeguata di risorse primarie, e di materiali equivalenti provenienti da scarti e sottoprodotti; b) contribuire all'ottimizzazione, in chiave di impatto ambientale, di processi di produzione, ad esempio mediante studi di modellazione termodinamica; c) stabilire connessioni tra processi di base di piccola scala (dissoluzione, diffusione, adsorbimento, nucleazione, crescita) e proprietà ingegneristiche di materiali. Affinché ciò avvenga, è auspicabile una simbiosi tra le conoscenze e competenze di base della mineralogia classica, ed il dispiegamento di nuove conoscenze e competenze settoriali che richiederanno una visione rinnovata delle discipline mineralogiche, le quali dovranno essere pronte ad abbracciare tematiche di grande impatto, non solo dal punto di vista tecnologico, ma anche da quello sociale.