

GEOPOLIMERI: “CERAMICHE” PER UNO SVILUPPO SOSTENIBILE

Valentina Medri

CNR-ISTEC, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Scienza e Tecnologia per la Ceramica, Faenza

Abstract. *I geopolimeri sono materiali polimerici inorganici sviluppati negli anni '70 da Joseph Davidovits. I geopolimeri mimano le rocce naturali e sono il prodotto di una geosintesi, cioè una reazione che ricostituisce chimicamente le rocce. I geopolimeri appartengono alla cosiddetta classe delle ceramiche consolidate per via chimica (chemically bonded ceramics, CBCs): sono sintetizzati a bassa temperatura da una varietà di materiali includendo scarti della produzione industriale quali ceneri volanti o scorie d'altoforno, riducendo così la richiesta energetica e l'impatto ambientale durante la loro produzione. Per questa ragione i geopolimeri possono essere considerati ecocompatibili, “environmentally friendly”. I geopolimeri consentono l'utilizzo di materiali con proprietà ceramiche con le stesse modalità di alcune materie plastiche, rimuovendo gli equipaggiamenti pesanti e le alte temperature dagli impianti ceramici industriali. La tecnologia dei geopolimeri permette la produzione di una vasta gamma di materiali versatili che trovano già un impiego in diversi settori industriali, quali: ingegneria civile, trattamento dei rifiuti industriali, industria dell'automobile ed aerospaziale, fonderie di metalli non ferrosi e metallurgia, industrie plastiche, restauro, arte e decorazione, biomateriali, ecc.. I geopolimeri sono il prodotto naturale della cosiddetta “chimica verde”, che lavora per uno sviluppo sostenibile.*

1. INTRODUZIONE

Negli anni '50, Victor Glukhovsky, uno scienziato di origine ucraina, ricercò le differenze tra i cementi antichi e i calcestruzzi moderni [1]. Il suo lavoro portò alla sintesi di vari leganti alluminosilicatici da argille, feldspati, ceneri vulcaniche e scorie di vario tipo. Questi leganti

esibivano proprietà superiori a quelle dei materiali cementizi di uso comune a quel tempo. Partendo dagli studi di Glukhovsky, negli anni '70 il ricercatore francese Joseph Davidovits sviluppò una nuova classe di materiali polimerici inorganici ora utilizzata per diverse applicazioni industriali: i così detti “geopolimeri” [2, 3].

Davidovits studiò i geopolimeri come alternativa a matrici organiche per i materiali compositi [2]. I geopolimeri, infatti, hanno molti vantaggi rispetto ad altri materiali organici e non, primo fra tutti una grande tolleranza al calore rispetto ai compositi organici; ad esempio, i compositi geopolimerici rinforzati con fibre di carbonio non bruciano quando sono sottoposti a fiamma diretta). Inoltre, i geopolimeri resistono a tutti i solventi organici e sono attaccati solo da acido cloridrico concentrato.

Con il termine “geopolimero” si indica generalmente un materiale a base allumino-silicatica. I geopolimeri sono formati per polimerizzazione di condensazione, la così detta “geopolimerizzazione”, o geosintesi, cioè una reazione che ricostituisce chimicamente i materiali e il prefisso “geo” implica che essi mimino i materiali naturali come ad esempio le argille: gli atomi di silicio (Si) e di alluminio (Al) reagiscono per formare molecole che sono chimicamente e strutturalmente confrontabili con quelle che legano e compongono le rocce naturali. Ciò permette ai prodotti geopolimerici di esibire le principali proprietà degli elementi che formano le rocce e cioè la durezza, la stabilità chimica e una longevità pari a quella geologica [4].

Durante la geopolimerizzazione, si forma una ‘resina’ poli-minerale (cioè la vera e propria matrice geopolimerica) che funge da collante per le materie prime a base allumino-silicatica che non hanno reagito e le eventuali ‘cariche’ (polveri o fibre, vetro, ceramica, metalli o materiali organici) che rendono funzionale il materiale, formando di fatto i materiali compositi a base geopolimerica (figura 1) che sono generalmente in commercio. Si possono utilizzare diverse cariche per ottimizzare specifiche proprietà fisiche o meccaniche in base alle applicazioni a cui sono destinati i geopolimeri.

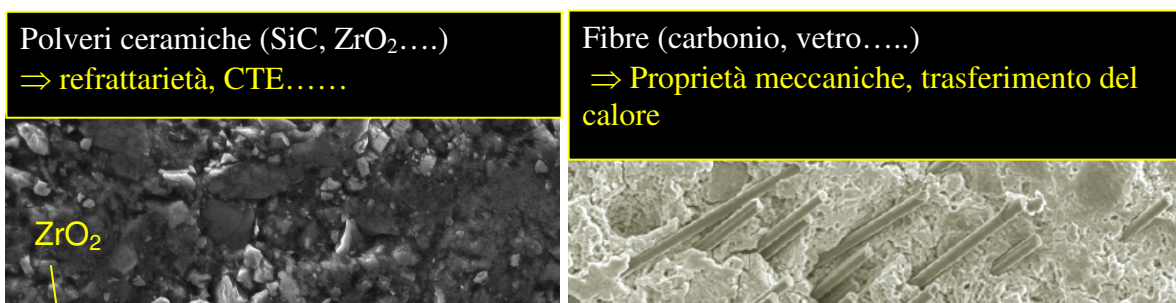


Figura 1 Varie tipologie di materiali compositi a base geopolimerica: le cariche (polveri ceramiche, fibre, metalli, organici) impartiscono e/o modificano le proprietà fisiche e meccaniche dei compositi.

Sebbene con geopolimeri si indichino solitamente materiali a base allumino-silicatica, la definizione può essere estesa a tutti i polimeri inorganici presenti in natura, quali fosfati (apatiti), vanadati, borati, arseniati.

Diversamente dai cementi a base di calcio (come il cemento Portland), i geopolimeri non contengono acqua di idratazione entro la struttura cristallina e sebbene siano lavorati a basse temperature, generalmente da 80°C a 120°C, con tecniche usate comunemente per la presa delle resine organiche, queste “resine inorganiche” possono resistere fino a 1200°C, anche per lunghe esposizioni. Le resine inorganiche pertanto permettono la produzione di materiali simili alla ceramica e di compositi per alte temperature più resistenti dei materiali a base cementizia ed impermeabili all’acqua, utilizzando un processo semplice a bassa temperatura [5].

2. I GEOPOLIMERI COME “CERAMICHE” CONSOLIDATE PER VIA CHIMICA

“Geopolimeri” è un termine che descrive un’ampia varietà di materiali compositi. I geopolimeri a base allumino-silicatica sono “ceramiche” consolidate per reazione alcalina (alkali bonded ceramics, ABCs) [6], cioè appartengono alla classe delle “ceramiche” consolidate chimicamente (chemically bonded ceramics, CBCs) intendendo che materiali assimilabili alle ceramiche possono essere prodotti utilizzando una reazione chimica e non la sinterizzazione. Le ceramiche consolidate per via chimica hanno parecchi aspetti importanti:

- il basso costo, perché possono essere prodotte a bassa temperatura,
- si evitano stress termici dovuti ai gradienti di temperatura,
- si ha stabilità dimensionale,
- si ha la possibilità di produrre il materiale in situ.

Inoltre i geopolimeri sono sviluppati seguendo i principi della “chimica verde” poiché sono prodotti da una varietà di materie prime inclusi materiali derivanti da scarti industriali (ceneri volanti, scorie d’altoforno), riducendo la richiesta di energia e l’impatto ambientale durante la loro produzione.

In figura 2 è schematizzata la preparazione di un ABC. La reazione di un alluminosilicato solido con una soluzione acquosa altamente concentrata di idrossidi alcalini (KOH, NaOH) e/o silicato di potassio e/o di sodio produce il geopolimero, cioè un alluminosilicato alcalino sintetico, che è l’analogo amorfo o semi-cristallino delle zeoliti. Durante la geopolimerizzazione si forma un gel che consiste di tetraedri SiO_4 e AlO_4 legati in sequenza alternata. Le materie prime sono principalmente metacaolino e scarti industriali come ceneri volanti o scorie d’altoforno, ma anche rocce naturali e qualsiasi sorgente di allumina e silice, purché in polvere.

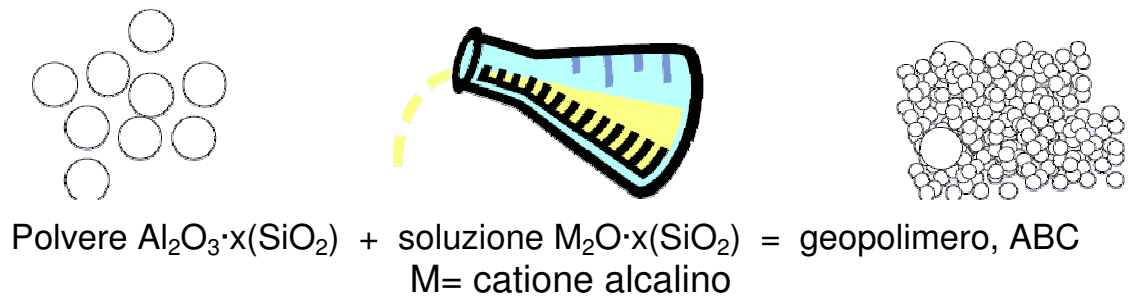


Figura 2 - Rappresentazione schematica della preparazione di un ABC [6].

La decomposizione ad alta temperatura di un geopolimero ABC produce un vetroceramico. In dipendenza della composizione dell'ABC, Kriven [6] ha osservato la formazione di:

- nefelina, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $T_{\text{fus}} = 1526^\circ\text{C}$;
- leucite, $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, $T_{\text{fus}} > 1698^\circ\text{C}$ con un alto coefficiente di espansione termica ($\alpha T \approx 25^\circ\text{C}^{-1}$);
- pollucite o cesio-leucite ($\text{Cs}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, $T_{\text{fus}} > 1900^\circ\text{C}$), estremamente resistente al creep (comparabile alla mullite) con un coefficiente di espansione molto basso (<0.5% nell'intervallo 25-1000 °C).

Le ceramiche a base fosfatica consolidate per via chimica (*chemically bonded phosphate ceramics*, CBPCs), possono essere correlate ai geopolimeri poiché sono polimeri inorganici: infatti le CBPCs hanno il tetraedro PO_4^{3-} come elemento base [7]. Le CBPCs sono sintetizzate mediante una reazione acido-base tra un ossido inorganico di un metallo di- o tri-valente, come ad esempio CaO, MgO e Al_2O_3 , e un fosfato acido a basse temperature ($T \leq 250^\circ\text{C}$). I più importanti minerali formati come CBPCs sono le apatiti $\text{M}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Z}_2$ dove M è un metallo (Ca, Mg o Pb) e Z è OH, Cl, F o CO_3 .

3. APPLICAZIONI DEI GEOPOLIMERI

Nel suo sito web, Joseph Davidovits [8] cita un esempio di sviluppo di un composito a base geopolimerica e cemento che migliora la sicurezza dei viaggi aerei e l'efficienza degli aeroporti: "Un jet si sta preparando a decollare da New York mentre su una pista d'atterraggio di Los Angeles si sta cominciando a posare del calcestruzzo. L'aeroplano è

equipaggiato con un 'registratore elettronico di volo' (scatola nera) racchiuso in un geopolimero resistente al fuoco, brevettato dalla multinazionale S.F.I.M. La stessa cabina del jet è stata resa a prova di fuoco con pannelli di un composito carbonio/Geopolymite® e quadri isolanti Willit® fatti di materiali Trolit®. Il jet è anche equipaggiato con un filtro dell'aria a prova di fuoco della Sofiltra-Camfil. Vari componenti strutturali del jet, a base di una lega superplastica di alluminio sono stati preparati a 1100°F usando materiali Geopolyceram®. Quando l'aereo è pronto all'atterraggio a Los Angeles, la pista riparata con il calcestruzzo Pyrament® è pronta a riceverlo”.

Questo implica che i geopolimeri, sia usati puri o con cariche o rinforzati, trovano già applicazioni in molti campi dell'industria, quali: 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. Di seguito vengono approfondite alcune delle applicazioni più importanti.

3.1. Applicazioni per alte temperature e a prova di fuoco

Esempi di applicazioni che risultano in questo raggruppamento sono: stampi per fonderia; pannelli e pareti isolanti-coibentanti; materiali a prova di fuoco per automobili e aerei; pannelli geopolimerici espansi per isolamento termico; refrattari; adesivi, leganti e rivestimenti per alte temperature.

Questa tipologia di applicazioni richiede materiali geopolimerici ad alta tecnologia sviluppati principalmente da materie prime come il metacaolino e/o di origine sintetica (silice e allumina) per un miglior controllo compositivo. Di contro, i geopolimeri derivati da metacaolino necessitano durante la fase di sintesi di molta acqua, di un consolidamento in temperatura (circa 80°C) e sono troppo “morbidi” per avere un utilizzo pratico nel campo delle costruzioni [9].

Pechiney, il quarto maggior produttore mondiale di prodotti a base di alluminio, ha brevettato dei materiali refrattari a base geopolimerica per la formatura in sicurezza di leghe corrosive alluminio/litio (Al/Li) allo stato liquido [8]. La ricerca congiunta tra Catawba Resources Inc. (Stow, OH) e l'Università dell'Illinois ha sviluppato stampi compositi

geopolimerici per la lavorazione dei metalli fusi [10]. La produzione di materiali Fe-Si e Fe-Mn per il mercato dell'acciaio include il colaggio del metallo fuso a 1425°C, finora eseguito in grandi stampi di nichel. Gli stampi compositi a base geopolimerica sono meno costosi di quelli di nichel e possiedono la maggior parte dei requisiti per i materiali da stampo: alta stabilità termica (1528°C), resistenza meccanica di circa 100 MPa, un basso coefficiente di espansione, un'alta temperatura di ossidazione, facile estrazione, lungo ciclo di vita e stabilità in ambiente alcalino; inoltre, non è richiesto il preriscaldamento degli stampi.

Diversamente dai compositi polimerici convenzionali, i compositi geopolimerici rinforzati con fibre di carbonio non s'incendiano, non bruciano o rilasciano fumo anche dopo un esteso flusso di calore, al massimo sinterizzano, fondono o espandono. Pertanto sono adatti come materiali nei cabinati di aerei (soffitti, pavimenti, decorazioni a prova di fuoco, contenitori per lo stivaggio, isolamento di fili elettrici). In Francia, come citato in precedenza è stata brevettata da S.F.I.M. una scatola nera racchiusa in un geopolimero resistente al fuoco e i jet sono stati inoltre equipaggiati con un filtro a prova di fuoco della Sofiltra-Camfil. Per la Northrop Aviation, è stato utilizzato un prototipo di composito carbonio/SiC/geopolimero per un nuovo bombardiere della US Airforce. Inoltre, in Formula 1, il sistema di scarico di alcune auto è stato dotato di uno scudo termico a base di un composito carbonio/geopolimero, rimpiazzando il titanio [2, 5, 8].

I geopolimeri vengono utilizzati durante il processo di produzione di parecchi materiali. Durante la manifattura del vetro, anelli compositi sono installati sui rulli affinché sopportino la temperatura di esercizio di 750°C. La manipolazione a caldo durante la manifattura delle bottiglie di vetro include molle d'estrazione e vari dispositivi per la movimentazione protetti da materiali geopolimerici [5].

Aremco Products (Valley Cottage, NY) e Sauereisen (Pittsburgh, Pennsylvania) hanno sviluppato e commercializzato adesivi inorganici, rivestimenti, sigillanti e stucchi per substrati ceramici, metallici e vetrosi in strumenti elettrici, meccanici, metallurgici e sensoristici fino a 1700°C. Le applicazioni tipiche sono elencate di seguito:

- Bruciatori IR – adesione delle piastre riscaldanti a diversi substrati.
- Assemblaggio di punte di accensione – adesione alla ceramica.

- Sensori – vetro legato a leghe metalliche.
- Filtri per alta temperatura – adesione del filtro alla sede metallica.
- Lampade – annegamento con “resina” inorganica dielettrica delle lampadine in sede (figura 3).
- Resistori – incapsulazione delle resistenze (figura 3).
- Termocoppie – assemblaggio dei componenti.
- Elementi riscaldanti: annegamento con resina inorganica dielettrica degli elementi.

La versatilità di questi prodotti deriva dalla loro formulazione composita che utilizza polveri ceramiche, vetrose e di ossidi metallici per ottimizzare specifiche proprietà quali il coefficiente di espansione termica, la conducibilità termica, la resistenza dielettrica e la resistenza chimica.

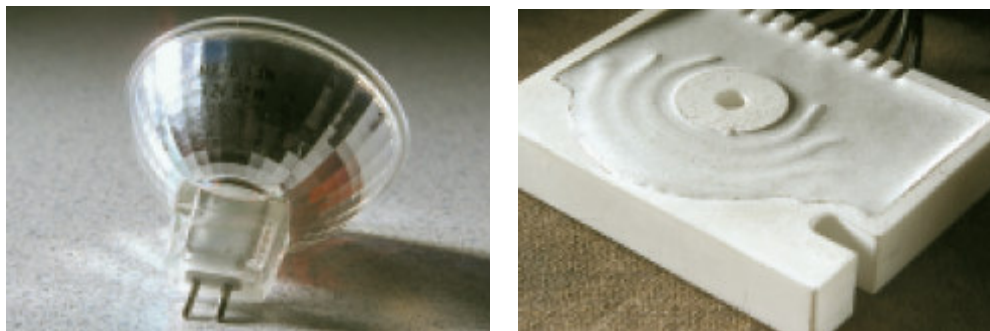


Figura 3 Un esempio di lampada e resistore assemblati con resine inorganiche geopolimeriche dielettriche.

3.2. Industria delle costruzioni edili e civili

In linea di massima, le applicazioni in questo settore si possono riassumere come di seguito specificato:

- Miscele di cementi per applicazioni strutturali
- Cementi con alta resistenza agli acidi e al fuoco
- Riparazione esterna ed ammodernamento di vecchie strutture
- Materiali da costruzione a bassa tecnologia
- Piastrelle e mattoni a basso impatto energetico.

Dal punto di vista della “chimica verde” e dello sviluppo sostenibile, i cementi geopolimerici possono contribuire alla mitigazione del surriscaldamento globale rimpiazzando il cemento Portland ordinario. Quest’ultimo, infatti, proviene dalla calcinazione di carbonato di calcio e di silico-alluminati a circa 1450° C, con produzione di grandi quantità di anidride carbonica (CO₂), un gas che influisce sull’effetto serra [11]. Si può stimare che i materiali a base geopolimerica riducano l’emissione di CO₂ di circa l’80% poiché non necessitano di alte temperature di calcinazione. Inoltre utilizzano ceneri volanti, cioè prodotti di scarto delle centrali industriali, o rocce naturali, e possono essere riciclati come aggregati ad esempio nelle sedi stradali. Per questi motivi i geopolimeri si definiscono con un inglesismo “environmentally friendly materials” per l’industria delle costruzioni.

Oltre al surriscaldamento globale, un altro difetto del cemento Portland ordinario è la durata (20 anni o meno). Il Portland è un cemento idraulico e consiste principalmente di un gel colloidale di calcio-silicati idrati e calcio idrossido. Esposti agli stress ambientali come le piogge acide, essi formano gesso, mentre la instabilità termodinamica dei calcio-silicati idrati tende a farli ritornare carbonato di calcio e silice [12]. Inoltre, il calcestruzzo con cemento Portland ordinario esplose durante gli incendi a causa della sua natura idraulica, cioè a causa dell’acqua intrappolata nella struttura.

I cementi a base geopolimerica hanno una lunga durata grazie alla loro inerzia chimica in particolare rispetto agli acidi, un’alta resistenza meccanica data dalla struttura polimerica 3-D e un’alta refrattarietà per l’assenza di acqua o composti organici nella struttura.

Nel caso del calcestruzzo geopolimerico derivato da ceneri volanti, il costo è generalmente inferiore di circa il 10–30% rispetto al cemento Portland [9]. Inoltre, le caratteristiche tecnologiche del geopolimero mostrano promettenti miglioramenti: il calcestruzzo geopolimerico sviluppa un’alta resistenza a compressione nelle prime ore dopo l’attivazione alcalina (60–70 MPa dopo 24 ore), ha una grande stabilità dimensionale del legante e capacità di proteggere l’armatura d’acciaio [9].

I cementi Portland miscelati (Portland Blended Cements) a presa rapida sono miscele di Portland con leganti geopolimerici, ottenuti dall’addizione di scorie d’altoforno ai leganti geopolimerici, perché esse esibiscono un’attività cementizia idraulica latente. La presa rapida è

dovuta alla compatibilità tra il gel del cemento Portland e il geopolimero. I cementi Portland miscelati sono già stati commercializzati come PYRAMENT® Blended Cement (PBC) dalla Lone Star Industries negli Stati Uniti [13] e come cemento “F” in Finlandia. Il Pyrament consiste di 80% di cemento Portland e 20% di materie prime geopolimeriche, ed è un materiale ideale per la riparazione delle piste d’atterraggio fatte di calcestruzzo, per le pavimentazioni industriali e le autostrade. Nel caso delle piste, un indurimento di 4-6 ore è abbastanza per permettere l’atterraggio di un airbus. Il cemento geopolimerico raggiunge una resistenza in compressione di 20 MPa dopo 4 ore, mentre il semplice calcestruzzo impiega parecchi giorni [8]. Comunque, l’inabilità a mantenere una miscela compatta ha limitato il successo del Pyrament nonostante fosse estremamente promettente [12].

Le infrastrutture, come ad esempio i ponti, degradano per la corrosione del rinforzo d’acciaio contenuto nel cemento armato, a causa dell’acqua salata e dei composti anti-gelo. Un metodo di riparazione del calcestruzzo e delle strutture murarie consiste nell’applicazione di fogli flessibili compositi a matrice organica rinforzati con fibre. Per questa applicazione, in particolare nel caso di architravi e colonne all’interno di edifici, l’inflammabilità è un serio problema [8, 14]. Il rischio d’incendio limita l’uso dei polimeri organici nelle infrastrutture, precludendo ogni vantaggio di resistenza meccanica, rigidità e resistenza a corrosione rispetto all’acciaio e al calcestruzzo. I bendaggi a matrice organica possono quindi essere sostituiti da geopolimeri rinforzati con fibre di carbonio, che non s’incendiano, non bruciano nè rilasciano fumo anche dopo una lunga esposizione ad una fiamma viva, e mantengono oltre il 60% della loro resistenza a flessione originale dopo simulazione d’incendio [14].

È anche possibile produrre elementi infrastrutturali prefabbricati, come architravi e colonne, da geopolimeri a base di ceneri volanti (figura 4). In questo caso non è utilizzato il cemento Portland, ma è necessario un indurimento a 80°C [15].

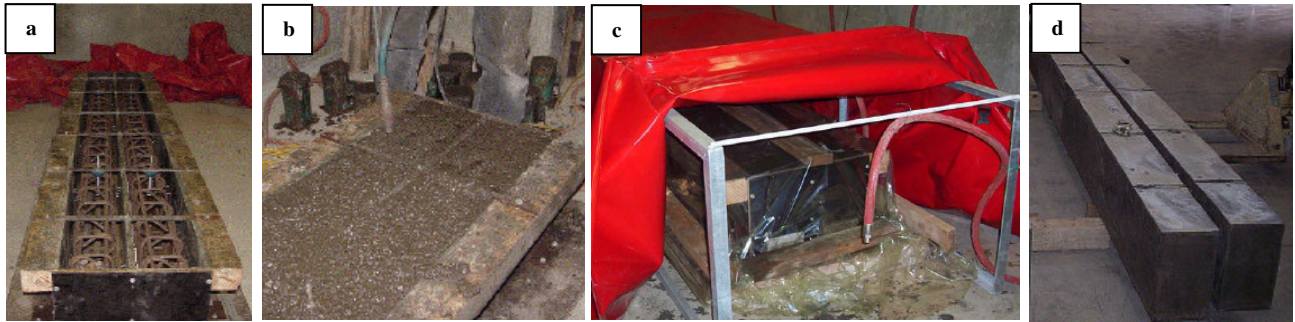


Figura 4 - Produzione di architravi [15]: a) stampo con gabbia di rinforzo, b) compattazione, c) riscaldamento, d) architravi.

3.3. Stoccaggio di rifiuti tossici

I materiali zeolitici assorbono i rifiuti chimici tossici e per analogia strutturale i geopolimeri si comportano in modo simile. Infatti i geopolimeri immobilizzano gli elementi pericolosi entro la matrice geopolimerica e agiscono come legante per convertire lo scarto semisolido in un solido coeso.

Come riportato da Davidovits [8], le tecnologie di immobilizzazione hanno tre obiettivi:

1. sigillare i materiali pericolosi in un monolite impermeabile: i materiali geopolimerici non conducono quantitativi misurabili di acqua e sono resistenti agli attacchi acidi;
2. progettare una matrice solida che leghi gli elementi pericolosi riducendo la loro mobilità: le sostanze inquinanti sono intrappolate nella struttura geopolimerica in 3-D;
3. produrre un monolite duraturo che superi gli stress ambientali: le antiche strutture romane in calcestruzzo come ad esempio il Colosseo (2.000 anni) offrono una documentazione storica della durata estesa dei cementi a base geopolimerica.

La tecnologia GEOPOLYTECH [11, 16], sviluppata nell'ambito di un progetto di ricerca europeo da B.P.S. Engineering, Wismut (Germania) e la Cordi-Gèopolymère (Francia), offre un metodo di incapsulazione e contenimento a lungo termine di fanghi tossici, pericolosi e radioattivi, di pozze di decantazione e rifiuti semisolidi (filtri) di impianti di trattamento delle acque. Eccellenti risultati sono stati ottenuti con elementi altamente tossici quali metalli pesanti, uranio, radio, arsenico e idrocarburi.

Alla fine degli anni novanta, è stata condotta una sperimentazione pilota nell'impianto di trattamento acque di miniera della Wismut a Aue (Germania), usando la tecnologia

precedentemente progettata per la solidificazione con cemento Portland e quindi sostituito da cementi geopolimerici. Il procedimento consiste nel colaggio dei geopolimeri miscelati con le sostanze tossiche in stampi cubici di acciaio di 1 m³; il materiale consolidato viene poi tolto dagli stampi e trasportato in un sito di stoccaggio (figura 5). Gli ottimi risultati conseguiti con l'esperienza pilota ha dimostrato la maturità tecnologica dei cementi a base geopolimerica [11, 16].



Figura 5. Geopolimero miscelato con le scorie tossiche e sito di stoccaggio [8, 11, 16].

4. CONCLUSIONI

La definizione e le caratteristiche dei materiali geopolimerici possono essere riassunte come segue:

- mimano i minerali naturali, essendo prodotti di una geo-sintesi, cioè una reazione che reintegra chimicamente i minerali stesso,
- sono materiali polimerici inorganici,
- sono materiali compositi: le ‘resine’ geopolimeriche, formate durante la geopolimerizzazione, sono il collante che lega le materie prime che non hanno reagito e le cariche introdotte nel sistema per renderlo funzionale,
- sono ‘ceramiche’ consolidate per via chimica (*chemically bonded ceramics*, CBCs) con una temperatura di presa inferiore ai 300°C,
- possono essere prodotti da materie prime di scarto e loro stessi riciclati,
- Sono eco-compatibili (*environmentally friendly*).

La tecnologia dei geopolimeri permette la produzione di una vasta gamma di materiali versatili che trovano già applicazioni in vari settori industriali. Inoltre, i geopolimeri consentono l'utilizzo di materiali con proprietà ceramiche, con le stesse modalità di alcune materie plastiche, rimuovendo gli equipaggiamenti pesanti e le alte temperature dagli impianti ceramici industriali. I geopolimeri sono quindi il prodotto naturale della chimica verde, che lavora per uno sviluppo sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Glukhovsky, V. D., Rostovskaja, G. S., Rumyna, G. V., 1980, *Communications of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement* **3**, p. 164.
- [2] Davidovits, J., 2002, 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs, Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia.
- [3] Davidovits, J., 1991, Geopolymer: inorganic polymeric new materials, *J. Thermal analysis* **37**, pp.1633-56.
- [4] Davidovits, J., 1994, Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement, *Journal of Material Education* **16**, pp. 91-139.
- [5] Sheppard, L.M., Geopolymer Composites: A Ceramics Alternative to Polymer Matrices. See also URL <http://composite.about.com/>
- [6] Gordon, M., Bell, J., Kriven, W. M., 2006, Geopolymers: Alkali Bonded Ceramics (ABCs) for High-Tech Applications, *Ceram. Tran.*, **175**, pp. 215-224.
- [7] Wagh, A.S., Jeong, S.Y., 2003, Chemically Bonded Phosphate Ceramics: I, A Dissolution Model of Formation, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86** [11], pp. 1838-44.
- [8] <http://www.geopolymer.org/>

- [9] Duxson, P., Fernandez-Jimenez A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., van Deventer, J. S. J., 2007, Geopolymer technology: the current state of the art, *J Mater Sci*, **42**, pp. 2917–2933.
- [10] Comrie D. C., Kriven, W. M., 2003, Composite Cold Ceramic Geopolymer in a Refractory Application, *Ceram. Tran.*, **153**, pp. 211-225.
- [11] Davidovits, J., 2002, Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications, Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia. See also URL <http://www.geopolymer.org/>
- [12] Phair, J.W., 2006, Green chemistry for sustainable cement production and use, *Green Chem.*, **8**, pp. 763–780.
- [13] Gartner, E. M., Myers, D. F., 1991, *Ceram. Trans.*, **16**, p. 621.
- [14] Balaguru, P.N., Kurtz S., Rudolph J., Geopolymer for repair and rehabilitation of reinforced concrete beams. See also URL <http://www.geopolymer.org/>
- [15] Sumajouw, M.D.J., Rangan, B. V., 2006, Low-calcium fly ash based geopolymer concrete: reinforced beams and columns Research Report GC 3 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.
- [16] Hermann, E., Kunze, C., Gatzweiler, R., Kießig, G., Davidovits, J., (1999) Solidification of various radioactive residues by Gèoplymère with special emphasis on long-term-stability, Gèopolymère '99 Proceedings. See also URL <http://www.geopolymer.org/>