
GEOPOLÍMERS

Autor:

Data de publicació: 15-05-2012

Els geopolímers són inorgànics, típicament ceràmics, alumino-silicats formant xarxes de llarg abast, unides covalentment, no cristal·lines (amorfes). Els fragments d'obsidiana (vidre volcànic) són un component d'algunes mesclures de geopolímers. [1] Els geopolímers produïts comercialment es poden utilitzar per a recobriments i adhesius resistents al foc i a la calor, aplicacions medicinals, ceràmiques d'alta temperatura, nous aglutinants per a compostos de fibra resistents al foc, encapsulació de residus tòxics i radioactius i nous ciments per al formigó.

Els geopolímers són inorgànics, típicament ceràmics, alumino-silicats formant xarxes de llarg abast, unides covalentment, no cristal·lines (amorfes). Els fragments d'obsidiana (vidre volcànic) són un component d'algunes mesclures de geopolímers. [1] Els geopolímers produïts comercialment es poden utilitzar per a recobriments i adhesius resistents al foc i a la calor, aplicacions medicinals, ceràmiques d'alta temperatura, nous aglutinants per a compostos de fibra resistents al foc, encapsulació de residus tòxics i radioactius i nous ciments per a formigó. Les propietats i usos dels geopolímers s'estan explorant en moltes disciplines científiques i industrials: química inorgànica moderna, química física, química de col·loïdes, mineralogia, geologia i en altres tipus de tecnologies de processos d'enginyeria. El camp dels geopolímers és una part de la ciència, la química i la tecnologia de polímers que forma una de les principals àrees de la ciència dels materials.

Els polímers són materials orgànics, és a dir, basats en el carboni, o polímers inorgànics, per exemple basats en silici. Els polímers orgànics comprenen les classes de polímers naturals (cautxú, cel·lulosa), polímers orgànics sintètics (fibres tèxtils, plàstics, pel·lícules, elastòmers, etc.) i biopolímers naturals (biologia, medicina, farmàcia). Les matèries primeres utilitzades en la síntesi de polímers basats en silici són principalment minerals formadors de roques d'origen geològic, d'aquí el nom: geopolímer. Joseph Davidovits va encunyar el terme el 1978[2] i va crear la institució científica francesa sense ànim de lucre (Association Loi 1901) Institut Géopolymère (Institut de Geopolímers).

Segons T.F. Yen[3] els geopolímers es poden classificar en dos grans grups: geopolímers inorgànics purs i orgànics que contenen geopolímers, anàlegs sintètics de macromolècules naturals. En la següent presentació, un geopolímer és essencialment un compost químic mineral o barreja de compostos consistents en unitats repetitives, per exemple silico-òxid (-Si-O-Si-O-), silico-aluminat (-Si-O-Al-O-), ferro-silico-aluminat (-Fe-O-Si-O-Al-O-) o alumino-fosfat (-Al-O-P-O-), creat mitjançant un procés de geopolimerització. [4] Aquesta síntesi mineral (geosíntesi) es va presentar per primera vegada en un simposi de la IUPAC el 1976. [5]

La microestructura dels geopolímers depèn essencialment de la temperatura: és de raigs X amorfa a temperatura ambient, però evoluciona a una matriu cristal·lina a temperatures superiors a 500 °C.[6]

Es poden distingir dues rutes de síntesi: en medis alcalins (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca²⁺, Cs⁺ i similars); o En medis àcids amb àcid fosfòric, àcids carboxílics orgànics procedents d'extractes vegetals (àcids acètic, cítric, oxàlic i húmic).

A principis dels anys 2000 la ruta alcalina era la més important pel que fa a investigació i desenvolupament i aplicacions comercials i es descriu a continuació. La ruta àcida es discuteix en altres llocs. [7][8]

Contingut

Definició

A la dècada de 1950, Víktor Glukovski, de Kíev, URSS, va desenvolupar materials de formigó coneguts originalment sota els noms de "formigons de silicat del sòl" i "ciments del sòl", [9] però des de la introducció del concepte de geopolímer per Joseph Davidovits, 1991, la terminologia i les definicions de "geopolímer" s'han tornat més diverses i sovint conflictives. Els exemples següents es van extreure de publicacions científiques de 2011, escrites per científics amb diferents antecedents.

Definicions del terme geopolímer[10]

Per a químics[11]

'... Els geopolímers consisteixen en un marc polimèric Si-O-Al, similar a les zeolites. La principal diferència amb la zeolita és que els geopolímers són amorfs en lloc de cristal·lins. La microestructura dels geopolímers a escala nanomètrica observada per TEM comprèn petits grups d'aluminosilcats amb porus dispersos dins d'una xarxa altament porosa. Les mides dels clústers són d'entre 5 i 10 nanòmetres".

Per a químics de materials geopolímers[12]

'... La reacció produeix SiO_4 i AlO_4 , marcs tetraèdrics units per oxigens compartits com poli(sialats) o poli(sialat-siloxo) o poli(sialat-disiloxo) depenent de la relació $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ en el sistema. La connexió dels marcs tetraèdrics es produeix mitjançant enllaços covalents de llarg abast. Així, l'estructura geopolímera es percep com una fase amorfa densa que consisteix en una microestructura semicristal·lina d'alumini-silicat 3-D.

Per als científics del ciment àlcali[13]

'... Els geopolímers són estructures entramades produïdes per condensació d'unitats d'aluminosilicat tetraèdric, amb ions metàl·lics alcalins equilibrant la càrrega associada a l'Al. Convencionalment, els geopolímers se sintetitzen a partir d'una barreja de dues parts, que consisteix en una solució alcalina (sovint silicat soluble) i materials sòlids aluminosilcats. La geopolimerització es produeix a temperatura ambient o lleugerament elevada, on la lixiviació de matèries primeres sòlides d'aluminosilicat en solucions alcalines condueix a la transferència d'espècies lixiviables de les superfícies sòlides a una fase de gel en creixement, seguida de la nucleació i condensació de la fase de gel per formar un aglutinant sòlid.

Per a químics ceràmics geopolímers[14]

'... Tot i que el geopolímer és generalment amorf de raigs X si es cura a pressions i temperatures estàndard, es convertirà en fases ceràmiques cristal·lines com la leucita o la pol·lucita en escalfar-se.

Per a científics ceràmics[15]

'... Els geopolímers són una classe de ceràmiques totalment inorgàniques, a base d'alumini-silicat que estan equilibrades per la càrrega dels òxids del grup I. Són gels rígids, que es fabriquen en condicions relativament ambientals de temperatura i pressió en cossos de dimensió gairebé neta, i que posteriorment es poden convertir en materials cristal·lins o vitroceràmics.

Síntesi de geopolímers

Coordinació iònica vs enllaç covalent

El 1937, W. L. Bragg va publicar un mètode per classificar tot tipus de silcats i les seves estructures cristal·lines basat en el concepte de la teoria iònica de Linus Pauling. La unitat fonamental és un complex tetraèdric format per un petit catió com Si^{4+} , o Al^{3+} en coordinació tetraèdrica amb quatre oxigens (primera regla de Pauling). Molts llibres de text expliquen la geometria del tetràedre SiO_4 i altres estructures minerals determinades per les mides relatives dels diferents ions.

Aquesta representació iònica de coordinació ja no s'adapta als requeriments de la química geopolímera que es regeix per mecanismes d'enllaç covalent. Les diferències entre el concepte iònic (coordinació) i l'enllaç covalent són profundes. L'estructura del doble tetràedre (coordinació) comparteix un anió d'oxigen O^{2-} , mentre que en l'estructura molecular Si-O-Si-, l'enllaç covalent s'aconsegueix compartint només un electró. [16] Això resulta en un vincle més fort dins d'aquesta última estructura. El mineralogista i geoquímic nord-americà G. V. Gibbs i el seu equip van estudiar l'enllaç polimèric Si-O-Si-O i van afirmar el 1982-2000:

L'exitosa modelització de les propietats i estructures de la sílice ... dóna credibilitat a l'afirmació que un polimorf de sílice com el quarz pot ser vist com una molècula gegant unida per essencialment les mateixes forces que uneixen els àtoms de l'esquelet Si-O-Si en una petita molècula de siloxà. [17]

El terme molècula gegant utilitzat per G.V. Gibbs és equivalent a la definició de geopolímer i la petita molècula de siloxà descriu els oligòmers reals de compostos organo-silici ben coneguts com a polímer de silicona. Aquests oligòmers de siloxà tenen la mateixa estructura que els oligòmers de silico-aluminat descrits a continuació en aquest article.

Geopolimerització amb oligòmers

Cinc oligòmers aïllats de les espècies K-poly(sialate)/poly(sialate-silxo)

La geopolimerització és el procés de combinar moltes molècules petites conegudes com a oligòmers en una xarxa enllaçada covalentment. Les síntesis geoquímiques es duen a terme a través d'oligòmers (dímer, trímer, tetràmer, pentàmer) que proporcionen les estructures unitàries reals de l'edifici macromolecular tridimensional. El 2000, T.W. Swaddle i el seu equip[18] van demostrar l'existència de molècules aïllades solubles d'alumini-silicat en solució en concentracions relativament altes i pH alt. Una millora important en la seva investigació va ser que el seu estudi es va dur a terme a temperatures molt baixes, tan baixes com -9 °C. De fet, es va descobrir que la polimerització a temperatura ambient dels oligo-sialats tenia lloc en una escala de temps d'uns 100 mil·lisegons, és a dir, de 100 a 1000 vegades més ràpid que la polimerització d'unitats orto-silicats, oligo-siloxos. A temperatura ambient o superior, la reacció és tan ràpida que no es pot detectar amb equips analítics convencionals.

La imatge mostra 5 oligòmers solubles de les espècies K-poli(sialat) / poli(sialat-siloxo), que són les unitats de partida reals de la geopolimerització d'alumini-silicat basada en potassi.

Exemple de geopolimerització (-Si-O-Al-O-) amb metacaolina MK-750 en medi alcalí[19]

Consta de quatre fases principals que comprenen set passos de reacció química:

Despolimerització alcalina de la capa poli(silox) de caolinita;

Formació d'espècies monomèriques i oligomèriques, inclosa la molècula "orto-sialat" (OH)₃-Si-O-Al-(OH)₃ (#1 a la figura);

En presència de vidre d'aigua (K-polisiloxonat soluble), s'obté la creació d'una estructura cíclica orto-sialat-disiloxo (per exemple, #5 a la figura), mitjançant la qual l'hidròxid és alliberat per reaccions de condensació i pot reaccionar de nou; Geopolimerització (policondensació) en oligòmers superiors i xarxes 3D polimèriques.

La cinètica de geopolimerització per a Na-poli(sialat-siloxo) i K-poli(sialat-siloxo) són lleugerament diferents respectivament. Això es deu probablement a les diferents dimensions dels cations Na⁺ i K⁺, sent K⁺ més gran que Na⁺.

Exemple de geopolimerització zeolítica (Si-O-Al-O-) amb cendres volants en medi alcalí[20]

Consta de 5 fases principals

Etapa de nucleació en la qual els aluminosilicats de la partícula de cendres volants es dissolen en el medi alcalí (Na⁺), alliberant aluminats i silicats, probablement en forma de monòmers.

Aquests monòmers reaccionen inter-per formar dímers, que al seu torn reaccionen amb altres monòmers per formar trímers, tetràmers, etc.

Quan la solució arriba a la saturació, precipita un gel ric en alumini (denominat Gel 1).

A mesura que avança la reacció, més grups Si-O de la font sòlida inicial es dissolen, augmentant la concentració de silici en el medi i augmentant gradualment la proporció de silici en el gel precursor de la zeolita (Gel 2).

Policondensació en marcs 3D similars a la zeolita.

Marcs 3D de geopolímers

Deshidroxilació de poli(sialat-silox) en marc 3D

La geopolimerització forma marcs d'aluminosilicat que són similars als dels minerals formadors de roques. No obstant això, hi ha grans diferències. El 1994, Davidovits[21] va presentar una estructura teòrica per a K-poli(sialat-siloxo) (K)-(Si-O-Al-O-Si-O) que era consistent amb els espectres de RMN. No mostra la presència d'aigua en l'estructura perquè només es va centrar en la relació entre els àtoms de Si, Al, Na, K. L'aigua només està present a temperatures inferiors a 150 °C – 200 °C, essencialment en forma de grups -OH, mentre que nombroses aplicacions industrials i comercials de geopolímers treballen a temperatures superiors a 200 °C, fins a 1400 °C, és a dir, a temperatures superiors a la deshidroxilació. No obstant això, els científics que treballen en aplicacions de baixa temperatura, com el

ciment i la gestió de residus, van intentar identificar la hidratació catiònica i les molècules d'aigua. [22][23] Aquest model mostra un geopolímer reaccionat incompletament (a l'esquerra de la figura), que implica grups Si-OH lliures que més tard amb el temps o amb la temperatura es policondensaran amb Al-O-K oposat, en enllaços sialats Si-O-Al-O. L'aigua alliberada per aquesta reacció o bé roman en els porus, s'associa amb el marc de manera similar a l'aigua zeolítica, o bé pot ser alliberada i eliminada. Diversos marcs 3D es descriuen en el llibre 'Geopolymer Chemistry and Applications'. [24] Després de la deshidroxilació (i la deshidratació), generalment per sobre dels 250 °C, els geopolímers es tornen cada vegada més cristal·lins (a la dreta de la imatge) i per sobre dels 500-1000 °C (depenent de la naturalesa del catió alcalí present) cristal·litzen i tenen patrons de difracció de raigs X i estructures marc idèntiques als seus anàlegs geològics.

Commercial applications

There exist a wide variety of potential and existing applications. Some of the geopolymer applications are still in development whereas others are already industrialized and commercialized. See the incomplete list provided by the Geopolymer Institute.[25] They are listed in three major categories:

Geopolymer resins and binders

Materials resistents al foc, aïllament tèrmic, escumes;

Rajoles ceràmiques de baixa energia, articles refractaris, refractaris al xoc tèrmic;

Sistemes de resina d'alta tecnologia, pintures, aglutinants i rejuntades;

Bioteχνologies (materials per a aplicacions medicinals);

Indústria de foneria (resines), utilitats per a la fabricació de compostos de fibra orgànica;

Composites per a la reparació i enfortiment d'infraestructures, compostos de fibra de carboni d'alta tecnologia resistents al foc i resistents a la calor per a interiors i automòbils d'avions;

Contenció de residus radioactius i tòxics;

Ciments i formigons geopolímers

Materials de construcció de baixa tecnologia (maons d'argila);

Ciments i formigons baixos en CO₂.

Arts i arqueologia

Artefactes decoratius de pedra, arts i decoració;

Patrimoni cultural, arqueologia i història de les ciències.

Resines i aglutinants geopolímers

La classe de materials geopolímers és descrita per Davidovits com: [26]

Aglutinant geopolímer basat en Metacaolin MK-750

fórmula química (Na,K)-(Si-O-Al-O-Si-O-), relació Si:Al=2 (rang 1,5 a 2,5)

Aglutinant geopolímer basat en sílice

fórmula química (Na,K)-n(Si-O-)-(Si-O-Al-), relació Si:Al>20 (rang 15 a 40).

Aglutinant geopolímer basat en gel solàrium (sintètic MK-750)

fórmula química (Na,K)-(Si-O-Al-O-Si-O-), relació Si:Al=2

La primera resina geopolímera va ser descrita en una sol·licitud de patent francesa presentada per J. Davidovits el 1979. La patent nord-americana, US 4.349.386, va ser concedida el 14 de setembre de 1982 amb el títol Mineral Polymers and methods of making them. Es tractava essencialment de la geopolimerització de silicat soluble alcalí [vidre d'aigua o (Na,K)-polisiloxonat] amb argila caolinítica calcinada (posteriorment encunyada metacaolina MK-750 per ressaltar la importància de la temperatura de calcinació, és a dir, 750 °C en aquest cas). El 1985, Kenneth MacKenzie i el seu equip de Nova Zelanda, van descobrir la coordinació Al(V) de caolinita calcinada (MK-750), descrivint un "canvi químic intermedi entre tetraèdric i octaèdric". [27] Això va tenir una gran aportació cap a una millor comprensió de la seva reactivitat geopolimèrica.

Des de 1979, la indústria química, a tot el món, va desenvolupar una varietat de resines, aglutinants i rejuntades. [28]

Utilització potencial de materials compostos geopolímers

Les resines geopolímeres basades en Metacaolin MK-750 i basades en sílice s'utilitzen per impregnar fibres i teixits per obtenir compostos de fibra basats en matrius geopolímeres. Aquests productes són resistents al foc; No alliberen fum ni fums tòxics. Van ser provats i recomanats per les principals institucions internacionals com l'Administració Federal d'Aviació Americana FAA. [29] La FAA va seleccionar el compost carboni-geopolímer com el millor candidat per al programa de cabina resistent al foc (1994-1997). [30] Els geopolímers són materials hostes atractius per immobilitzar residus nuclears a causa de la seva alta durabilitat ambiental i flexibilitat als canvis compositiu dels residus. Ja s'utilitzen a escala industrial per immobilitzar fluxos de residus radioactius difícils a la República Txeca i Eslovàquia. [31][32]

Material resistent al foc

Time to flashover: comparació entre composites de matriu orgànica i geopolímer-matriu

Més informació: Flashover

El flashover és un fenomen exclusiu dels incendis de compartiments on els productes de combustió incompleta s'acumulen al sostre i s'encenen provocant una implicació total dels materials del compartiment i assenyalant la fi de la supervivència humana. En conseqüència, en un incendi de compartiment, el temps per parpellejar és el temps disponible per a la fugida i aquest és el factor més important per determinar el perill d'incendi d'un material o conjunt de materials en un incendi compartimental. L'Administració Federal d'Aviació ha utilitzat el time-to-flashover dels materials en les proves de cabina dels avions com a base per a un alliberament de calor i criteris d'acceptació de la taxa d'alliberament de calor per als materials de cabina per a avions comercials. La figura mostra com la millor matriu orgànica feta de termoplàstics d'enginyeria arriba al flashover després del període d'encesa de 20 minuts i genera fum apreciable, mentre que el compost de matriu geopolímera mai s'encendrà, arribarà a flashover ni generarà cap fum en un incendi de compartiment.

El compost carboni-geopolímer s'aplica als cotxes de carreres al voltant de les peces d'escapament. [33] Aquesta tecnologia es podria transferir i aplicar per a la producció massiva de peces regulars d'automòbils (tubs d'escapament resistents a la corrosió i similars), així com escuts tèrmics. [34] Un conegut fabricant d'automòbils ja va desenvolupar un sistema de tubs d'escapament geopolímer-compost. [35]

Ciments geopolímers

Article principal: Cement geopolímer

La producció de ciment geopolímer requereix un material precursor d'aluminosilicat com el metacaolí o les cendres volants, un reactiu alcalí fàcil d'utilitzar [36] (per exemple, silicats solubles en sodi o potassi amb una relació molar $MR \text{ SiO}_2:M_2\text{O} \geq 1,65$, sent M Na o K) i aigua (vegeu la definició de reactiu "fàcil d'utilitzar" més avall). L'enduriment de la temperatura ambient s'aconsegueix més fàcilment amb l'addició d'una font de cations de calci, sovint d'alt forn.

Química del ciment pòrtland vs química de geopolímers

Química del ciment pòrtland comparada amb la geopolimerització GP

Esquerra: enduriment del ciment Portland (P.C.) mitjançant la hidratació del silicat càlcic en hidrat de silicat càlcic (C-S-H) i portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Dreta: enduriment (ajust) del ciment geopolímer (GP) mitjançant policondensació d'oligo-potassi-(sialat-siloxo) en xarxa reticulada de poli potàssic (sialat-silox).

Categories de ciment geopolímer

Les categories comprenen:

Ciment geopolímer a base d'. [37]

Ciment geopolímer a base de roca. [38]

Ciment geopolímer a base de cendres volants

Tipus 1: geopolímer de cendres volants activat per àlcalis. [39]

Tipus 2: ciment geopolímer a base d'/cendres volants. [40][41][42]

Ciment geopolímer a base d'

Components: metacaolí (MK-750) + d'alt forn + silicat alcalí (fàcil d'utilitzar). Maquillatge geopolimèric: Si:Al = 2 de fet[cal citació] solució sòlida de Si:Al=1, Ca-poli(di-sialat) (tipus anorthita) + Si:Al = 3, K-poli(sialat-disiloxo) (tipus ortoclasa) i C-S-H Ca-silicat hidrat.

El primer ciment geopolímer desenvolupat en la dècada de 1980 va ser del tipus (K,Na,Ca)-poli(sialat) (o ciment geopolímer basat en) i va resultar dels desenvolupaments d'investigació duts a terme per Joseph Davidovits i J.L. Sawyer a Lone Star Industries, EUA i va produir la invenció del ciment piramentós®. La sol·licitud de patent nord-americana es va presentar el 1984 i la patent US 4.509.985 es va concedir el 9 d'abril de 1985, amb el títol "Early high-resistance mineral polymer".

Ciment geopolímer a base de roca

La substitució d'una certa quantitat de MK-750 per tufs volcànics seleccionats produeix ciment geopolímer amb millors propietats i menys emissió de CO₂ que el ciment geopolímer simple basat en. [cal citació]

Components de fabricació: metacaolí MK-750, d'alt forn, tufs volcànics (calcinats o no calcinats), revestiments de mines i silicat alcalí (fàcil d'utilitzar). Maquillatge geopolimèric: Si:Al = 3, de fet[cal citació] solució sòlida de Si:Al=1 Ca-poli(di-sialat) (tipus anorthita) + Si:Al = 3-5 (Na,K)-poli(silicat-multisiloxo) i C-S-H Ca-silicat hidrat.

Ciments geopolímers a base de cendres volants

Més tard, el 1997, basant-se en els treballs realitzats sobre ciments geopolimèrics basats en, d'una banda i sobre la síntesi de zeolites a partir de cendres volants d'altra banda, Silverstrim et al.[44] i van Jaarsveld i van Deventer[45] van desenvolupar ciments geopolimèrics basats en cendres volants. La patent nord-americana 5.601.643 de Silverstrim et al. es titulava "Material cementici de cendres volants i mètode de fabricació d'un producte".

Emissions de CO₂ durant la fabricació

Segons l'expert australià en formigó B. V. Rangan, la creixent demanda mundial de formigó és una gran oportunitat per al desenvolupament de ciments geopolímers de tot tipus, amb la seva molt menor xifra de diòxid de carboni CO₂. [46] El 2021, un estudi d'anàlisi de cicle de vida realitzat per investigadors de la Universitat de Nova Gal·les del Sud (UNSW Sydney), Austràlia, va confirmar que els morters de geopolímer estableixen resistència a la compressió i resistència a la flexió adequades per a aplicacions de construcció i presenten beneficis de sostenibilitat en el potencial d'escalfament global, el que suggereix que són possibles substitucions del ciment portland ordinari. No obstant això, el tractament de residus industrials (és a dir, la preparació de cendres volants) esgota les masses d'aigua i el silicat de sodi indueix importants càrregues ambientals durant la seva fabricació, convertint-se en el factor clau per millorar la sostenibilitat del geopolímer. [47]

La necessitat d'estàndards

Al juny de 2012, la institució ASTM International va organitzar un simposi sobre Geopolymer Binder Systems. La introducció al simposi diu:[cal citació] Quan es van escriure les especificacions de rendiment per al ciment Portland, els aglutinants no portland eren poc comuns... Cada vegada s'investiguen més nous aglutinants com els geopolímers, es comercialitzen com a productes especials i s'exploren per al seu ús en formigó estructural. Aquest simposi pretén proporcionar una oportunitat perquè ASTM consideri si les normes de ciment existents proporcionen, d'una banda, un marc eficaç per a una major exploració dels aglutinants de geopolímers i, d'altra banda, una protecció fiable per als usuaris d'aquests materials.

Les normes existents de ciment portland no estan adaptades als ciments geopolímers. Han de ser creats per un comitè ad hoc. No obstant això, per fer-ho, es requereix també la presència de ciments geopolímers estàndard. Actualment, cada expert presenta la seva pròpia recepta basada en matèries primeres locals (residus, subproductes o extrets). Cal seleccionar la categoria adequada de ciment geopolímer. L'estat del geopolímer R&D de 2012,[48] va suggerir seleccionar dues categories, a saber:

Ciment geopolímer tipus 2 a base d'/ cendres volants: les cendres volants estan disponibles als principals països emergents;

Ciment geopolímer a base de ferro-sialat: aquesta matèria primera geològica rica en ferro està present a tots els països del món, i;

El reactiu geopolimèric apropiat i fàcil d'utilitzar.

Aplicacions dels geopolímers a les arts i l'arqueologia

Com que els artefactes geopolímers semblen pedra natural, diversos artistes van començar a fondre en motlles de

cautxú de silicona rèpliques de les seves escultures. Per exemple, a la dècada de 1980, l'artista francès Georges Grimal va treballar en diverses formulacions de pedra fosa de geopolímer. [49]

Pedres piramidals egípcies

Article principal: Tècniques de construcció de piràmides egípcies

Pel que fa a les aplicacions arqueològiques, a mitjans de la dècada de 1980, Joseph Davidovits va presentar els seus primers resultats analítics realitzats sobre pedres piramidals genuïnes. Va afirmar que els antics egipcis sabien generar una reacció geopolimèrica en la fabricació d'un reaglomerat blocs de pedra calcària. [50] El científic ucraïnès G.V. Glukhovsky va donar suport a la investigació de Davidovits en el seu document principal al Primer Intern. Conf. sobre ciments i formigons alcalins, Kíev, Ucraïna, 1994. [51] Més tard, diversos científics i físics de materials es van fer càrrec d'aquests estudis arqueològics i estan publicant els seus resultats, essencialment en pedres piramidals. [52][53][54][55]

Ciments romans

De l'excavació d'antigues ruïnes romanes, se sap que aproximadament el 95% dels formigons i morters que constitueixen les construccions romanes consisteixen en un ciment de calç molt senzill, que es va endurir lentament per l'acció precipitant del diòxid de carboni CO₂, procedent de l'atmosfera i de la formació d'hidrat de silicat càlcic (C-S-H). Es tracta d'un material molt feble o mitjà que s'utilitzava essencialment en la fabricació de fonaments i en edificis per a la població.

Però per a la construcció dels seus "ouvrages d'art", especialment obres relacionades amb l'emmagatzematge d'aigua (cisternes, aqüeductes), els arquitectes romans no van dubtar a utilitzar ingredients més sofisticats i cars. Aquests excel·lents ciments romans es basen en l'activació càlcica d'àrids ceràmics (en llatí testa, anàleg al nostre modern metacaolí MK-750) i tufs volcànics rics en àlcals (cretoni, putzolan zeolític), respectivament amb calç. Es van dur a terme investigacions d'espectroscòpia MAS-NMR sobre aquests ciments romans d'alta tecnologia que daten del segle II dC. Mostren la seva composició geopolimèrica. [2]

Vegeu també

Ciment geopolímer

Zeolita

Referències

- ^ Kozhukova, N.I.; Chizhov, R.V.; Zhervovsky, I.V.; Strokova, V.V. (2016). Formació de l'estructura de l'aglutinant de perlita geopolímer vs. tipus d'agent activador alcalí, International Journal of Pharmacy & Technology, vol. 8, núm. 3, p. 15.339.
- ^ Un article publicat per la Comissió de les Comunitats Europees el 1982, exposa les raons per les quals es va triar el terme genèric geopolímer per a aquesta nova química. Vegeu: J. Davidovits, The Need to Create a New Technical Language for the Transfer of Basic Scientific Information, in Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information, Proceedings of the symposium, Luxemburg, 10–12 juny 1981, pp. 316-320. Està disponible en format pdf i es pot descarregar a la Llibreria del Parlament Europeu. Aneu a < <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/02a1db8b-3873-46d7-9e72-a6e02660e154> > i feu clic a "descarregar".
- ^ Kim, D.; Lai, H.T.; Chilingar, G.V.; Ien T.F. (2006), Formació de geopolímers i les seves propietats úniques, Environ. Geol, 51[1], 103–111.
- ^ "Què és un geopolímer? Introducció – Institut de Geopolímers".
- ^ Fitxer pdf #20 Fita paper IUPAC 76 a <https://www.geopolymer.org/category/library/technical-papers>
- ^ Zoulgami, M; Lucas-Girot, A.; Michaud, V.; Briard, P.; Gaudé, J. i Oudadesse, H. (2002); Síntesi i caracterització fisicoquímica d'un compost de polisialat-hidroxiapatita per a potencial aplicació biomèdica, Eur. Phys. J. AP, 19, 173-179. Vegeu també: Kriven, W.M.; Campana, J.; Gordon, M. (2003), Microestructura i microquímica de geopolímers totalment reaccionats i compostos de matriu geopolimèrica, transaccions ceràmiques, 153, 227–250; Perera, D.S. i Trautman R.L. (2005), Geopolímers amb potencial per al seu ús com a castables refractaris, avenços en tecnologia de processament de materials i materials, 7[2], 187–190.
- ^ Wagh, A.S. (2004), Ceràmica fosfat enllaçada químicament – una nova classe de geopolímers, Actes del 106è Ann. Mtg. de l'American Ceramic Society, Indianapolis. Vegeu també, Capítol 13, Geopolímers basats en fosfats, al llibre de J. Davidovits Geopolymer Chemistry and Applications.
- ^ Perera, D.S., Hanna, J.V., Davis, J., Blackford, M.G., Latella, B.A., Sasaki, Y. i Vance E.R. (2008), Forces relatives dels materials metacaolí reaccionats amb àcid fosfòric i reaccionats amb àlcali, J. Mater. Sci., 43, 6562–6566. Vegeu també, Cao, D.; Su, D.; Lu, B. i Yang Y. (2005), Síntesi i caracterització d'estructures de material geopolimèric basat en

metacaolinita i àcid fosfòric, Journal Chinese Ceramic Society, 33, 1385–89.

^ Gluchovskij V.D.: "Gruntosilikaty" Gosstrojizdat Kíev 1959, Patent URSS 245 627 (1967), Patent URSS 449894 (Patent appl. 1958, concedida 1974).

^ Vegeu, Discussió al Camp de Geopolímers 2012, vídeo Definició de geopolímers a la Viquipèdia a "Geopolymer Institute » GP Camp 2012". Arxivat de l'original el 2013-04-15. [Consulta: 2013-01-18].

^ Huang, Yi i Han, Minfang (2011) (Universitat de Minería i Tecnologia de la Xina, Pequín), La influència de l'addició de γ - Al_2O_3 en les propietats d'adsorció de microestructura, mecànica i formaldehid dels productes geopolímers basats en cendres volants, Journal of Hazardous Materials, 193, 90–94

^ Pimraksaa, K.; Chindaprasirt, P.; Rungchet, A.; Sagoe-Crentsil, K. i Sato, T. (2011) (Departament de Química Industrial, Universitat de Chiang Mai, Tailàndia; CSIRO, Melbourne, Austràlia; Universitat de Tohoku, Sendai, Japó), Geopolímer lleuger fet de materials silícis altament porosos amb diverses proporcions $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ i $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Ciència i Enginyeria de Materials A, 528, 6616–6623.

^ Feng, Dingwu; Provis, John L. i van Deventer, Jannie S. J. (2012) (Universitat de Melbourne, Austràlia), Activació tèrmica d'albita per a la síntesi de geopolímers de barreja d'una part, J. Am. Ceram. Soc., 95 [2] 565–572.

^ Peigang He, Dechang Jia, Meirong Wang, Yu Zhou, (2011) (Harbin Institute of Technology, Harbin, PR Xina:), Evolució tèrmica i cinètica de cristallització del geopolímer basat en potassi, Ceramics International, 37, 59–63.

^ Campana, Jonathan L.; Driemeyer, Patrick E. i Kriven, Waltraud M. (2009) (Universitat d'Illinois, EUA), Formació de ceràmica a partir de geopolímers basats en metacaolí. Part II: Geopolímer basat en K, J. Am. Ceram. Soc., 92 [3], 607-615.

^ Vegeu la xifra a <https://www.geopolymer.org/science/about-geopolymerization>

^ Gibbs, G.V.; Turó, F.C.; Boisen Jr, M.B. i Downs R.T., (2000), Molècules com a base per modelar el camp de forces de la sílice, capítol 6 en estructura i imperfeccions en diòxid de silici amorf i cristal·lí, editat per R. A. B. Devine, J.-P. Duraud i E. Dooryhee, John Wiley & Sons Ltd

^ North, M.R. i Swaddle, T.W. (2000). Cinètica de l'intercanvi de silicats en solucions d'aluminosilicat alcalí, Inorg. Chem., 39, 2661–2665.

^ veure a <https://www.geopolymer.org/science/about-geopolymerization>

^ Duxson, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C; Palomo, A. i Van Deventer, J.S.J., (2007), Tecnologia de geopolímers: l'estat actual de la qüestió, J. Mat. Sci., 42 (9) 2917–2933.

^ Davidovits, J., (1994), Geopolímers: geosíntesi de roques artificials i el desenvolupament resultant de ciment d'alta resistència molt primerenc, J. Educació de materials, 16 (2 i 3), 91–139.

^ Barbosa, V.F.F; MacKenzie, K.J.D. i Thaumaturgo, C., (2000), Síntesi i caracterització de materials basats en polímers inorgànics d'alúmina i sílice: polímers de polisialat sòdic, Intern. Revista de Materials Inorgànics, 2, pp. 309–317.

^ Rowles, M.R. (2004), La naturalesa estructural dels polímers inorgànics d'aluminosilicat: un estudi macro a nanoescala, tesi doctoral, Universitat de Tecnologia de Curtin, Perth, Austràlia.

^ Vegeu: Marcs estructurals i mecanismes químics, al llibre de Davidovits Geopolymer Chemistry and Applications, Seccions 8.6-8.7.

^ vegeu a <https://www.geopolymer.org/about/business-fellows> Arxivat 2019-09-25 a Wayback Machine.

^ vegeu els capítols 8, 11, 20 del llibre de J. Davidovits Geopolymer Chemistry and Applications.

^ Meinhold, R. H.; MacKenzie, K. J. D.; Marró, I. W. M. (1985). "Reaccions tèrmiques de caolinita estudiades per estat sòlid 27-Al i RMN 29-Si". Revista de Cartes de Ciència de Materials. 4 (2): 163–166. DOI:10.1007/BF00728065. ISSN 0261-8028. S2CID 96064063.

^ vegeu les actualitzacions a les Keynotes State of Geopolymer R&D, 2009, 2010, 2011 i 2012 a <https://www.geopolymer.org/camp>

^ El projecte de recerca de la FAA, 1994-1997 va implicar la col·laboració entre els equips de recerca de: - Departament de Bombers de la FAA, Atlantic City, EUA; - Universitat Rutgers de Nova Jersey, EUA; – Laboratori Cordi-Géopolymère, Saint-Quentin, França. Una imatge de les proves de compostos de geopolímers per FAA (Oil Burner Test of Fireproof composite) es pot descarregar a <https://www.fire.tc.faa.gov/Research/TargetAreas>

^ Lió, R.E.; Foden, A.J.; Balaguru, P.N.; Davidovits, J. i Davidovics, M. (1997), Propietats dels compostos de fibra de carboni de matriu geopolímera, foc i materials, 21, 67–73.

^ R.O. Abdel Rahman, R.Z. Rahimov, N.R. Rahimova, M.I. Ojovan. Materials cimentosos per a la immobilització de residus nuclears. ISBN 978-1-118-51200-5, Wiley, Chichester 232 pàg., (2015)

^ Almkvist, L.; Bai, S.; Bastiaens, W.; Cau-dit-Coumes, C.; Vidrier, F.; Govaert, J. (2013). "El comportament dels materials cimentosos en l'emmagatzematge i eliminació a llarg termini de residus radioactius | OIEA-TECDOC-1701, OIEA, 61 p., Viena (2013)". iaea.org. [Consulta: 21 febrer 2021].

^ Davidovics, M.; Bruno, M. i Davidovits, J. (1999), Experiència passada i present sobre l'ús de compostos de geopolímers de carboni en cotxes de competició de Fórmula U i CART, Geopolymer '99 Proceedings, 141–142.

^ Davidovits, J. (2002), 30 anys d'èxits i fracassos en aplicacions de geopolímers, tendències de mercat i avenços potencials, Geopolymer 2002 Conference, 28-29 d'octubre, Melbourne, Austràlia. Descarregueu el fitxer pdf #15 a <https://www.geopolymer.org/category/library/technical-papers>.

^ Vegeu la publicació de la sol·licitud de patent PCT WO 2004/106705 presentada per Porsche AG, 2004.

- ^ Vegeu els exemples a la pàgina de l'Institut de Geopolímers <https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement>
- ^ Davidovits, J. i Sawyer, J.L., (1985), Polímer mineral d'alta resistència primerenc, patent dels EUA 4,509,985, 1985, presentada el 22 de febrer de 1984. El primer ciment geopolímer comercial va ser encunyat Pyrament 2000™ dissenyat per a operacions de reparació i pegat.
- ^ Gimeno, D.; Davidovits, J.; Marini, C.; Rocher, P.; Tocco, S.; Cara, S.; Díaz, N.; Segura, C. i Sistu, G. (2003), Desenvolupament del ciment a base de silicats a partir de roques volcàniques alcalines vítries: interpretació de dades preliminars relacionades amb la composició mineralògica química de matèries primeres geològiques. Article en castellà, Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 42, 69-78. [Resultats del Projecte Europeu de Recerca GEOCISTEM (1997), Cost Effective Geopolymeric Cements for Innocuous Stabilisation of Toxic Elements, Informe Tècnic Final, 30 d'abril de 1997, Brussel·les, Projecte finançat per la Comissió Europea, Brite-Euram BE-7355-93, 1 de gener de 1994 a 28 de febrer de 1997].
- ^ Palomo, A.; Grutzeck, M.W. i Blanco, M.T. (1999), Cendres volants activades per àlcali: un ciment per al futur, Ciment de formigó Res, 29, 1323–1329.
- ^ GEOASH (2004-2007), El projecte GEOASH es va dur a terme amb una subvenció financera del Fons de Recerca del Carbó i l'Acer de la Comunitat Europea, número de contracte RFC-CR-04005. Hi participen: Antenucci D., ISSEP, Lieja, Bèlgica; Nugteren H. and Butselaar- Orthlieb V., Universitat Tecnològica de Delft, Delft, Països Baixos; Davidovits J., Cordi-Géopolymère Sarl, Saint-Quentin, França; Fernández-Pereira C. i Luna Y., Universitat de Sevilla, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial, Sevilla, Espanya; Izquierdo i M., Querol X., CSIC, Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, Barcelona, Espanya.
- ^ Izquierdo, M.; Querol, X.; Davidovits, J.; Antenucci, D.; Nugteren, H. i Fernández-Pereira, C., (2009), Geopolímers a base de cendres volants del carbó: microestructura i lixiviació metàl·lica, Journal of Hazardous Materials, 166, 561–566.
- ^ Vegeu: Capítol 12 del llibre de J. Davidovits Geopolymer Chemistry and Applications.
- ^ Davidovits, J. et al., Ciment geopolímer del tipus de polímer de silicat de calci-ferroaluminí i procés de producció, publicació de la patent PCT WO 2012/056125.
- ^ Silverstrim, T.; Rostami, H.; Larralde, J.C i Samadi-Maybodi, A. (1997), Material cimentós de cendres volants i mètode de fabricació d'un producte, Patent EUA 5.601.643.
- ^ Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. i Lorenzen L. (1997), L'ús potencial de materials geopolimèrics per immobilitzar metalls tòxics: Part I. Teoria i aplicacions, Enginyeria de minerals, 10 (7), 659–669.
- ^ Rangan, BV, (2008), Formigó geopolímer basat en cendres de mosca baixa en calci, capítol 26 a Concrete Construction Engineering Handbook, editor en cap E.G. Naway, segona edició, CRC Press, Nova York.
- ^ Tang, W.X.; Pignatta, G.; Sepasgozar, SME (2021). "Avaluació del cicle de vida de cendres volants i material geopolímer basat en la cenosa". Sostenibilitat. 13 (20): 11167. DOI:10.3390/SU132011167.
- ^ Vegeu el vídeo a "Institut de Geopolímers » GP Camp 2012". Arxivat de l'original el 2013-04-15. [Consulta: 2013-01-18].
- ^ Vegeu Possibles utilitzacions en art i decoració, a <https://www.geopolymer.org/applications/potential-utilizations-in-art-and-decoration>; un article pdf #19 Escultures dramatitzades amb geopolímers a <https://www.geopolymer.org/category/library/technical-papers/>
- ^ Davidovits, J. (1986), Anàlisi de raigs X i difracció de raigs X de pedres de carcassa de les piràmides d'Egipte, i la pedra calcària de les pedreres associades; pp. 511–20 in Science in Egyptology Symposia, editat per R. A. David, Manchester University Press, Manchester, Regne Unit (arxiu pdf #A a la Biblioteca de l'Institut Geopolímer, Archaeological Papers); vegeu també: Davidovits J., (1987), Formigons antics i moderns: quina és la diferència real? Internacional concreta: Des. Constr, 9 [12], 23–29. Vegeu també: Davidovits, J. i Morris, M., (1988), Les piràmides: un enigma resolt. Hippocrene Books, Nova York, 1988.
- ^ G.V. Glukhovski va morir abans de la conferència. El seu treball principal, titulat: Formigons antics, moderns i futurs, s'inclou a les Actes del Primer Intern. Conf. sobre ciments i formigons alcalins, pp. 1-9, Kíev, Ucraïna, 1994.
- ^ Demortier, G. (2004), PIXE, PIGE i estudi de RMN de la maçoneria de la piràmide de Kheops a Gizeh, Instruments i mètodes nuclears, Physics Research B, 226, 98–109.
- ^ Barsoum, M.W.; Ganguly, A. i Hug, G. (2006), Evidència microestructural de blocs de pedra calcària reconstituïts a les Grans Piràmides d'Egipte, J. Am. Ceram. Soc. 89[12], 3788–3796.
- ^ MacKenzie, Kenneth J.D.; Ferrer, Marc E.; Wong, Alan; Hanna, Joan V.; Barry, Bernard i Barsoum, Michel W. (2011), Les pedres de la carcassa de la piràmide doblegada de Senefru a Dahshour van ser foses o tallades? Proves multinuclears de RMN, Materials Letters 65, 350–352.
- ^ Túnyi, I. i El-hemaly, I. A. (2012), Investigació paleomagnètica de les grans piràmides egípcies, Europhysics News 43/6, 28-31.
- ^ Com a part del projecte de recerca europeu GEOCISTEM [33], Davidovits J. i Davidovits F. van mostrejar morters i formigons arqueològics que es remunten al segle II dC i més tard, a Roma i Òstia, Itàlia. Van seleccionar dues sèries d'artefactes: Opus Signinum a Roma, Opus Caementicum / Testaceum: morters i formigons (carbunculus), a Òstia. Parcialment publicat a Geopolymer '2 Proceedings, 99-283 i al llibre de Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, Secció 295.17. Vegeu també els espectres de RMN

Bibliografia

Geopolymer Chemistry and Applications, Joseph Davidovits, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, França, 2008, ISBN 9782951482050 (3a ed., 2011). En xinès: National Defense Industry Press, Beijing, ISBN 9787118074215, 2012.
Geopolímers Estructura, processament, propietats i aplicacions industrials, John L. Provis i Jannie S. J. van Deventer, Woodhead Publishing, 2009, ISBN 9781845694494.

Enllaços externs

Institut de Geopolímers: <https://www.geopolymer.org/>

Aliança de Geopolímers: <https://web.archive.org/web/20130409024601/http://geopolymers.com.au/>