

APROFITAMENT DEL SOFRE PER A LA FABRICACIÓ DE FORMIGÓ. UNA PROPOSTA SOSTENIBLE

Violeta Gràcia

Starlab Barcelona, SL

Introducció

El desenvolupament de nous materials és, avui en dia, una de les àrees prioritàries de la investigació científica i és responsable en gran mesura de nombrosos avenços en tecnologia. En l'àmbit de la construcció, la seva importància rau en la necessitat de disposar de materials de característiques optimitzades, és a dir, que manifestin, en tant que sigui possible, un alt rendiment, responen correctament als requeriments projectats per a la seva vida útil. D'altra banda, actualment s'ha reconegut la importància de l'impacte de les activitats humanes sobre el medi ambient, amb la qual cosa la minimització d'aquest impacte ha adquirit un interès preponderant en la ciència i la tecnologia. Pel que fa als materials de construcció, una de les seves importants contribucions a la conservació del medi ambient és la possibilitat d'utilitzar residus d'origen divers com a components d'aquests materials, amb la consegüent eliminació o minimització dels residus en quedar fixats en una matriu sòlida.

En les darreres dècades ha augmentat considerablement la disponibilitat de sofre en diversos llocs del món. Això es deu a les restriccions ambientals actuals pel que fa al procés de refinació del petroli i el gas natural, que limiten la quantitat màxima de sofre present en els combustibles amb el fi d'evitar la contaminació ambiental per diòxid de sofre procedent de vehicles i indústries. Per això, durant el tractament d'aquests recursos naturals previ al seu ús, s'obté sofre com a subproducte o residu en grans quantitats. Actualment, la majoria dels països han incorporat en les seves legislacions aquestes normatives ambientals, o bé les estan desenvolupant. A la Unió Europea, per exemple, es va acordar reduir de forma progressiva el contingut de sofre a la gasolina i el gasoil a partir de 2005, amb lleis que prohibiran des de 2009 combustibles amb més de 10 mil·ligrams de sofre per quilogram. En la figura 1 poden observar-se, com a exemple, dipòsits de sofre acumulat a Vancouver, procedent del refinatge de combustibles fòssils.

Cal esperar, per tant, que la producció de sofre a les refineries de petroli i gas natural augmenti significativa-

ment durant els propers anys. Per a tenir una idea de la magnitud del problema, es pot posar com a exemple el cas del petroli cru pesant (que és el principal en molts països), amb continguts de sofre entre el 3 % i el 5 % del pes total. A l'Amèrica del Sud, per exemple, un dels principals productors de petroli és Veneçuela: a les seves refineries es processen uns 280.000 barrils de cru al dia, dels quals se n'obtenen 1.780 tones de sofre diàries. En el cas de Xile, que també posseeix refineries de cru, s'estima que les quantitats obtingudes, que aniran augmentant gradualment, assoliran aviat uns valors de 60.000 tones per any i refineria aproximadament. En un altre context geogràfic, s'estima que, cap a finals d'aquesta dècada, a Kazakhstan es produiran uns 5 milions de tones anuals de sofre excedent com a resultat de l'explotació dels dipòsits petrolífers.

És poc probable que pugui utilitzar-se tot el sofre obtingut d'aquesta manera en les aplicacions tradicionals, que es troben a la indústria química i a l'agricultura, ni que els països productors puguin exportar aquestes quantitats. Per això, existeix un considerable i creixent interès a desenvolupar noves aplicacions per a aquest element, per estar considerat ja com un important dipòsit contaminant (a més, donat que es tracta d'un subproducte, la seva utilització comporta avantatges econòmics). De fet, aquest problema ja s'havia detectat a les últimes dècades, impulsant la investigació de nous camps d'aplicació per al sofre, essent-ne un dels més prometedors l'ús com a component de materials de construcció.

Els materials basats en el sofre que s'han desenvolupat majoritàriament s'inscriuen en tres grups: (1) compostos d'asfalt i sofre per a la construcció i reparació de paviments, en els quals el sofre representa un 30-50 % de la mescla; (2) materials amb certa plasticitat i gran capacitat d'aïllament tèrmic (escumes de sofre), i (3) formigó de sofre, material d'alta resistència a àcids, sals i humitat, i capaç d'assolir les seves propietats en edats primerenques. A més, s'ha investigat l'ús de sofre per a impregnar altres materials, com el formigó convencional, per a millorar les seves propietats mecàniques i químiques, i la fabricació de morters de sofre com a lligants en parets de blocs prefabricats. Tots aquests



FIGURA 1. Dipòsits de sofre obtingut com a subproducte del refinatge del petroli a Vancouver (Canadà).

materials han estat utilitzats i comercialitzats en alguns països, principalment al Canadà i als Estats Units, i més recentment a Xile, l'Iran, el Japó, Corea del Sud i a alguns països europeus, i s'han obtingut resultats altament satisfactoris en les aplicacions realitzades.

El concepte de formigó de sofre

El formigó de sofre és un material termoplàstic constituït per una mescla d'àrid fi, àrid gruixut i sofre com a lligant. No conté aigua ni ciment. La tecnologia del procés de fabricació, similar a la de l'asfalt, és relativament simple: els components es mesclen a una temperatura que es trobi per sobre del punt de fusió del sofre (119 °C), el qual, llavors, es torna líquid i embolcalla l'àrid fins a formar una mescla homogènia. En refredar-se posteriorment, el sofre se solidifica, lliga l'àrid i forma una massa dura i rígida. A diferència del formigó de ciment, l'enduriment del qual és conseqüència d'un procés químic, el refredament i enduriment del formigó de sofre és de tipus físic, sense necessitar cap reacció química ni condicions especials d'humitat; l'únic procés implicat és un canvi de fase del sofre.

El formigó de sofre no és un material nou. La utilització de sofre fos com a lligant es remunta al segle XVII, en què es va utilitzar per a adherir metall i pedra, i es conserven encara alguns exemples d'aquesta tècnica a l'Amèrica del Sud. En realitat, es tenen proves molt més antigues del coneixement del sofre i la seva utilització, ja que se'n troben citacions en alguns textos clàssics com l'Odissea i la Bíblia. El 1859 Wright va descriure les propietats aglutinants del sofre en una patent als Estats Units, però durant els seixanta anys següents no va haver-hi pràcticament cap investigació sobre el possible ús del sofre en la construcció.

No obstant això, durant la Primera Guerra Mundial va haver-hi una demanda molt alta de sofre i es van obrir diversos dipòsits d'aquest element a l'Amèrica del Nord per

a la seva explotació. Aquesta operació va duplicar la producció anual de sofre als EUA i va tenir com a conseqüència un excedent de sofre considerable, la qual cosa va impulsar la recerca de noves aplicacions per a aquest element. A partir de 1920 es van publicar alguns estudis sobre la utilització del sofre excedent en la fabricació de materials de construcció i es van realitzar els primers experiments sobre aquest tipus de materials. Es van estudiar morters de sofre amb proporcions de 60 % de sorra i 40 % de sofre, que van resultar ser resistents als àcids i amb bones propietats mecàniques. A més, es van començar a estudiar diferents additius per a modificar les propietats del sofre per a aplicacions específiques, però la majoria de les substàncies estudiades no van resultar satisfactòries.

Entre 1934 i 1940 diversos investigadors van descobrir que el morter de sofre patia una important variació volumètrica sota cicles tèrmics, amb pèrdua de resistència a la flexió. Aquesta inestabilitat ve donada pel fet que el sofre, després de la solidificació als 119 °C, en refredar-se per sota dels 95,4 °C, pateix una transformació entre dos estats cristal·lins del sofre monoclínic al sofre ortoròmbic. Aquest últim és més dens, i ocupa, per tant, un menor volum, i aquest fet fa que el sofre quedi en un estat tensional intern i subjecte a desintegració sota cicles tèrmics o altres inestabilitats. Per a solucionar aquest problema, es va modificar el sofre amb un polisulfur olefínic que retardava tant la tendència a augmentar de volum com la consegüent pèrdua de resistència; la possibilitat d'obtenir ciments més estables va portar a una major acceptació industrial i investigació del producte, i s'aconseguí estendre l'ús de formigó de sofre en plantes químiques, especialment per a la construcció de tancs d'àcid.

Durant els trenta anys següents es van dedicar grans esforços a l'estudi dels modificadors i plastificants per al formigó de sofre que eliminessin l'augment de fragilitat d'aquest element. La majoria de les substàncies utilitzades van ser compostos polimèrics de diversos tipus, que, en reaccionar amb el sofre elemental, formen polisulfurs i intervenen en la cristallització del sofre. A partir d'aquestes investigacions, es van desenvolupar noves formulacions per al formigó de sofre, que milloraven les seves propietats i la seva durabilitat en el temps. Aquest desenvolupament, que es va donar principalment durant les dècades dels setanta i vuitanta, va tenir com a resultat un gran augment de l'interès en aquest material orientat cap a activitats comercials, i es van obtenir patents per a alguns dels materials obtinguts.

Un impuls important a aquest desenvolupament va ser el fet que el sofre va començar a obtenir-se com a subproducte del refinatge del petroli per exigències ambientals respecte als combustibles, amb la qual cosa grans quantitats d'aquest element van començar a emmagatzemar-se als països productors de petroli. Es van realitzar diverses investigacions per a caracteritzar i optimitzar el formigó de

sofre, que es van centrar en l'objectiu de dissenyar un material amb un comportament fisicomecànic satisfactori, és a dir, amb bona resistència sota càrregues, tensions, variacions tèrmiques, etc. Els treballs de caracterització realitzats van ser considerablement complets i exhaustius pel que fa a propietats fisicomecàniques. Diversos equips van obtenir patents i es va iniciar la comercialització del formigó de sofre, encara que el seu camp d'aplicació va ser relativament limitat, principalment orientat a l'àmbit de la indústria.

Actualment, el formigó de sofre és un producte comercial utilitzat principalment al Canadà i als Estats Units, països amb sobreproducció de sofre. En algunes zones de l'Amèrica del Sud (Xile), Europa (Dinamarca, la República Txeca), l'Àsia (Iran) i l'Àfrica (Sud-àfrica), també s'ha utilitzat aquest material de construcció, encara que a escala relativament petita, és a dir, en aplicacions puntuals orientades principalment a la indústria.

Propietats del formigó de sofre

El formigó de sofre, si bé és similar al formigó de ciment quant a propietats mecàniques, presenta una sèrie de característiques especials. La taula 1 mostra algunes de les propietats físiques i mecàniques típiques del formigó de sofre. Les resistències a compressió, flexió i tracció del formigó de sofre són similars i fins i tot majors que les obtingudes amb formigó convencional.

TAULA 1
Propietats físiques i mecàniques del formigó de sofre
(ACI, 1988; Malhotra, 1978)

Propietat	Valors típics
Densitat	2,4 g/cm ³
Resistència a compressió	60 - 70 MPa
Resistència a flexió	10 - 12 MPa
Mòdul d'elasticitat	20 - 40 GPa
Retracció	0,7 - 1,4 mm/m
Coefficient d'expansió tèrmica	10 - 30 · 10 ⁻⁶ 1/°C
Conductivitat tèrmica	0,4 - 2 W/m°C
Porositat	1 - 4 %
Absorció d'aigua	0 - 1 %

El formigó de sofre exhibeix, a més, una propietat especial que el diferencia fortament del formigó de ciment convencional: com el seu enduriment consisteix simplement en un procés físic de canvi de fase, adquireix les seves propietats mecàniques molt ràpidament, i assolix el 80 % de la seva resistència màxima a compressió en unes hores i el 90 % abans de les vint-i-quatre hores, fet que el diferencia considerablement del formigó convencional per la possibilitat de posada en servei gairebé immediata (ACI, 1988; Gregor i Hackl, 1978).

Una propietat interessant del formigó de sofre és que, a diferència del formigó convencional, pot ser reciclat, és a dir, que un cop acabada la seva vida útil pot ser recuperat, triturat, mòlt i fos novament per a ser utilitzat en una altra

aplicació. S'ha demostrat que les propietats i característiques fisicoquímiques d'aquest formigó no es veuen afectades negativament pel reciclatge, sinó que fins i tot milloren fins al cinquè reciclatge (Lee *et al.*, 1978). Aquesta propietat representa, en principi, un important avantatge econòmic, encara que es tracti d'un tema obert a investigacions més detallades pel que fa a la química i a l'impacte ambiental del procés.

Una de les diferències principals entre el formigó de sofre i el formigó convencional, que confereix al primer avantatges especials que determinaran les seves aplicacions, és la seva durabilitat en ambients especials. Les característiques més destacables d'aquest tipus de formigó són la seva gran durabilitat en ambients àcids i salins, i la seva resistència a l'abrasió. Un dels motius de l'elevada durabilitat química d'aquest material és que els mecanismes de transport de líquids a través seu es veuen fortament impeditos per la seva baixa porositat. Diversos investigadors han realitzat experiments per a determinar com afecta l'atac químic al formigó de sofre, i s'ha trobat que aquest posseeix una elevada resistència a la corrosió provocada per gran part d'agents químics, com àcids i sals. Les instal·lacions industrials construïdes amb formigó de sofre en ambients d'aquest tipus es mostren en molt bones condicions després de dècades en servei (Okumura, 1998).

La propietat química més destacable és la seva resistència a ambients àcids, sempre que l'àrid utilitzat sigui resistent a aquestes substàncies (àrid basàltic, granit o un altre material silícic). Fins i tot per a immersió en solucions àcides (àcid sulfúric al 10 %) durant llargs períodes de temps, no hi ha variació apreciable en les propietats mecàniques del formigó, així com en la seva integritat. Vroom (1991) reporta resistència a àcids sulfúric i clorhídric al 98 % de concentració, sense apreciar-se variació en les propietats. De manera similar, el formigó de sofre posseeix una alta resistència a ambients salins. S'ha comprovat que la immersió en solucions salines, com clorur i sulfat sòdics, i clorur càlcic, al 5 i 10 %, no produeix efecte apreciable en les propietats mecàniques ni en l'aspecte visual de les provetes, fins i tot per a immersions de fins a un any de durada.

Aplicacions: antecedents

Fins avui, els formigons de sofre s'han utilitzat principalment al camp de les construccions industrials. A causa de la natura de la seva estructura molecular, la pasta de ciment hidratada del formigó convencional no té un comportament satisfactori quan està exposada a ambients severos (contacte amb àcids altament concentrats, ambients salins, etc.); per aquesta raó és necessari utilitzar recobriments que evitin el contacte del formigó amb el medi. Normalment, per a protegir el formigó es recorre a l'ús de recobriments amb resines epoxi, ceràmiques, betums, pintures, etc. No obstant això, aquestes solucions presenten

diferents desavantatges, entre aquests el seu alt cost a causa de la complexitat de la seva tecnologia d'aplicació, baixes prestacions davant sol·licitacions mecàniques i curta vida útil. El formigó de sofre ha demostrat ser una bona alternativa per a aquest tipus de recobriment; fins i tot algunes estructures que normalment es construeixen amb formigó convencional han estat construïdes amb formigó de sofre, i se n'han obtingut resultats satisfactoris.

Dins el camp de les construccions industrials, les principals aplicacions en què s'ha utilitzat el formigó de sofre són paviments, murs, fundacions, drenatges, claveguerams i contenidors per a productes químics (Vroom, 1998). Els usos principals s'han basat en la seva alta resistència sota atacs químics, i s'ha utilitzat com a material per a sòls en ambients severos, com a alternativa al formigó convencional amb recobriments especials. Concretament, s'han construït paviments de plantes químiques, especialment en refineries de metalls, com, per exemple, les refineries de coure de CODELCO (Corporació Nacional del Coure) a Xile (Silva, 1998), refineries de zinc a Sud-àfrica (Nevin, 1998) i a la Colúmbia Britànica, al Canadà (Okumura, 1998), a més de diverses indústries de fertilitzants com les existents a Alberta, al Canadà (Okumura, 1998). Les plantes químiques (d'àcid sulfúric i sulfat amònic principalment) d'aquestes refineries i indústries han utilitzat aquest material des de finals de la dècada dels setanta, i en tots els casos la durabilitat del material ha estat altament satisfactòria; re-

visions actuals de les construccions mostren un excel·lent estat de conservació.

Una altra de les aplicacions que ha tingut aquest material a Xile ha estat la construcció de canals d'evacuació de líquids abrasius i la reparació dels ja existents, a les instal·lacions de CODELCO, per l'empresa Hormitec. Aquesta aplicació ha vingut donada per l'alta resistència a l'abrasió del formigó de sofre, la seva bona adherència al formigó convencional i, en especial, pel seu ràpid temps d'enduriment. La posada en servei i operació dels canals reparats ha estat possible al cap de poques hores d'efectuada la reparació, amb el consegüent avantatge en permetre la ràpida represa de les activitats de la indústria (Silva, 1998). S'ha constatat el bon comportament del formigó de sofre en aquesta aplicació, tant pel que fa a la seva col·locació (ràpidament i relativament senzilla), com a la seva durabilitat.

En les figures 2 i 3 es mostren diverses aplicacions que ha tingut el formigó de sofre en entorns industrials a Xile, al Canadà i als Estats Units.

Recerca a la Universitat Politècnica de Catalunya

Donat el gran potencial que ha demostrat tenir el formigó de sofre, es va decidir dur a terme un projecte de recerca a la Universitat Politècnica de Catalunya, en el transcurs del

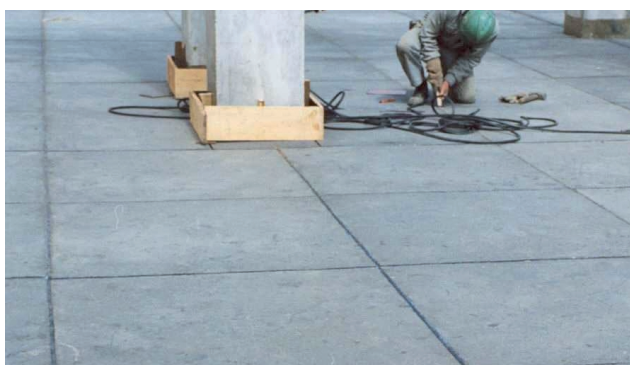


FIGURA 2. Aplicacions del formigó de sofre a l'empresa minera CODELCO (Xile): paviments, elements prefabricats i recobriments per a ambients corrosius.



FIGURA 3. Diverses aplicacions del formigó de sofre al Canadà i als Estats Units: paviments industrials, recobriments, contenidors, elements prefabricats.

qual s'ha aprofundit en diversos aspectes d'aquest material que no havien estat completament coberts per anteriors investigacions. Cal esmentar que, per a la fabricació dels morters i formigons, s'ha fet servir sofre provinent del refinatge del petroli (vegeu la figura 4), proporcionat per la refinaria de petroli de Concón (Xile), per tal d'assegurar la viabilitat d'utilitzar aquest tipus de sofre.

Malgrat la gran cobertura que van tenir els estudis de caracterització físicomecànica, s'evidencia un gran buit en el coneixement microscòpic d'aquest material i, especialment, pel que fa a la relació entre la seva microestructura i les seves propietats macroscòpiques. Aquesta falta de coneixement no sols impedeix una satisfactòria comprensió del comportament del formigó de sofre, sinó que a més té com a probable efecte limitar-ne el camp d'aplicacions, tal com ha succeït fins ara. Per tant, una part essencial del projecte ha tractat d'investigar la microestructura del formigó de sofre i la seva relació amb les seves propietats.

Avui en dia, a més, si es desitja desenvolupar un nou material de construcció i ampliar el seu camp d'aplicacions, no n'hi ha prou amb conèixer les seves característiques físiques i mecàniques com és ara la resistència, sinó que altres aspectes dels materials han esdevingut especialment importants. Entre aquests està la compatibilitat química dels materials de construcció i el seu impacte ambiental. Hi ha una quasi total absència d'estudis sobre l'impacte ambiental del formigó de sofre, deguda probablement al fet que, tal com s'ha esmentat, els usos projectats per a aquest material s'han dirigit fins ara a l'àmbit industrial, i en ambients químicament corrosius, en els quals una possible contaminació per part d'aquest material no era gaire significativa. Per a fer viable actualment l'ús del formigó de sofre és necessari completar la seva caracterització en el sentit indicat.

L'estructura global de la campanya experimental s'ha dissenyat i ha estat centrada al Departament d'Enginyeria de la Construcció de la Universitat Politècnica de Catalunya, mentre que part de les activitats experimentals s'han realitzat al Departament d'Obres Cívils de la Universidad



FIGURA 4. Mostra del sofre que es va utilitzar en el present projecte, provinent del refinatge del petroli.

Técnica Federico Santa María de Valparaíso (Xile). El projecte consisteix, a grans trets, en un estudi del comportament físicoquímico del formigó de sofre, orientat a determinar les prestacions que ofereix i l'impacte ambiental que pogués presentar, a fi de delimitar correctament les seves possibles aplicacions i al mateix temps dissenyar formulacions que maximitzin la durabilitat i minimitzin l'impacte d'aquest material en diverses aplicacions constructives. S'ha tractat, en definitiva, de contribuir a determinar el valor afegit que pot oferir aquest material de construcció, perquè pugui justificar-se el seu ús com a solució al problema mediambiental de l'acumulació de sofre.

Fabricació i estudi de propietats bàsiques

Una primera etapa experimental d'aquesta investigació ha consistit a dissenyar un procés de fabricació de morters i formigons de sofre d'acord amb la hipòtesi de treball plantejada, i realitzar mesures de les propietats físiques i mecàniques dels materials obtinguts. L'objectiu principal d'aquesta etapa experimental ha estat comprovar si els materials confeccionats aconseguien tenir propietats similars o superiors als realitzats per altres investigadors, amb la diferència d'haver utilitzat, en aquest cas, sofre no modificat. A més, s'ha cregut convenient realitzar un estudi mecànic complet ja que encara que aquest tema ha estat investigat anteriorment, els estudis anteriors són molt fraccionaris. A grans trets, els aspectes estudiats en aquesta etapa han estat: *a)* optimització del procés de fabricació, incloent-hi selecció de materials; *b)* elecció de dosificació sota criteris de resistència i treballabilitat, i *c)* estudi de propietats físicomecàniques, com retracció, resistència mecànica, reciclatge i durabilitat tèrmica. En la figura 5 es mostren algunes de les provetes fabricades per a assajar diferents propietats.

Una de les propietats més destacables dels materials fabricats, tant de morters com de formigons, és la gran resistència mecànica que presenten. Les resistències a compressió, a flexotracció i a tracció indirecta trobades són

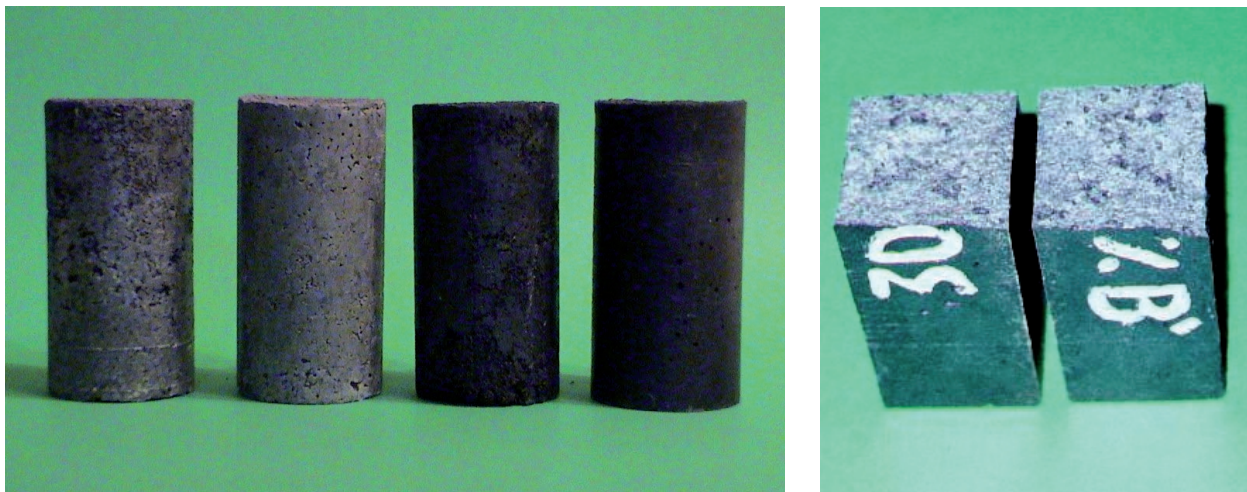


FIGURA 5. Exemples de provetes de morter de sofre, de composicions diferents, fabricades en el context del treball de recerca presentat.

molt elevades, i superen en la majoria de casos les del formigó convencional (de ciment), i similars a les del formigó d'alta resistència. Les resistències a compressió han estat al voltant dels 70 MPa per als morters i 50-60 MPa per als formigons, mentre que les resistències a flexotracció han estat d'uns 12 MPa per a morters i entre 9 i 10 MPa per a formigons, valors tots superiors als dels formigons i morters de ciment pòrtland convencionals.

El motiu d'aquesta propietat el trobem en la microestructura, concretament en el seu caràcter ben cohesionat, compacte i poc porós i en la bona adherència existent entre el sofre i els àrids. Si bé és cert que hi contribueix també el fet d'utilitzar sofre com a lligant, ja que el sofre cristal·lí és notablement resistent, és decisiva la intervenció de l'àrid per a evitar que els cristalls i els espais entre aquests siguin grans, fet que fragilitzaria massa el material i li impediria aconseguir una alta resistència. L'elevada resistència al desgast mostrada per les provetes es deu tant a la cohesionada microestructura com al tipus d'àrid utilitzat, basàltic, i per tant de gran resistència mecànica. Una altra propietat notable del morter i formigó de sofre és la rapidesa amb què assolixen altes resistències o, dit d'una altra manera, l'obtenció de les seves propietats mecàniques a edats primerenques. Això es deu, com s'ha esmentat, al fet que la rigidificació del material només depèn de la solidificació del sofre, transformació que es dona molt ràpidament (unes poques hores per al cas de provetes de formigó).

Microestructura

En una segona etapa experimental s'ha passat a estudiar propietats microscòpiques del material, amb l'objectiu de conèixer el comportament del sofre a microescala: la forma que adquireix, la capacitat d'actuar com a lligant, el tipus de cristallització que pateix, etc. S'ha observat la seva microestructura mitjançant les tècniques de microscòpia òptica i, princi-

palment, electrònica, en etapes successives. El principal resultat de l'estudi de la microestructura del morter de sofre confeccionat és que el sofre recobreix bé tot el material ja que està present en la immensa majoria de les superfícies de fractura estudiades, i, en conseqüència, es donen grans extensions d'aquest element en forma de mantells uniformes que cobreixen els àrids. A més, sembla adherir-se bé a aquests, fins i tot als àrids més fins. Aquesta característica confereix als morters una elevada homogeneïtat a petita i a gran escala.

Paral·lelament a aquesta capacitat de recobrir del sofre, cal destacar també que aquest omple bé els espais, deixa pocs buits o porositat i fa que el material sigui altament compacte. Aquesta propietat, que en part es deu a les pròpies característiques del sofre (elevada fluïdesa a la temperatura de fabricació, poder de recobriment i gran adherència respecte als àrids), també prové de la formulació del morter. Específicament, el fet que l'àrid estigui ben graduat, és a dir, posseeixi una granulometria adequada, i s'hagi completat a més la corba granulomètrica amb materials fins, comporta una optimització de l'espai que facilita l'ompliment dels buits per part del sofre. Les bones propietats físicomecàniques del material es deuen en gran part a la microestructura aconseguida en aquests morters, la qual, gràcies a una acurada dosificació, es caracteritza per la seva homogeneïtat i compacitat, i l'absència de grans cristalls de sofre que produirien una elevada fragilitat.

En la figura 6 s'observen algunes de les imatges de microscòpia electrònica obtingudes durant aquesta etapa, en les quals s'aprecien les característiques esmentades.

Impacte ambiental

Com s'ha explicat, l'impacte que un material produeix sobre el medi és complex i per a conèixer-lo és necessari tractar amb aspectes molt diversos que descriuen la relació d'aquest amb el medi durant tot el seu cicle de vida. Aquest es-

tudi s'ha limitat a tractar dues de les principals etapes del cicle del formigó de sofre, la seva vida en servei i la generació de residus al final d'aquesta. Respecte a la primera etapa, s'ha avaluat i quantificat la contaminació produïda pel formigó de sofre, mitjançant assajos de lixiviació. I pel que fa a la segona etapa, s'ha estudiat la possibilitat de reciclar el material totalment, i s'ha quantificat com aquest reciclatge afectaria eventualment algunes de les seves propietats mecàniques.

En estudiar els resultats de contaminació, s'ha observat que, en tots els casos, els valors de sulfats lixiviatos al medi es troben molt per sota dels límits tolerats. Segons els resultats dels assajos realitzats, el formigó de sofre pot utilitzar-se en aplicacions exteriors sense tractaments o precaucions especials. Encara que l'extrapolació de la lixiviació a llarg termini no pot conèixer-se amb exactitud, els resultats obtinguts suggereixen un bon comportament en aquest sentit. Aquests resultats, a més, són coherents amb el fet de posseir el material una baixa porositat.

D'altra banda, respecte a la generació de residus al final de la vida útil del material, cal recordar que el formigó de sofre, com s'ha comprovat, és reciclable. Els assajos practicats han demostrat la factibilitat de reciclar el material fins a unes cinc vegades, la qual cosa reduiria el problema dels residus. En general, per tant, cal destacar la viabilitat de reciclatge del morter de sofre, que fins i tot millora en molts casos (almenys en els primers reciclatges) la resistència a compressió i a flexotracció.

Noves aplicacions: propostes

Elements prefabricats

Una primera possible aplicació del formigó de sofre és l'elaboració d'elements prefabricats per a la seva utilització en diversos àmbits. Les característiques del formigó de sofre que porten a considerar aquesta aplicació són, principalment, la seva elevada resistència, la rapidesa amb què l'assoleix i la possibilitat de reciclatge. L'elevada resistència asseguraria el compliment dels requeriments mecànics sol·licitats, mentre que la rapidesa del seu enduriment faria possible una immediata posada en servei, sense necessitat d'emmagatzematges llargs. D'altra banda, en cas de deteriorament o fractura de l'element, la seva reciclabilitat permetria una reparació senzilla i ràpida.

Alguns dels elements prefabricats que podrien realitzar-se són els següents:

- Elements relacionats amb les obres vials: mitjanes de carreteres (barreres de New Jersey), voreres.
- Tanques provisionals, suports de senyals, pedestals, etcètera.
- Rajoles i llambordes per a pavimentar exteriors i interiors. En la present investigació, per tal de comprovar la viabilitat del material en aquesta aplicació, s'ha fabricat una sèrie de rajoles de morter de sofre (figura 7) i s'ha comprovat que compleixen sobradament tots els requisits tècnics que es demanen per a aquests elements.

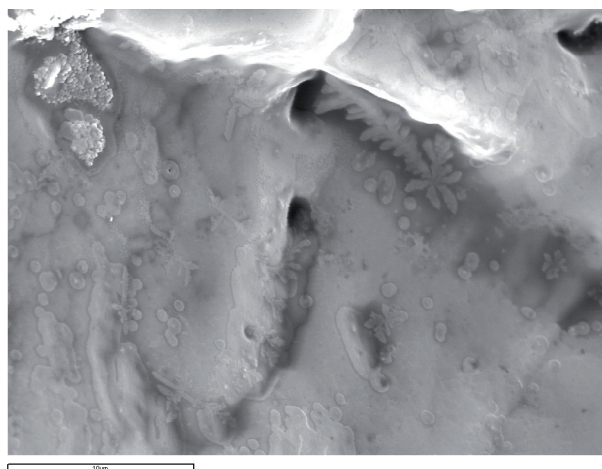
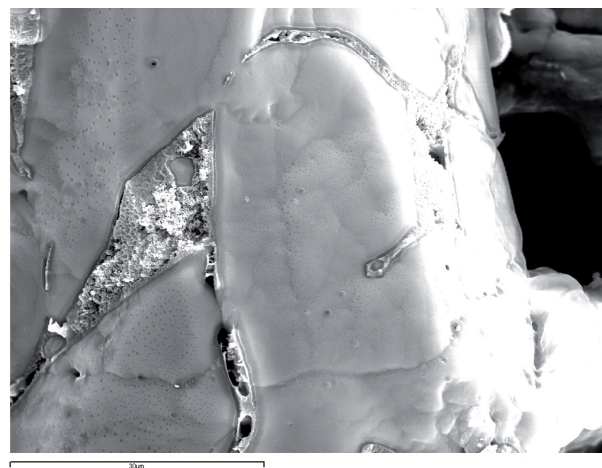
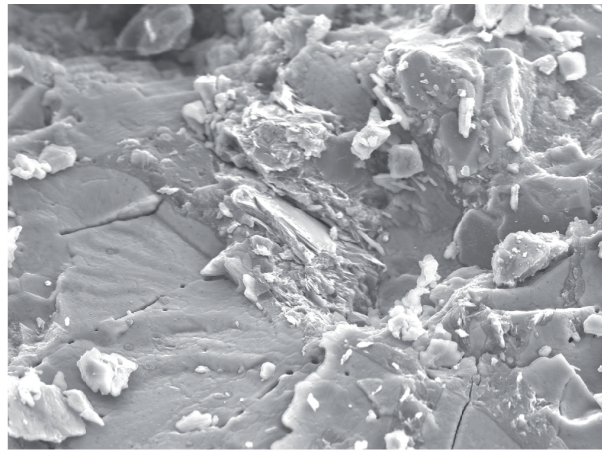


FIGURA 6. Imatges de microscòpia electrònica dels morters de sofre desenvolupats, a diferents escales (les marques d'escala representen 100, 30 i 10 micres, respectivament), on s'aprecia l'elevada homogeneïtat i l'absència de porositat i grans cristalls de sofre.

- Maons per a estructures exteriors senzilles.
- Elements per a instal·lacions de sanejament i drenatge: tubs de clavegueram, recobriments, pous... Cal esmentar que aquesta és una de les aplicacions amb major potencial i els principals fabricants de formigó de sofre l'estan considerant.
- Elements en ambient marí, com esculleres i elements de protecció de costes.

- Travesses de ferrocarril i tramvia.
- Cel·les electrolítiques i altres contenidors de productes químics corrosius.

Immobilització de residus

El formigó convencional s'ha utilitzat en nombroses ocasions com a matriu per a l'encapsulació de residus contaminants, però presenta alguns problemes en aquesta aplicació que limiten el percentatge de residus que poden incloure-s'hi. Un dels principals és la lixiviació de les substàncies encapsulades, que, mitjançant la xarxa porosa del formigó, poden passar al medi en certes quantitats i cal que es controli, per tant, aquesta possible contaminació. D'altra banda, com que l'enduriment del formigó convencional es deu a reaccions químiques entre el ciment i l'aigua, un excés de residus o alguna classe en particular d'aquests podria interferir en aquestes reaccions i dificultar-ne la solidificació.

El formigó de sofre ha demostrat ser un material altament impermeable; a més, el seu enduriment per solidificació està, generalment, menys afectat per la presència de diverses substàncies. Això fa que pugui utilitzar-se com a substrat o lligant per a la immobilització de residus, mesclant aquests amb el sofre i l'àrid en el moment de la fabricació. Com a exemple, poden considerar-se els resultats presentats en aquesta investigació, en l'apartat d'impacte ambiental, en què, encara que no es va tractar amb mostres amb residus encapsulats, sí que es va observar que el mateix sofre no és lixiviat tot i ser el principal component del material.

Alguns dels residus que podrien ser encapsulats en formigó de sofre són els següents:

- Metalls pesants
- Residus orgànics
- Àrids residuais de mineria o altres indústries
- Cendres d'incineradores, indústria del carbó, etc.
- Residus nuclears
- Pneumàtics usats
- Residus amb contingut en sulfats, clorurs i altres sals.



FIGURA 7. Rajola de formigó de sofre fabricada en el context del present projecte de recerca, com a demostració d'una possible aplicació.

És interessant comentar que pot desenvolupar-se una formulació de formigó de sofre composta enterament per residus. El sofre, com s'ha explicat, és un important subproducte dels processos de refinació de gas i petroli, així com de la desgasificació del carbó. D'altra banda, poden usar-se àrids procedents de la indústria minera, per exemple, que per la seva composició no sempre poden utilitzar-se en formigons convencionals. A més, com a material fi pot usar-se alguna cendra, com la procedent d'indústries de tractament de carbó, o altres.

Diverses empreses estan desenvolupant avui en dia formulacions de formigó de sofre que contenen residus problemàtics o especialment importants en diferents àrees.

Paviments i recobriments industrials

L'aplicació clàssica del formigó de sofre ha estat, donada la seva extremadament alta resistència química i la seva elevada resistència al desgast, la construcció de paviments i recobriments en ambients industrials corrosius. Aquesta pot continuar sent una de les principals aplicacions per a aquest material, encara que és possible diversificar les àrees per a les quals poden realitzar-se els esmentats paviments de formigó de sofre.

Alguns exemples de l'aplicació de formigó de sofre en paviments i recobriments són:

- Sòls de plantes químiques, especialment les d'ambient àcid
- Sòls per a la indústria alimentària
- Carreteres, bases de carreteres
- Paviments en zones de baixa temperatura
- Recobriments de fonaments
- Recobriments d'elements en ambient marí: proteccions, esculleres.

Cal destacar que les experiències anteriors en aquest tipus d'aplicacions, concretament en la construcció de paviments per a ambients químicament corrosius, han estat molt satisfactòries, com s'ha explicat. La prolongada durabilitat mostrada pel formigó de sofre en aquestes aplicacions, mantenint les seves propietats durant llargs períodes de temps, fa que continuïn sent un dels camps d'aplicació més prometedors per a aquest material.

Reparacions

Una de les propietats més interessants del formigó de sofre és la seva extrema rapidesa per a endurir-se i assolir bona part de la seva resistència màxima. Aquesta característica propicia un tipus d'aplicació en què pot oferir un gran avantatge: el de les reparacions. Alguns exemples poden ser:

- Reparació de paviments rígids
- Reparacions urgents en grans indústries.

Hi ha experiències de reparacions en la indústria mineira del coure a Xile, concretament en els canals que evacuen líquid abrasiu provinent del rentatge del material mineral, de manera continuada, que sovint pateixen trencaments per les condicions en què operen. El formigó de sofre ha permès que no hagués de clausurar-se el canal tant de temps com si la reparació es realitzés amb formigó convencional. Això, òbviament, suposa un gran avantatge econòmic ja que minimitza la influència de les reparacions sobre la producció, i és especialment notable en les indústries de grans mides, com és el cas de l'exemple exposat.

Altres aplicacions

El formigó de sofre pot tenir molt diverses aplicacions, que hauran de ser estudiades en el futur. Com aquest article no pretén ser un catàleg exhaustiu de totes, sinó un conjunt de propostes de gran potencial, no s'han tractat en particular més aplicacions del tipus de les ja proposades.

No obstant això, hi ha una aplicació que, pel seu interès i originalitat, s'ha volgut esmentar aquí. Es tracta de la utilització del formigó de sofre per a construir a la Lluna. Una de les prioritats en els projectes a llarg termini per a establir bases en el nostre satèl·lit és la utilització dels recursos naturals d'aquest, en especial pel que fa als materials de construcció utilitzats. Encara que el formigó tradicional té propietats adequades per a la seva utilització a la Lluna, hi ha un problema quant als materials necessaris per a la seva fabricació. Pot obtenir-se àrid i fabricar ciment a partir dels recursos naturals lunars; no obstant això, l'aigua no hi és present, almenys en quantitats suficients per a justificar el seu ús massiu en construcció. Quant a la possibilitat de sintetitzar-la, és possible extreure oxigen de diversos minerals lunars, però no l'hidrogen necessari. Per tant, és altament probable que, si es desitja construir a la Lluna amb formigó de ciment, sigui necessari transportar part del material (l'aigua o l'hidrogen) des de la Terra, fet que té un cost econòmic extremadament alt.

El sofre, en canvi, sí que és present en la regolita lunar; de fet, és el volàtil més abundant en l'escorça lunar, i la seva extracció pot realitzar-se mitjançant diferents mètodes. L'oxidació de la troilita (FeS, el mineral de sofre més abundant en els materials lunars) a magnetita, per exemple, el proporciona en forma de diòxid de sofre, i s'ha proposat fins i tot la utilització de processos bacterians. En tot cas, per a l'extracció mineral es requereixen temperatures a l'entorn de 1.000-1.200 °C, que són fàcils d'aconseguir a la Lluna amb tecnologia relativament senzilla; els concentradors de radiació solar són molt eficients per no disposar la Lluna d'atmosfera. Diversos experiments duts a terme amb mostres del sòl lunar recollides per les missions Apollo 15 i 16 van demostrar que, en condicions de buit (com les existents a la Lluna), a 1.100 °C pot extreure's el 85-95 % del sofre. A més, el sofre és un subproducte de les reaccions per a l'obtenció d'oxigen a partir de la ilmenita, en quantitats del 10 % de la massa d'oxigen produïda.

La utilització de formigó de sofre a la Lluna va ser proposada per Leonard i Johnson (1988) i posteriorment la idea va ser desenvolupada per Kuck (1991), Issa i Omar (1994) i Gràcia i Casanova (1998). En general, les propietats d'aquest material el fan adequat per a la seva utilització com a material de construcció a la Lluna, especialment pel que fa a la seva elevada resistència, ràpid enduriment i absència de reaccions adverses a baixes temperatures. No obstant això, la seva pitjor resposta a altes temperatures o amplis cicles tèrmics el fa inadequat per a la col·locació en determinades zones de la Lluna. Les restriccions quant a la seva localització inclouen evitar les àrees equatorials per a les construccions a l'aire lliure i preferir les polars o les latituds mitjanes, o utilitzar-lo en construccions sota terra. En la figura 8 es mostra una visió artística del que podria ser una futura base lunar; part dels elements constructius utilitzats podrien confeccionar-se amb formigó de sofre.

S'han realitzat assajos amb morters de sofre fabricats amb àrid que simula el material lunar (granulometria, composició química), i s'han obtingut resultats molt prometedors. Així mateix, les estimacions de cost i comparatives econòmiques amb el formigó tradicional, que pot ser més car que el formigó de sofre (depenent dels costos del transport), han suposat un esperó més per a la investigació d'aquesta aplicació. Entre altres usos, el formigó de sofre a la Lluna podria utilitzar-se en forma de rajoles, com a paviment per a evitar la dispersió de la finíssima pols lunar durant les operacions a l'exterior i el dany a l'instrumental que això comporta, a més de minimitzar l'impacte de les activitats humanes sobre l'entorn lunar. La seva utilització com a material per apantallar la radiació solar també ha estat proposada, i juntament amb l'anterior aplicació seran probablement motiu d'estudi en les properes dècades.

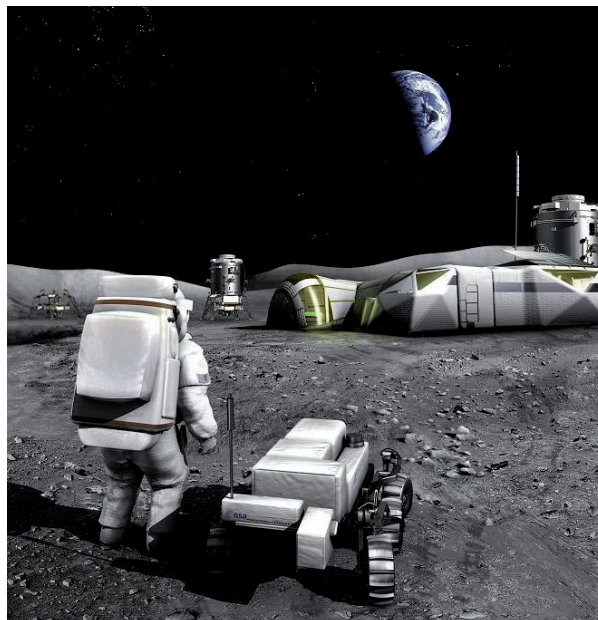


FIGURA 8. El formigó de sofre podria representar una solució per a la construcció de determinats elements de les bases lunars.

Conclusions

Les activitats del sector de la construcció, malgrat les múltiples innovacions que aquest ha incorporat en les darreres dècades pel que fa a materials i tècniques, continuen produint un elevat impacte mediambiental. La fabricació de ciment és responsable d'un percentatge considerable del total d'emissions de diòxid de carboni a l'atmosfera, mentre que l'explotació de pedreres per a obtenció d'àrids produeix un consum de recursos naturals i un impacte visual poc sostenibles. Els residus de construcció i demolició també representen una gran part dels residus totals produïts en els entorns industrials i urbans, de manera que, tot i no ser tan contaminants com els residus d'altres classes (orgànics, metalls pesants, etc.) són un problema cada vegada més preocupant. Per tant, les accions destinades a minimitzar l'impacte ambiental d'aquest sector són de gran importància i cal que siguin tingudes en compte i generalitzades.

La utilització de sofre com a component de materials de construcció pot contribuir a reduir aquest impacte, ja que aquesta pràctica comporta diversos avantatges mediambientals. Com s'ha explicat, el sofre és un residu o subproducte de diversos processos industrials, i es preveu que en el futur proper les aplicacions tradicionals per a aquest element no seran suficients per a utilitzar-ne tota la producció. L'ús d'aquest sofre com a lligant en materials de construcció compostos que substitueixin en part el formigó tradicional significa, a més, reduir les emissions de diòxid de carboni de la indústria cimentera. D'altra banda, tal com s'ha demostrat en aquesta investigació, els morters i formigons de sofre són materials no contaminants i poden reciclar-se fàcilment un cop acabada la seva vida útil. El baix impacte ambiental d'aquest material no havia estat estudiat de manera global anteriorment, i els resultats positius obtinguts en aquest projecte suggereixen que gran part dels formigons de sofre comercialitzats poden considerar-se no contaminants, fins i tot sota els criteris i normatives ambientals més estrictes.

No obstant això, el bon comportament mediambiental d'un material de construcció no justifica per si sol la seva utilització; cal que existeixin valors afegits que facin viable la seva aplicació. En la present investigació s'han desenvolupat morters i formigons de sofre no modificat químicament, i s'ha demostrat que posseeixen altes prestacions mecàniques, que inclouen elevades resistències i durabilitat. S'ha confirmat, a més, la viabilitat d'utilitzar el sofre excedent del procés de refinació del petroli, sense necessitat de tractament previ, i la relativa simplicitat del procés de fabricació i posada en obra, que no necessita tecnologia d'alt nivell o diferent de la ja existent per a altres materials.

Tenint en compte les seves característiques i limitacions, pot definir-se un camp d'aplicacions per al formigó de sofre considerablement extens, i la seva utilització no pot descar-

tar-se, tal com ha succeït en el passat. Aquest material pot representar una solució constructiva de gran interès en àrees on, malgrat existir un excedent de sofre, no es disposa de tecnologia d'alt nivell. De fet, gran part de les reserves petrolíferes responsables d'aquest excedent es troben en zones poc desenvolupades, amb greus carències en infraestructura que el formigó de sofre podria pal·liar en part.

Per a dur a terme una generalització en l'ús del formigó de sofre, és necessària una sòlida base de coneixement, fet que ha pretès ressaltar aquest projecte. Entendre la relació entre la microestructura i les propietats del material permetrà definir uns criteris de qualitat adequats i establir el rang d'aplicacions exacte per a cada formulació. Si aquests dos aspectes es desenvolupen adequadament, el formigó de sofre posseeix un gran potencial com a material de construcció, contribuint al mateix temps al desenvolupament sostenible del sector. ■

Referències

- ACI (1988). *Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction*. Report 548.2R-88. 12 p.
- BORDOLOI, B. K.; PEARCE, E. M. (1978). «Plastic sulfur stabilization by copolymerization of sulfur with dicyclopentadiene. New Uses of Sulfur — II». A: *Advances in Chemistry Series 165*. American Chemical Society, p. 31-53.
- GANNON, C. R.; WOMBLES, R. H.; HETTINGER, W. P.; WATKINS, W. D. (1983). «New concepts and discoveries related to the strength of plasticized sulfur». *Special Technical Publication, 807*, ASTM.
- GILLOTT, J. E., JORDAAN, I. J.; LOOV, R. E.; SHRIVE, N. G.; WARD, M. A. (1978). «Characteristics of some sulfur-bonded civil engineering materials. New Uses of Sulfur — II». A: *Advances in Chemistry Series 165*. American Chemical Society, p. 98-112.
- GRÀCIA, V. (2005). *Estudio de la microestructura, las propiedades y el impacto ambiental del hormigón de azufre*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 232 p.
- GRÀCIA, V.; CASANOVA, I. (1998). «Sulfur concrete: a viable alternative for lunar construction». A: *Engineering, Construction and Operations in Space VI (Space'98)*. American Society of Civil Engineers, p. 180-189.
- GREGOR, R.; HACKL, A. (1978). «A new approach to sulfur concrete. New Uses of Sulfur-II». A: *Advances in Chemistry Series 165*. American Chemical Society, p. 54-78.
- ISSA, M. A.; OMAR, H. A. (1994). «Feasibility of dual technology in manufacturing lunar concrete». A: *4th Int. Conf. Space'94*. ASCE, p. 933-941.
- JORDAAN, I. J.; GILLOTT, J. E.; LOOV, R. E.; SHRIVE, N. G. (1978). «Improved ductility of sulphur concretes and its relation to strength». A: *Int. Conf. on Sulphur in Construction, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada [12-15 set. 1978, Ottawa]*, p. 475-488.

- KUCK, D. L. (1991). *Lunar sulfur. Resources of Near-Earth Space (abstract)*. Arizona University, p. 18.
- LEONARD, R. S.; JOHNSON, S. W. (1988). «Sulfur-based construction materials for lunar construction». A: *1st Int. Conf. Space'88*, ASCE, p. 1295-1307.
- MALHOTRA, V. M. (1978). «Mechanical properties and freeze-thaw resistance of sulphur concrete». A: *Int. Conf. on Sulphur in Construction, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada* [12-15 set. 1978, Ottawa], p. 433-453.
- MCBEE, W. C.; SULLIVAN, T. A. (1978). «Development of specialized sulphur concrete». A: *Int. Conf. on Sulphur in Construction, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada* [12-15 set. 1978, Ottawa], p. 454-474.
- NEVIN, P. J. (1998). «Assessing sulfur concrete applications». *Concrete International*, vol. 20, núm. 2, p. 87-89.
- OKUMURA, H. A. (1998). «Early sulfur concrete installations». *Concrete International*, vol. 20, núm. 1, p. 72-75.
- SILVA, L. (1998). Hormitec Ltda., comunicació personal.
- VROOM, A. H. (1998). «Sulfur concrete goes global». *Concrete International*, vol. 20, núm. 1, p. 68-71.