



Capítol VIII

CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

VIII. Conclusions i recomanacions

Les conclusions parcials i recomanacions s'han anat exposant al darrer apartat de cada capítol, però a continuació es resumeixen els aspectes més rellevants. Les conclusions d'aquest estudi fan referència específicament a les escòries mostrejades i no tenen per què ser vàlides per a material d'altres plantes incineradores. Com s'ha anat veient, hi ha altres plantes que produeixen material amb molts paral·lelismes amb les escòries estudiades, però no sempre és així i les variacions del procés indueixen modificacions en el producte. Els resultats i les conclusions d'aquest estudi tampoc no abasten una eventual mescla de les escòries amb altres subproductes del procés d'incineració (per exemple, les cendres).

VIII.1 CONCLUSIONS

Caracterització general

L'heterogeneïtat de les escòries es deu a la coexistència de tres paragènesis minerals diferents, constituïdes per diversos materials de composició química, mineralogia, morfologia i propietats molt diferents.

Dins la paragènesi *preincineració* destaca el vidre domèstic, el component més abundant (especialment en mides de gra intermèdies), mentre que la contribució del material ceràmic i els àrids a l'escòria total és més limitada (només és destacable a les fraccions >10 mm); una certa fracció d'ambdós materials es presenta en forma de plaques, una de les claus de la relativa fragilitat de les escòries. Tant el material combustible com els components metàl·lics es troben en proporcions molt baixes (especialment a les escòries de Tarragona i Mataró, en les quals les plantes de processament realitzen una tria molt efectiva) i són materials no desitjables per problemes de durabilitat.

Les característiques dels productes de fusió (*sinincineració*) són un tret particular de les escòries d'incineració de residus sòlids urbans. Per la seva composició química i mineralògica es poden equiparar a una roca ultrabàsica, molt enriquida en Fe, així com Ti, B, Co, Cr i Mn, que han estat assimilats per la fosa i resten fermament fixats a aquest material. Els productes de fusió inclouen una fase vítria opaca i espècies cristallines poc freqüents a la natura, com la gehlenita-akermanita o la wüstita. Les textures de desgasificació són en gran mesura les responsables de les altes capacitats d'absorció d'aigua de les escòries i de la seva densitat seca de partícules relativament baixa.

La paragènesi *postincineració* posa de manifest que la mineralogia de les escòries és dinàmica durant les primeres setmanes. Inclou productes d'alteració amb una granulometria molt fina i una especiació variada que consisteix essencialment en òxids i hidròxids de Ca i en sals (principalment halita i sulfats càlcics diversos). En aquestes fases de neoformació hi ha el tret diferencial entre escòries fresques i envellides: les primeres contenen calç i portlandita, espècies que confereixen pH molt alcalins a les aigües que entren en contacte. En les escòries envellides aquestes espècies han reaccionat per tal de formar principalment calcita, de manera que disminueix el pH. A les escòries, les espècies secundàries (*postincineració*) càlciques són les reguladores del pH del sistema així com dels lixiviats resultants.

El tret diferencial de les escòries respecte als àrids naturals i a diversos subproductes no només és el fet que inclou diversos materials de naturalesa molt diferent, sinó que aquests es presenten en distribucions granulomètriques variades (però tanmateix força similars en les mostres de totes les plantes incineradores mostrejades), motiu pel qual moltes característiques de les escòries tenen una important manca d'uniformitat segons la mida de gra considerada.

S'ha determinat la concentració de més de 50 elements presents a les escòries, que es poden estructurar en tres categories: els majoritaris (>10000 mg/kg) són Si, Ca, Fe, Al, Na, C, Mg i K, elements comuns a materials naturals. Entre els minoritaris (1000-10000 mg/kg), n'hi ha que també són comuns en àrids naturals com Ti, Ba i Mn; però en canvi les escòries estan molt enriquides en Cu, Zn i Pb. La resta d'elements determinats es presenten en concentracions clarament inferiors als 1000 mg/kg i destaquen Sr, Sn, Cr i Ni. Els continguts de Terres Rares generalment no superen els 40 mg/kg. D'altra banda, les concentracions d'elements com Mo, Se, Cd, Ta o Bi són baixes (generalment no superen els 10 mg/kg) i les de Hg molt baixes. Els elements, com les diverses tipologies de materials, també es distribueixen de manera diferent segons la mida de gra considerada. Comparant els continguts a les escòries respecte a roques calcàries i roques bàsiques, elements com Pb, W, Sn, Cu, Zn, S i Cd presenten factors d'enriquiment superiors a un ordre de magnitud, mentre que les escòries estan lleugerament enriquides en Ba, P, B, As, Mo i U (factors d'enriquiment entre 2 i 10).

Els rangs de variabilitat de les concentracions d'elements minoritaris i traça entre escòries de diverses procedències o de diversos períodes de mostreig són relativament estrets i no superen un ordre de magnitud; les dispersions més grans les registra el carboni a causa del divers grau de carbonatació (en altres paraules, envelliment) de les mostres, i diversos metalls (per exemple, Cu, Pb, Zn, V o Sn) per dos motius diferents: només algunes escòries passen per sistemes d'extracció de metalls i, a més, estan parcialment o totalment en forma de partícules metàl·liques, subjectes a l'efecte *pebble*.

Caracterització física i comportament mecànic

Sense cap intervenció expressa sobre el procés, el subproducte més abundant de la incineració es presenta amb granulometries que s'ajusten al fus ZN20 estipulat a l'article 510 del PG-3 (2004), que fa referència a l'ús d'àrids en capes granulars. Les escòries són un material granular amb mida màxima nominal de fins a 20 mm (0/20), amb una granulometria contínua, fet que n'afavoreix la compactabilitat: les densitats seques màximes del Proctor modificat indiquen elevats graus de compactació, tot i que numèricament són inferiors a les corresponents a àrids naturals. Aquest fet es deu a que en relació amb àrids convencionals, les densitats de partícula assecades a l'estufa de les escòries són baixes, a causa d'una porositat considerable. Per contra, la densitat de partícules aparent és més alta i comparable amb àrids naturals. L'elevada porositat desemboca en capacitats d'absorció d'aigua considerables (i, consegüentment, les humitats òptimes són superiors a les d'àrids naturals), fet que cal tenir en compte en algunes aplicacions que requereixin l'addició de lligants o conglomerants i aigua. No obstant això, s'ha demostrat que aquesta característica de les escòries no implica degradacions importants davant els fenòmens de gel-desgel, i les resistències de les escòries davant aquest atac són acceptables.

Les escòries convenientment compactades constitueixen matrius granulars força tancades i amb capacitats portants molt considerables, gràcies a una granulometria adequada i un esquelet mineral amb un notable fregament intern, al qual contribueix les textures dels fragments ceràmics, els productes de fusió i el vidre domèstic. La relativa fragilitat de les escòries i la presència de partícules amb formes poc equidimensionals no sembla que repercuteixi directament en la seva resistència als esforços tangencials, si més no a curt termini.

Tanmateix les escòries són lleugerament més fràgils que molts àrids naturals, però tot i això compleixen les sol·licitacions de coeficient de desgast de Los Angeles que preveu el PG-3/2004. Si bé les capes granulars estan sotmeses a petits però repetitius esforços dinàmics que poden alterar les estructures superficials de les partícules, en els prop de tres anys de funcionament del tram experimental de Tagamanent no s'ha detectat assentaments o cap signe de degradació visible, motiu pel qual el comportament mecànic de les escòries —a curt termini— és com a mínim correcte. És difícil establir l'evolució a mitjà i llarg terminis, però diversos factors apunten a un rendiment adequat: l'absència de reaccions químiques que comportin expansions significatives, l'escassa susceptibilitat a l'aigua i la gran capacitat de

suport suggereixen que es pot garantir l'estabilitat volumètrica de la matriu granular d'escòries compactades, sempre que l'execució de l'obra sigui l'adequada i es tracti d'escòries madurades de bona qualitat, fruit d'una combustió eficient i una certa depuració exercida per processos de tractament del material

Comportament ambiental

Les escòries confereixen pH més o menys alcalins a les aigües que hi entren en contacte, en funció de la qualitat i el grau d'envelliment (concretament del grau de carbonatació d'(hidr)òxids càlcics): les que tenen una combustió menys eficient generen lixiviats neutres, moderadament alcalins les envellides (pH de 8-10, rang en el qual les solubilitats de molts elements són mínimes) i clarament alcalins les fresques (pH ≥ 10 , en el qual s'observen comportaments amfòters). La fracció soluble de les escòries és molt baixa, especialment en comparació amb altres subproductes de la incineració, i disminueix bruscament a mesura que augmenta la mida de gra, paral·lelament a la conductivitat.

A partir dels resultats sobre càlculs d'emissions per lixiviació obtingudes als tests de camp i de laboratori s'estableixen diversos paràmetres: la fracció disponible, la fracció lixiviable, la fracció lixiviada i el període d'esgotament d'aquesta. La magnitud de cada una i les diferències entre elles indiquen els elements que tenen un especial interès.

En funció de la mobilitat a les escòries, els elements es poden classificar en dos grups: d'una banda els que constitueixen sals més o menys solubles com Ca, Na, K, SO_4^{2-} i Cl^- , amb fraccions disponibles i lixiviables altes (>1000 mg/kg), preferentment localitzades a les fraccions més fines de les escòries (també la conductivitat relativament alta dels lixiviats és en bona part deguda a la solubilitat més alta de la fracció fina). La resta d'elements presenten fraccions lixiviables molt inferiors i fraccions disponibles variables, en funció de la seva solubilitat en el medi àcid.

En general les fraccions lixiviables —així com les lixiviades— estan molt lluny d'atènyer les fraccions disponibles, excepte en el cas d'alguns constituents presents en fases amb solubilitat poc dependent del pH (per exemple, els clorurs) o en espècies més mòbils a pH bàsic (com els molibdats). El test de disponibilitat, per tant, és molt conservatiu i quedaria en segon terme com a eina de gestió del possible impacte ambiental a curt i mitjà terminis.

La baixa fracció disponible de P, Ti, Cr, Sn, Si, Fe, Al, W, V i As indica que aquests elements estan fermament lligats a les escòries i per tant no han de suposar cap problema ambiental. A la retenció mineralògica d'aquests elements s'hi afegeix la gran capacitat de retenció química d'altres elements com Mg, Zn, Pb, Ba, Mn, Ni i Co, la solubilitat dels quals ateny el mínim en el rang de pH propi dels lixiviats de les escòries envellides. D'aquí es dedueix la importància de la capacitat de neutralització àcida de les escòries, que és l'òptima per resistir canvis en el pH induïts per factors externs o per fenòmens que tenen lloc en el si de l'escòria, com ara la degradació de la matèria orgànica.

Per contra, tant les retencions per causes mineralògiques com les químiques són poc efectives en elements que constitueixen espècies més o menys solubles com Ca, Na, K, S, o Cl, amb fraccions disponibles i lixiviables altes. Amb emissions per lixiviació més baixes, també mostren una certa mobilitat Cu, Sr, Sb, B, Mo i Se.

Hi ha un grau de coincidència força elevat entre les fraccions lixiviables determinades segons els tests CEN i les fraccions que han estat lixiviables al tram experimental de camp a Tagamanent (només el Zn és més mòbil en condicions de camp i presenta una emissió acumulada més alta). Així, els tests CEN realitzats permeten fer previsions realistes i ajustades de la fracció lixiviable de les escòries en un marc temporal relativament limitat (menys de 10 anys) a causa de la manca de recobriment del sistema i les consegüents altes taxes d'infiltració. Es tractaria, doncs, de previsions poc conservatives en aquest escenari en concret, però possiblement més conservatives en un altre context amb unes característiques, pluviometria i infiltració eficaç diferents (cal tenir en compte que el marc temporal de previsió de cada test de lixiviació no és un paràmetre intrínsec a les característiques del procediment sinó que depèn en cada cas concret de l'escenari d'aplicació).

En el tram de camp de Tagamanent s'ha observat que per a molts elements les dues primeres extraccions són crítiques i suposen la major contribució a l'emissió acumulada, de manera que en les següents extraccions les dissolucions d'aquests elements tendeixen (asimptòticament) a zero; per a d'altres es requereixen més extraccions per arribar a aquesta situació. En general, però, al cap de 2 anys la fracció lixiviable d'una gran part dels elements està esgotada i les següents lixiviacions extrauran quantitats molt baixes. Només B, Sr, Mo, Si, Ba i SO_4^{2-} presenten un esgotament lent i encara ara són progressivament alliberats.

La comparació entre els tests de lixiviació aplicats a escòries i a la calcària, així com les lixiviacions obtingudes als respectius sots del tram de Tagamanent evidencia que els lixiviatos de les escòries són molt més salins, amb conductivitats i concentracions d'anions i de Ca, Na i K molt superiors (d'uns dos ordres de magnitud). Així mateix, les lixiviacions de Cu, Zn, Ti o Mo per exemple també serien un tret diferencial. En canvi no s'observen alliberaments significativament diferents en altres elements com Mg, Mn, Ba o V.

Juntament amb l'anàlisi de les dades obtingudes, l'aplicació del Decret de materials de construcció holandès sobre els nivells d'immissió calculats a partir de les emissions acumulades del test CEN12457-3 i del tram de Tagamanent permet identificar Cu, Mo, Se i Sb, així com Cl^- i SO_4^{2-} com els constituents potencialment conflictius de les escòries d'incineració de residus sòlids urbans. Segons el DMC, les immissions d'aquestes espècies restringirien —i en algunes escòries fins i tot invalidarien— les possibles opcions de valorització, i per tant mereixen la màxima atenció en l'avaluació del risc ambiental que l'ús de les escòries pot comportar. Les lixiviacions de la resta d'elements no han de comportar cap problema ambiental, sempre que s'utilitzin escòries envellides; en cas contrari, els pH

fortament alcalins augmentarien la solubilitat d'espècies considerades sense risc com Pb o Zn. Les emissions d'aquest darrer (més mòbil en condicions de camp) així com les de P, NO₃⁻, Ba, B i W són baixes però requeririen un cert control.

Adequació a les normatives tècniques

Les normatives tècniques que regulen l'aplicació proposada en aquest estudi són l'Ordre de 15 de febrer de 1996 sobre valorització d'escòries i l'article 510 sobre tot-u del PG-3 (2004). Les escòries compleixen amb escreix les màximes concentracions llixivables (mitjançant el test DIN 38414) que fixa l'Ordre, així com la fracció soluble. No obstant això, algunes escòries presenten pèrdues al foc superiors a les permeses i per tant no seria possible valoritzar-les.

Excepte Cu, els constituents de màxima preocupació a les escòries segons els resultats d'aquest estudi (Cu, Mo, Se, Sb, Cl⁻, SO₄²⁻) no coincideixen amb els detallats a l'Ordre sobre valorització d'escòries, que inclou alguns elements que estan molt fixats a l'escòria o bé elements dels quals estan molt empobrides. Així, potser caldria una revisió del text de l'Ordre per tal de restringir les emissions de certs constituents que es passen per alt, com Cl⁻, SO₄²⁻, Sb, Mo i Se.

Pel que fa a l'adequació de les escòries a les prestacions tècniques d'un tot-u, una de les principals limitacions és el contingut en compostos de sofre totals, especialment elevat en les escòries de Sant Adrià a causa del temperament amb aigua de mar. D'altra banda, només el contingut en partícules en forma de plaques d'algunes fraccions granulomètriques superen el límit establert, especialment a les escòries de Mataró. Així mateix el coeficient de neteja és lleugerament superior al permès en algunes escòries, però cal dir que també ho és sovint en àrids convencionals. La resta de propietats compleixen més o menys satisfactòriament els valors estipulats pel PG-3 en l'article 510 sobre el tot-u, del 2004.

VIII.2 RECOMANACIONS SOBRE MESURES PER MILLORAR LA QUALITAT

Les mesures que se suggereixen per millorar la qualitat mecànica i ambiental de les escòries incideixen sobre les quatre etapes de la vida de les escòries: sobre la *matèria primera* (és a dir, el residu sòlid urbà originari), el procés d'incineració, el processament posterior i l'escenari i el tipus d'aplicació, i han de estar en equilibri amb el cost econòmic que poden implicar.

Sobre la matèria primera i el procés

Qualsevol alteració de les característiques dels residus sòlids urbans, i en especial de la proporció dels seus constituents refractaris, té repercussions directes sobre les escòries. Per

aquest motiu, un augment de la recollida selectiva, a més dels evidents beneficis que comporta amb vista al reciclatge (que n'és l'objectiu primordial), modificaria les característiques de les escòries. Aquesta sembla ser l'única alternativa per reduir la presència de Mo a les escòries (presumiblement associat a la fracció metàl·lica) i, per extensió, la seva fracció lixiviable.

La fracció no combustible que més notaria els efectes és el vidre domèstic. La reducció de la seva proporció comportaria una millora en les propietats mecàniques del producte i possiblement es reduiria la fragmentació de les plaques amb l'acció repetitiva de les càrregues. Els avantatges d'aquesta mesura són doncs evidents, però presenta certes dificultats d'aplicació. La realització passa per augmentar la conscienciació social dels beneficis del reciclatge i potenciar la recollida selectiva. Aquesta modificació del residu sòlid urbà originari podria anar acompanyada d'una alteració del procés d'incineració per tal d'afavorir els processos de fusió a la cambra de combustió, regulant el temps de residència del residu i espaiant-lo per uniformitzar la combustió, per tal de potenciar l'existència de vidre amb una fusió parcial i arrodonit en detriment de les plaques, més inestables des del punt de vista mecànic.

També el contingut de material combustible de les escòries generades en algunes plantes suggereix que és necessari optimitzar l'eficiència de la incineració potenciant algunes pràctiques que no han de suposar grans costos, com espaiar el residu introduït dins la cambra de combustió. La importància de la reducció de la fracció orgànica restant és motivada per múltiples aspectes: fragilitat, inestabilitat, disminució del pH per biodegradació, presència de substàncies orgàniques potencialment lixiviables i augment de la mobilitat del Cu per complexació. És, per tant, fonamental una combustió completa per obtenir escòria neta i lliure d'aquest material. Això es pot complementar amb una segona depuració durant el processament posterior, mitjançant un sistema de corrents d'aire com el que s'aplica a les Pedreres Rusc, que no obstant només extreu la fracció grossa de material combustible; una combustió eficient és la millor opció per minimitzar les substàncies orgàniques que romanen a les escòries.

Caldria repensar la pràctica de temperar el material que surt del forn amb aigua de mar, font addicional amb una gran quantitat de clorurs i sulfats capaços de migrar cap a les aigües subterrànies i de desenvolupar certes patologies en les capes tractades en contacte. Si bé aquestes sals es concentren preferentment a les partícules <1 mm, la hipotètica extracció d'aquesta fracció granulomètrica a més de ser poc viable des del punt de vista econòmic tampoc no les eliminaria completament.

Sobre el processament posterior

Les plantes d'acondicionament desenvolupen un paper molt important en la millora i la depuració del producte final (escograva), alhora que permeten recuperar metalls que a les escòries poden ser font d'inestabilitat i de possibles problemes ambientals. És molt

recomanable, per tant, potenciar la implantació de dispositius de processament de les escòries dins la mateixa incineradora o bé com a planta de tractament independent.

Es descarten intervencions complexes com ara rentats, extraccions del fil·ler o vitrificacions, ja que els beneficis no són clarament significatius i els costos econòmics associats són elevats. De fet, el tractament més econòmic és l'envelliment durant uns quants mesos, durant el qual es permet que tinguin lloc lliurement les reaccions pròpies d'un material d'alta temperatura. Transcorregut aquest període, el material està molt més equilibrat amb el medi i les condicions de pH són molt menys propícies a la mobilització de molts elements.

Sobre el producte final i l'aplicació

Tenint en compte que les escòries són lleugerament més fràgils que molts àrids convencionals i davant les incerteses sobre el comportament de les escòries a llarg termini, es recomanaria complementar les capes granulars d'escòries amb unitats d'obra que continguin àrids naturals per garantir una secció estructural amb un rendiment òptim.

Si bé la major part de les propietats físiques i mecàniques de les escòries són adequades i compleixen les sol·licitacions que marca el PG-3/2004, hi hauria la possibilitat d'ajustar alguns dels aspectes menys favorables. Un exemple seria l'addició d'una petita proporció de grava natural a les escòries, que restituiria la lleugera mancança de partícules grosses. Aquesta mescla contribuiria a aconseguir una granulometria que es podria enquadrar al fus ZA20, aportaria angularitat i augmentaria la fricció interna, de manera que es constituïria un esquelet encara més resistent i es densificarien les capes. Paral·lelament disminuiria la fragilitat de les escòries (coeficient de desgast inferior i menys plaques, segons el tipus d'àrid incorporat). Òbviament aquesta operació encariria el producte però en milloraria molt les prestacions mecàniques. Caldria avaluar, doncs, si aquesta incorporació és viable, i a partir de quin percentatge d'incorporació s'observa una millora significativa del material.

VIII.3 RECOMANACIONS SOBRE MESURES DE PROTECCIÓ

L'aïllament total del material amb l'objectiu de minimitzar el contacte aigua-residu condueix evidentment a una reducció dràstica del volum de lixiviats i de la migració de sulfats, alhora que s'evita la saturació de la capa (font d'inestabilitat). Aquesta opció podria ser efectiva i el cost afegit de la utilització de geotèxtils és perfectament assumible.

No obstant això, tenint en compte els aspectes de durabilitat dels mateixos dispositius d'aïllament, la impermeabilització sembla ser una solució d'abast temporal limitat, ja que una

degradació del ferm i/o dels sistemes d'aïllament de la capa d'escòries activaria les emissions de la càrrega lixiviable que havia restat retinguda fins aleshores.

Una simple mescla bituminosa en superfície pot exercir un cert efecte impermeabilitzant, ja que situada sobre la capa granular d'escòria restringeix la infiltració d'aigua (tot i que no evita la percolació lateral). És molt possible que amb aquest tipus de secció estructural es redueixin suficientment les altes taxes d'infiltració i, per extensió, les emissions i immissions dels elements. De tota manera, tampoc no és una solució definitiva atès que una incipient degradació de la mescla bituminosa propiciaria l'aparició de zones d'entrada d'aigua.

En tot cas seria necessari portar un registre dels emplaçaments que contenen escòries substituint àrids naturals i que, si finalitzava el període de vida útil del tram de carretera, es desmantellés el ferm i es diposités el material en un abocador adequat a aquest efecte, tenint en compte que les escòries són un residu no especial.

Ara bé, si l'escenari d'aplicació és una zona urbana o residencial es pot optar per aïllar la capa d'escòria només parcialment, revestint la base i els laterals, i crear sistemes de drenatge i canalitzacions de les aigües d'infiltració que les derivin cap a la xarxa de clavegueram. Els costos econòmics inicials són més elevats que una simple impermeabilització amb geotèxtils, però es tracta d'una solució d'abast temporal més llarg que permet l'esgotament de la fracció lixiviable dels elements a les escòries de manera controlada i com a conseqüència un cop arribat a l'esgotament total de les fraccions extraïbles a llarg termini, les escòries es converteixen presumiblement en un material inert sense cap perillositat.

VIII.4 RECOMANACIONS SOBRE LA METODOLOGIA

És possible caracteritzar les escòries amb les mateixes eines que els àrids naturals, excepte alguns casos concrets en què certs trets no s'adapten satisfactòriament als assaigs reglamentaris, o bé alguns aspectes que no estan coberts. En tot cas, cal ressaltar alguns aspectes que s'han anat observant durant la realització dels assaigs de laboratori.

Respecte a la caracterització física i mecànica

- La majoria de paràmetres físics i mecànics presenten un rang de variabilitat relativament estret entre les diferents escòries produïdes en una mateixa planta, així com entre les de diferents plantes; la proporció de plaques, el valor del sulfat de magnesi i els índex CBR són els menys uniformes. A més, els dos darrers mostren una certa dispersió entre rèpliques del mateix assaig, de manera que és molt recomanable fer les provetes CBR per triplicat i amb el mateix grau de compactació, contràriament al que es fa amb àrids

naturals. Pel que fa a l'assaig del sulfat de magnesi, caldria realitzar-lo per triplicat i/o augmentar el pes de mostra respecte als 420-430 g estipulats per la norma UNE-EN 1367-2, que semblen ser insuficients per obtenir resultats representatius a causa de l'heterogeneïtat pròpia d'aquest material.

- La particular naturalesa de les escòries, constituïdes per múltiples components i la seva heterogeneïtat en funció de la mida de gra repercuteix en la major part de les propietats intrínseques de les partícules. Per aquest motiu s'ha considerat necessari l'estudi de la influència de la mida de gra en alguns aspectes, una pràctica que no s'utilitza en àrids naturals considerats uniformes.
- En aquest sentit, convé tenir present que algunes propietats mecàniques s'avaluen sobre una sola fracció granulomètrica de l'àrid. Per tant, cal tenir en compte aquesta heterogeneïtat a l'hora d'atribuir les conclusions del resultat de l'anàlisi d'una fracció granulomètrica concreta al total d'escòria. Aquest és el cas d'assaigs com el del coeficient de desgast de Los Angeles, l'índex de plaques o el valor del sulfat de magnesi.
- La morfologia de les escòries invalida la metodologia d'assaig del percentatge de cares de fractura, però caldria trobar una manera alternativa d'avaluar i quantificar la rugositat de les partícules.
- El Proctor és l'assaig de compactació estipulat al PG-3, però durant l'execució es modifica la granulometria del material. Seria més convenient, doncs, reemplaçar la compactació per impactes per la vibració de les partícules, que reproduïx el mecanisme que té lloc a l'obra.
- Així mateix, durant el Proctor s'observa una distribució poc uniforme de la humitat; es recomana no prendre cap mostra del nucli de la proveta sinó de tots els punts possibles per tal que el resultat sigui representatiu.
- Resten algunes incerteses sobre si els aspectes de durabilitat estan totalment coberts amb les normes d'assaig dels àrids naturals. Al marge de l'expansivitat, l'assaig del sulfat de magnesi (reproduint el gel-desgel) i la immersió prolongada de provetes CBR, hi ha dificultats en l'avaluació de l'evolució del material.

Respecte a la caracterització química i mineralògica

- La concentració de diversos metalls sembla que està subjecta a l'efecte *pebble*, motiu pel qual és convenient determinar la composició química de les escòries almenys per duplicat, juntament amb un quarterament i una reducció de la mida de la partícula acurats.
- La separació per fraccions granulomètriques evita l'efecte de *dilució* produït pel predomini del vidre domèstic a les escòries. Si a més de fer una caracterització general de les escòries es pretén aprofundir més en alguns aspectes concrets de la mineralogia, com ara determinar l'estat de carbonatació de les escòries o la tipologia de fases de neoformació (postincineració), és necessària una aproximació per fraccions granulomètriques independents.

Respecte a la caracterització ambiental

- La dispersió de dades observada en la determinació de la composició química de les escòries es redueix en gran mesura en els resultats dels tests de lixiviació (la quantitat de mostra utilitzada és diversos ordres de magnitud més alta). El rang de variació entre les dues rèpliques és molt estret, i per tant no seria estrictament necessari dur a terme els tests de lixiviació per triplicat.
- Coneixent l'objectiu del test de disponibilitat NEN 7341 i tenint en compte que infravalora les fraccions extraïbles dels elements amb més mobilitat en el medi bàsic, esdevé necessari trobar un test alternatiu o una petita modificació d'aquest que s'adapti al comportament dels elements continguts a residus de naturalesa alcalina. En aquest sentit, només seria necessària una alteració de la primera fase del test, que s'executés a un pH estàtic clarament alcalí o bé el pH que dictaminés el mateix material durant els primers 10 minuts d'agitació normatius. En general, els residus de combustió són inicialment molt alcalins i el pH tendeix a davallar cap a condicions lleugerament bàsiques fins a equilibrar-se amb el medi; per tant, en un escenari d'aplicació mai no se superarà el llindar superior de pH que defineixi el mateix material (excepte si hi ha addició d'algun conglomerant hidràulic), ja que a més es tracta de material triturat finament i per tant exposa noves cares de fractura fresques i disponibles per hidratar i carbonatar. La segona fase del test, que es desenvolupa a pH 4, es mantindria.

VIII.5 PROPOSTES DE RECERCA FUTURA

Ara com ara es té un bon coneixement del comportament físic i mecànic de les escòries gràcies a un bon nombre d'estudis per als quals la caracterització ha estat necessària. No obstant això, es tracta d'un coneixement parcial, ja que altres aspectes no estan tan investigats; les principals incògnites són l'evolució de les escòries a llarg termini (aspectes de durabilitat) i les conseqüències ambientals que la valorització pot comportar, també a llarg termini. Els efectes de la meteorització sobre les escòries al cap dels anys podrien provocar canvis en l'especiació dels elements que reactivessin la dissolució de certs elements.

Ambdós qüestions comporten moltes dificultats per avaluar-les al laboratori, motiu pel qual no es pot garantir l'eficiència de les escòries en un marc temporal llarg i, per tant, l'ús d'aquest material —i de fet, també d'altres subproductes en la mateixa situació— encara està en un estadi molt incipient.

D'altra banda, com ja s'ha vist les fraccions lixiviables determinades mitjançant tests estandarditzats i les fraccions lixiviables al tram experimental de camp a Tagamanent no sempre són coincidents; es tracta d'escales de treball —i escales temporals— molt diferents.

Per aquest motiu es recomanaria aprofundir en el comportament ambiental de les escòries mitjançant la utilització de lisímetres, en els quals es faci un seguiment de l'evolució del pH del medi i de les emissions de manera controlada. Aquest tipus d'instal·lacions permeten avaluar el material en condicions molt més properes a les d'un escenari d'aplicació, i per tant se'n poden extreure previsions més realistes, per bé que el temps requerit és molt més llarg. La monitorització dels lisímetres també pot proporcionar informació sobre possibles variacions dimensionals.

Al marge de l'ús en capes granulars, en el qual s'ha focalitzat aquesta tesi, les escòries tenen múltiples aplicacions, per exemple amb ciment. Dins l'àmbit de les carreteres, poden constituir altres unitats d'obra com formigons compactats o grava-ciment. A més de ser necessari un estudi de la dosificació més adequada del producte i una caracterització mecànica, esdevé fonamental un estudi ambiental exhaustiu; malgrat l'aparent immobilització de l'escòria, una matriu de pòrtland genera lixiviats amb pH molt alcalins, que propicia la dissolució d'elements amfòters com Pb o Cr. Actualment al Departament d'Enginyeria de la Construcció hi ha una tesi doctoral en curs en la qual es treballa amb les escòries de Mataró. D'altra banda, també es pot considerar la possibilitat d'utilitzar les escòries amb mescles bituminoses.