



Capítol V

**COMPORTAMENT MECÀNIC**



## V. Comportament mecànic

Dins aquest punt s'exposen totes aquelles propietats que avaluen el comportament de les escòries com a material granular que reemplaça àrids naturals al ferm. Les característiques estudiades no versen exclusivament sobre el comportament mecànic, sinó que s'hi inclouen altres propietats físiques i fins i tot químiques que d'alguna manera poden repercutir en el rendiment mecànic de l'estructura. L'objectiu és estudiar la viabilitat del material per a l'ús esmentat i els possibles problemes que poden sorgir en la posada en obra i durant el període de vida útil del ferm resultant, és a dir, els aspectes de durabilitat.

Pràcticament tots els assaigs estan normalitzats i la seva realització és requerida en els plecs de prescripcions. Val a dir, però, que en general, a excepció de les obres estatals, les prescripcions del PG-3 no són estrictament obligatòries, sinó que són recomanacions d'ús que es poden matisar; la decisió final d'utilitzar o descartar el material en qüestió la té el director de l'obra, amb la justificació convenient, en el seu cas.

Tot i que s'exposaran separatament, gairebé totes les propietats estan relacionades i moltes són interdependents. D'una banda, hi ha aquelles propietats físiques i mecàniques que deriven directament de les característiques de les diverses tipologies de materials que inclouen les escòries, més concretament de l'abundància relativa i dels aspectes petrogràfics de cada constituent (Taula V-1). Les característiques que es detallen a la Taula V-1 condicionen en gran mesura el comportament mecànic de les escòries; la influència directa es palesa a les propietats que es detallen a la columna de la dreta, tot i que la influència indirecta en altres propietats té un abast molt més ampli.

Com ja s'ha vist al capítol IV, el vidre domèstic es presenta en dues geometries, textures i porositats diferents (vegeu la Figura IV-5, al capítol anterior) amb predomini de cada una en diferents rangs granulomètrics, a excepció de les escòries de Mataró, en les quals la forma més abundant són les plaques anguloses en totes les mides de gra. Mentre que les morfologies més equidimensionals i/o arrodonides revelen una certa fusió (productes de fusió, metalls fosos), les formes de plaques anguloses i agulles són clarament relictos i es donen en partícules que no han experimentat grans canvis durant la combustió, exceptuant una

fragmentació. Els metalls no fosos, així com el material combustible, mostren morfologies de partícula molt variables, irregulars i poc adequades. En principi els materials més abundants són òbviament els que exerceixen un influència més gran, però en diversos aspectes no és estrictament així: per exemple, les espècies de neoformació són poc importants quantitativament en el total d'escòries i tanmateix desenvolupen un paper fonamental en l'estabilitat volumètrica, ja que els productes de certes reaccions poden ser expansius.

Taula V-1. Aspectes petrològics dels constituents de les escòries i paràmetres sobre els quals influeixen de manera directa.

Caract.	Vidre		Productes de fusió	Material ceràmic	Metalls	Material combustible	Productes neoformació	paràmetres
<i>abundància</i>	alta	mitjana	alta	mitjana	baixa	baixa	baixa	-
<i>forma</i>	placa	equidim	equidim	plaques	irregular	irregular	-	IL, LA, CBR, $\rho_{dm\grave{a}x}$
<i>textura</i>	llisa	rugosa	molt rugosa	llisa	variable	variable	-	CBR.ang
<i>porositat</i>	nul·la	baixa	alta	baixa	nul·la	alta	-	MS, LA, $\omega_{opt}$
<i>mineralogia</i>	sílice	sílice	fases Fe	Al-Si	e.natius	orgànic	sals	LA, LOI, exp, $\rho_{dm\grave{a}x}$
<i>reactivitat</i>	baixa	baixa	baixa	baixa	mitjana	mitjana	alta	exp

IL: índex de plaques; LA: desgast de Los Angeles; CBR: capacitat portant; ang: angulositat; LOI: pèrdua al foc; exp: expansions. MS: valor del sulfat de magnesi;  $\rho_{dm\grave{a}x}$ : densitat seca màxima;  $\omega_{opt}$ : humitat òptima; Al-Si: aluminosilicats. e.natius: elements natius.

D'altra banda, hi ha propietats que no estan tan condicionades per la naturalesa i la proporció relativa de cada constituent, sinó per la granulometria del conjunt del material. Respecte a aquestes interrelacions, es fa difícil expressar-les en una taula, atès que moltes de les propietats estan relacionades les unes amb les altres. Per exemple, la granulometria condiciona en gran mesura la compactabilitat, que a la vegada condiciona la capacitat de suport. La granulometria condiciona també la densitat aparent i la permeabilitat. El contingut i tipus de fins repercuteixen en la neteja, l'equivalent de sorra i la plasticitat, i de manera indirecta en la capacitat portant.

Els assaigs realitzats s'han dividit en quatre blocs: el primer i el segon fan referència a aspectes condicionats per la petrologia de les escòries, com la geometria i la durabilitat de les partícules. El tercer bloc versa sobre propietats relacionades amb les diverses fraccions granulomètriques presents i la seva proporció. El quart i darrer grup engloben els assaigs que es realitzen amb el material compactat.

## V.1 GEOMETRIA DE LES PARTÍCULES

### V.1.1 FORMA: índex de plaques

De tots els paràmetres que defineixen la geometria de les partícules mereix una atenció especial l'índex de plaques, per les conseqüències que se'n deriven. Com ja s'ha exposat al

capítol III, aquest índex expressa el % en pes de partícules que tenen una dimensió molt més petita (concretament menys de la meitat) que les altres dues, és a dir, que conformen peces planes (Figura V-1), però alhora inclou també les agulles (és a dir, les partícules amb una dimensió molt més gran que les altres dues).

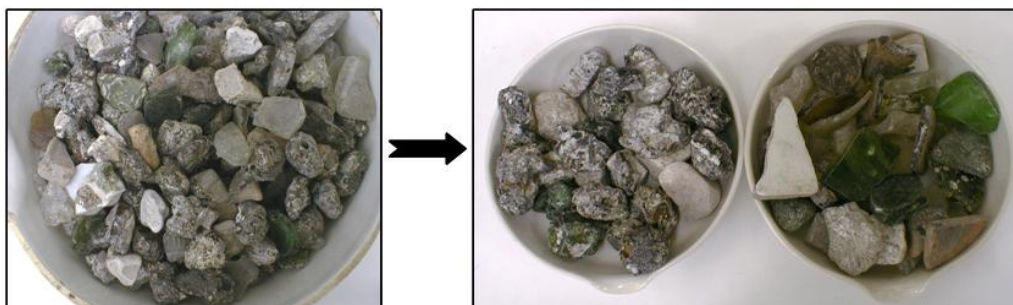


Figura V-1. Fracció granulomètrica de 12.5-16 mm de les escòries de Tarragona (març del 2001), en què es mostra la imatge de l'esmentada fracció abans (esquerra) i després (dreta) de la realització de l'assaig de determinació de l'índex de plaques de les escòries. S'observen separatament les partícules més equidimensionals i les plaques i agulles.

Els índexs de plaques determinats es representen a la Figura V-2, en la qual s'observen les diferències morfològiques de les escòries de Mataró. Els valors determinats oscil·len entre el 24 % i el 28 % en les escòries de Tarragona, el 33 % i el 41 % en les de Mataró i el 27 % i el 29 % en les de Sant Adrià. Aquestes dades indiquen una variabilitat associada a la procedència de l'escòria, i una relativa homogeneïtat entre escòries de la mateixa planta (menys palesa entre les escòries de Mataró).

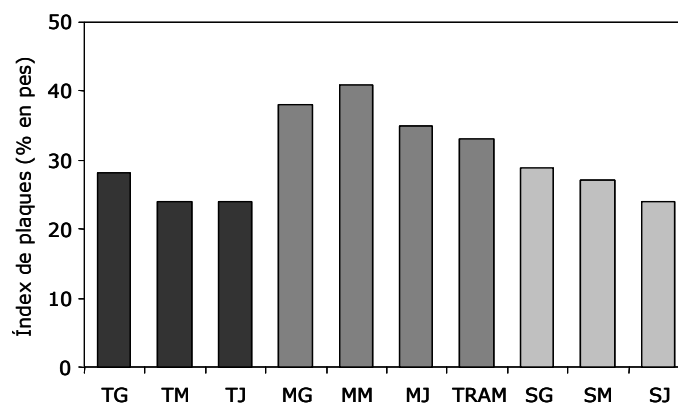


Figura V-2. Índex de plaques de les escòries, expressat en % en pes. T: escòries de Tarragona; M, TRAM: escòries de Mataró; S: escòries de Sant Adrià. G, M, J: mostres recollides el gener, març i juliol del 2001, respectivament. TRAM: mostra de novembre del 2001 utilitzada en el tram experimental.

Un estudi més detallat d'aquest paràmetre, observant la seva variació segons la mida de gra considerada, revela l'origen de les diferències entre les escòries de cada planta i el motiu pel qual la proporció de plaques és relativament alta. De les cinc tipologies de materials que constitueixen les escòries, les més abundants són el vidre residual, el material ceràmic i àrids i els productes de fusió. Mentre que aquests darrers tendeixen a ser més o menys

equidimensionals, una certa proporció del vidre domèstic amb morfologia preexistent i del material ceràmic adopta formes de peces amb contorn irregular i planes (vegeu les Figures IV-5 i 8). En el cas del vidre, com ja s'ha exposat anteriorment, a les fraccions més fines tendeix a presentar-se en formes més cúbiques, mentre que les partícules més grans no mostren gaire fusió i mantenen geometries anguloses i aplanades.

La distribució de l'índex de plaques en funció de la mida de gra es pot correlacionar amb la distribució d'aquests materials. Les corbes obtingudes es representen a la Figura V-3 i mostren a grans trets dos trams diferenciats: dels 4 mm als 12 mm d'obertura de tamís el contingut de plaques experimenta un pendent pronunciat que indica un augment important cap a mides de partícula més grans; a partir d'aquest punt els valors s'estabilitzen. Com que les fraccions més gruixudes estan constituïdes majoritàriament per fragments ceràmics, mentre que a les partícules intermèdies hi predomina el vidre, les corbes de distribució de l'índex de plaques es podrien assimilar qualitativament a les corbes de distribució conjunta del vidre domèstic i el material ceràmic (Figures IV-7 i IV-10).

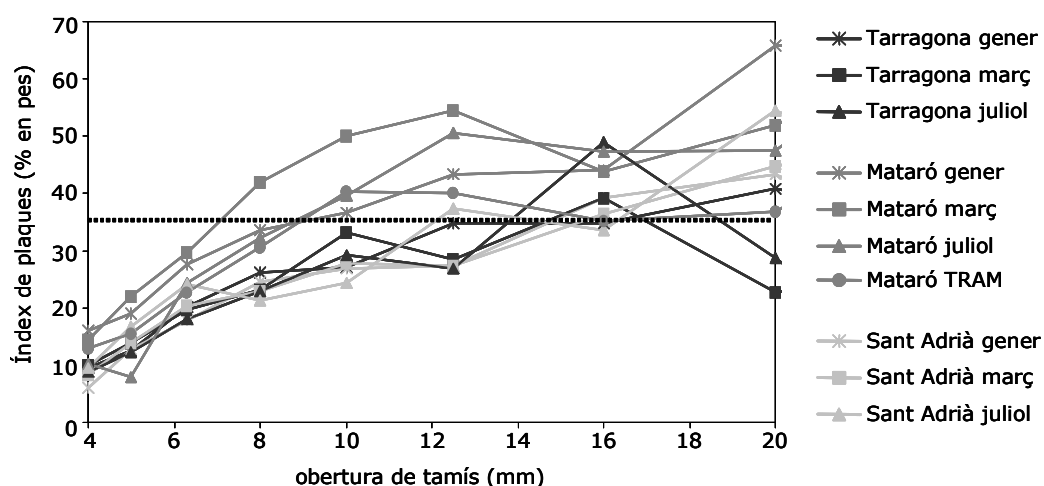


Figura V-3. Influència de la fracció granulomètrica considerada en l'índex de plaques i valor màxim admès pel PG-3/2004 per a tot-u artificial.

Els índexs de plaques més elevats han estat determinats a les escòries de Mataró, i destaquen les mostres del març i el juliol del 2001. Aquestes observacions es corresponen amb un major contingut de vidre domèstic a les fraccions granulomètriques intermèdies (Figura IV-7) (justament aquelles que més contribueixen a la granulometria total), vidre que en les escòries de Mataró té la particularitat de ser majoritàriament del tipus aplanat. Les escòries de Tarragona i Sant Adrià presenten moltes similituds en els índexs de plaques, més moderats, i en la seva distribució, tot i que en realitat aquestes escòries són més diferents del que a primera vista podria semblar: les escòries de Sant Adrià estan comparativament empobrides en vidre i enriquides en material ceràmic, mentre que a les de Tarragona s'esdevé justament el contrari.

Les prescripcions del PG-3/2004 indiquen que l'índex de plaques de les diverses fraccions granulomètriques de l'àrid gruixut ha de ser <35 % per al seu ús com a tot-u artificial. Les escòries de Mataró sobrepassen aquest líndar del 35 % en les fraccions >8 mm. En les escòries de Tarragona i Sant Adrià només superen aquest límit les fraccions 16-20 mm i 20-80 mm, respectivament, però cal remarcar la limitada contribució que suposen a la granulometria total, de manera que l'índex de plaques global del material d'aquestes plantes està lluny del 35 % estipulat. A més, les fraccions >20 mm es consideren desclassificats superiors, atès que les escòries són un material 0/20. D'altra banda, les escòries de Mataró que han estat utilitzades en la construcció del tram experimental són les que contenen menys plaques de totes les procedents d'aquesta planta.

En tot cas, les dades indiquen que els índexs de plaques de les escòries són relativament alts. Aquesta característica, pel fet de ser inherent de constituents preexistents, podria ser modificada alterant la composició del residu sòlid urbà originari. En aquest sentit, una recollida selectiva més eficaç contribuiria a la disminució de la proporció de vidre residual i de material ceràmic, al marge dels clars beneficis que suposa qualsevol operació de recollida selectiva amb la subsegüent reutilització i/o reciclatge.

Més enllà de complir els valors detallats als plecs de prescripcions, esdevé important controlar la quantitat d'àrids amb formes poc equidimensionals, incloent-hi plaques i agulles, perquè aquestes geometries mostren menys resistència a la fragmentació que els àrids cúbics. Això fa pensar que les partícules amb formes poc adequades poden trencar-se amb més facilitat durant la compactació en la posada en obra o posteriorment sota l'acció del trànsit i modificar la granulometria, de manera que es veuria reduïda la capacitat portant; és per aquest motiu que s'imposen limitacions en el contingut de plaques.

### **V.1.2 ANGULOSITAT: *cares de fractura***

La metodologia de l'assaig de determinació de les cares de fractura està enfocada als àrids de matxuqueig, concretament a la quantificació del nombre d'arestes que contenen les partícules. El procés d'incineració també produeix alguns àrids amb cares de fractura, perquè el moviment de les graelles i l'impacte tèrmic comporta la fragmentació de vidre relicte i material ceràmic. Per altra banda, el vidre fos i els productes de fusió no tenen cares de fractura però les seves estructures superficials podrien desenvolupar una funció anàloga. La morfologia irregular del vidre fos i, especialment, els productes de fusió amb una superfície vesicular i molt rugosa poden contenir punts d'ancoratge d'unes partícules respecte les altres, amb la qual cosa disminuiria el lliscament intergranular dels àrids (Figura V-4).



Figura V-4. Aspecte del vidre domèstic (esquerra) i dels productes de fusió (dreta) de les escòries de Tarragona, corresponents a la fracció granulomètrica 12.5/20, per mostrar l'angulositat de les partícules d'aquests constituents, que són les majoritàries a les escòries.

A falta de lligant o conglomerant, la resistència a la deformació i per tant la capacitat de suport d'una capa granular del ferm depenen essencialment del fregament intergranular de l'esquelet mineral (Kraemer et al., 1999; Smith i Collis, 1994), que en el cas de les escòries seria determinat per les singulars textures superficials dels seus constituents.

### V.1.3 CONCLUSIONS

És difícil comparar la geometria de les partícules de les escòries amb les dels àrids naturals perquè els processos de producció són clarament diferents; els grans no són arrodonits com les graves ni netament angulosos com els àrids de matxuqueig. Els aspectes morfològics més rellevants per al paper que desenvolupen en les propietats mecàniques són la quantitat de plaques i la textura superficial; en altres paraules, les *cares de fractura*. El material més problemàtic tenint en compte aquestes dues característiques és el vidre domèstic relict que no ha experimentat una fusió: amb superfícies llises i forma de placa, esdevé possiblement una de les claus de la fragilitat de les escòries.

No totes les escòries compleixen estrictament les prescripcions de PG-3/2004 quant a l'índex de plaques, especialment en les seves fraccions granulomètriques  $>10$  mm de les escòries de Mataró; aquest fet és directament atribuïble al vidre domèstic. Les partícules equidimensionals són menys fràgils i permeten obtenir empaquetats més densos (per a una mateixa granulometria), que juntament amb una textura superficial rugosa proporcionen al sistema una major estabilitat. Per totes aquestes qüestions es considera que una reducció del contingut de vidre a les escòries repercutiria favorablement en certes propietats; seria desitjable un augment de la proporció de productes de fusió en detriment del vidre o, si no, una major presència de vidre del tipus subarrodonit. Per a això es requeriria, per exemple, una variació en la composició del residu sòlid urbà incinerat, una trituració prèvia a la incineració o una certa modificació del procés, com ara regular el temps de residència del residu dins la cambra de combustió.



## V.2 DURABILITAT

### V.2.1 RESISTÈNCIA AL DESGAST: *coeficient de Los Angeles*

Els coeficients de Los Angeles determinats en les escòries es representen a la Figura V-5, en què es reflecteix el % en pes de pèrdua. D'entrada sorprèn la uniformitat entre les dades de totes les escòries de les diferents plantes, que oscil·len en un estret rang d'entre el 39 % i el 42 %. El valor anòmal de les escòries del juliol de Sant Adrià (36 %) s'atribueix a la granulometria D emprada en l'assaig (2.5-5 mm), amb partícules molt inferiors a les de la granulometria B (10-20 mm). La causa d'aquesta pèrdua inferior no es troba necessàriament en diferències del procés (en les granulometries més fines es treballa amb una càrrega abrasiva menor per contrarestar) o en una dependència de la fragmentació segons la mida de gra, sinó més aviat en la mateixa escòria, i es pot correlacionar amb l'abundància relativa dels diferents constituents i l'índex de plaques. La mostra de Sant Adrià utilitzada estaria en el rang de mides més baixes de la Figura V-3, en la qual els índexs de plaques són clarament més baixos que els corresponents a diàmetres de partícula més grans; convé recordar que aquest fet és causat perquè en les mides <5 mm el contingut de productes de fusió és superior en detriment del vidre domèstic, i que aquest, quan és d'aquestes dimensions, és més equidimensional. Al marge d'aquesta mostra, les escòries de Mataró presenten coeficients de Los Angeles lleugerament superiors (arriben al 42 %) als de les altres, que en cap cas no superen el 41 %. L'augment de la fragilitat, com es veurà a continuació, està relacionat amb una major proporció de vidre, que, a més, és preferentment aplanat.

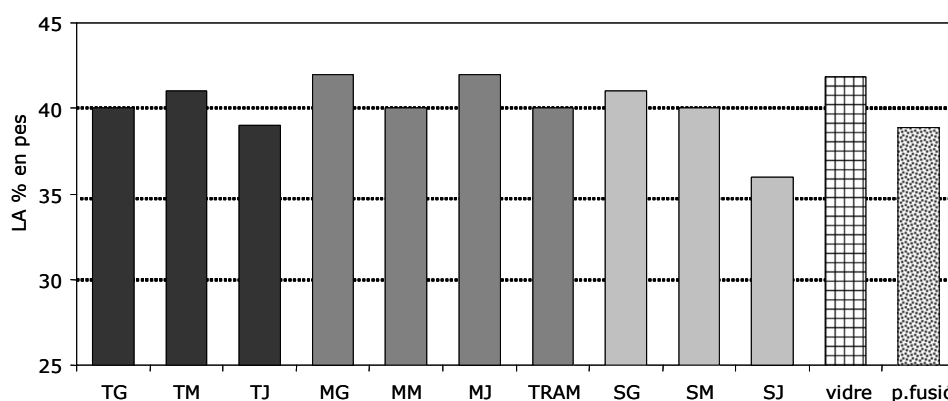


Figura V-5. Coeficients de desgast de Los Angeles de les escòries i del vidre domèstic i productes de fusió de l'escòria de Tarragona mostrejada el març del 2001. El valor corresponent a la mostra del tram experimental és de Flor (2002). (T: escòries de Tarragona; M escòries de Mataró; S: escòries de Sant Adrià. G, M, J: mostres recollides el gener, març i juliol del 2001, respectivament. TRAM: mostra de Mataró de novembre del 2001 utilitzada en el tram experimental).

Adicionalment s'ha estudiat la fragilitat dels dos constituents principals de les escòries. Per a la determinació dels coeficients de Los Angeles corresponents (Figura V-5) s'han extret, mitjançant una separació manual, 5 kg de vidre domèstic i 5 kg de material de fusió de les

escòries de Tarragona mostrejades el març del 2001. Els valors obtinguts són del 42 % i el 39 %, respectivament. Vidre domèstic i productes de fusió tenen desgasts similars, i com que són els dos constituents més abundants, tant les escòries de totes les plantes com altres escòries d'arreu presenten pèrdues molt properes d'entre el 40 % i el 45 %.

La resistència a la fragmentació està condicionada essencialment per dos factors: la petrologia de l'àrid, és a dir, la resistència pròpia de la naturalesa mineralògica de cada un dels constituents de les escòries, i la forma de les partícules de l'àrid; ambdós factors explicarien la diferència del 3 % de pèrdua entre els dos materials. Els productes de fusió contenen espècies riques en ferro i formes més equidimensionals que el vidre, però les vesícules constitueixen punts de debilitat. La presència de plaques i agulles al vidre domèstic té repercussions negatives sobre la resistència a la fragmentació, amb l'augment del % de pèrdua. Segons Smith i Collis (1994), hi ha una correlació directa entre l'índex de plaques i els coeficients d'impacte i de fragmentació (a la vegada hi ha una correlació lineal entre el coeficient de fragmentació i el coeficient de desgast de Los Angeles), que indueix diferències d'entre el 30 % i el 60 %. D'altra banda, Ruiz et al. (2002) han determinat un augment de fins al 6 % de pèrdua en reemplaçar les partícules cúbiques d'un àrid per partícules aplanades del mateix àrid. La morfologia més equidimensional juntament amb la composició dels productes de fusió podrien ser la principal responsable d'aquest 3 % de diferència. Val a dir que és una diferència ajustada però probablement, en cas d'haver fet l'assaig amb el vidre de les escòries de Mataró –més ric en peces planes anguloses–, la variació hauria estat més àmplia. El vidre domèstic de les escòries de Tarragona conté les dues geometries de vidre; d'aquesta manera es pretenia evitar que el valor del coeficient estigués tan condicionat per la forma de la partícula. En tot cas, que el desgast dels productes de fusió, malgrat la seva forma més adequada no sigui substancialment més baix, es podria atribuir al fet que l'estructura porosa aporta fragilitat addicional.

Amb aquestes observacions un altre cop es posen de manifest els beneficis indirectes que tindria una disminució de la proporció de vidre domèstic al residu sòlid urbà sobre les propietats de les escòries que són importants amb vista a la seva aplicació.

Les restants tipologies de constituents de les escòries també tenen un comportament mecànic particular. Les peces metàl·liques són resistents als impactes i no es fragmenten, però en alguns casos experimenten deformacions importants a causa de la seva ductilitat. Pel que fa al material combustible, es tracta en general de partícules inestables i mecànicament molt dèbils. La seva influència no és palesa, ja que està en una proporció molt baixa, proporció que de tota manera cal mantenir sota control. Finalment, les partícules de la tipologia anomenada material *ceràmic i àrids* tindrien resistències variables en funció del contingut d'àrids. Lerma (1997) va determinar coeficients de Los Angeles en material ceràmic pur del 47 %, valor que indica un desgast considerable. De tota manera, a les escòries sempre hi ha una certa proporció d'àrids naturals –més resistents– que rebaixaria les pèrdues.

A la bibliografia són relativament abundants les dades de coeficients de Los Angeles d'altres materials, ja que aquest assaig és d'acceptació universal, sempre tenint en compte la important influència de la granulometria utilitzada i la forma de les partícules sobre el resultat (Del Val, 1988; ALTMAT, 2001). La comparació amb altres mostres d'escòries de les mateixes plantes estudiades, així com de plantes d'altres països recollides per diversos autors, confirma la important uniformitat de dades i suggereix que les pèrdues del voltant del 40 % són un paràmetre inherent a les escòries d'incineració (Taula V-2), superior a l'observat en àrids naturals. D'altra banda, les dades referents a altres residus difereixen en la mesura que també les mineralogies són significativament diferents. Així, l'àrid siderúrgic es caracteritza per desgasts molt baixos i comparables a àrids naturals, però en canvi l'àrid reciclat –com s'ha anat veient– presenta paral·lelismes amb les escòries d'incineració. Els coeficients de Los Angeles no són extremadament inferiors als de les escòries. En àrids reciclats també s'han detectat variacions temporals en la proporció de certs constituents que repercuteixen sobre les pèrdues (per exemple, una major proporció de material ceràmic augmenta les pèrdues, segons Montepara i Tebaldi (2000) i Lerma (1997)).

Taula V-2. Valors del coeficient de Los Angeles utilitzant la granulometria B, per tant no s'hi inclou la mostra de Sant Adrià del juliol. Dades en % en pes de pèrdua.

escòries estudiades	<i>altres dades escòries Catalunya</i>		<i>altres escòries arreu</i>		<i>altres residus</i>		<i>àrids naturals</i>	
Tarragona 39-41	Tarragona <sup>a</sup>	42	EUA <sup>d</sup>	46-48	àrid reciclat <sup>h,i</sup>	29-47	basalt <sup>k,l,m</sup>	10
Mataró 40-42	Mataró <sup>a</sup>	42	Dinamarca <sup>e</sup>	45-53			diabasa <sup>k,l,m</sup>	12-16
Sant Adrià 40-41	Sant Adrià <sup>b</sup>	38-49	Alemanya <sup>f</sup>	35-41	àrid siderúrgic <sup>j</sup>	19	granit <sup>k,l,m</sup>	13-28
	Son Reus <sup>c</sup>	45	França <sup>e,g</sup>	41-43			calcària <sup>k,l,m</sup>	19-30

Dades: <sup>a</sup>diversos informes de control de qualitat de les escòries de Tarragona (VECSA) i Mataró (RUSC) proporcionats pels responsables de les plantes d'acondicionament; <sup>b</sup>Hernández (1985); <sup>c</sup>Seguí et al. (2001); <sup>d</sup>Chandler et al. (1997); <sup>e</sup>ALTMAT (2001); <sup>f</sup>Pihl (1997); <sup>g</sup>Coutaz (1996); <sup>h</sup>ITEC (1995); <sup>i</sup>Montepara i Tebaldi (2000); <sup>j</sup>Amaral (1999); <sup>k</sup>Smith i Collins (1994); <sup>l</sup>COURAGE (1999); <sup>m</sup>Del Val (1988)

En general, doncs, els coeficients de desgast mesurats són relativament alts en comparació amb els d'àrids naturals, fet que indica que les escòries presenten una certa feblesa i friabilitat. Com a conseqüència, les escòries no serien aptes com a àrids per a capes de trànsit. Tampoc no serien gaire recomanables en fermes sotmesos a les categories de trànsit pesant més intenses (T00 a T1), ja que en una capa granular no lligada les partícules individuals d'àrid suporten esforços puntuals més grans que en una capa tractada. Per tant, perquè la capa mantingui les característiques inicials durant el període de servei, és important que els àrids tinguin una resistència al desgast apreciable (Kraemer et al., 1999). D'altra banda, al mateix PG-3/2004 en l'article 510 (tot-u) ja s'estableix que només per a les categories de trànsit pesant T2 a T4 es podran utilitzar altres materials granulars reciclats, àrids siderúrgics, subproductes i productes inerts de rebuig reemplaçant àrids naturals, sempre que compleixin les prescripcions tècniques d'aquest article. Malgrat això, fixa igualment uns coeficients màxims per a subproductes emprats en trànsit pesant T00 a T2.

Les pèrdues màximes admeses són variables en funció del tipus de tot-u i del trànsit, com es detalla a la Taula V-3. Els valors són més restrictius per al tot-u artificial i més permissius per al tot-u natural amb àrids no convencionals.

Taula V-3. Coeficients de Los Angeles exigits a l'article 510 sobre tot-u del PG-3/2004. Valors en % en pes de pèrdua. ZAD20: tot-u artificial amb granulometria oberta.

<i>unitat d'obra</i>	<i>tipus àrids</i>	<i>T00 a T2</i>	<i>T3 a T4 i vorals</i>
tot-u artificial	naturals	≤30	≤35
tot-u artificial ZAD20	subproductes	≤35	≤40
tot-u natural	naturals	≤35	≤40
tot-u natural	subproductes	≤40	≤45

Les escòries, amb coeficients del 39-42 %, complirien les prescripcions de desgast establertes pel PG-3/2004 per a tot-u natural; atenent el coeficient de Los Angeles podrien ser emprades en capes granulars en vials amb trànsit pesant de categories T2 a T4 i vorals.

## **V.2.2 RESISTÈNCIA AL GEL-DESGEL: *assaig de sulfat de magnesi***

Si mitjançant el coeficient de Los Angeles es pretén estimar la degradació del material sota les càrregues dinàmiques del trànsit, l'objectiu de l'assaig del sulfat de magnesi és simular la degradació de les partícules degut a l'efecte destructiu de l'augment del volum de l'aigua dins els porus en congelar-se. La resistència de l'àrid a les glaçades també s'avalua quantificant un % de pèrdua.

La porositat de les partícules -la porositat accessible- esdevé el factor condicionant més important del deteriorament del material degut als fenòmens expansius. Per tant, la notable capacitat d'absorció que tenen les escòries es tradueix en una major sensibilitat a l'efecte de les glaçades en comparació amb àrids naturals amb menors absorcions i porositats.

Els valors del sulfat de magnesi de les escòries són molt variables i oscil·len entre 5 i 16% en pes; les dades, representades a la Figura V-6, mostren una certa dispersió fins i tot entre dues submostres d'una mateixa escòria (les dues rèpliques, ja que l'assaig es fa per duplicat).

Tot i que davant aquesta variabilitat, juntament amb un limitat registre de dades no es pot arribar a conclusions definitives, s'observa que les escòries de Sant Adrià semblen experimentar una major degradació en aquest assaig que les de la resta de procedències. La causa d'aquesta diferència caldria buscar-la en la proporció dels materials: totes les mostres assajades (fraccions de 10-14 mm) presenten proporcions molt similars de productes de fusió, però les de Sant Adrià contenen el doble de material ceràmic que les de Tarragona i Mataró, més riques en vidre domèstic.

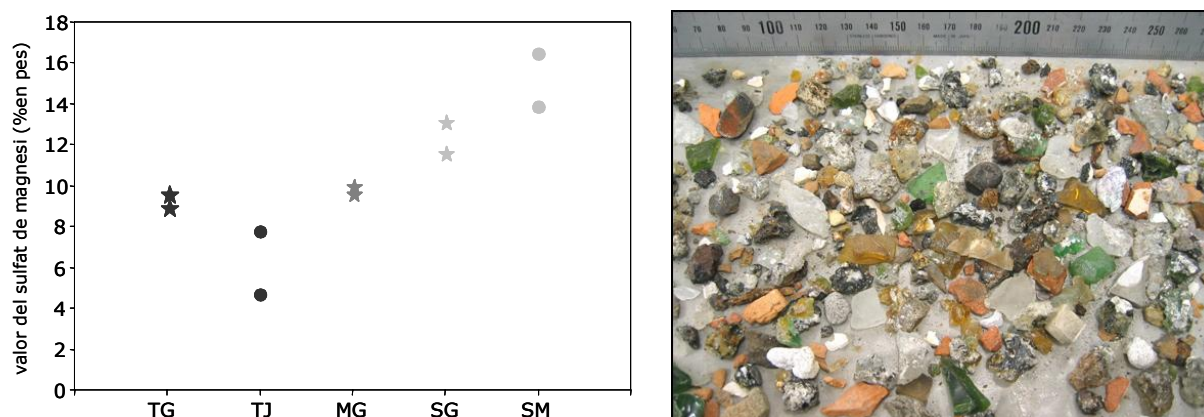


Figura V-6. Valors del sulfats de magnesi i aspecte dels fragments de les partícules que s'han degradat durant l'assaig de 3 mostres d'escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià.

De fet a primer vista podria semblar que els productes de fusió són els únics que experimenten aquests fenòmens de trencaments per pressions de creixements cristal·lins intersticials. A la pràctica s'ha observat que efectivament aquesta tipologia de material és sensible als esforços tensionals, però que alhora altres constituents poden experimentar aquests fenòmens, amb porositat més petita (Figura V-6, dreta). El material ceràmic no esmaltat mostra una clara debilitat davant aquest atac i diverses partícules s'han desintegrat en forma de làmines. Aquesta tipologia de material sense recobriment té una certa porositat, per bé que amb un diàmetre molt per sota de les vesícules dels productes de fusió. També el vidre domèstic fos amb algunes vesícules i certs tipus de material combustible com els ossos també experimenten fragmentacions, que en alguns casos són veritables esmicolaments.

El fet que es detecti una certa variabilitat entre rèpliques suggereix que el pes de mostra a assajar que defineix la norma UNE 1367-2 és suficientment representativa per a àrids uniformes, però no per a materials heterogenis com les escòries o altres com els àrids reciclats. Caldria, per tant, reconsiderar la quantitat de mostra d'assaig o bé contemplar la possibilitat de realitzar l'assaig com a mínim per triplicat.

No hi ha prescripcions generals d'aquest paràmetre en l'àmbit de les carreteres, però a títol orientatiu es detalla les limitacions que figuren a la EHE-98 i que fan referència als àrids que seran utilitzats en formigons (Taula V-4). A la Taula s'inclouen també els valors d'alguns àrids naturals, tot i que la resistència al sulfat de magnesi és fortament dependent del grau de meteorització en què es troba la roca en qüestió. Les pèrdues percentuals de les escòries són clarament superiors a les que experimenten àrids naturals convencionals ( $\leq 6\%$  en pes, tenint en compte que és roca fresca, sense alteració) però tanmateix els valors no són extremadament alts i complirien amb la EHE-98, de manera que pel que fa referència al valors del sulfat de magnesi (i per extensió, a la resistència al gel-desgel) podrien ser utilitzats com a àrids per a formigó.

Taula V-4. Valors del sulfat de magnesi de les escòries estudiades, així com d'altres escòries i àrids naturals. Dades en % en pes de pèrdua.

escòries Catalunya	escòries Alemanya	EHE98	basalts	calcàries	andesites	granits
5-16	3-15 <sup>a</sup>	≤18 <sup>b</sup>	2 <sup>c</sup>	6 <sup>c</sup>	4 <sup>c</sup>	2 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Pfrang-Stotz i Reichelt (1997); <sup>b</sup> EHE-98; <sup>c</sup> Smith i Collis (1994)

Si bé en les nostres latituds en general les glaçades no arriben a aprofundir dins el ferm més de 10 cm (Kraemer et al. 1999), segons la Norma 6.1-IC *Seccions de ferm* (Instrucció de Carreteres, 2003) en els projectes de carreteres situades a més de 1500 m d'alçada cal adoptar mesures especials i assegurar-se mitjançant un estudi especial que l'esplanada i el drenatge subterrani siguin adequats per evitar problemes amb la formació de gel per l'acció de glaçades prolongades.

Per altra banda convé puntualitzar que l'assaig es realitza amb el material solt i per tant només reproduïx les conseqüències de les glaçades a la porositat intragranular de les partícules, però no avalua els efectes de la formació de lletions de gel dins l'estructura de la capa o sota el ferm.

### **V.2.3 ESTABILITAT VOLUMÈTRICA I: *expansivitat per hidratació de fases***

L'article 510 del PG-3/2004 estableix que en cas d'utilitzar àrid siderúrgic com a tot-u, ha de presentar una expansivitat <5% segons UNE-EN 1744-1. Malgrat que aquest assaig d'expansió està específicament dissenyat per a aquest material i les reaccions que experimenta, s'ha aplicat sobre les escòries, amb una duració de 168 hores. L'objectiu de l'assaig per a àrid siderúrgic consisteix en detectar la potencial expansió produïda per la hidratació lenta de la cal lliure i de l'òxid de magnesi, ja que aquesta reacció comporta un augment de volum.

Les escòries d'incineració de residus sòlids urbans envellides no contenen proporcions importants de CaO i MgO lliure, ja que aquestes fases són molt inestables i durant la maduració reaccionen ràpidament. De tota manera es va considerar interessant provar aquest assaig amb les escòries, per tal de detectar i si era possible quantificar les expansions produïdes per les quantitats residuals d'aquestes i altres fases.

Les dades obtingudes en les escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià mostrejades el gener del 2001 oscil·len entre -2.8% i 2.1% en volum. Tant les variacions de volum positives com negatives són poc importants i molt ràpides, motiu pel qual es creu que estan associades a petits moviments de partícules que reajusten la seva posició a causa del flux ascendent de vapor, més que no pas per neoformació de fases hidratades (que tampoc explicarien l'aparent

contracció de la mostra). En tot cas es pot concloure que les escòries no són expansives en aquestes condicions d'assaig.

#### **V.2.4 ESTABILITAT VOLUMÈTRICA II: *patologies derivades dels sulfats i clorurs solubles***

Les reaccions que a priori es consideren potencialment conflictives en les escòries estan relacionades amb els sulfats, concretament la formació d'ettringita, una fase amb 32 molècules d'aigua estructural; d'aquí la importància de controlar la quantitat de sulfats presents. La neoformació d'aquesta fase és característica de l'àmbit del formigó i s'ha constatat que té repercussions negatives en matrius rígides, que poden arribar a fracturar-se. En principi les matrius flexibles com una capa granular d'escòries poden absorbir una certa pressió d'inflament amb més facilitat.

Les dades corresponents a aquests assaigs no són totalment noves, ja que d'alguna manera la quantitat de sulfats totals i solubles ja ha estat avaluada en els capítols IV i VI. La Figura V-7 mostra els continguts de compostos de sofre totals (0.88-2.19 %), sulfats solubles en àcid (0.76-1.40 %) i sulfats solubles en aigua (0.05-0.39 %). A causa del temperament amb aigua de mar, les escòries de Sant Adrià són les més enriquides en sofre (especialment la mostra més fina, la del juliol), per sobre de les concentracions a les escòries de Tarragona i Mataró.

El contingut en sulfats solubles en àcid és lleugerament inferior al sofre i segueix la seva mateixa tendència en funció de la planta de procedència del material. En canvi, el contingut en sulfats solubles en aigua és menys variable en totes les escòries i més baix a les escòries de Tarragona en comparació amb les altres dues. Les dades dels sulfats solubles en aigua tenen òbviament moltes coincidències amb els resultats de la primera fase del test CEN 12457-3, la relació L/S és la mateixa (2 L/kg), tot i que el temps d'agitació és superior (24 hores respecte a 6 hores) i la granulometria, que en aquest cas és de 0-20 mm. Les poques partícules retingudes pel tamís de 20 mm han estat lleugerament triturades d'acord amb el procediment d'assaig estipulat a la norma UNE-EN 1744-1; de tota manera, la influència de la mida màxima és poc significativa, ja que els sulfats, com ja s'ha vist, es concentren a la fracció més fina. Per altra banda, en dos casos el contingut de sulfats solubles en àcid és lleugerament superior al sofre total, determinat per ICP-AES. Aquesta aparent incoherència es pot atribuir a l'heterogeneïtat de la mostra i a la diferent precisió de les dues tècniques.

Segons el PG-3/2004, el contingut màxim de compostos de sofre totals al tot-u, expressats en  $SO_3$ , ha de ser <0.5 % on els materials estiguin en contacte amb les capes tractades amb ciment, i <1 % en els altres casos; les escòries superen lleugerament aquests valors límit establerts, i són les de Mataró les que més s'ajustarien a les prescripcions. Les prescripcions per a materials tractats amb ciment (sòl-ciment, grava-ciment) i sòls estabilitzats *in situ* són molt similars, amb límits de sofre total i sulfats solubles en àcid de l'1 % i el 0.8 %, respectivament.

respectivament. Tot i que aquestes unitats d'obra no són l'aplicació proposada, s'han inclòs els seus valors límit a efectes comparatius: tant el contingut en compostos de sofre totals com el de sulfats solubles en àcid de les escòries són considerables i suggereixen que caldria prendre algunes precaucions respecte a això. De tota manera tampoc no es descarta la utilització de les escòries reemplaçant parcialment o totalment els àrids naturals en aquestes unitats d'obra; de fet, actualment hi ha una tesi doctoral en curs que preveu algunes d'aquestes possibilitats, concretament la grava-ciment i el formigó compactat amb escòries de la planta de Mataró.

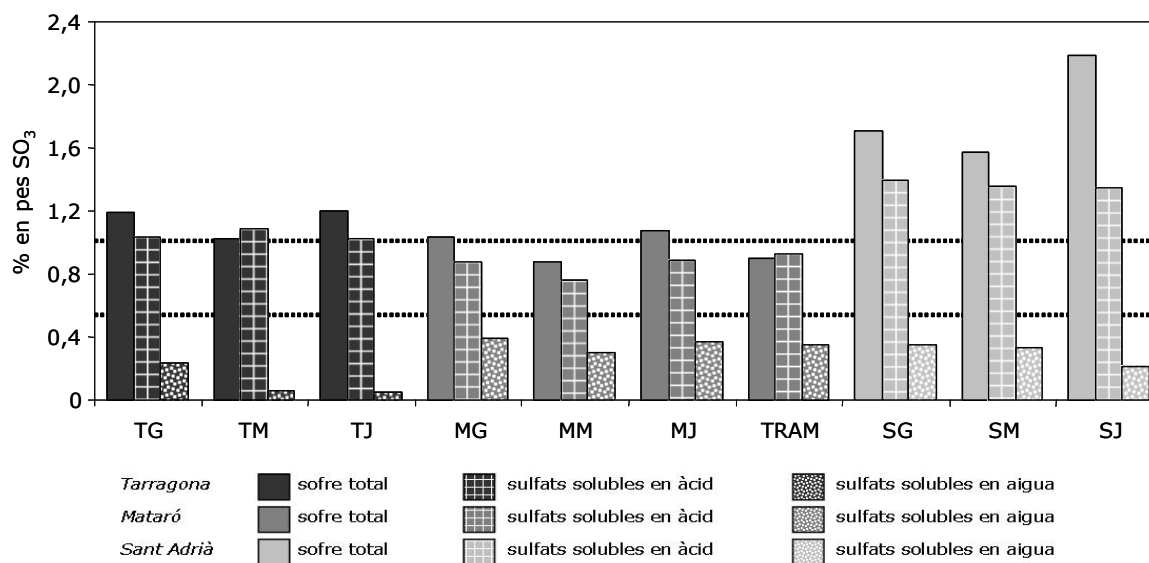


Figura V-7. Contingut en compostos de sofre totals, sulfats solubles en àcid i sulfats solubles en aigua de les escòries (expressats en % de SO<sub>3</sub>) i límits màxims admesos pel PG-3/2004. T: escòries de Tarragona; M, TRAM: escòries de Mataró; S: escòries de Sant Adrià. G, M, J: mostres recollides el gener, març i juliol del 2001, respectivament. TRAM: mostra de novembre del 2001 utilitzada en el tram experimental.

Com es veurà, l'estudi de l'evolució del tram experimental, així com de l'estabilitat volumètrica i dels inflaments observats durant l'assaig CBR, ha posat de manifest que no es produeixen expansions, si més no en les escòries un cop envellides i utilitzades sense tractar. El problema radica, doncs, no tant en la capa mateixa, sinó en les unitats d'obra amb ciment que estan en contacte directe. La proporció de sulfats solubles en aigua és molt baixa en relació amb els solubles en àcid i el sofre total, ja que el sulfat predominant és el càlcic, poc soluble. Però, com es veurà al capítol VI, aquest anió té un període d'esgotament llarg i lent, de manera que es va lixiviant de manera lenta i progressiva. Això comporta una dissolució continuada de sulfats que poden migrar cap a les capes lligades suprajacents, ascendint per exemple per capil·laritat. Per tot plegat potser seria recomanable, doncs, emprar ciment resistent als sulfats en les capes amb ciment en contacte. També es pot considerar com a una mesura molt eficient un cert aïllament de les escòries.

Per al formigó estructural es requereix controlar addicionalment la quantitat de clorurs solubles en aigua; la seva presència pot representar un perill potencial perquè augmenta



considerablement el risc de corrosió del metall per despassivació de les armadures. Les concentracions màximes admeses de clorurs solubles en aigua per l'EHE-98 en els àrids que seran utilitzats en formigó armat són del 0.05 %, mentre que a les escòries el contingut oscil·la entre el 0.19 % i el 0.38 %, valors molt superiors, que descartarien aquest material com un àrid apte per a aquesta aplicació.

L'única unitat d'obra que experimentaria aquest problema serien els paviments de formigó armat, en els quals l'ús de materials alternatius no és recomanat pel PG-3. La resta de capes lligades amb conglomerants hidràulics (per exemple, grava-ciment o sòl-ciment) consegüentment estarien lliures d'aquestes reaccions.

Com ja s'ha exposat al capítol IV, l'altra reacció expansiva que segons la bibliografia es produeix en les escòries és l'alteració de l'alumini metàl·lic, que comporta la formació d'aluminat amb el despreniment d' $H_2$  i posterior precipitació d' $Al(OH)_3$ . Aquestes reaccions són molt lentes i tenen lloc paral·lelament a l'envelliment de les escòries. Són fenòmens molt difícils de reproduir artificialment al laboratori i es requeriria un estudi específic en el qual s'induís una carbonatació accelerada del material. Resten, per tant, certes incerteses sobre l'efecte de les partícules d'alumini metàl·lic.

## V.2.5 CONCLUSIONS

Les escòries presenten algunes limitacions quant a la seva resistència al desgast, que és inferior a la d'altres àrids naturals –sempre que no estiguin alterats– però comparable amb altres subproductes com els àrids reciclats. Els resultats indiquen que les escòries podrien ser utilitzades com a tot-u natural complint les prescripcions del PG-3/2004, però no serien aptes per reemplaçar àrids naturals en unitats d'obra amb una funció estructural de més entitat dins el ferm (en posicions superiors o en categories de trànsit pesant intenses). Els desgasts, però, no són tan elevats per posar en dubte la resistència de les partícules durant la manipulació, el transport i especialment durant la compactació a l'obra, ja que aquesta darrera es duu a terme mitjançant vibració en lloc d'impactes. Les claus d'aquesta relativa fragilitat cal buscar-les en el predomini del vidre d'origen domèstic, que, especialment per la seva morfologia planar, tendeix a fragmentar-se amb més facilitat. Els productes de fusió presenten coeficients de Los Angeles lleugerament inferiors, però són més sensibles a l'efecte gel-desgel per la seva important porositat. Altres constituents, com algunes partícules ceràmiques i de vidre fos, també presentarien una certa debilitat davant aquest fenomen. De tota manera, aquesta consideració només adquireix una certa importància en zones climàtiques més fredes en les quals les glaçades poden penetrar en el ferm, fenomen de poca entitat a la península Ibèrica que només es pot esdevenir en carreteres de muntanya.

L'estabilitat volumètrica de les escòries envellides és notable, si més no a curt termini. No s'han detectat expansions produïdes per hidratació de CaO i MgO. L'experimentació sobre

l'estabilitat química de les escòries es completa amb les observacions que s'han dut a terme durant la determinació de l'índex CBR (apartat V.4.2). El caràcter potencialment expansiu de les escòries es fonamenta essencialment en la formació d'ettringita i, per tant, gira a l'entorn de la presència de sulfats. Cal recordar, com ja s'ha esmentat anteriorment, que la formació d'ettringita en el si de l'escòria és una reacció molt ràpida que té lloc en els primers estadis de meteorització –o envelliment– de les escòries fresques, i que al llarg dels mesos fins i tot tendeix a desaparèixer. Per tant, la utilització del material madurat no ha de comportar problemes de durabilitat. Ara bé, per la solubilitat dels sulfats de les escòries, el problema es trasllada: els sulfats que han estat lixiviats per les aigües que entren en contacte amb les escòries poden migrar cap a altres capes. Per evitar eventuais patologies es podria plantejar la possibilitat d'utilitzar ciment SR, sense que es descarti la possibilitat d'un cert aïllament de les escòries dins el ferm, si s'escau.

Es desconeix l'abast real les patologies induïdes per l'alteració de l'alumini metàl·lic; en tot cas convé minimitzar (mitjançant el processament posterior) la presència de partícules d'aquesta naturalesa que puguin desenvolupar reaccions expansives i acumulacions de gas.

## **V.3 PROPIETATS RELACIONADES AMB EL PROCÉS DE PRODUCCIÓ**

---

S'inclouen característiques de les escòries condicionades a les particularitats del procés de combustió a partir del qual s'han generat i el tractament que poden haver rebut posteriorment. Una de les característiques més rellevants és la granulometria de les escòries, per la considerable influència que exerceix en moltes de les seves propietats. Precisament perquè és un paràmetre cabdal en la caracterització bàsica de qualsevol material, s'ha considerat oportú incloure'l al capítol IV. De tota manera, cal recordar que les escòries són un material granular, amb una granulometria contínua de 0-20 mm que es pot enquadrar en el fus ZN20 del PG-3, pertanyent al tot-u natural.

### **V.3.1 PLASTICITAT: límits d'Atterberg**

S'ha sotmès les mostres a la determinació del límit plàstic però en cap cas no s'ha pogut concloure l'assaig davant la falta de cohesió per formar el cilindre de 3 mm de diàmetre. Les escòries són, doncs, un material no plàstic. Així mateix, les dades bibliogràfiques confirmen aquesta característica, que deu ser inherent al procés d'incineració perquè en totes les referències consultades les escòries sempre es qualifiquen de no plàstiques (diversos informes de control de qualitat de les escòries de Tarragona (VECSA) i Mataró (RUSC); Seguí et al., 2001; Hernández, 1985; Chandler et al., 1997).

Per a tot-u artificial, així com per a tot-u natural en les categories de trànsit pesant més intens, es requereix que el material no sigui plàstic, per garantir que en presència d'aigua la capa en qüestió conservi les seves característiques resistents. En aquest sentit, les escòries satisfan àmpliament les restriccions de plasticitat imposades.

A causa de la manca de cohesió observada, no s'ha considerat necessari dur a terme l'assaig per determinar el límit líquid.

### V.3.2 NETEJA: coeficient de neteja i equivalent de sorra

Com ja s'ha exposat, la neteja dels àrids s'avalua de manera diferent segons que es consideri la sorra o la grava. El coeficient de neteja, determinats sobre la fracció >2 mm, i els equivalents de sorra es representen a la Figura V-8. Les limitacions fixades pel PG-3/2004 són del 2 % en pes per al coeficient de neteja per al tot-u artificial, i variables per a l'equivalent de sorra segons el tipus de tot-u i la categoria de trànsit pesant; en tot cas, el valor més restrictiu és del 40 %.

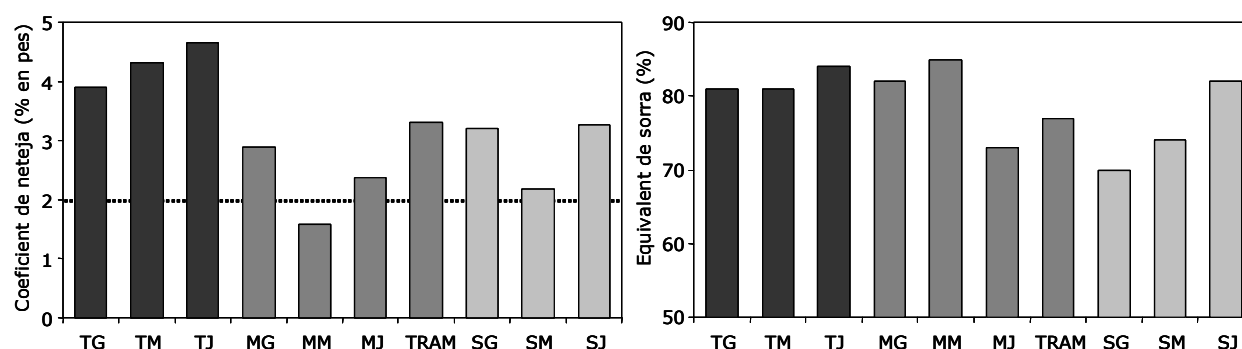


Figura V-8. Coeficient de neteja de la fracció >2 mm (esquerra) i equivalent de sorra de la fracció <5 mm (dreta) de les escòries. T: escòries de Tarragona; M, TRAM: escòries de Mataró; S: escòries de Sant Adrià. G, M, J: mostres recollides el gener, març i juliol del 2001, respectivament. TRAM: mostra de novembre del 2001 utilitzada en el tram experimental.

Les dades obtingudes indiquen que el grau de neteja de les partícules >2 mm no és el més adequat, oscil·la entre l'1.6 % i el 4.6 % en pes i supera la prescripció del 2 %, valor límit, d'altra banda, molt restrictiu que sovint tampoc no compleixen alguns àrids naturals (Taula V-5).

Taula V-5. Equivalent de sorra (%) i coeficient de neteja (% en pes) de les escòries estudiades, així com d'altres escòries i altres materials.

	<i>Eq.sorra</i>	<i>C.neteja</i>		<i>Eq.sorra</i>	<i>C.neteja</i>		<i>Eq.sorra</i>	<i>C.neteja</i>
<i>Tarragona</i>	81-84	3.9-4.6	<i>Tarragona<sup>a</sup></i>	53-58	-	<i>àrid reciclat<sup>d,e</sup></i>	62-90	-
<i>Mataró</i>	73-85	1.6-3.3	<i>Mataró<sup>a</sup></i>	65	-	<i>calcària 0/40<sup>f</sup></i>	68	2.7
<i>Sant Adrià</i>	70-82	2.2-3.3	<i>Sant Adrià<sup>b</sup></i>	42-77	-	<i>granit 0/40<sup>f</sup></i>	61	3.8
			<i>Son Reus<sup>c</sup></i>	52	-			

<sup>a</sup>informes de control de qualitat de les escòries de Tarragona (VECSA) i Mataró (RUSC) proporcionats pels responsables de les plantes d'acondicionament; <sup>b</sup>Hernandez (1985); <sup>c</sup>Seguí et al. (2001); <sup>d</sup>ITEC (1995); <sup>e</sup>Montepara i Tebaldi (2000); <sup>f</sup>Canteras La Ponderosa (2004)

La pols adherida a la superfície de les partícules és un tret característic dels àrids de matxuqueig i també és visible a les escòries, com s'observa a la Figura V-9.



Figura V-9. Aspecte general de la fracció 2/20 de les escòries de Tarragona del juliol abans (esquerra) i després (dreta) d'aplicar el rentat sobre el tamís de 0.5 mm. S'observa que les escòries presenten una fina capa de pols i partícules fines adherides a la superfície.

En canvi, els equivalents de sorra de les escòries són molt satisfactoris, en tots els casos >70 %, cosa que indica que els àrids estan aparentment exempts de fins potencialment conflictius que puguin desestabilitzar la capa en presència d'aigua. En general es considera que un àrid amb un equivalent de sorra <20 % constitueix un material no apte per a la utilització en les capes del ferm. Valors més grans de 50, com és el cas de les escòries, indiquen que es tracta d'un àrid adequat per a la major part de les aplicacions (Kraemer et al., 1999).

Tot i ser un assaig normatiu, no es tenen dades sobre el coeficient de neteja d'altres escòries, ni tan sols en els informes de control de qualitat consultats; sí que es disposa de les dades referents a dos àrids naturals comercialitzats sota la denominació de tot-u artificial, materials de bona qualitat que tanmateix tampoc no satisfan els límits fixats pel PG-3/2004. En canvi, l'equivalent de sorra s'utilitza de manera més àmplia i per tant es disposa d'algunes referències. Així, segons s'ha pogut constatar, tant les dades de les escòries estudiades com les consultades en altres informes sobre les plantes de Tarragona, Mataró, Sant Adrià i Son Reus, així com els àrids reciclats i els àrids naturals de matxuqueig, tenen equivalents de sorra comparables, amb valors variables però en general superiors al 50 %. Aquests valors els fan aptes per a la utilització en diverses capes del ferm.

### **V.3.3 QUALITAT DEL PROCÉS: *pèrdua al foc a 500 °C***

Les pèrdues al foc a 500 °C determinades són variables i estan entre el 2.05 % i el 9.76 % en pes. L'Ordre de 15 de febrer de 1996 sobre de valorització d'escòries estableix un valor màxim del 5 %, valor que es compleix en les escòries de les plantes de Tarragona, Mataró, Sant Adrià, Montcada i Girona. La Taula V-6 mostra els valors mitjans de les mostres de l'any 2000 i 2001 de cada planta incineradora. Les pèrdues de les escòries de les plantes de Malla i Vielha, properes al 10 %, reflecteixen una combustió poc eficient. Les pèrdues al foc de la

planta incineradora Concord, que com s'ha anat veient té molts paral·lelismes amb les escòries estudiades, oscil·len entre el 3.2 % i el 10.7 % (Eighmy et al., 1992), un rang molt proper.

Taula V-6. Pèrdua al foc a 500 °C de les escòries mostrejades els anys 2000 i 2001. Valors en % en pes de pèrdua.  $\sigma$ : desviació estàndard

	Pèrdua a 500 °C	$\sigma$
Tarragona	5.05	1.00
Mataró	4.53	0.13
Sant Adrià	3.45	0.82
Montcada	4.24	-
Girona	4.36	-
Malla	8.34	-
Vielha	9.30	-

Les escòries de Malla i Vielha no serien aptes per a la seva valorització, ja que estan molt enriquides en partícules que són més dèbils i propenses a una degradació a curt termini (a diferència de les meteoritzacions de materials inorgànics, que en general són més lentes). El material combustible és inestable des del punt de vista mecànic i a més la fracció orgànica és inestable des del punt de vista químic, ja que pot experimentar fermentacions o oxidacions que en poden modificar el volum o emetre gasos i provocar deformacions al ferm. La resta de plantes generen escòries amb pèrdues al foc inferiors al 5 % en pes; cal esperar que aquest valor límit és suficientment ajustat per garantir que no es desencadenaran problemes de subsidències per la degradació i no es reduirà el període de vida útil del ferm.

### V.3.4 VOLUM: densitat aparent

La determinació d'aquest paràmetre no és prescriptiva ni aporta informació directa sobre el comportament mecànic o la durabilitat del material, però és en certa manera important per a la manipulació del material i per qüestions econòmiques, ja que el transport del material pot arribar a ser una de les partides més importants que incideixen en el preu de la posada en obra de qualsevol tipus d'àrid.

La densitat aparent del material depèn òbviament de la densitat de les partícules, però també està molt condicionada per la granulometria del material, ja que aquesta determina les característiques de l'empaquetat. Els valors obtinguts en les deu mostres es representen a la Figura V-10 i oscil·len entre 1.09 Mg/m<sup>3</sup> i 1.29 Mg/m<sup>3</sup>, però en set d'elles les densitats aparents són de 1.21-1.23 Mg/m<sup>3</sup>.

La Taula V-7 recull les dades de diverses escòries i d'altres àrids; cal destacar les similituds entre les densitats aparents de les escòries estudiades i les d'altres procedències: els rangs de valors són molt propers. Aquesta proximitat suggereix que es tracta d'una propietat comuna a moltes escòries i, com altres paràmetres, inherent a la naturalesa del material a

causa del seu origen. Les densitats aparents dels àrids naturals convencionals són en general més altes, com també ho són les densitats de les seves partícules. Segons la norma PNE-EN 13242, les escòries serien un àrid a mig camí entre convencional i lleuger, ja que un àrid es pot classificar com a lleuger quan la seva densitat aparent no supera els 1.20 Mg/m<sup>3</sup>.

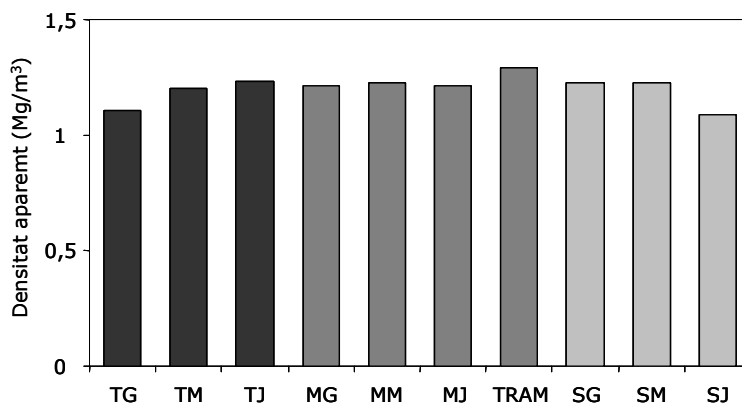


Figura V-10. Densitat aparent de les escòries. T: escòries de Tarragona; M, TRAM: escòries de Mataró; S: escòries de Sant Adrià. G, M, J: mostres recollides el gener, març i juliol del 2001, respectivament. TRAM: mostra de novembre del 2001 utilitzada en el tram experimental.

Taula V-7. Rangs de densitats aparents de les escòries estudiades, així com d'altres escòries i àrids naturals. Els valors entre parèntesis indiquen el valor mitjà. Dades en Mg/m<sup>3</sup>

escòries Catalunya	Alemanya	EUA	àrids naturals
1.09-1.29 (1.20)	1.05-1.27 (1.19) <sup>a</sup>	1.04-1.23 (1.16) <sup>b</sup>	1.2-1.8 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Pfrang-Stotz i Reichelt (1997); <sup>b</sup> Eighmy et al. (1992); <sup>c</sup> Smith i Collis (1994).

A més de la densitat aparent, s'ha calculat la porositat de les acumulacions d'escòries, és a dir, del material amb un grau de compactació zero. Així, les piles d'escòries tindrien una porositat d'entre 0.50 i 0.58, amb una valor mitjà de 0.53. D'aquest valor cal tenir en compte que un 0.18 el conforma la porositat accessible de les mateixes partícules, i la resta correspon a buits intergranulars. Aquesta observació s'exposarà més àmpliament a l'apartat V.4.1.

### V.3.5 CONCLUSIONS

Les propietats recollides en aquest apartat, juntament amb la granulometria ja exposada prèviament, donen una idea general de la depuració de les escòries com a àrids per a capes no tractades. El tret més destacat és la no-plasticitat del material, particularitat comuna a totes les escòries d'arreu i de gran importància per al rendiment de la capa; així mateix, l'equivalent de sorra és molt alt, compleix les prescripcions i constata l'absència de quantitats significatives de fins conflictius quan entren en contacte amb l'aigua. Tanmateix, l'àrid >2 mm presenta algunes limitacions de neteja i supera lleugerament el valor límit. Les pèrdues al foc determinades a 500 °C estan en general per sota del 5 % fixat com a valor màxim per l'Ordre

sobre valorització d'escòries; només les escòries de les plantes de Malla i Vielha sobrepassen amb escreix aquesta dada i, per tant, no seria recomanable utilitzar-les. Aquest criteri, juntament amb l'alt contingut de ferralla a causa de l'absència de dispositius d'extracció, les inhabilita automàticament com a possible substitut d'àrids naturals.

Finalment, l'estudi de la densitat aparent de les escòries posa de manifest que són un àrid a mig camí entre convencional i lleuger i suggereix que cal tenir precaució a l'hora de valorar a simple vista la quantitat de material existent en una acumulació.

## V.4 COMPORTAMENT DE LES ESCÒRIES EN L'APLICACIÓ PROPOSADA

---

### V.4.1 COMPACTABILITAT: *compactació Proctor*

La granulometria de les escòries és en certa manera indicativa que *a priori* no s'espera que comportin problemes de compactació. La realització de l'assaig Proctor permet aprofundir més en el comportament durant la compactació i establir els paràmetres de densitat seca màxima i humitat òptima que s'aplicaran a la posada en obra.

#### V.4.1.1 Corbes Proctor, densitats seques màximes i humitats òptimes

Les densitats seques màximes determinades mitjançant el Proctor modificat oscil·len entre 1.63 Mg/m<sup>3</sup> i 1.84 Mg/m<sup>3</sup> i les humitats òptimes són de l'11.7-17.7 %. Aquests rangs són bastant amplis, però es redueixen si es té en compte que set d'elles tenen densitats seques màximes de 1.74-1.79 Mg/m<sup>3</sup> i humitats del 14-16 %. Les dades referents al Proctor normal, que només s'ha dut a terme sobre les mostres del gener del 2001, són d'1.65-1.70 Mg/m<sup>3</sup> la densitat seca màxima i 14.5-16.5 % la humitat òptima.

La Figura V-11 mostra les corbes de compactació de Proctor normal (línia discontinua) i modificat (línia contínua) de totes les escòries mostrejades l'any 2001, així com diverses corbes corresponents a quatre graus de saturació diferents, incloent-hi la de saturació total (expulsió total de l'aire als buits). Les corbes d'isosaturació s'han calculat a partir de la densitat de les partícules assecades a l'estufa mitjana de totes les escòries; això explica la falta de paral·lelisme amb les branques humides d'algunes corbes de Proctor.

En general, les escòries de Mataró presenten humitats òptimes més baixes (<14 %) i densitats més altes, les escòries de Tarragona tenen corbes de Proctor molt properes –cosa que suggereix una homogeneïtat en la compactabilitat del material– i humitats òptimes >14 %, com les de Sant Adrià. L'escòria de Sant Adrià del juliol presenta una corba de Proctor anòmala, amb densitats seques baixes i humitats altes i amb una morfologia molt laxa

i oberta que indica poca sensibilitat a la humitat de compactació, trets característics de sorres uniformes, sòls llimosos o argilosos, amb densitats més baixes. Efectivament, aquesta mostra té una granulometria més fina en contraposició amb la resta d'escòries. La resta d'escòries tenen corbes amb un màxim més ben definit, la qual cosa indica que les densitats seques màximes són més sensibles al contingut d'aigua (tot i que aquesta sensibilitat no és excessivament accentuada), amb les conseqüències que se'n deriven: més enllà de dos punts per sota o per sobre de la humitat òptima, la densitat seca màxima davalla considerablement.

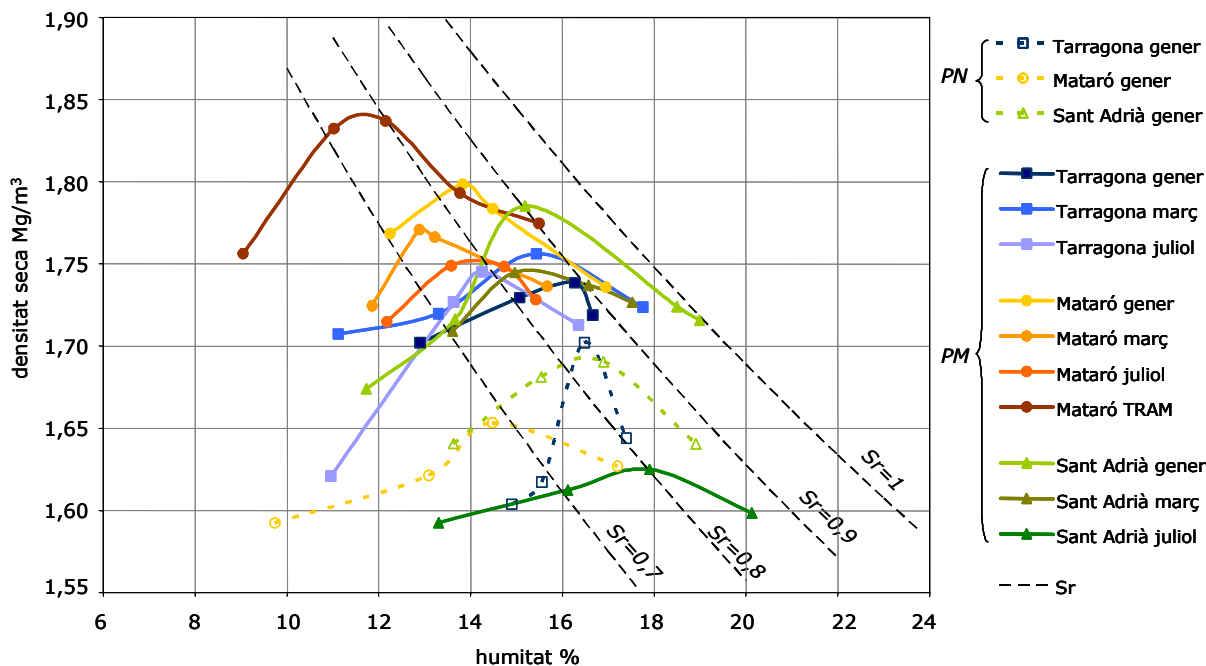


Figura V-11. Corbes de Proctor normal i modificat de les escòries, i línies d'isosaturació, amb graus de saturació del 70 %, 80 %, 90 % i 100 %.

Aquest fet és important perquè habitualment no es treballa amb una humitat fixa sinó amb un interval, motiu pel qual en la posada en obra de materials granulars per a tot-u la humitat de compactació només pot variar un  $\pm 1\%$  i  $\pm 1.5\%$  respecte a la humitat òptima en les categories de trànsit pesant T00-T1 i T2-T4, respectivament i segons el PG-3/2004. Els intervals de tolerància admissibles són estrets per evitar deficiències en la compactació i garantir densitats adequades.

A la Figura V-12 es mostra un detall de les corbes de Proctor normal i modificat de les mateixes escòries per posar en relleu el desplaçament relatiu d'una respecte a l'altra. Tot i que les separa una diferència de 4.5 cops d'energia de compactació, la diferència entre les densitats seques màximes i humitats òptimes obtingudes és estreta, especialment en l'escòria de Tarragona. La humitat òptima varia tan sols un 0.4-0.6 %, mentre que la variació de la densitat oscil·la entre 0.04 Mg/m<sup>3</sup> i 0.15 Mg/m<sup>3</sup> de l'escòria de Mataró. Amb els nivells d'energia relativament modestos del Proctor normal s'arriba a graus de compactat considerables, i per tant es pot concloure que les escòries presenten una bona



compactabilitat. Aquesta característica és habitual en materials granulars (tot-u) ben graduats, mentre que les diferències més grans es detecten en sòls fins plàstics (Kraemer et al., 1999).

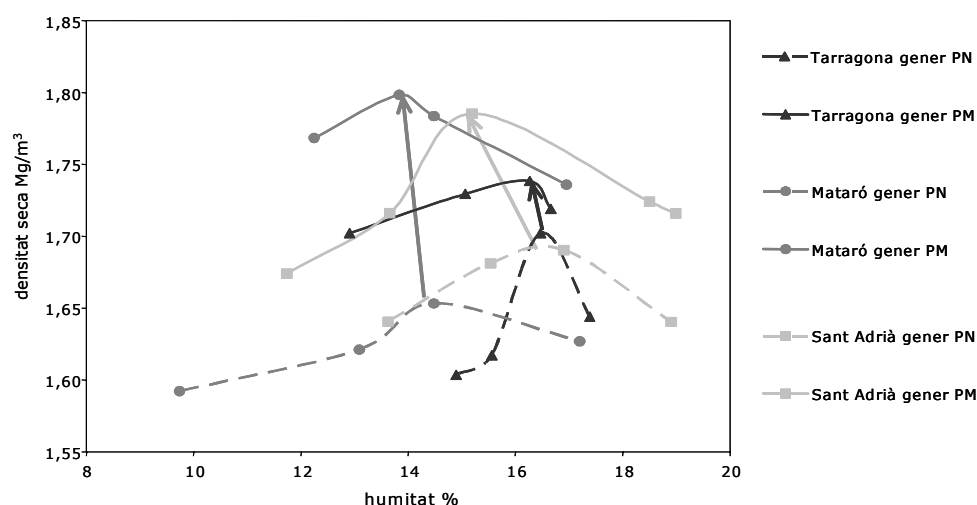


Figura V-12. Corbes de Proctor normal i modificat de les escòries del gener del 2001 procedents de les plantes de Tarragona, Mataró i Sant Adrià. Les fletxes indiquen el desplaçament de la densitat seca màxima i la humitat òptima.

En comparació amb escòries de les mateixes plantes i altres períodes de mostreig, així com d'altres procedències, els rangs de densitats seques màximes són força similars i també bastant amplis en alguns casos (Taula V-8). De tota manera, els valors de 1.7-1.8 Mg/m<sup>3</sup> semblen ser els més habituals. Les humitats òptimes, en canvi, són més variables. Alguns dels àrids naturals de la Taula V-8 es comercialitzen com a tot-u granític 0/40 i tot-u calcari 0/40; aquests materials, en tant que classificats com a tot-u artificial, tenen una granulometria idònia per arribar a assolir arribar a altes compacitats; malgrat la marcada influència de la granulometria, la densitat de les partícules també és un paràmetre important que condiciona la densitat seca màxima, i per aquest motiu en àrids naturals és més elevada.

Taula V-8. Densitats seques màximes (ρ<sub>dmàx</sub>) i humitats òptimes (ω<sub>òpt</sub>) (expressades en Mg/m<sup>3</sup> i % en pes respectivament) corresponents al Proctor modificat de diverses escòries i d'altres materials.

escòries estudiades	altres dades escòries		altres materials				
	ρ <sub>dmàx</sub>	ω <sub>òpt</sub>	ρ <sub>dmàx</sub>	ω <sub>òpt</sub>			
Tarragona	1.74-1.76	14.2-16.1	Tarragona <sup>a</sup>	1.72-1.75 14.4-14.8	àrid reciclat <sup>g</sup>	1.96-2.17	8.9-9.3
Mataró	1.75-1.84	11.7-14.0	Mataró <sup>b</sup>	1.77 10.1	granit <sup>h,i</sup>	2.25-2.31	5.9-7.4
Sant Adrià	1.63-1.79	15.2-17.7	Sant Adrià <sup>c</sup>	1.75-2.01 12.3-9.3	calcària <sup>h,i</sup>	2.30-2.37	4.9-6.2
			Son Reus <sup>d</sup>	1.80 12.3	gneis <sup>i</sup>	2.20	6.0
			EUA <sup>e</sup>	1.62-1.84 12.0-16.0			
			Alemanya <sup>f</sup>	1.57-1.81 12.2-17.2			

<sup>a,b</sup>informes de control de qualitat de les escòries de Tarragona (VECSA) i Mataró (RUSC) proporcionats pels responsables de les plantes d'acondicionament; <sup>c</sup>Hernandez (1985); <sup>d</sup>Seguí et al. (2001); <sup>e</sup>Eighmy et al. (1992); <sup>f</sup>Chandler et al. (1997); <sup>g</sup>ITEC (1995); <sup>h</sup>Canteras La Ponderosa (2004); <sup>i</sup>CoURAgE (1999)

D'altra banda, la comparació posa de manifest que les humitats òptimes de les escòries són molt altes, el doble que les d'un tot-u convencional, essencialment per dos motius: d'una

banda, també la capacitat d'absorció d'aigua de les escòries és molt superior, cosa que indica que la porositat accessible és molt elevada i, per tant, l'aigua tendeix a entrar als buits connectats a l'exterior i això fa disminuir la quantitat d'aigua lliure que resta per lubricar les partícules. Però hi ha un altre factor que condiciona les humitats òptimes a més de la porositat, i és la superfície específica de les partícules. Aquest paràmetre no es reflecteix en el valor de l'absorció atès que aquesta es determina amb l'àrid saturat però amb la superfície seca. Especialment els productes de fusió tenen vesícules connectades que no constitueixen pròpiament buits però que confereixen altes superfícies específiques a les partícules. Addicionalment, el vidre i la ceràmica en forma de plaques poden contribuir a augmentar la superfície específica del material. El resultat d'aquests fenòmens és l'augment de la demanda d'aigua per satisfer aquestes necessitats en primer terme, i que en resti la quantitat suficient per lubricar convenientment les partícules.

Algunes mostres de la planta de Sant Adrià analitzades per Hernández (1985) arriben a densitats seques superiors als 2.00 Mg/m<sup>3</sup> (Taula V-8), molt altes en contrast amb les dades d'altres escòries recollides a la Taula V-8. A l'apartat d'aspectes metodològics es discutiran aquests valors anòmals.

#### **V.4.1.2 Control de la compactació mitjançant la porositat**

D'entrada es tendeix a comparar les densitats seques màximes que de les escòries amb les de materials granulars naturals, i d'aquesta comparació a primera vista es podria concloure que el grau de compactat que assoleixen les escòries és força baix. Tanmateix, no s'ha de perdre de vista que la densitat del mateix material és més baixa.

Una manera de controlar –i comparar– el grau de compactació és veure com es redueix la porositat del sistema ( $n$ ). Es parteix de dos casos extrems: la situació inicial consisteix en el material solt, sense compactar, la situació en què es mesura la densitat aparent del material ( $\rho_b$ ). La situació intermèdia s'obté quan se li aplica una compactació, es redueix el volum de buits que hi ha entre les partícules (buits intergranulars) per densificar el sistema fins a la densitat seca màxima ( $\rho_{dmàx}$ ). La situació final és fictícia i suposaria una compactació intensa tal que s'eliminen completament els buits entre les partícules i només resten els buits intragranulars accessibles, que òbviament mai no es podrien evitar sense triturar el material. Els tres casos es representen a la Figura V-13, amb les seves porositats corresponents. Mentre que la porositat inicial de les piles d'escòries és de poc més de 0.50 (concretament de 0.50-0.58, amb una mitjana de 0.53), durant el Proctor modificat la densificació aconsegueix reduir considerablement el volum de buits i es rebaixa la porositat total (intergranular+intragranular) fins al 0.31 de mitjana (0.29-0.37). D'aquests valors, el 0.18 de mitjana (0.14-0.22) constitueix porositat de les mateixes partícules o intragranular (franja de color gris clar de la Figura V-13). Per tant, la reducció efectiva de la porositat intergranular en el Proctor és de prop del 65 %, i consegüentment el procés de compactació es pot qualificar de molt efectiu i equivalent a l'experimentat per àrids naturals.

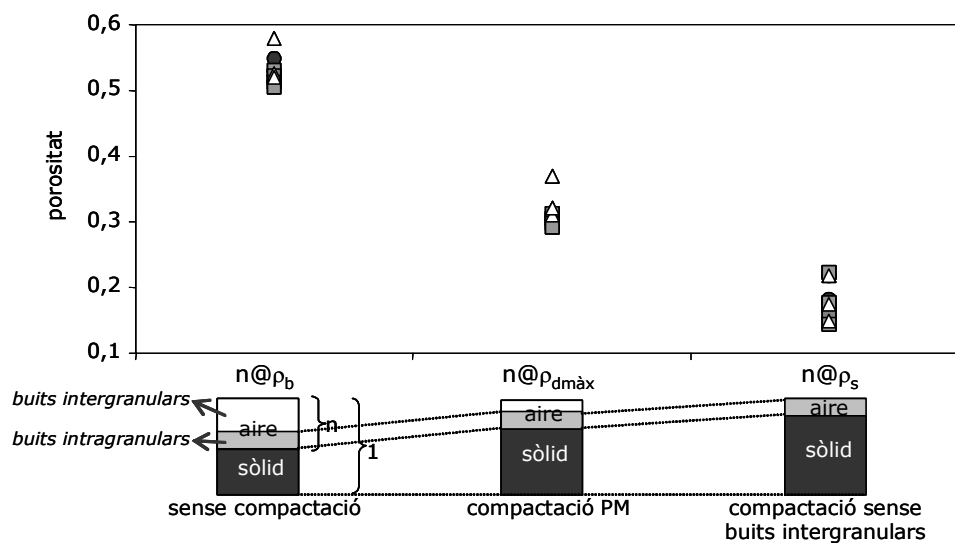


Figura V-13. Evolució de la porositat ( $n$ ) segons tres graus de compactació diferents.  $p_b$ : densitat aparent;  $p_{dm\grave{a}x}$ : densitat seca màxima;  $p_s$ : densitat de les partícules assecades a l'estufa. Els cercles, triangles i quadrats representen les dades de les escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià, respectivament.

### V.4.1.3 Aspectes metodològics

Durant la realització dels assaigs s'han detectat dues particularitats que convé detallar de cara a modificar lleugerament els procediments d'assaig habituals.

La norma NLT 108/98 planteja la possibilitat d'utilitzar el mateix material per determinar tots els punts de les corbes, mitjançant la compactació, posterior disgregació del material i addició successiva de l'aigua necessària. De manera experimental es van sotmetre les escòries de Tarragona del gener del 2001 a aquest procediment d'assaig, i el resultat s'observa a la Figura V-14, en la qual també es representen les corbes de Proctor normal i modificat confeccionades a partir de mostres diferents per a cada punt.

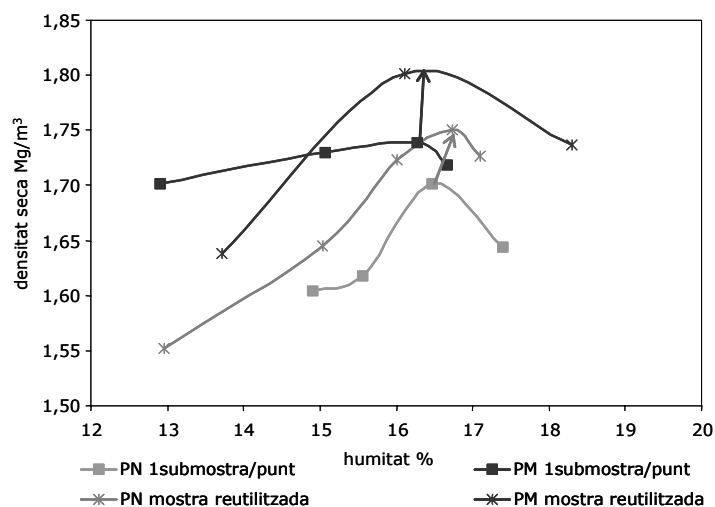


Figura V-14. Corbes Proctor normal i modificat d'escòries de Tarragona (gener del 2001), realitzades amb diverses submostres per a cada punt (línia contínua) i amb una sola mostra reutilitzada per a tots els punts (línia discontinua). Les fletxes indiquen l'evolució de la densitat seca màxima i la humitat òptima.

Els resultats obtinguts per les dues vies són diferents, ja que, segons s'ha pogut observar durant l'assaig, s'experimenten dificultats en disgregar completament el material compactat, que queda endurit formant aglomerats com els que il·lustra la Figura V-15. Per aquest motiu els efectes de les subsegüents compactacions es van acumulant i es produeix una progressiva densificació, que condueix a una densitat seca màxima més gran. Paral·lelament a aquest fenomen acumulatiu, s'ha observat que es produeix una fragmentació de partícules sota l'impacte de la caiguda de la maça, de manera que en cada punt determinat la granulometria d'assaig és lleugerament diferent i es produeix una densificació addicional perquè els fragments fins generats se situen reomplint els buits intergranulars. Aquesta fragmentació i consegüent generació de fins possiblement explicaria l'augment de la humitat òptima, ja que una granulometria més fina requereix més aigua.



Figura V-15. Probeta de Proctor compactada (esquerra), que s'obre al llarg en 4 parts per extreure mostra representativa (centre) i assecar-la durant 24 hores per determinar la humitat (dreta). Un cop secs, els agregats no es desfan.

Aquest fenomen ha estat també observat per Hernández (1985), que va obtenir densitats seques màximes en escòries de la planta de Sant Adrià d' $1.75-2.01 \text{ Mg/m}^3$ , amb els valors més habituals d' $1.80-1.90 \text{ Mg/m}^3$ ; en aquest estudi es fa constar explícitament que s'ha treballat amb material remodelat. Kraemer et al. (1999) no recomanen utilitzar aquesta metodologia en cas de tenir uns àrids amb partícules friables i adverteixen que les corbes de Proctor obtingudes amb mostra reutilitzada tenen màxims de densitat superiors als que s'obtindrien amb una mostra independent per a cada punt. No és aconsellable, doncs, seguir aquesta metodologia.

En l'assaig de les primeres escòries, mostrejades a la planta de Tarragona el gener del 2001, es van detectar algunes anomalies en l'obtenció de les humitats corresponents a cada punt. Les dificultats plantejades van poder ser solucionades en les següents mostres estudiades, un cop identificat el problema: una distribució desigual de la humitat afegida a la proveta compactada, especialment en els punts de baixada de la corba.

Durant la compactació s'ha observat que es produeix una exsudació d'aigua que migra cap a l'exterior i es concentra a la base i la superfície de la proveta, mentre que el nucli resta més sec. Inicialment es va seguir el procediment descrit a les normes NLT 107/98 i NLT 108/98,

en les quals es detalla que per a cada punt s'ha d'extreure una part de mostra del centre de la proveta compactada, però aquest nucli no és representatiu del contingut d'aigua global; per tant, es falsegen les humitats i consegüentment també les densitats seques que s'atenyen.

És difícil evitar la segregació d'aigua, especialment significativa quan s'està determinant els punts de baixada de les corbes de Proctor (branca humida), però per salvar l'obstacle de la distribució no uniforme de la humitat es recomana extreure mostra de tots els punts de la proveta un cop desemmotllada.

Finalment cal afegir que durant la compactació al laboratori és prescriptiu extreure i descartar la fracció retinguda al tamís de 20 mm d'obertura. Aquesta fracció granulomètrica és <10 % en pes (desclassificats superiors, per tant) i consegüentment no és necessari restituir-ne l'eliminació per l'equivalent en pes de fracció 5/20. Per la seva granulometria, les escòries correspondrien a una ZN20, amb mida màxima nominal de 20 mm, i per tant es pot esperar que existeixin moltes similituds entre el material compactat al laboratori i el que es fa servir a l'obra. En aquest sentit, l'existència d'un acondicionament posterior minimitza el pes d'aquests desclassificats superiors i apropa encara més la compactació al laboratori i la real.

#### **V.4.1.4 Degradació**

Durant la realització dels assaigs s'ha pogut constatar una certa degradació, que consisteix en un trencament de diverses partícules sota l'impacte de la maça del Proctor. Hernández (1985) i Chandler et al. (1997) han avaluat la modificació de les corbes granulomètriques abans i després de la compactació al laboratori i en una carretera en servei, respectivament.

La fragmentació s'atribueix a la relativa feblesa de les partícules, però d'altra banda la compactació dinàmica amb impactes no és possiblement el millor mètode per determinar la compactabilitat d'un material, especialment si no té una resistència considerable. Segons Hernández (1985), la producció de fins i els canvis en la granulometria no són gaire significatius i es manté aproximadament dins els fusos. Caldria, però, revisar el procediment actual de compactació i preveure la possibilitat de reemplaçar-lo per mètodes menys destructius en cas de tractar subproductes. En el projecte ALTMAT (2001) es van estudiar els diversos mètodes de compactació disponibles (Proctor, compactació giratòria i taula vibratòria) i es va observar que el Proctor no és el més adequat per a residus; el mètode que millor reproduïx el procés de compactació que es duu a terme en una obra és la taula vibratòria, que ja està normalitzat (CEN 13286-3:2003). Efectivament, a la pràctica la compactació en obra es realitza amb corró vibrant i no amb impactes; així, una de les conclusions del projecte ALTMAT és que el mètode de compactació de la taula vibratòria en condicions humides és l'òptim tant per a àrids naturals com per als alternatius. Això no impedeix que es produeixi una certa fragmentació, com també succeeix al camp. De fet, segons Smith i Collis (1994) és beneficiós que durant la compactació amb corró en la posada en obra tingui lloc una certa fragmentació que genera noves partícules que rebleixen els

espais intersticials i proporcionen nous punts de contacte entre les partícules, amb la qual cosa augmenta el fregament i es densifica la capa.

## **V.4.2 CAPACITAT PORTANT: *índex CBR***

La capacitat de suport és la resistència a la deformació sota les càrregues del trànsit i depèn no només de les característiques dels àrids, sinó també de la densitat seca del material (grau de compactació) i la humitat. Se sap que una granulometria contínua, les altes compacitats i cares de fractura contribueixen a formar un esquelet mineral amb altes capacitats portants.

No s'ha pogut establir una relació clara entre l'índex CBR (*California bearing ratio*) i la granulometria, ja que dues escòries amb granulometries molt similars presenten capacitats portants molt diferents, amb valors d'altres paràmetres també molt similars. També s'observa el cas contrari: dues escòries amb els mateixos índexs CBR tenen granulometries clarament diferents. Òbviament, la granulometria és un factor important, però no pas determinant. Tampoc no s'ha observat correlació entre el grau de compactat expressat en termes de densitat seca màxima d'una escòria i el seu índex CBR, tot i que és sabut que a majors densitats es corresponen generalment majors resistències mecàniques i que la compactació és un factor condicionant de primer ordre.

L'aigua té un efecte negatiu sobre la capacitat de suport; per aquest motiu els quatre dies d'immersió tenen com a objectiu saturar completament el material i assajar-lo en les condicions més desfavorables possible.

L'article 510 del PG-3 (2004) no imposa cap assaig per avaluar la capacitat portant de les capes granulars del ferm; la determinació de l'índex CBR és molt més habitual realitzar-la sobre sòls per a esplanades i terraplens, però fins fa pocs anys era també un assaig prescriptiu per a tot-u natural, amb un valor mínim exigít del 20 % (PG-3/75 i OC 1986 de la Dirección General de Carreteras). Actualment les sol·licitacions de capacitat de suport dels tot-u s'han eliminat, possiblement perquè es considera que si el material d'aquesta unitat obra satisfà els requisits de granulometria i plasticitat, de ben segur complirà amb escreix aquest punt sempre que la posada en obra sigui l'adequada quant a la compactació.

### **V.4.2.1 Índexs CBR**

Els valors de l'índex CBR oscil·len entre el 58 % i el 108 % (Figura V-16, esquerra) i són extremadament elevats tenint en compte que es tracta d'un residu i molt superiors a molts sòls que són utilitzats en terraplens. A diferència d'altres paràmetres com el coeficient de Los Angeles, el valor dels quals és molt uniforme en totes les escòries mostrejades així com en escòries d'altres procedències, la capacitat portant presenta variabilitat important. Una certa dispersió és alhora present en les tres rèpliques de cada assaig (Figura V-16, dreta); tal

vegada interfereix sobre el resultat el tipus i/o la mida de les partícules que se situen al punt de contacte amb el pistó, el reduït diàmetre del qual fa que l'àrea de contacte sigui molt limitada. Aquesta variabilitat també ha estat observada per Chandler et al. (1997) en escòries d'altres procedències, i tampoc no n'han pogut establir els motius.

En general les escòries de Mataró tenen capacitats portants més baixes que les de Tarragona i Sant Adrià, però en totes les plantes els valors són variables. La mostra del juliol de la planta de Sant Adrià té un CBR bastant inferior a les escòries d'altres períodes, fet que podria ser atribuït a la seva granulometria enriquida en sorra; en canvi, no es pot establir una causa per a la mostra del gener de la planta de Tarragona. Sembla que hi ha una certa relació entre els índexs CBR i de plaques, però no es disposa de prou dades per confirmar una correlació inversa, és a dir, que un major pes de plaques repercuteix negativament en la resistència del material a la penetració del pistó.

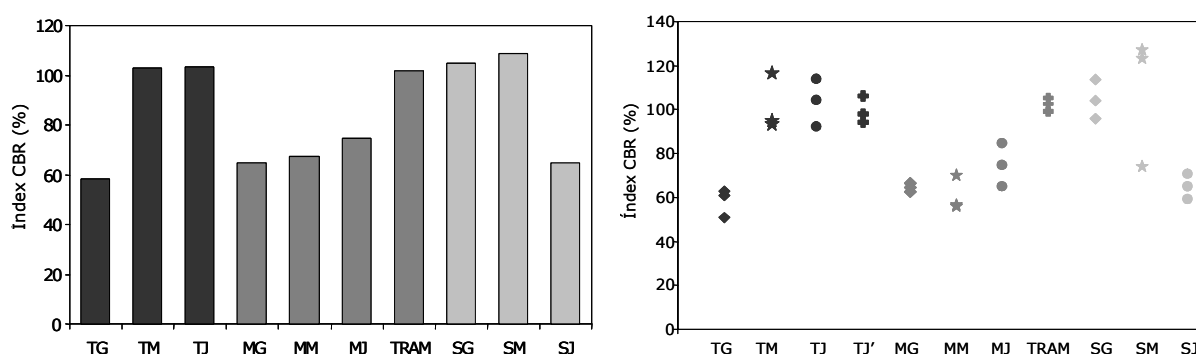


Figura V-16. Índexs CBR de les escòries compactades al 100 % de la  $\rho_{dmàx}$  determinada a partir del Proctor modificat. T: escòries de Tarragona; M, TRAM: escòries de Mataró; S: escòries de Sant Adrià. G, M, J: mostres recollides el gener, març i juliol del 2001, respectivament. TRAM: mostra de novembre del 2001 utilitzada en el tram experimental.

En comparació amb altres escòries (Taula V-9), la dispersió sembla el tret característic del CBR de les escòries; en tot cas, les dades són en totes les escòries superiors al 20 %, considerat ja un valor molt acceptable (per exemple, permet classificar els sòls per a terraplens com a seleccionats). Les dades són comparables a les dels àrids reciclats, però inferiors a les d'alguns materials naturals.

Taula V-9. Valors de l'índex CBR, expressat en % respecte al material de referència.

escòries estudiades	altres escòries Catalunya		altres escòries arreu		altres materials		
Tarragona	58-103	Tarragona <sup>a</sup>	24-41	EUA <sup>d</sup>	92-136	àrid reciclat <sup>f</sup>	54-123
Mataró	65-102	Mataró <sup>a</sup>	65	Holanda <sup>e</sup>	28-76	granit <sup>g</sup>	140
Sant Adrià	65-108	Sant Adrià <sup>b</sup>	101-159			gneis <sup>g</sup>	250
		Son Reus <sup>c</sup>	97				

<sup>a</sup>diversos informes de control de qualitat de les escòries de Tarragona (VECSA) i Mataró (RUSC) proporcionats pels responsables de les plantes d'acondicionament; <sup>b</sup>Hernández (1985); <sup>c</sup>Seguí et al. (2001); <sup>d</sup>Eighmy et al. (1992); <sup>e</sup>TAUW (1988); <sup>f</sup>ITEC (1995); <sup>g</sup>CoURAgE (1999)

Les dades obtingudes reflecteixen altes compacitats, esquelets minerals fermes gràcies a un considerable fregament intern i un bon comportament tot i la saturació: l'absència de fins plàstics evita que durant la immersió es produeixi una lubricació de les partícules, disminueixi el fregament intergranular i s'indueixin deformacions permanents a la capa. Les capacitats portants són, doncs, molt satisfactòries i indiquen una important resistència a les tensions tangencials provocades per les càrregues del trànsit.

#### **V.4.2.2 Inflaments**

La immersió permet veure quina és el comportament del material compactat quan se sotmet a una saturació més o menys sobtada. Per exemple, si la compactació no és l'adequada i s'ha compactat a una humitat inferior a l'òptima (branca seca), en alguns sòls sotmesos a una càrrega es pot produir un assentament important (col·lapse) en el moment en què s'inunden. Òbviament, la immersió de les provetes CBR amb la sobrecàrrega anular no pot substituir l'assaig de col·lapse de sòls però sí que pot d'alguna manera simular-lo. En cap cas no s'han detectat col·lapses que es puguin relacionar amb el reajustament de la posició de les partícules en la immersió. En canvi, sí que s'han detectat lleugeres variacions de volum positives, augments causats per l'absorció d'aigua per part d'un material parcialment saturat; aquesta aigua absorbida és expulsada posteriorment per la mateixa mostra durant l'assaig de piconament. L'absorció és ràpida en les primeres 24 hores, després de les quals l'augment és molt més progressiu.

Els inflaments determinats oscil·len entre el 0.034 % i el 0.359 %; aquest darrer correspon a les escòries del juliol de Sant Adrià: les tres provetes han experimentat els inflaments més elevats a causa de la seva granulometria més fina; en la resta d'escòries el valor més alt detectat és del 0.130 % i l'inflament mitjà és del 0.097 %. Aquestes dades són molt baixes, pràcticament negligibles, i indiquen que les escòries no experimenten canvis de volum ni en el moment de la immersió ni durant les 96 hores de saturació.

#### **V.4.2.3 Evolució temporal**

Amb el doble objectiu de detectar una eventual degradació que es tradueix en una disminució de la capacitat portant després d'un cert temps en condicions de saturació completa (considerada la pitjor situació possible) i observar el comportament de les expansions -en cas d'haver-n'hi-, es van realitzar sis provetes CBR d'escòries de Tarragona, de les quals tres es van submergir durant quatre dies i a continuació es van assajar. Les restants van romandre submergides fins a completar un període de trenta dies.

Els índexs CBR mesurats al cap de trenta dies són pràcticament iguals als dels quatre dies d'immersió: els valors mitjans de les tres provetes són del 103 % i el 99 %, respectivament. La similitud entre les dades descarta la possibilitat d'una degradació del material -durant un mes de saturació total- i la consegüent pèrdua de la resistència a l'esforç tallant a curt



termini. Atès que el registre de dades és molt limitat, caldria aprofundir més en aquest tipus d'assaig per treure conclusions del comportament a curt i mitjà termini de les escòries.

Els inflaments determinats són els mateixos: 0,072 % per a les escòries amb quatre dies d'immersió i 0,076 % per a les escòries de 30 dies d'immersió (Figura V-17). Com ja s'ha exposat durant les primeres hores d'immersió, el material compactat, tot i la sobrecàrrega anular, absorbeix una certa quantitat d'aigua i experimenta petits inflaments. Al cap de 24 hores, el grau de saturació del material és elevat i augmenta molt més lentament. Finalment, al cap de cinc dies, l'escòria està saturada i la lectura s'estabilitza completament. Aquest comportament respon a un material compactat amb una certa permeabilitat, ja que en cas de tractar-se de materials argilosos l'absorció d'aigua seria molt més lenta des del primer moment. De la comparació de la Figura V-17 es dedueix que les lectures realitzades al cap de 3-4 dies d'immersió són totalment representatives de l'inflament experimentat en un període de trenta dies, i per extensió també en altres materials granulars amb una granulometria tal que tinguin permeabilitats similars.

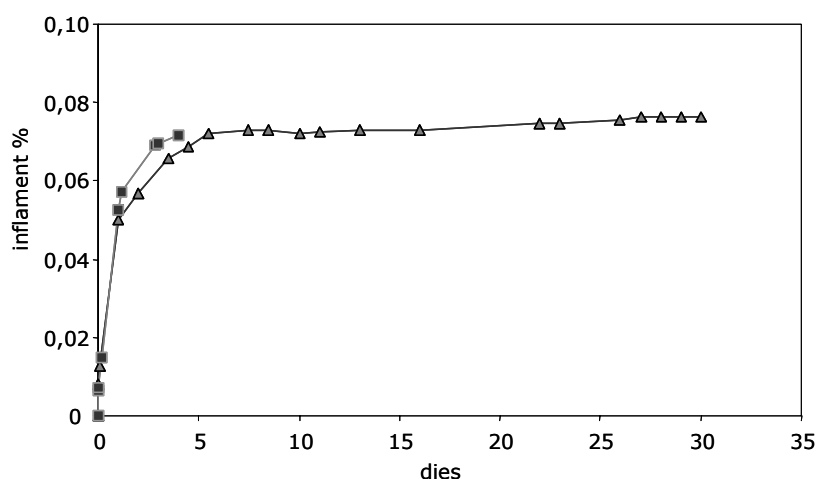


Figura V-17. Evolució dels inflaments de les provetes CBR submergides d'escòries de Tarragona del juliol del 2001.

Es confirma, doncs, que els canvis de volum es produeixen per l'absorció d'aigua d'un material que inicialment està només parcialment saturat, i que quan la mostra està embeguda aquest procés s'atura. Per tant, els inflaments detectats són ràpids (gràcies a la permeabilitat) i associats a aquest fenomen. No s'ha observat expansions d'una altra tipologia i d'aparició desfasada, amb un retard que suggeriria fenòmens expansius de naturalesa química (per neoformació de fases).

L'experiència ha estat, doncs, satisfactòria i suggereix que les escòries (almenys les madurades) podrien formar sistemes estables i sense experimentar expansions o susceptibilitats respecte a la presència d'aigua, de manera que la seva funció estructural no quedaria compromesa per canvis en la humitat de la capa o deficiències en el drenatge. De tota manera, per confirmar aquests aspectes seria convenient dur a terme més experiències similars, així com augmentar el període d'immersió.

### V.4.3 PERMEABILITAT

Malgrat que no s'han detectat variacions en el comportament de les escòries en presència d'aigua, està demostrat que l'acumulació d'aigua redueix la capacitat de suport, accelera el deteriorament del ferm i per tant és essencial un bon drenatge que l'elimini, ja que tot i les superfícies relativament impermeables, no es pot evitar les filtracions.

La compactació del material suposa la reducció dels espais intergranulars i per tant de la capacitat de percolació de l'aigua a través, de manera que es redueix la permeabilitat de manera significativa. Com ja s'ha exposat, la determinació s'ha dut a terme aplicant una certa càrrega; no obstant això, cal tenir en compte que, prenent com a capa suprajacent un tot-u artificial compactat a  $2.2 \text{ Mg/m}^3$  amb 30 cm de gruix, això suposaria una càrrega propera als 70 kPa, lleugerament inferior a la més petita utilitzada en l'assaig. Les permeabilitats de les escòries compactades a una densitat seca propera a la màxima són de l'ordre de  $10^{-5} \text{ cm/s}$  (Taula V-10), lleugerament superiors a les escòries de Tarragona. Evidentment, la permeabilitat disminueix a mesura que augmenta la càrrega vertical aplicada, tot i que la reducció és poc significativa.

Taula V-10. Permeabilitats segons la càrrega vertical aplicada de les escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià del juliol, novembre i març del 2001, respectivament. Valors en cm/s

	Tarragona	Mataró	Sant Adrià
$\rho_d$	$1.73 \text{ Mg/m}^3$	$1.75 \text{ Mg/m}^3$	$1.73 \text{ Mg/m}^3$
100 kPa	$8.8 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$
200 kPa	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$4.1 \cdot 10^{-5}$
500 kPa	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$

La permeabilitat és fortament dependent del grau de compactació i de l'estructura del material; això es reflecteix en la variabilitat de dades observades a la bibliografia, recollides a la Taula V-11. Els valors oscil·len entre  $10^{-4}$  i  $10^{-6} \text{ cm/s}$ .

Taula V-11. Permeabilitats de diverses escòries i fonts corresponents.

Procedència	Permeabilitat cm/s	Referència
Catalunya	$4.4-8.8 \cdot 10^{-5}$	-
EUA	$\approx 10^{-4}$	Demars et al., 1993
EUA	$3.5-4.4 \cdot 10^{-6}$	Wiles, 1996
Dinamarca	$3.5-4.4 \cdot 10^{-6}$	Geoteknisk Institut, 1992
Dinamarca	$0.2-8 \cdot 10^{-4}$	Pihl, 1997
Suècia	$0.2-10 \cdot 10^{-4}$	Hartlén i Elander, 1986

Les permeabilitats determinades en les escòries són relativament baixes, però cal tenir en compte que es tracta d'un material granular ben graduat, característica que tendeix a fer

augmentar la tortuositat del sistema compactat i redueix la velocitat de percolació d'aigua. De tota manera, aquestes permeabilitats encara possibiliten la infiltració. De fet, segons Del Val (1988), contràriament al que tradicionalment s'havia considerat, les capes de tot-u són poc permeables (de l'ordre de  $10^{-7}$  cm/s), i les úniques granulometries autènticament drenants són només aquelles que no contenen partícules <2 mm.

Després d'estudiar la permeabilitat necessària per al drenatge adequat de diferents gruixos i amplades de subbase, Jones i Jones (1989) van arribar a la conclusió que era necessari un valor de  $10^{-5}$  cm/s, el mateix ordre de magnitud que s'ha determinat en les escòries.

No obstant això, les permeabilitats s'han mesurat en estat saturat, mentre que en un escenari real la major part del temps el material està tan sols parcialment saturat. Coneixent l'elevada capacitat d'absorció d'aigua de les escòries, sembla lògic pensar que el drenatge només tindrà lloc quan hagin entrat de grans volums d'aigua que permetin arribar a la saturació.

#### **V.4.4 CONCLUSIONS**

Les escòries presenten densitats seques màximes d'1.63-1.84 Mg/m<sup>3</sup> i humitats òptimes del voltant del 12-18 % (1.74-1.79 Mg/m<sup>3</sup> i 14-16 % els valors més habituals, respectivament). Aquestes densitats són clarament més baixes que les dels àrids naturals convencionals perquè també ho són les densitats de les partícules, i no implica necessàriament que el grau de compactació sigui inferior. De fet, a partir de la reducció de la porositat del sistema s'ha pogut deduir que s'arriba a compacitats comparables. A més de poder-ho constatar experimentalment mitjançant l'evolució de la porositat, també es pot observar de manera qualitativa per les altes capacitats portants obtingudes, ja que l'alt grau de compactació repercuteix en la resistència a l'esforç tallant avaluada amb el CBR.

Per a la correcta densificació del material no es requereix excessiva energia, ja que el material és altament compactable a jutjar pel marge de diferència relativament estret entre les densitats seques màximes obtingudes mitjançant el Proctor normal i el Proctor modificat, especialment en les escòries de Tarragona. Cal tenir en compte, però, que el consum d'aigua de les escòries per la seva morfologia és superior al dels àrids naturals. D'altra banda, algunes incidències posen de manifest la necessitat de tractar les escòries de manera específica, ja que hi ha alguns aspectes de la metodologia d'assaig que no s'adapten al comportament de les escòries i condueixen a resultats erronis.

Les capacitats de suport són molt variables, però en molts casos properes al 100 %; els elevats valors són deguts a una compactació òptima en conjunció amb un considerable fregament intergranular gràcies a la singular textura superficial de les escòries. Així mateix, és destacable el fet que l'índex CBR es mantingui en trenta dies de saturació total i les expansions experimentades, pràcticament negligibles, s'aturin els primers dos dies

d'immersió. No s'han observat inflaments retardats associats a reaccions de neoformació de fases. Les escòries, doncs, mostren una resistència important i estable.

Tot i no haver detectat alteracions amb l'aigua, a llarg termini aquesta disminueix el rendiment estructural del ferm i per tant és important evacuar-la convenientment. És difícil conciliar dues necessitats bàsiques, una capa granular densa i ferma i alhora drenant; amb les escòries es pot arribar a un cert equilibri, amb un bon nivell de compactació i permeabilitats pròpies d'un material amb una granulometria tancada però suficients per garantir el drenatge en certs casos.

## V.5 CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

### V.5.1 QÜESTIONS GENERALS I METODOLÒGIQUES

El que a primera vista semblava un material molt heterogeni i amb una considerable variabilitat temporal, resulta ser menys variable del previsible i en algunes propietats estudiades fins i tot presenta una notable uniformitat.

De deu mostres caracteritzades amb profunditat, nou presenten moltes similituds; així, deixant de banda l'escòria de Sant Adrià mostrejada el juliol, amb les altres es pot traçar un perfil de les característiques d'una escòria tipus (Taula V-12).

Taula V-12. Rangs de valors en diverses característiques de les escòries estudiades tret de la mostra de juliol del 2001 de la planta de Sant Adrià.

	<i>unitats</i>	<i>escòries</i>
Índex de plaques	% en pes	24-41
Desgast de Los Angeles	% en pes	39-42
Valor del sulfat de magnesi	% en pes	5-16
Expansió UNE-EN 1744-1	% en volum	no expansiu
Compostos de sofre total	% SO <sub>3</sub> en pes	0.88-1.71
Sulfats solubles en àcid	% SO <sub>3</sub> en pes	0.76-1.40
Sulfats solubles en aigua	% SO <sub>3</sub> en pes	0.06-0.39
Clorurs solubles en aigua	% Cl en pes	0.16-0.38
Coefficient de neteja	% en pes	1.6-4.6
Plasticitat	-	no plàstic
Equivalent de sorra	%	>70
Pèrdua a 500 °C	% en pes	≤10 (≤5 majoritàriament)
Densitat aparent	Mg/m <sup>3</sup>	1.11-1.29 (1.21-1.23 en 7 mostres)
Densitat seca màxima	Mg/m <sup>3</sup>	1.74-1.84 (1.74-1.79 en 7 mostres)
Humitat òptima	% en pes	11.7-16.1 (14-16 en 7 mostres)
Porositat mat. compactat	-	0.29-0.32
CBR	%	58-108
Inflaments	% en longitud	0.03-0.36 (0.03-0.13 en 9 mostres)
Permeabilitat	cm/s	≈10 <sup>-5</sup>

Els rangs de variació relativament estrets es donen en tot tipus de propietats, no tan sols aquelles en les quals seria previsible pel fet d'estar associades a la naturalesa dels constituents de les escòries. Les propietats menys uniformes són la proporció de plaques, el valor del sulfat de magnesi, els índexs CBR i el sulfats solubles, mentre que la resta són més homogènies i en molts casos els rangs de variació encaixarien amb els observats en escòries d'altres plantes incineradores amb procediments operatius semblants. Les dades de la Taula V-12 serien vàlides, per tant, per a escòries de qualitat similar.

En aquest sentit, no s'ha de passar per alt que les escòries de Tarragona, Mataró i Sant Adrià són de molt bona qualitat, la combustió és eficient i la depuració exercida pels processos d'acondicionament del material és més o menys significativa; per aquest motiu s'hi ha pogut treballar com si es tractés d'un àrid convencional. Així, el producte final està empobrit en materials que puguin entorpir les possibles aplicacions, com poden ser material combustible i peces metàl·liques grans. En efecte, les escòries d'aquestes plantes tenen una pèrdua al foc  $\leq 5\%$ , contenen menys material combustible en les fraccions intermèdies i grosses i menys partícules metàl·liques. Les dues tipologies són partícules amb formes poc adequades que dificulten la compactació de l'escòria i que tenen influències negatives sobre l'estabilitat per la poca rigidesa i tendència a la degradació. Prat (1987) va demostrar la disminució de l'índex CBR (i per tant de la capacitat de suport) a mesura que augmentava el contingut de matèria no cremada. Per això la importància de la tasca desenvolupada per les plantes d'acondicionament de l'escòria i que sigui necessari mantenir-les, i és molt recomanable ampliar-ne el nombre.

Precisament gràcies a la qualitat de les escòries estudiades és viable caracteritzar-les amb les mateixes eines que els àrids naturals, excepte alguns casos concrets en què certs trets no s'adapten satisfactòriament als procediments reglamentaris, i per tant caldria fer-ne esment.

- La distribució de cada tipologia de material en funció de la mida de partícula és ben diferent; així, les propietats que en depenen directament revelen una forta heterogeneïtat en els seus valors segons la mida de gra. Òbviament, només es produeix en les propietats que s'avaluen sobre una sola fracció de l'escòria i no sobre el total. N'és un exemple clar el coeficient de desgast Los Angeles, amb pèrdues del 36 % si es pren la granulometria D i del 39-42 % si es pren la B; això també és extensible a altres paràmetres com l'índex de plaques o el valor del sulfat de magnesi. Cal tenir en compte aquesta variació a l'hora d'atribuir les conclusions del resultat de l'anàlisi d'una fracció granulomètrica concreta al total d'escòria.
- La morfologia de les escòries invalida la metodologia d'assaig del % de cares de fractura però caldria trobar una manera alternativa d'avaluar i quantificar la rugositat de les partícules.

- D'altra banda, hi ha aspectes de les escòries que no queden coberts amb les normes d'assaig dels àrids naturals i per als quals caldria establir protocols d'avaluació. El més important està relacionat amb la major incertesa que es té sobre el comportament de les escòries en l'àmbit mecànic: la durabilitat del material, una qüestió de difícil avaluació. En tot cas, l'estudi de l'eventual comportament expansiu de les escòries envellides sembla estar cobert per l'assaig d'expansivitat (destinat a l'àrid siderúrgic) i pel seguiment dels inflaments durant la saturació de les provetes CBR. Davant el reduït percentatge de CaO i MgO lliure a les escòries envellides, aquesta darrera opció sembla la més adequada per a les escòries, per bé que s'hi podrien introduir lleugeres modificacions, com allargar el període d'immersió i/o alternar amb períodes d'assecatge (cicles humitat-sequedat) per afavorir la cristallització de sals, algunes potencialment expansives. La manca de cohesió dificulta la realització de provetes de les quals es puguin mesurar canvis volumètrics en més d'una dimensió; el material ha de romandre confinat en un motlle i únicament es poden mesurar els inflaments longitudinals. Resta saber la influència de les partícules d'alumini metàl·lic a llarg termini.
- La compactació de Proctor, de tipus dinàmica i mitjançant els impactes de la caiguda d'un pes, produeix una degradació de partícules d'escòries –i per extensió, de qualsevol àrid menys dur que un àrid natural– i la modificació de la granulometria. Altres estudis han posat de manifest que ni és el mètode òptim per avaluar la compactabilitat d'àrids secundaris ni reflecteix el procés de compactació que té lloc a l'obra amb materials granulars. Seria convenient, doncs, reemplaçar la compactació per impactes per la vibració de les partícules.
- Així mateix, sembla que les escòries tenen la capacitat d'expulsar l'excés d'aigua durant la compactació, especialment en la corba de baixada. Davant aquesta distribució poc uniforme de la humitat, es recomana no prendre mostra del nucli de la proveta sinó de tots els punts possibles perquè el resultat sigui representatiu.

## V.5.2 COMPORTAMENT

La Taula V-13 és equivalent a la Taula I-15; inclou les sol·licitacions establertes pel PG-3 però addicionalment conté un resum de les dades corresponents a les escòries. També s'hi inclou la pèrdua al foc establerta per l'Ordre sobre valorització d'escòries. Per la seva granulometria, les escòries s'adapten millor al fus del tot-u natural, així com pel seu desgast de Los Angeles. Per al tot-u natural, però, no hi ha prescripcions de plaques ni de percentatge de partícules fracturades perquè no és un material que procedeixi d'un procés de trituració.

Taula V-12. Prescripcions recollides a l'article 510 del PG-3 i a l'Ordre sobre valorització d'escòries, i comparació amb les dades de les escòries. T: categories de trànsit pesant. NP: no plàstic. LL: límit líquid; IP: índex de plasticitat. Tots els paràmetres estan en %.

	TOT-U NATURAL	TOT-U ARTIFICIAL	ESCÒRIES
Compostos de S totals	<1 / <0.5 si contacte amb capes tractades		0.88-2.19
Partícules fracturades	-	100 (T00-T0) / >75 (T1-T2) >50 (T3-T4)	-
Índex de plaques	-	<35	<37-<41 (només 0/20)
Desgast Los Angeles	<35-40 (T00-T2) <40-45 (T3-T4)	<30 (T00-T2) <35 (T3-T4)	39-42
Coefficient de neteja	-	<2	1.6-4.6
Equivalent de sorra	-	>40 (T00-T1) >35 (T2-T4, vorals T00-T2) >30 (vorals T3-T4)	>70
Plasticitat	NP (T00-T3) LL<25 IP<6 (T4)	NP	NP
Pèrdua al foc @ 500 °C		<5	<5 excepte Vielha i Malla

Una de les principals limitacions és el contingut en compostos de sofre totals, especialment elevat en les escòries de Sant Adrià a causa de l'aigua de mar utilitzada en el temperament del material. D'altra banda, només el contingut en plaques d'algunes fraccions granulomètriques superen el límit establert, especialment a les escòries de Mataró. També el coeficient de neteja és lleugerament superior al permès en algunes escòries, com també ho és sovint en àrids convencionals. La resta de propietats compleixen més o menys satisfactòriament els valors estipulats.

Més enllà de complir les prescripcions, a l'hora de valorar l'aptitud mecànica de les escòries com a possible substitut dels àrids naturals, en realitat cal discernir entre aquelles propietats que són importants en si mateixes i aquelles altres que no s'han de considerar com un fi en si mateix sinó com un mitjà per atènyer-ne una altra. Per exemple, la compactació de Proctor i el percentatge de partícules fracturades no són determinants en si mateixos sinó per la influència que exerceixen sobre la capacitat portant -en altres paraules, resistència a l'esforç tallant- i la durabilitat. No s'ha de perdre de vista que l'assoliment d'una bona resistència i durabilitat del material és l'objectiu principal. En aquest sentit, la geometria d'algunes partícules de les escòries no és la més apropiada; d'entrada sobta, en comparació amb els àrids naturals, la variada morfologia de partícules presents. La presència de partícules amb formes poc adequades és moderadament baixa i no compromet el funcionament del material a curt termini, a jutjar pels alts índexs CBR.

Són sorprenents les elevades capacitats de suport d'un material que a primera vista sembla relativament fràgil. Sembla que si la granulometria i la compactació són les adequades, i de fet aquesta darrera ho és amb facilitat gràcies a la bona compactabilitat de les escòries, es forma una matriu granular tancada i densa, amb un important fregament intern de l'esquelet mineral, que inhibeix el desplaçament d'uns grans respecte als altres durant l'assaig, i cal suposar que també durant el seu funcionament sota les càrregues en moviment.

Així, la relativa fragilitat de les escòries d'entrada no sembla que repercuteixi directament en la seva resistència als esforços tangencials. De tota manera, durant el període de servei de l'obra el ferm se sotmet a petits però repetitius esforços dinàmics que poden fragmentar les partícules, especialment els sortints angulars de la superfície (Smith i Collis, 1994). L'alteració d'aquestes estructures superficials en les escòries deguda a la llei de fatiga del mateix material, amb desgasts lleugerament superiors als dels àrids naturals, pot comportar la disminució del fregament intern, en el qual es fonamenta en gran mesura l'estabilitat d'una capa granular. De tota manera sobre les capes granulars generalment s'hi emplacen capes tractades amb un component estructural important que absorbeix eficientment una part important dels esforços. Així, sobre les escòries les càrregues del trànsit arriben molt esmorteïdes. No obstant, atès el desconeixement de l'evolució real de les escòries, com a precaució es recomanaria completar la secció estructural amb unitats d'obra que continguin àrids naturals i de qualitat, per garantir un bon rendiment del ferm a llarg termini.

Cal destacar l'escassa sensibilitat de les escòries a l'aigua, el principal agent responsable del deteriorament dels ferms. Les escòries són no plàstiques i el grau de neteja de les partícules és a grans trets acceptable, molt satisfactori en l'àrid fi, però poc adequat en la fracció >2 mm. En tot cas, la presència de fins possiblement conflictius que puguin desestabilitzar l'esquelet mineral i induir deformacions en la capa és molt baixa. Això s'ha pogut constatar en el manteniment de la resistència a l'esforç tallant després de 30 dies de saturació total. No s'han detectat canvis de volum (inflaments i/o assentaments) durant la immersió del material, i per tant tampoc no n'haurien d'experimentar amb pluges importants.

Però la gran estabilitat de les escòries no només és deguda a factors de caire geotècnic, sinó també a l'absència de reaccions de neoformació que duguin associats fenòmens expansius. Això és el que es desprèn de l'assaig d'expansió UNE-EN 1744-1 i de l'evolució dels inflaments de les provetes CBR. Això no impedeix que es puguin produir a llarg termini, ja que no es disposa de dades de laboratori corresponents a marcs temporals més enllà de 30 dies d'immersió. En aquest punt les informacions quantitatives i en condicions controlades de laboratori han de ser reemplaçades per observacions qualitatives realitzades al tram experimental.

Així, l'estabilitat volumètrica determinada al laboratori, així com l'evolució del tram experimental, han posat de manifest que no es produeixen expansions, si més no en les escòries un cop envellides i utilitzades sense lligar. Es pensa que el problema podria raure, doncs, no tant en el si de la capa d'escòria, sinó en les unitats d'obra amb conglomerants hidràulics que estan en contacte. Pels continguts moderats en sulfats en les escòries potser s'haurien de prendre algunes precaucions.

De fet, l'evolució del tram experimental és ara com ara l'única eina de què es disposa per avaluar –qualitativament i de manera integral– la durabilitat de les escòries, que inclou els



efectes a mitjà i llarg termini de la relativa fragilitat de les partícules, la presència de plaques, la important porositat i eventuais canvis volumètrics.

No es preveuen problemes durant la posada en obra de les escòries sempre que es tinguin en compte els paràmetres de densitat seca màxima i humitat òptima determinats; la demanda d'aigua de les escòries és clarament superior a les d'un àrid convencional (aproximadament el doble) i passar per alt aquesta particularitat conduiria a densitats seques molt per sota de la màxima i, per tant, a una compactació molt deficient.

Tampoc no es preveuen problemes en períodes d'altres humitats a la capa, però cal evitar la saturació. No és fàcil arribar a l'estat de saturació de les escòries, atès que per l'elevada capacitat d'absorció que les caracteritza el volum d'aigua requerit seria molt més alt que en un àrid natural. Aquest fet fa pensar que només es produirà en cas de períodes llargs de pluja, o amb precipitacions intenses. En tot cas, la permeabilitat del material compactat i saturat és moderada i indica que no hi ha excessiva dificultat perquè dreni lliurement.

### **V.5.3 RECOMANACIONS**

Els dos principals inconvenients tècnics de les escòries són els sulfats i l'abundància de partícules fràgils com les plaques i especialment les del vidre domèstic. Les mesures pal·liatives poden ser diverses i es diferencien en dos grans grups: prevenció i protecció.

Les mesures de prevenció incideixen sobre la matèria primera i han d'estar en equilibri amb el cost econòmic que poden suposar. En aquest sentit, caldria repensar la pràctica de temperar el material que surt del forn amb aigua de mar, que aporta gran quantitat de sals amb especial atenció als sulfats. Aquests es concentren preferentment a les partícules <1 mm, però la hipotètica extracció d'aquesta fracció granulomètrica, a més de ser poc viable econòmicament, tampoc no eliminaria completament els sulfats i les possibles patologies induïdes a les capes amb ciment properes.

D'altra banda, en diversos assaigs realitzats s'ha posat de manifest que una certa reducció del vidre domèstic en forma de plaques comportaria una millora en les propietats mecàniques del producte, perquè aquest constituent és més fràgil. Les repercussions serien directes en propietats com l'índex de plaques i el coeficient de desgast, però l'abast d'aquesta reducció es faria palès possiblement també en la compactabilitat i en la capacitat de suport. La durabilitat de la capa també quedaria afavorida (possible fragmentació de les plaques sota l'acció repetitiva de les càrregues).

Els avantatges d'aquesta mesura són, doncs, evidents, però presenta certes dificultats d'aplicació. La realització depèn d'una major conscienciació social dels beneficis del reciclatge i la potenciació de la recollida selectiva. Aquesta modificació del residu sòlid urbà originari

podria anar acompanyada d'una alteració del procés d'incineració per afavorir els processos de fusió a la cambra de combustió, regulant el temps de residència del residu, espaïant-lo per uniformitzar la combustió.

Adicionalment, es podria preveure la possibilitat d'una mescla de les escòries amb àrids naturals. El tamisatge per separar fraccions pot ser costós; per aquest motiu es descarta l'extracció dels fins. La seva eliminació efectivament disminuiria la quantitat de sulfats però no en la mesura en què no faci necessari adoptar mesures de protecció addicionals, i per tant no esdevé econòmic (a més en aquesta operació es genera un altre residu que cal valoritzar, tractar o abocar). Però, en lloc de separar fraccions, es podria incorporar a les escòries una certa proporció d'àrids naturals de matxuqueig de les fraccions granulomètriques més grosses, just aquelles en què les escòries presenten algunes mancances. Així, aquesta mescla podria ser molt beneficiosa perquè es milloraria la granulometria i es podria enquadrar al fus ZA20, aportaria angularitat i augmentaria la fricció interna; així es constituïria un esquelet encara més resistent, es densificarien les capes i s'incrementarien les capacitats portants, i paral·lelament disminuiria el coeficient de desgast. Només caldria reajustar les humitats òptimes perquè, com que hi hauria més grava, segurament les humitats serien inferiors. Òbviament, aquesta operació encariria el producte però en milloraria molt les prestacions mecàniques.

Les mesures de protecció ja han estat esmentades en els apartats anteriors. Hi ha diversos aspectes de les escòries que apunten com a mesura molt beneficiosa l'aïllament del material per reduir la percolació d'aigua. A més de l'evident reducció de la lixiviació, només en l'àmbit mecànic es minimitzaria la mobilització de sulfats i s'evitaria la saturació de la capa, situació en la qual les pressions intersticials transitòries, a causa de les càrregues produïdes pel trànsit, poden reduir tant la rigidesa com l'estabilitat (Brown i Selig, 1991). Aquesta opció podria ser efectiva i el cost afegit no és desmesuradament alt, ja que també s'aplica en altres situacions com en cas de tenir esplanades de mala qualitat i que convé aïllar de l'aigua per possibles inestabilitzacions.

De tota manera, per protegir les capes granulars de l'entrada de grans quantitats d'aigua és suficient una mescla bituminosa en superfície. De fet, les capes que s'emplacin sobre les escòries no tan sols han de protegir-les de la infiltració d'aigua, sinó que han d'absorbir una part important dels esforços, i per tant, per contrarestar la presència de les escòries (i el relatiu desconeixement que es té de la seva evolució a llarg termini), no seria convenient que estiguessin constituïdes també d'escòries, sinó d'àrids naturals.

#### **V.5.4 APLICACIONS ADDICIONALS**

L'objectiu d'aquest estudi es centra en la utilització d'escòries com a capa estructural del ferm sense lligar, però per les seves propietats serien aptes per a altres aplicacions que tampoc no

requereixen l'addició de lligants o conglomerants. Destaca especialment la possible utilització en esplanades, és a dir, per sota del que és el ferm pròpiament. En aquest cas, l'ús està regulat per l'article 330 del PG-3 (amb data del 2002), que fa referència a les diferents tipologies de sòls. Com a informació addicional, si es consideren les escòries com un sòl, les seves categories segons les diferents classificacions es detallen a la Taula V-14.

Taula V-14. Categories de les escòries segons diverses classificacions.

CLASSIFICACIÓ	CATEGORIA
USCS de Casagrande	SW-SM. Sorra llimosa ben graduada, amb pocs fins
AASHTO	A-1-a
Art. 330 del PG-3/2002	tolerable

A més de la del PG-3/2002, es recullen dues classificacions més que s'acostumen a utilitzar per avaluar de manera aproximada i ràpida les característiques i propietats dels sòls utilitzats en una obra: la Classificació Unificada de Classificació de Sòls (USCS), modificada per Casagrande i l'AASHTO, atenent el comportament d'un sòl en esplanades, com a capa de suport o assentament d'un ferm (Jiménez et al., 1975). Per a la classificació d'aquesta taula no s'ha tingut en compte l'escòria mostra del juliol del 2001 de la planta de Sant Adrià.

Malgrat que per la seva granulometria i plasticitat podria ser classificat com el millor possible –un sòl seleccionat–, el contingut de matèria orgànica de les escòries (determinat mitjançant UNE 103204, els valors de les escòries de Mataró estan al voltant de l'1 % segons diversos informes proporcionats pel responsable de Pedreres Rusc), i especialment el de sulfats solubles, en rebaixa la categoria fins a sòl tolerable. El CBR és clarament >3 % i per tant es podria emprar com a cimentació o com al nucli del terraplè.