UNIVERSITAT DE BARCELONA

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FI DE CARRERA

## Títol

CLASSIFICACIÓ I ANÀLISI DE L'APLICABILITAT D'ÀRIDS RECICLATS (706-TES-EG-4967)

## Autor/a

Andreu Gonzàlez Corominas

## Tutor/a

Miren Etxeberria Larrañaga

## Departament

Enginyeria de la Construcció

## Intensificació

Materials de Construcció

## Data

17 de Febrer de 2011

Per a Miren i Andrés.
A tots aquells que seguiran després d'això
i als que, desafortunadament, no.
Als dos, Ivan i Rebeca, gràcies.

# ÍNDEX

ÍNDEX DE TAULES 8
ÍNDEX DE FIGURES 9
RESUM 10
ABSTRACT 11

## 1. INTRODUCCIÓ

1.1. Aspectes generals 13

1.2. Objectius 13

1.3. Estructura de la tesina 14

## 2. ESTAT DE L'ART

2.1. INTRODUCCIÓ 15

2.2. ORÍGENS DELS RESIDUS DE CONSTRUCCIÓ I DEMOLICIÓ 15
2.2.1. Residus en la fase de construcció 15
2.2.2. Residus en la fase de demolició 16

2.3. GESTIÓ DELS RESIDUS DE CONSTRUCCIÓ I DEMOLICIÓ 16
2.3.1. Recomanacions en el procés de construcció 16
2.3.2. Recomanacions en planta 16
2.3.3. Consideracions ambientals 17

2.4. ANÁLISI DE LA NORMATIVA ACTUAL SOBRE ELS ÀRIDS RECICLATS 17

2.5. PLANTES DE RECICLATGE I CLASSIFICACIONS 18
2.5.1. Classificació de les plantes de tractament de RCD segons el grau d'automatització 19
2.5.2. Classificació de les plantes de tractament de RCD segons el grau d'admissió 19
2.5.3. Classificació de les plantes de tractament de RCD segons la seva capacitat de transport 20
2.5.3.1. Plantes fixes 20
2.5.3.2. Plantes mòbils 21

2.6. PROCESOS DE PRODUCCIÓ D'ÀRIDS RECICLATS 22
2.6.1. Trituració dels RCD 22
2.6.2. Eliminació d'impureses 23

2.7. TIPUS D'ÀRIDS RECICLATS I PROPIETATS 26
2.7.1. Tipus d'àrids reciclats 26
2.7.1.1. Classificació dels àrids segons el seu origen 26
2.7.1.2. Classificacions segons les diferents normatives 27
2.7.2. Propietats dels àrids reciclats aplicats a la fabricació de formigó: 29
2.7.2.1. Granulometria 29
2.7.2.2. Contingut de fins (<0.063mm) 30
2.7.2.3. Contingut de sorres (<4mm) 31
2.7.2.4. Forma i textura superficial 31
2.7.2.5. Densitat i absorció 32
2.7.2.6. Coeficient de Los Angeles 34
2.7.2.7. Contaminants i impureses 35
2.7.3. Propietats dels àrids reciclats aplicats a ferms de carreteres 38
2.7.3.1. Composició dels àrids reciclats 38

2.7.3.2. Granulometria 39
2.7.3.3. Coeficient de Los Angeles 40
2.7.3.4. Relació entre humitat i densitat 40
2.7.3.5. California Bearing Ratio (CBR) 41
2.7.3.6. Altres propietats 41

2.8. ÀMBIT D'APLICACIÓ DELS ÀRIDS RECICLATS 42
2.8.1. Fabricació de formigó 42
2.8.2. Ferms de carreteres 44

***3. PLANTES DE RECICLATGE***

3.1. INTRODUCCIÓ 47

3.2. PLANTA DE LES FRANQUESES 47

3.3. PLANTA DE CALLÚS, MANRESA. 51

3.4. PLANTA DE MONTOLIU 52

3.5. PLANTA DE PERALADA 52

3.6. PLANTA DEL PORT DE BARCELONA 54

3.7. PLANTA DE SANT JULIÀ DE RAMIS 55

***4. ÀRIDS RECICLATS***

4.1. INTRODUCCIÓ 57

4.2. PROPIETATS DELS ÀRIDS RECICLATS: 58
4.2.1. Granulometria 58
4.2.2. Contingut de fins (<0.063mm) 61
4.2.3. Contingut de sorres (<4mm) 63
4.2.4. Forma i textura superficial 64
4.2.5.Densitat i absorció 65
4.2.6. Coeficient de Los Angeles 66
4.2.7. Contaminants i impureses 67

4.3. VARIACIÓ DE LES PROPIETATS DELS ÀRIDS DINS LES ESTIBES 69

***5. PROPIETATS DELS MATERIALS I PRODUCCIÓ DE FORMIGÓ***

5.1. INTRODUCCIÓ 71

5.2. CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS 71
5.2.1. Ciment 72
5.2.2. Àrids reciclats 72
5.2.3. Àrids naturals 75
5.2.4. Additius 76

5.3. FABRICACIÓ DE FORMIGÓ 77
5.3.1. Dosificació 77
5.3.2.Fabricació 79
5.3.3. Omplert de provetes, compactació i conservació 81
5.3.3.1. Compactació 81
5.3.3.2. Conservació, desemmotllatge i transport de provetes 82
5.3.3.3. Recapçat 82
5.3.3.4. Marcatge de les provetes 82

## *6. ASSAIGS I CARACTERITZACIÓ DEL FORMIGÓ*

6.1. INTRODUCCIÓ 83

6.2. FORMIGÓ ENDURIT 83
6.2.1. Assaigs de densitat, absorció i porus accessibles 83
6.2.2. Assaig de compressió 84
6.2.3. Assaig de tracció indirecta (assaig brasiler) 85
6.2.4. Assaig del mòdul d'elasticitat 85
6.2.5. Assaig de succió capil·lar 86

6.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ DE LES PROPIETATS DEL FORMIGÓ ENDURIT 87
6.3.1. Propietats físiques: Determinació de la densitat 87
6.3.2. Propietats mecàniques: Trencament a compressió 88
6.3.3. Propietats mecàniques: Resistència a tracció indirecta 92
6.3.4. Propietats mecàniques: Mòdul d'elasticitat 93
6.3.5. Succió capil·lar 94

## *7. APLICACIÓ PRÀCTICA*

7.1. INTRODUCCIÓ 97

7.2. CARACTERITZACIÓ DELS ÀRIDS RECICLATS 97
7.2.1. Classificació dels components dels àrids reciclats 97
7.2.2. Anàlisi físico-mecànic 98

7.3. DOSIFICACIÓ DEL FORMIGÓ 99

7.4. PROPIETATS DEL FORMIGÓ 100

7.5. MODIFICACIÓ DE LA DOSIFICACACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS 100

## *8. CONCLUSIONS GENERALS*

8.1. INTRODUCCIÓ 103

8.2. CONLUSIONS 103
8.2.1. Àrids 103
8.2.2. Plantes 104
8.2.3. Formigó fresc 105
8.2.4. Formigó endurit 105
8.2.5. Aplicació pràctica 106

8.3. FUTURES LÍNIES DE RECERCA 106

BIBLIOGRAFÍA 107

## ÍNDEX DE TAULES

Taula 1: Combinació de tipus de trituradores [2]. 23
Taula 2: Comparació entre els diferents tipus de sistemes de trituració [2]. 23
Taula 3: Classificació dels àrids reciclats segons la RILEM [17]. 27
Taula 4: Classificació dels àrids reciclats segons la norma belga [18]. 27
Taula 5: Especificacions internacionals per als diferents tipus d'àrids [4, 10, 17-21, 26]. 28
Taula 6: Classificació dels àrids reciclats segons la norma DIN 4223. 29
Taula 7: Requisits granulomètrics de l'àrid reciclat per a la fabricació de formigó per a edificació segons la norma japonesa [4]. 30
Taula 8: Requisits granulomètrics de l'àrid reciclat per a la fabricació de formigó en obra pública segons la norma japonesa [4]. 30
Taula 9: Fusos granulomètrics per a l'àrid reciclat segons la norma belga. 30
Taula 10: Classificació dels materials constituents de l'àrid reciclat segons EN 933-11. 36
Taula 11: Composició dels àrids reciclats segons la norma BS 8500-2:02 37
Taula 12: Composició dels àrids reciclats segons la norma japonesa. 37
Taula 13: Composició dels àrids reciclats segons la norma DIN 4223. 37
Taula 14: Classificació de les mostres estudiades segons la seva categoria granulomètrica 58
Taula 15: Resum dels resultats obtinguts per les mostres en els assaigs de laboratori. 59
Taula 16: Resum dels resultats obtinguts a la classificació de components. 67
Taula 17:Resultats de les propietats per a l'anàlisi de la variació dins les estibes. 69
Taula 18: Propietats físico-químiques del ciment utilitzat per a la fabricació del formigó. 72
Taula 19: Detall taula 15. Classificació dels components dels àrids reciclats utilitzats per a la fabricació de formigó. 73
Taula 20: Detall taula 15. Propietats físico-químiques dels àrids reciclats utilitzats per a la fabricació de formigó. 75
Taula 21: Granulometria dels àrids naturals utilitzats en la fabricació de formigó 75
Taula 22: Propietats físiques dels àrids naturals utilitzats per a la fabricació de formigó. 76
Taula 23: Formigons estudiats amb la seva nomenclatura simplificada. 77
Taula 24: Formigons de la fase 1 fabricats amb àrids de les Franqueses. 78
Taula 25: Formigons de la fase 1 fabricats amb àrids reciclats de Les Franqueses i amb addició de filler calcari en la fase 1. 79
Taula 26: Dosificacions de formigons fabricats en la fase 2 79
Taula 27: Consistència del formigó en funció del assentament del con d'Abrams. 80
Taula 28: Resultats de l'assaig del con de Abrams i la quantitat d'additiu utilitzat. 80
Taula 29: Densitat dels formigons de la fase 2. 87
Taula 30: Resistència a compressió fase 1. 88
Taula 31: Increment de la resistència a compressió de 7 a 28 dies en la fase 1. 89
Taula 32: Resistència a compressió fase 2. 89
Taula 33: Increment de la resistència a compressió de 7 a 28 dies en la fase 2. 90
Taula 34: Resistència a tracció en la fase 2. 92
Taula 35: Mòdul d'elasticitat en la fase 2. 93
Taula 36: Línies de tendència i coeficients de succió. 96
Taula 37: Classificació de components de l'àrid utilitzat. 98
Taula 38: Propietats físiques i mecàniques dels àrids reciclats. 98
Taula 39: Pes (kg) de cadascun dels materials per a la fabricació de 1m ³ de formigó 99
Taula 40: Consistència obtinguda (Con d'Abrams) i resistència a compressió en els formigons fabricats 100

## ***ÍNDEX DE FIGURES***

Figura 1: Planta fixa de reciclatge de Sant Julià de Ramis [16]. 20
Figura 2: Esquema d'una planta fixa [1]. 20
Figura 3: Planta mòbil de tractament de RCD [1]. 21
Figura 4: Planta mòbil de reciclatge en un tram de l'AVE a Llinars del Vallès [16]. 21
Figura 5: Separadors en sec per aire [1]. 24
Figura 6: Sistema Aquamator [2]. 24
Figura 7: Procés d'eliminació automàtic de les fraccions de guix [15]. 24
Figura 8: Detall del procés d'eliminació de guix [15]. 25
Figura 9: Tipus de Magneto Steinert [1]. 25
Figura 10: Separadors per corrents de Foucault [1]. 25
Figura 11: Mapa de localitzacions de les instal·lacions de GRC [16]. 48
Figura 12: Fotografia aèria de la planta de Les Franqueses del Vallès [16]. 49
Figura 13: Esquema del procés de fabricació a la Planta de Les Franqueses del Vallès [16]. 50
Figura 14: Fotografia de la Planta de reciclatge de Callús, Manresa [43]. 51
Figura 15: Fotografia de la Planta de reciclatge de Montoliu [16]. 52
Figura 16: Fotografia de la instal·lació fixa de la Planta de reciclatge de Peralada [44]. 53
Figura 17: Fotografia de detall de la instal·lació fixa de la Planta de reciclatge de Peralada [45]. 53
Figura 18: Fotografia dels equips mòbils de la Planta de reciclatge de Peralada [45]. 54
Figura 19: Fotografia dels equips mòbils de la Planta de reciclatge del Port de Barcelona [45]. 55
Figura 20: Corbes granulomètriques corresponents a les mostres de graves. 60
Figura 21: Corbes granulomètriques corresponents a les mostres de sorres. 60
Figura 22: Corbes granulomètriques corresponents a les mostres de tot-u. 61
Figura 23: Contingut de fins (<0,063) en graves. 61
Figura 24: Contingut de fins (<0,063) en sorres. 62
Figura 25: Contingut de fins (<0,063) en tot-u. 62
Figura 26: Contingut de sorres (<4mm) en graves. 63
Figura 27: Contingut de sorres (<4mm) en tot-u. 63
Figura 28: Índex de llenques per a graves i tot-u. 64
Figura 29: Relació entre índex de llenques i contingut de ceràmics. 64
Figura 30: Relació entre densitat i absorció per a totes les mostres. 65
Figura 31: Relació entre contingut de ceràmics i absorció per a graves. 66
Figura 32:Resultats de l'assaig de Los Angeles. 67
Figura 33:Resultats de la classificació de components. 68
Figura 34: Distribució granulomètrica dels àrids reciclats de les plantes de Les Franqueses i el Port de Barcelona i els fusos inferior i superior núm. 67 de la norma ASTM C33-07 "Àrids per a formigó". 74
Figura 35: Distribució granulomètrica del àrid reciclat de la planta de Peralada i els fusos inferior i superior núm. 57 de la norma ASTM C33-07 "Àrids per a formigó". 74
Figura 36: Distribució granulomètrica dels àrids naturals utilitzats per a la fabricació de formigó. 76
Figura 37: Corba de distribució granulomètrica de la mescla d'àrids del formigó HRF100-2. 78
Figura 38: Màquina de premsat per a morters i formigons 84
Figura 39: Esquema de l'assaig de succió 86
Figura 40: Evolució de la resistència a compressió en el temps per a la fase 1. 88
Figura 41: Evolució de la resistència a compressió en el temps per a la fase 2. 90
Figura 42: Anàlisi comparatiu de la resistència a compressió a 28 dies respecte a el HC per a la fase 2. 91
Figura 43: Anàlisi comparatiu de la resistència a tracció a 28 dies respecte al HC per a la fase 2 92
Figura 44: Anàlisi comparatiu del mòdul d'elasticitat a 28 dies respecte al HC per a la fase 2. 94
Figura 45: Succió capil·lar a 72h en la fase 2. 95
Figura 46: Succió capil·lar a 2h en la fase 2. 95
Figura 47: Distribució granulomètrica de l'àrid reciclat. 99
Figura 48: Sèrie de fotografies (a-h) de la posada en obra del formigó reciclat a la Mar Bella. 101

## ***RESUM***

**TÍTOL:** Classificació i anàlisi de l'aplicabilitat d'àrids reciclats.
**AUTOR:** Andreu Gonzàlez Corominas.
**TUTORA:** Miren Etxeberria Larrañaga.

El treball de recerca dut a terme consisteix en l'anàlisi del disseny i la producció de les plantes de reciclatge més importants existents a Catalunya. Es va realitzar la caracterització de tots els àrids produïts per aquestes plantes, així com l'anàlisi d'algunes de les fraccions per a la fabricació de formigons no estructurals. Les plantes analitzades van ser les de les Franqueses (Vallès Oriental), Callús (Bages), Montoliu (Segrià), Peralada (Alt Empordà), Port de Barcelona (Barcelonès) i Sant Julià de Ramis (Gironès).

En l'anàlisi dels àrids es van comparar els resultats dels assajos amb els valors establerts a les principals normes internacionals per comprovar el seu nivell d'aptitud. També es van recopilar resultats d'estudis efectuats per altres autors per comprovar la validesa de les mesures trobades experimentalment. Alhora s'han descrit les plantes de producció estudiades per poder buscar paral·lelismes entre el procés de producció i el material final.

Després d'estudiar totes les plantes es van fabricar formigons amb àrids de les plantes de reciclatge de Les Franqueses i el Port de Barcelona perquè es tractava de les plantes amb més activitat i més properes a la ciutat de Barcelona. També es van estudiar els formigons fabricats amb àrids de la planta de Peralada per la gran qualitat de l'àrid i per ser la planta més important de la província de Girona.

La fabricació dels formigons es va dividir en dues fases. En la primera, es va utilitzar el mètode de dosificació de Bolomey, es van estudiar les propietats del formigó fresc i també la resistència a compressió del formigó endurit. A causa de les propietats no adequades del formigó fresc es va realitzar una fase més de fabricació de formigó. En aquesta segona, es va optar per emprar el mètode de dosificació de la compacitat òptima amb relacions a/c efectives de 0.6.

En la primera fase únicament es van fabricar formigons amb una substitució per àrid reciclat del 100% procedent de la planta de les Franqueses i es van assajar a compressió a les edats de 7 i 28 dies. En la segona fase es van fabricar formigons amb substitució per àrid reciclat del 25, 50 i 100% i es va analitzar la resistència a compressió a 7 i 28 dies. La tracció indirecta i el mòdul d'elasticitat es van estudiar a 28 dies. Addicionalment, es va analitzar la succió capil·lar i es van determinar les densitats de cadascuna de les mostres.

Entre les conclusions extretes, principalment destaca que, d'acord a les propietats dels àrids reciclats de les diferents plantes estudiades, tots ells són acceptables per a aplicacions de formigó no estructural com ara el cas real estudiat de la pavimentació d'una vorera.

## ***ABSTRACT***

**TITLE:** Recycled aggregates classification and applicability analysis.
**AUTHOR:** Andreu Gonzàlez Corominas.
**TUTOR:** Miren Etxeberria Larrañaga.

The research work consists of the production analysis of the most important recycling plants in Catalonia. The characterization of all the aggregates produced by these plants was also carried out, as well as the analysis of some fractions for the manufacture of non-structural concrete. The recycling plants analyzed were Les Franqueses (Vallès Oriental), Callús (Bages), Montoliu (Segrià) Peralada (Alt Emporda), Port de Barcelona (Barcelona), Sant Julià de Ramis (Girona).

In the analysis of aggregates, the results of the tests were compared to the values set in the main international standards in order to check the level of feasibility. Some results from other authors were collected to check the validity of the measures found experimentally. As well the production plants were studied in order to find parallels between the production process and the final material.

After studying all the plants, the decision was to produce concrete with recycled aggregates from Les Franqueses and Port of Barcelona plants because they were the most active plants and closest to the city of Barcelona. Concretes with recycled aggregates from Peralada were also made because of the high quality of the aggregate and because it is also the most important recycling plant in Girona.

The concrete production was divided in two phases. In the first one, the Bolomey dosage method was used and fresh properties and compressive strength of concrete were studied. Due to the unsuitable properties in fresh concrete, one more phase of concrete production was made. In the second phase, it was decided to use the optimal compacting dosage method with effective a/c ratio of 0,6.

In the first phase, concrete was only produced with a recycled aggregate replacement by 100% from the plant of Les Franqueses and compression tests were made at ages 7 and 28 days. In the second phase, concretes were produced with a recycled aggregate replacement of 25, 50 and 100% and the compressive strength was tested at 7 and 28 days. The tensile and elasticity modulus were studied at 28 days. Likewise, the capillary suction and densities of each sample were determined.

Among all the conclusions drawn and according to the properties of recycled aggregates from the different plants, the main conclusion is that all the aggregates are acceptable for non-structural concrete applications such as the sidewalk pavement exposed at the real example.

# *Capítol 1*

# *INTRODUCCIÓ*

## 1.1. ASPECTES GENERALS

El present document neix amb la intenció de trobar solucions a l'excedent generat a les plantes de reciclatge de residus de construcció i demolició (RCD). A Espanya, s'estima una producció anual d'uns 38 milions de tones d'aquest tipus de residu. Aproximadament, un 75% del total correspon a la mescla d'enderroc amb presència d'elements ceràmics, com ara, maons, teules o rajoles.

Només el 40% dels RCD són processats adequadament a les plantes de tractament de RCD ja que la resta es diposita, directament, en abocadors. La producció d'àrids reciclats presenta una taxa d'aprofitament entre el 10-20%. No obstant això, la caiguda del sector de la construcció a Espanya de més del 50% en els últims tres anys a causa de la crisi econòmica ha produït una reducció considerable en la producció de RCD.

La baixa taxa de reciclatge a Espanya comparada amb altres països europeus es deu a que el dipòsit en abocadors del RCD sense tractament previ té un cost molt baix, els costos de transport i tractament dels residus són elevats, el valor dels àrids reciclats és baix i, sobretot, manca una consciència ambiental generalitzada.

Des d'un punt de vista econòmic, el reciclatge de RCD només és interessant quan el producte final és competitiu en relació al seu cost i la seva qualitat respecte els recursos naturals. Els materials reciclats normalment seran competitius on hi hagi escassetat de matèries primeres i llocs adequats de dipòsit. Les condicions de competitivitat per escassetat o espai no es donen a Catalunya i Espanya, per tant, és necessari que l'administració promogui l'ús dels àrids reciclats en les obres per estendre la seva presència. L'incentiu per a projectes en concursos públics que contemplin la utilització d'àrids reciclats o, fins i tot, la seva obligació i la prohibició de l'abocament del RCD sense tractament previ són possibles solucions per al èxit de les plantes de tractament i reciclatge.

## 1.2. OBJECTIUS

L'objectiu d'aquest estudi és analitzar les propietats físiques i químiques dels àrids reciclats produïts en plantes catalanes, comparar els resultats amb les diferents normatives actuals i fabricar formigons amb diferents proporcions per avaluar els resultats.

La importància del nostre estudi radica en el fet que els àrids reciclats poden ser diferents en funció de la planta de reciclatge i dels processos de tractament als que són sotmesos. Per això, s'ha d'estudiar les seves propietats detalladament amb la finalitat de poder aconseguir el seu màxim rendiment i eficàcia en qualsevol camp d'aplicació.

El coneixement del producte és imprescindible per aconseguir valors afegits, increments de vendes i, en conseqüència, la taxes de reciclatge superiors a Catalunya i Espanya. Això permetria allargar la vida útil

dels abocadors i reduir l'explotació de recursos naturals, disminuint l'impacte ambiental de nous abocadors i pedreres.

## 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESINA

La tesina s'organitza al voltant de 7 capítols que permeten seguir el procés d'anàlisi portat a terme durant el treball investigador i arribar a emetre unes conclusions.

En primer lloc, l'estat de l'art pretén contextualitzar tots aquells materials i processos industrials que existeixen. Es tracta de presentar la situació actual que envolta la producció d'àrids reciclats i el seus tractament per tal de poder avaluar posteriorment les situacions concretes d'estudi. També es recopilen les normatives que afecten a l'ús d'àrid reciclat en les seves diferents aplicacions i les dades i resultats obtinguts per altres autors en experiències similars.

En el següent capítol, es descriuen totes les plantes que han proporcionat els àrids d'estudi. Es pretén conèixer el procés de fabricació i tots aquells factors que tenen influència sobre el producte final. Cal tenir en compte, tal i com s'ha dit, que les propietats dels àrids varien segons la planta de reciclatge i els tractaments que s'hi duen a terme.

Seguidament, s'exposa el resultat de l'assaig experimental amb les mostres d'àrids reciclats. La caracterització de les propietats físiques i químiques dels àrids permet analitzar la qualitat del producte i proposar actuacions o millores des de les plantes així com buscar forats en el mercat que puguin ser ocupats per els àrids reciclats de RCD.

En una segona fase experimental, s'ha fabricat formigó de tres de les plantes estudiades. S'han seleccionat tres plantes que per qualitat i sector de mercat han resultat més interessants. L'obtenció de resultats en formigó amb àrids de les característiques dels estudiats resulta innovadora ja que és molt reduït el nombre d'investigacions que s'han dut a terme en condicions semblants. Alhora, la fabricació d'aquest formigó en l'obra pública o privada és, encara, poc habitual, i no se'n tenen referències.

Lligats al l'anterior capítol són els dos darrers capítols, en els que s'ha discutit els resultats dels diferents assajos als que s'ha sotmès el formigó. S'ha relacionat aquests resultats amb les característiques dels àrids estudiats anteriorment i s'han proposat millores per a la fabricació de formigó. En últim lloc, s'ha exposat un cas pràctic que s'ha dut a terme a Barcelona durant el procés d'anàlisi que ha permès ampliar el coneixement i el tractament d'aquests tipus d'àrids en casos reals.

Finalment, a l'últim apartat es resumeixen les conclusions, productes de l'estudi previ, l'experiència pràctica i l'anàlisi dels resultats que s'han pogut determinar. També es recullen les recomanacions per a la producció d'àrids reciclats i es proposen futures línies d'investigació per a la continuïtat de l'estudi presentat.

# *Capítol 2*

# *ESTAT DE L'ART*

## 2.1. INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es pretén presentar un resum de la situació actual de l'ús dels àrids reciclats procedents de residus de construcció i demolició (RCD). Observant la bibliografia, es pot afirmar que la investigació efectuada fins l'actualitat es centra bàsicament en l'ús d'àrids reciclats de formigó i en la utilització d'aquests per a formigó estructural. Els articles publicats que tracten els àrids reciclats mixtes o ceràmics o en altres aplicacions com ara formigó no estructural són menys abundants. Sembla que existir una tendència a que en els pròxims anys aquesta situació varïi ja que són varis els equips d'investigació que, actualment, busquen respostes en aplicacions menys restrictives que la de formigó estructural per als àrids reciclats.

En la situació actual del sector de la construcció, és important que els àrids reciclats siguin reutilitzats i revalorats, arribant a ser competents dins la nova situació del mercat. Per això, és imprescindible que es trobin nous espais on es puguin col·locar i que el sistema de producció es millori per tal d'arribar a ser competents.

El capítol s'estructura en 7 apartats, on s'exposa en cadascun d'ells la base teòrica necessària sobre els temes que es tractaran ens els següents capítols. Bàsicament, es presenta una visió general de tot el procés de reciclatge d'àrids que va des dels seus orígens fins al seu destí final com a producte. Pot classificar-se la informació que es tractarà durant els següents capítols en: els orígens i la gestió dels RCD, la situació de la normativa actual que els afecta, les plantes de tractament de RCD, el procés de producció d'àrids a les plantes, els àrids reciclats (tipus, origen i propietats) i, finalment, les possibles aplicacions d'aquests àrids.

## 2.2. ORÍGENS DELS RESIDUS DE CONSTRUCCIÓ I DEMOLICIÓ

L'obtenció d'àrid reciclat prové de dues fonts principals associades als residus. En primer lloc, als residus produïts pel propi procés de construcció i, en segon, a la pròpia demolició o desmantellament d'estructures existents. Independentment d'altres factors, aquests orígens indueixen diferents característiques en els àrids reciclats [1-2].

### 2.2.1. Residus en la fase de construcció

Sempre que sigui possible, tant en les plantes de formigó com en les obres, cal disposar d'espais i equips que permetin la separació dels residus de construcció. Com que en la majoria dels casos la separació prèvia és difícil i les quantitats de residus produïts són petites, sol ser més comú portar-los fins a una planta separadora o de reciclatge.

### 2.2.2. Residus en la fase de demolició

L'operació de demolició s'ha de plantejar de forma que permeti la reutilització del màxim volum de components i materials. La manera de millorar la qualitat del residu de demolició és la demolició selectiva. Però, són varis els factors que condicionen poder dur-la a terme, entre d'altres es poden destacar l'accessibilitat, el temps disponible i el cost global de l'actuació.

S'entén com a accessibilitat, la facilitat de recuperació d'elements tant per reciclar com per reutilitzar directament.

Una altra qüestió important que pot limitar la demolició selectiva és el temps necessari per a la seva realització. Aquest factor pot venir limitat per les autoritats en àrees urbanes.

Per últim, els aspectes que condicionen el cost són també decisius. Quan els costos del processament dels materials barrejats són superiors als del tractament dels materials separats, es presenta una clara ocasió d'aplicar la demolició selectiva. Així mateix, els costos de transport i també d'abocador, sempre que sigui permès, juguen també un paper important. La imposició de restriccions o l'aplicació de taxes elevades per l'abocament afavoreix el reciclatge, i indirectament, la demolició selectiva.

La demolició selectiva és més cara en comparació amb els mètodes tradicionals de demolició, per això, la incidència en el cost de processament pot ser molt important respecte a l'adopció d'altres sistemes. Per tant, és de rellevant importància que demolició i reciclatge siguin considerats conjuntament. Cal destacar que la demolició selectiva afavoreix el coneixement del futur àrid reciclat, permet una preselecció segons la qualitat del formigó a demolir a més d'afavorir la uniformitat d'aquesta [1-2].

## 2.3. GESTIÓ DELS RESIDUS DE CONSTRUCCIÓ I DEMOLICIÓ

### 2.3.1. Recomanacions en el procés de construcció

Per minimitzar la producció d'aquests residus en el procés de construcció seria necessari [3]:

- Aplicar tècniques de reducció dels recursos, tant a l'obra com durant les fases de disseny i execució d'un projecte, i millorar la gestió de residus generats *in situ*.
- Aplicar estratègies de gestió de residus que involucrin tots els components que participen en el procés de construcció, assignant les responsabilitats pertinents entre el director d'obra, els contractistes principals i els subcontractistes.

### 2.3.2. Recomanacions en planta

La planta de tractament ha de procurar les mínimes distàncies de transport, és a dir, situar-se el més a prop possible del centre de la ciutat on s'originen la majoria dels residus de construcció i demolició, i on es genera una demanda més gran de reciclatge de matèries primeres. També es poden habilitar zones d'emmagatzematge temporal de residus i petites plantes mòbils que es poden emprar per un tractament primari dels mateixos.

Els sistemes de processament utilitzats dependran de l'aplicació final que se li vulgui donar al material reciclat i de la quantitat d'impureses que contingui.

Pel que fa a l'emmagatzematge, és interessant seguir les directrius sobre això que conté la normativa japonesa, les quals s'indiquen a continuació [4]:

- És aconsellable que els àrids reciclats procedents de formigó de diferents qualitats s'emmagatzemin separadament. Això és difícil d'aconseguir, ja que el control d'aquests materials, que se sol fer a l'entrada de la planta, és visual.
- Emmagatzemar en llocs diferents l'àrid gruixut reciclat i l'àrid fi reciclat.
- Separar els àrids reciclats dels àrids naturals.
- Tenint en compte que l'absorció d'aigua de l'àrid gruixut reciclat és elevada, és aconsellable utilitzar els àrids en condicions de saturació. Les tremuges dels àrids poden estar proveïdes de aspersors d'aigua per mantenir aquestes condicions d'humitat.
- Convé no emmagatzemar els àrids fins durant un llarg període de temps.

### 2.3.3. Consideracions ambientals

En una fase prèvia a la demolició cal determinar la presència d'asbests. En cas de detectar-se'n, els elements han de ser eliminats rigorosament d'acord amb els mètodes específics deguts que solen dur a terme empreses especialitzades. Cal minimitzar el risc de contaminar amb asbests els futurs àrids reciclats [1].

Els àrids reciclats procedents de residus de construcció i demolició no solen provocar problemes d'impacte ambiental per lixiviació de metalls, ja que aquests no solen estar presents en els materials d'origen.

En canvi, les quantitats de sulfats, procedents gairebé sempre del guix, poden superar els límits establerts per a les aigües de lixiviació. Els sulfats poden ser reduïts significativament per rentat.

Els lixiviats orgànics no són freqüents, però en tot cas solen concentrar-se més en les fraccions fines. En residus de construcció és convenient revisar el contingut en compostos aromàtics policíclics, encara que la seva presència és menys probable degut al procés de desaparició dels quitrans en les construccions [1-2].

## 2.4. ANÁLISI DE LA NORMATIVA ACTUAL SOBRE ELS ÀRIDS RECICLATS

Molts països europeus i els governs regionals d'aquests països han establert normes i procediments per fomentar la reutilització dels materials procedents de RCD en aplicacions de la construcció [5].

Al cas espanyol, en conformitat amb el marc de la Directiva 2006/12/CE relativa als residus, el Ministeri de Medi Ambient d'Espanya (MMA) va aprovar el Pla Nacional Integral de Residus (PNIR) 2008-2015 [6]. Els objectius fixats al PNIR per als RCD són, en primer lloc, la gestió ambiental del 100% de tots els materials perillosos continguts en els RCD, de manera correcta, per al 2010. En segon lloc, s'estableix un objectiu de reciclatge del 25% per al 2012 i del 35% per 2015. I en tercer, es fixa per a d'altres operacions de recuperació, inclòs el reomplert, un objectiu del 15% per al 2012 i del 20% per al 2015.

D'altra banda, el Reial Decret (RD) 105/2008 [7] regula la producció i la gestió dels RCD a Espanya. El RD prohibeix el dipòsit de residus no tractats en abocadors per tal d'impulsar el reciclatge i la revalorització de la majoria dels materials que arriben a les plantes de tractament. Per tal de complir les fites establertes en el RD, s'ha implementat a Espanya un model de quantificació de residus [8].

El govern espanyol també ha publicat modificacions a les diverses especificacions tècniques per als materials utilitzats en la construcció. Una d'elles és la modificació del Plec de Prescripcions Tècniques Generals per Obres de Carreteres (PG-3) per tal de permetre l'ús d'àrids reciclats com a material granular en capes estructurals [9]. De forma similar, la Instrucció Espanyola de Formigó Estructural EHE-08 es va veure modificada, permetent l'ús de àrids reciclats gruixuts per obtenir formigó estructural [10-11].

La EHE-08 estableix les especificacions per a les estructures de formigó i, més específicament, l'article 28 estableix els requisits per als àrids, i a l'annex 15 s'enumeren les especificacions per a àrids reciclats [10]. En aquesta mateixa Instrucció, es descriuen també les característiques que han de tenir els àrids per al seu ús en les diferents aplicacions del formigó. En aplicacions més exigents, com és el cas del formigó estructural, la normativa actual permet, exclusivament, l'ús d'àrids gruixuts reciclats procedents de formigó, excloent, per tant, la utilització dels àrids reciclats mixts (material granular procedent del tractament de runa amb presència majoritària de formigó i material ceràmic).

A l'annex num.18 de la Instrucció EHE-08 "Formigons d'ús no estructural", s'estableix que es podrà utilitzar fins a un 100% d'àrid gruixut reciclat procedent de la trituració de residus de formigó, sempre que compleixin les especificacions definides a l'annex núm.15 "Recomanacions per a la utilització de formigons reciclats".

Pel que fa a les propietats no recollides a l'annex esmentat, es mantenen les mateixes especificacions que per a l'àrid natural (coeficient dels Angeles, terrossos d'argila, contingut de clorurs i contingut de sulfats). Observant d'altres normatives, es detecta que les limitacions a Espanya són molt més restrictives que a la resta de països, pel fet que les especificacions de la EHE s'estableixen per als àrids reciclats procedents de formigó.

L'esborrany de conclusions del projecte CLEAM [12] proposa una modificació en els requisits que actualment estableix la EHE-08 en el seu annex núm.15 per als àrids reciclats, permetent la utilització d'àrids reciclats mixtos amb la conseqüent modificació d'algunes limitacions.

## 2.5. PLANTES DE RECICLATGE I CLASSIFICACIONS

Observant les dades estadístiques sobre la gestió dels Residus de Construcció i Demolició (RCD) a Espanya, destaca el creixement exponencial d'aquesta activitat en els últims anys. A principis de 2007, hi havia més de 195 plantes de tractament autoritzades, en tot el país [13]. En termes generals, aquestes plantes utilitzen diferents processos de tractament i un ampli nombre de solucions que s'adapten a les diferents àrees geogràfiques. Tot i això, la base tecnològica dels sistemes de tractament segueix sent la mateixa en el disseny dels diferents processos.

Es prenen tres criteris diferents per a classificar les plantes de reciclatge. Aquest criteris s'exposen a continuació:

### 2.5.1. Classificació de les plantes de tractament de RCD segons el grau d'automatització

La bibliografia especialitzada en el tractament de RCD [14], estableix tres nivells de tecnologia a les plantes d'acord amb el grau de separació de residus.

Així, d'una banda, es contemplen nivells de tecnologia més baixa que es basen en equips de trituració autònoms que consten exclusivament de tremuges d'alimentació, sistemes de trituració, separadors magnètics i cintes transportadores.

Els equips de nivell intermedi, o plantes semifixes, consten d'equipament mòbil en un emplaçament fix.

Finalment, els nivells superiors de tecnologia estan concebuts per tractar residus d'entrada de naturalesa molt variada. Es tracta de plantes estacionàries compostes per alguns dels següents equips: sistemes de trituració (d'impacte o mandíbules), cabines de triatge i separadors pneumàtics (hidrociclons i bufadors), hidràulics (per flotació) i/o magnètics. Més recentment, s'han incorporat novetats tecnològiques dirigides a una major separació de la fracció de guix durant el procés de tractament. És el cas de sistemes automàtics de detecció per infrarojos, i posterior eliminació mitjançant bufadors, de guix i d'altres impureses.

### 2.5.2. Classificació de les plantes de tractament de RCD segons el grau d'admissió

Basant-se en el RCD acceptat per a ser tractat a la planta de reciclatge, s'estableixen tres tipologies de residus originals que s'associen a tres categories de plantes de tractament de RCD. Les condicions d'entrada dels RCD es refereixen, en general, a la quantitat d'impureses orgàniques (plàstic, paper, fusta, tèxtils) i inorgàniques (vidre, guix, asfalt) que poden presentar-se als residus originals [15].

Sobre aquest criteri, s'estableixen les següents categories:

- **Categoria 1: Plantes que accepten RCD molt variat (VM).**
  Aquest grup està format per les plantes que accepten RCD d'ambdues naturaleses, orgànica i inorgànica, amb independència de quina estigui en major proporció.

- **Categoria 2: Plantes que accepten RCD variat en el qual predomina una fracció pètria (M).**
  S'inclou en aquesta categoria les plantes que accepten RCD amb una major part de fracció pètria (formigó, ceràmica i pedra natural), encara que es permet que els nivells d'impureses superin el 10%. Malgrat que aquestes plantes poden acceptar lliuraments de runes amb uns nivells d'impureses de més del 10% (en pes), en general es neguen RCD en què el contingut de guix sigui apreciable. Això té, per objectiu, restringir el contingut de compostos de sulfats en el producte final. Encara que, cal indicar que el càlcul del grau d'impureses no segueix, en general, una base de procediments estandarditzats. De fet, la classificació de residus en el lliurament a la planta es basa en una inspecció visual i, per tant, depèn de la interpretació subjectiva del personal de la planta.

- **Categoria 3. Plantes que només accepten RCD seleccionats (S).**
  S'entén RCD seleccionat com el residu que es compon fonamentalment de runes de naturalesa pètria (formigó, pedra natural i/o materials ceràmics), amb nivells d'impureses inferiors al 10%. De la mateixa manera que a la categoria anterior, el càlcul del nivell d'impureses depèn de valoracions subjectives, sense que estiguin establerts uns procediments estandarditzats per valorar-ho.

### 2.5.3. Classificació de les plantes de tractament de RCD segons la seva capacitat de transport

#### 2.5.3.1. Plantes fixes

Les plantes fixes són instal·lacions permanents amb cintes i elements transportadors, equips de separació, d'eliminació i, sovint, dos tipus de matxucadores (Veure figura 1). Els residus de construcció i demolició, per tant, han de ser transportats fins aquestes plantes.

Figura 1: Planta fixa de reciclatge de Sant Julià de Ramis [16].

Aquestes plantes fixes són les que presenten una major capacitat de producció (de l'ordre de 600t/h). A la figura següent es mostra l'esquema d'una planta fixa tipus (Veure figura 2) amb una definició breu de les etapes i actuacions associades al seu funcionament [1].

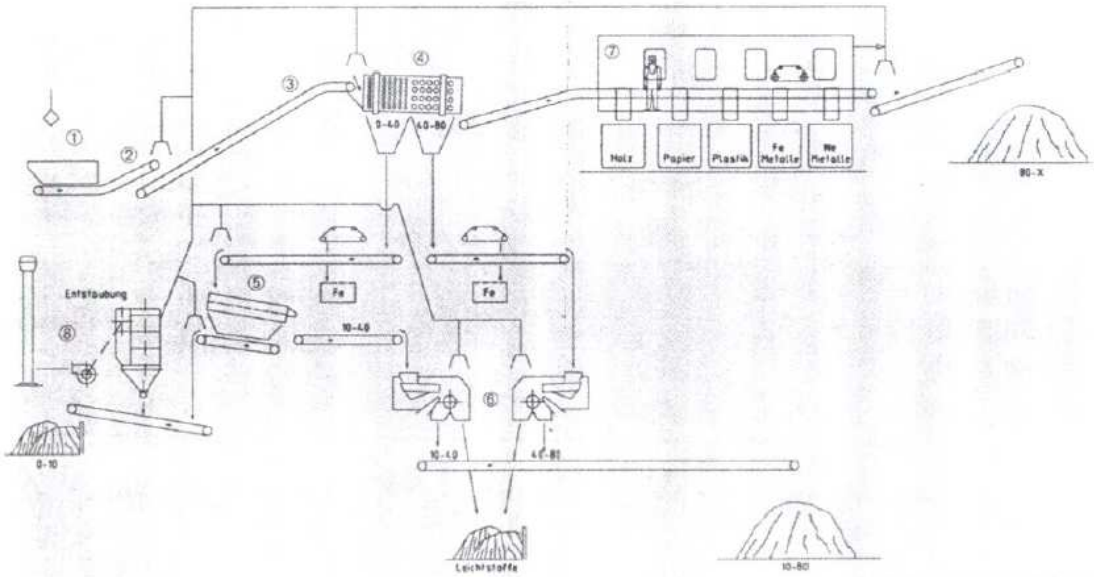


Figura 2: Esquema d'una planta fixa [1].

- **Llistat tipus d'Operacions:**

1. El residu barrejat arriba en un contenidor. És descarregat al terra on les peces grans de fusta, parets aïllants o metalls poden ser extretes amb una grua. Els blocs grans es fraccionen amb un martell per tal d'aconseguir una mida adequada.
2. Transport del material amb les cintes fins a la boca d'alimentació.

3. Transport del material amb les cintes fins al tambor de garbellat i separació.
4. Separació de les fraccions 0-40 i 40-80 amb el tambor.
5. Separació magnètica de la fracció fèrria. Garbellat fi que separa les fraccions 0-10 i 10-40.
6. Es garbellen les fraccions 10-40 i 40-80 i es trituren per impacte. Les fraccions lleugeres, com paper, plàstic, poliestirè expandit i goma espuma són separades amb aire i es reuneixen a la central d'extracció de pols.
7. Separació manual de la fracció >80. Els materials separats (metalls, paper, cartró, guix, materials d'aïllament o plàstics) es passen a contenidors.
8. Instal·lació d'eliminació de pols.

### 2.5.3.2. Plantes mòbils

Les plantes mòbils presenten una línia més simple que les fixes. Essencialment, tenen una única entrada d'alimentació, una cinta transportadora, una matxucadora i un o dos garbells (Veure figura 3). Algunes plantes mòbils consisteixen en dos vehicles transportadors: el primer porta la matxucadora amb cintes d'alimentació i descàrrega i el segon el garbell i diverses cintes.

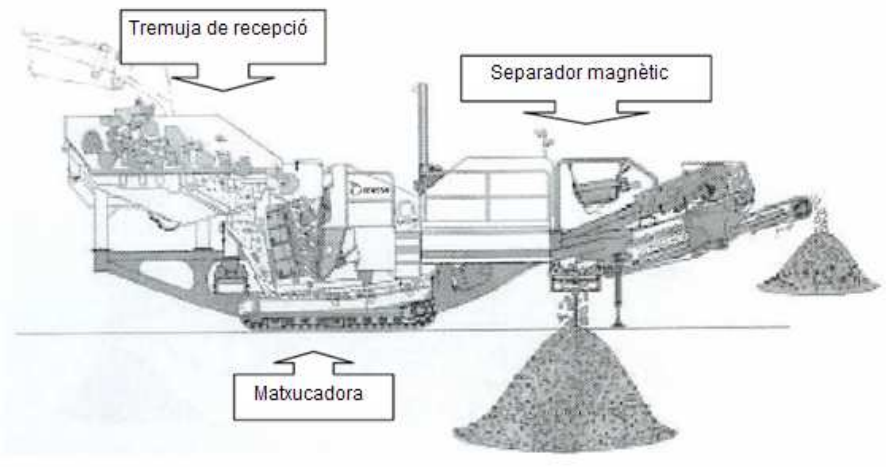


Figura 3: Planta mòbil de tractament de RCD [1].

Les plantes mòbils, amb una producció de 150 a 200 t/h, tenen un volum de sortida inferior al de les fixes. Les plantes mòbils, però, presenten l'avantatge de que es poden portar fins al lloc de la demolició (edifici, carretera, etc.) (Veure figura 4) [2].

Figura 4: Planta mòbil de reciclatge en un tram de l'AVE a Llinars del Vallès [16].

## 2.6. PROCESOS DE PRODUCCIÓ D'ÀRIDS RECICLATS

Els processos per a la producció dels àrids reciclats es realitzen en plantes de tractament que, en línies generals, són similars a les emprades en àrids naturals, tot i que incorporen de manera específica elements per a la separació d'impureses i altres contaminants [2].

Els diferents sistemes de tractament i les tècniques emprades per a la selecció, separació i classificació dels residus que entren a les plantes s'exposen a continuació:

### 2.6.1. Trituració dels RCD

L'objectiu de les plantes és, en general, l'obtenció d'un material granular amb una mida inferior a 40 mm. La maquinària emprada per a assolir-ho sol ser similar a la utilitzada en les instal·lacions de la mineria, com ara pedreres i graveres, però està adaptada a les condicions del material reciclat.

Independentment de quin sigui el procediment de trituració utilitzat, cal tenir en compte que el procés de demolició ha de proveir mides individuals que puguin ser acceptades a la planta per un triturador primari (1200mm per a la majoria de plantes fixes i de 400 a 700mm per a plantes mòbils). Alhora, aquest procés determina també diferents característiques de l'àrid reciclat com són, entre d'altres, la forma i la distribució de les partícules i la quantitat de morter adherit. Les trituradores utilitzades poden ser: de mandíbula, d'impacte o de con.

- **Sistemes de trituració [1-2,14-15]:**

  - **Molí d'impacte:** trituració per impacte rotatiu, que permet l'entrada de materials molt heterogenis, amb característiques físiques molt diferents. Les trituradores d'impacte produeixen àrids de bona qualitat. El principal inconvenient que presenten és que les partícules pateixen un gran desgast amb els impactes i produeix una gran quantitat de fins (fins a un 40%).
  - **Trituradores de mandíbula:** sistema de matxucat basat en el moviment d'una mandíbula mòbil sobre una altra de fixa, sobre la qual cau el material abans de ser aixafat. Les trituradores de mandíbules produeixen àrids amb una bona distribució granulomètrica per a la seva utilització en formigó, ja que el contingut de fins és reduït (inferior al 10%), encara que la forma de les partícules és més angulosa.
  - **Trituradora de con:** basat en triturar a través de l'impacte de martells lliures i oscil·lants units a un eix giratori. El disseny permet l'entrada de qualsevol tipus de material, encara que la presència de materials de baixa granulometria pot produir bloqueigs. A les trituradores de cons, la mida màxima de l'àrid admès és aproximadament de 200 mm, pel que són més apropiades per a un matxucat secundari. En aquest mètode es produeix una quantitat intermèdia de fins (menor del 20%).

Poden existir un o diversos processos de trituració en els quals es combinin diferents tipus de maquinària. A la següent taula es mostren les combinacions més freqüents de trituració primària i secundaria (Veure taula 1) [1,2].

Taula 1: Combinació de tipus de trituradores [2].

| TRITURACIÓ PRIMARIA | TRITURACIÓ SECUNDÀRIA |
|---|---|
| Trituradores de mandíbula | Trituradora de con |
| Trituradores de mandíbula | Molí d'impacte |
| Molí d'impacte | Molí d'impacte |
| Molí d'impacte | - |

L'elecció de cadascuna d'elles depèn, essencialment, de tres factors: consum d'energia, cost de producció i qualitat del producte. A la taula següent es resumeixen les principals característiques de cadascun dels tres tipus de sistemes de trituració (Veure taula 2) [1-2].

Taula 2: Comparació entre els diferents tipus de sistemes de trituració [2].

| PROPIETAT | MANDÍBULA | CON | IMPACTE |
|---|---|---|---|
| Capacitat | Alta | Intermèdia | Baixa |
| Cost de producció | Baix | Intermedi | Alt |
| Desgast | Baix | Baix | Alt |
| Qualitat de l'àrid | Baixa | Intermèdia | Alta |
| Contingut de fins | Baix | Intermedi | Alt |
| Consum d'energia | Baix | Intermedi | Alt |

Com a bon exemple es pot prendre la combinació més utilitzada als Països Baixos, on compten amb una àmplia experiència en el reciclatge. La matxucadora de mandíbules s'adopta per a la trituració primària degut a la seva alta capacitat i reduït cost, i la d'impacte per a la trituració secundària, aconseguint així una millor qualitat de l'àrid degut a una major eliminació del morter adherit [1].

### 2.6.2. Eliminació d'impureses

Un aspecte clau del processat de l'àrid reciclat respecte al àrid natural és el constituït per l'eliminació de les impureses i altres contaminants. Les tècniques normalment utilitzades per a aquest propòsit deriven, en gran mesura, de la seva aplicació a la indústria minera.

Prèviament, durant la demolició, s'ha d'evitar que la runa de formigó es barregi amb terra i aconseguir que es redueixi al màxim el contingut d'altres materials de construcció no desitjats, la qual cosa repercutirà favorablement en la reducció de tractaments posteriors [2].

Els residus de demolició incorporen certa quantitat d'impureses i contaminants com metalls, fusta, plàstics, guix, que han de ser eliminats per al seu ús com àrid per a formigó, la qual cosa es pot aconseguir utilitzant diferents tècniques depenent de la naturalesa d'aquests.

- **Equips de separació i control [1-2,14-15]:**

  - **Pantalles:** permeten la separació dels materials per la seva mida. Per a això, tenen una malla a la superfície de la pantalla a través del qual els materials passen degut a la vibració o al pendent de l'equip.

  - **Classificació manual:** Un procés de selecció manual utilitzat, principalment, per rebutjar els materials no desitjats (matèria orgànica, guix, etc.) durant el procés. Permet rebutjar els contaminants de mida superior.

- **Garbells:** s'utilitza per a la eliminació de terra, paper, plàstic i altres contaminants dels residus per a deixar un estoc de material petri net. Mitjançant el garbellat s'eliminen les impureses més petites i es podran realitzar en diverses etapes perquè resulti més efectiu.

- **Ventiladors:** utilitzat per a l'eliminació de materials més lleugers com ara paper, fusta, plàstic o cartró a través de mitjans pneumàtics. Es poden aplicar dos variants, un corrent d'aire horitzontal que arrossega els materials lleugers (figura 5.b) alternativament amb un corrent vertical (figura 5.a).

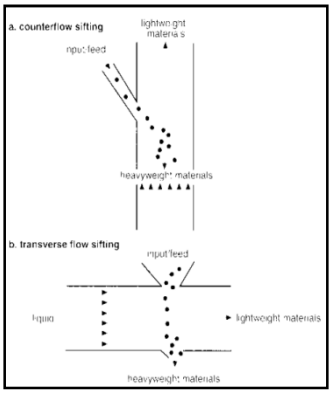


Figura 5: Separadors en sec per aire [1].

- **Ciclons:** es crea un cicló d'aire que separa, gràcies a la centrifugació, els elements més lleugers com ara paper, fusta, plàstic i cartró.

- **Flotació:** La separació per via humida s'efectua en un bany d'aigua. El sistema Aquamator (Veure figura 6) fa passar els materials a contracorrent. Però presenta com a inconvenient la generació de fangs.

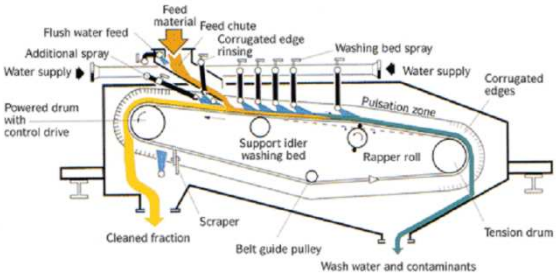


Figura 6: Sistema Aquamator [2].

- **Separació per infrarojos:** procés de selecció molt precís dels materials no desitjats, com els materials no ferruginosos, plàstics o guix per mitjà de sensors d'infrarojos propers (NIR) (Veure figures 7 i 8).

Figura 7: Procés d'eliminació automàtic de les fraccions de guix [15].

Figura 8: Detall del procés d'eliminació de guix [15].

- **Separació magnètica:** es pretén detectar i eliminar els materials ferruginosos ja que els residus de demolició contenen importants quantitats d'acer que poden ser separats magnèticament. La separació sol tenir lloc just després de la trituració, abans que l'acer solt pugui malmetre les cintes transportadores. El material triturat es transportat per una primera cinta fins a una magneto rotatòria o fixa (veure tipus de magnetos Steinert a la figura 9).

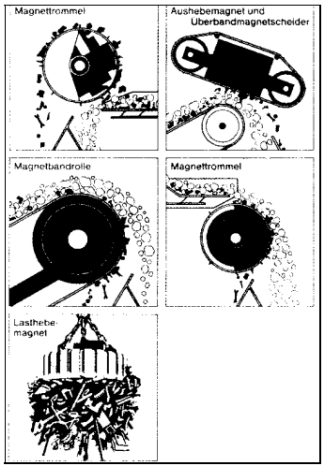


Figura 9: Tipus de Magneto Steinert [1].

- **Separació per Corrents de Foucault:** Als residus pot trobar-se també alumini, coure, plom, zinc i aliatges. Aquests metalls no són magnètics i la forma més moderna de separació és per corrents de Foucault (veure figura 10). Es basa en fer travessar els metalls per un camp magnètic variable que provoca la creació en el metall conductor de les corrents de Foucault produint la separació per repulsió dels metalls no magnètics i no ferruginosos. El material més senzill de separar és l'alumini.

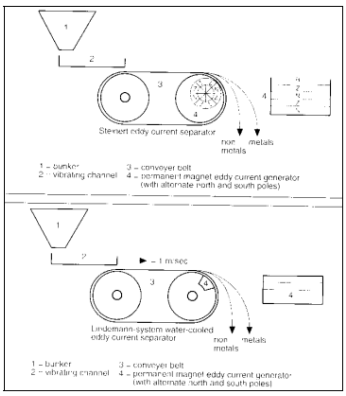


Figura 10: Separadors per corrents de Foucault [1].

- **Recirculació dels agregats:** permet que els agregats que no són de la mida desitjada siguin retornats a un punt anterior del procés per obtenir la granulometria idònia o la neteja adequada.

El formigó que constitueix la matèria primera per a l'obtenció del nou àrid reciclat de formigó ha de ser examinat, si és possible, prèviament al seu processat. En especial pel que fa a la possible presència d'àrids potencialment reactius davant els alcalins. S'ha d'evitar també el formigó de ciment aluminós i determinar els continguts originals de sulfats i clorurs [2].

La qualitat de l'àrid obtingut depèn de la qualitat del material processat i pot contenir com a principals contaminants fusta, guix, argila, alumini i plàstics, sense oblidar el vidre que, segons el tipus, pot comportar reaccions àlcali-sílice futures. De la mateixa manera, en el cas de tenir consciència de processos patològics en el formigó original, aquest ha de ser rebutjat com a matèria primera. En el cas de material procedent de carreteres, el principal problema pot ser degut a l'asfalt i alguns contaminants orgànics perjudicials. Cal, per tant, limitar els percentatges màxims de contaminants i analitzar amb una freqüència adequada els àrids obtinguts.

La presència de guix ha de ser reduïda a través de severs criteris d'acceptació prèvia del residu de demolició, rebutjant la partida que contingui quantitats importants d'aquesta naturalesa. A més, el guix del material fi ja triturat pot ser eliminat durant el rentat. En qualsevol cas el control de sulfats a l'àrid reciclat resultant ha de ser sistemàtic.

Actualment, existeixen noves tendències per a l'eliminació d'impureses, com ara, la separació magnètica per densitat. El principi de la separació magnètica en sec de materials de morter i ceràmics es basa en la susceptibilitat magnètica d'aquests. Es troba ja patentat un dispositiu, anomenat Frantz Isodynamic, que permet separar per propietats para i diamagnètiques materials de entre 10 micres i 2 mm eficaçment. Tenint en compte que la separació es basa en els continguts d'òxid de ferro, el sistema pot aplicar-se també per separar ceràmics i formigó ja que els continguts d'òxid de ferro del morter i del formigó són sensiblement iguals [2].

## 2.7. TIPUS D'ÀRIDS RECICLATS I PROPIETATS

### 2.7.1. Tipus d'àrids reciclats

En general s'entén àrid reciclat com a l'àrid resultant del processament de materials inorgànic utilitzats prèviament com a materials de construcció [1]. La matèria primera per a la seva obtenció són, doncs, els materials petris generats com a residu durant els processos de construcció i demolició .

#### 2.7.1.1. Classificació dels àrids segons el seu origen

- **Àrid reciclat de formigó:**

Àrid que s'obté de matxucar, garbellar i processar els residus de formigó de ciment amb clinker Portland i àrids naturals en plantes de reciclatge. Aquest àrid deriva d'un sòl tipus de material, el formigó, la composició del qual és heterogènia (ciment, aigua, àrids, additius i addicions), de manera que el producte resultant no es pot considerar un material uniforme. Les diferències de composició poden ser notables en funció de la proporció de morter present al residu. També cal tenir en compte que es permet la presència d'altres components secundaris fins una certa proporció. Per exemple, a la normativa holandesa es contempla un contingut mínim del 80% de formigó processat i que tingui una densitat superior a 2100kg/m$^3$ [1-2].

- **Àrid reciclat ceràmic:**

Àrid que s'obté de processar residus amb presència predominant de material ceràmic. Segons la normativa holandesa el 85% d'aquest àrid ha de tenir una densitat superior a 1600kg/$m^3$ per evitar materials excessivament porosos i lleugers [1-2].

- **Àrid reciclat mixt:**

Àrid definit per la normativa holandesa com a àrid que ha de contenir un percentatge de formigó superior al 50% amb una densitat seca superior a 2100kg/m3 i no més del 50% de materials petris reciclats de diferent naturalesa que el formigó, incloent el material ceràmic, amb una densitat seca superior a 1600kg/m3 [1-2].

#### 2.7.1.2. Classificacions segons les diferents normatives

A la següent taula es pot observar un quadre-resum de les normatives més representatives que s'han utilitzat a l'estudi (Veure taula 5). Cadascuna d'aquestes normatives estableix un criteri de classificació propi a partir del qual s'estableixen les restriccions als resultats dels assajos que en deriven de les seves propietats. Alhora aquestes classificacions també són usades a cadascun dels països on són vàlides per establir criteris d'aplicació d'aquests àrids reciclats.

Segons el projecte de norma japonesa "Ús d'àrid reciclat i formigó reciclat ", es distingeixen dos grans grups segons el seu ús: en obra civil o bé en edificació. Dins aquests grups, s'estableixen classificacions de l'àrid en funció d'aplicacions més concretes. L'àrid tipus 1 és el de major qualitat i es pot emprar en formigó en massa o armat amb finalitats estructurals, mentre que l'àrid tipus 2 és adequat per a formigó en massa o llenques de formigó i el tipus 3 per a formigons pobres [4].

Segons les especificacions de la RILEM, es distingeixen tres tipus d'àrids reciclats segons la seva composició o origen (Veure taula 3):

Taula 3: Classificació dels àrids reciclats segons la RILEM [17].

| TIPUS | ORIGEN |
|---|---|
| TIPUS I | Àrids procedents majoritàriament de runes de fàbrica de maó (definits en aquest capítol com a àrid ceràmic). |
| TIPUS II | Àrids procedents majoritàriament de runes de formigó (contingut de ceràmics <10%). |
| TIPUS III | Àrids compostos per una barreja d'àrids naturals superior al 80% i àrids TIPUS I inferior al 10% (o fins a un 20% d'àrid TIPUS II). |

Les especificacions belgues per a l'ús de l'àrid reciclat [18] són molt similars a les recomanacions de la RILEM, establint una classificació de l'àrid reciclat en dos grups, GBSB-I i GBSB-II. L'àrid tipus GBSB-I correspondria al àrid Tipus I de la RILEM, compost principalment de runes de fàbrica de maó, mentre que l'àrid GBSB-II és similar al tipus II, i correspondria a àrid procedent majoritàriament de formigó (Veure taula 4).

Taula 4: Classificació dels àrids reciclats segons la norma belga [18].

| TIPUS | ORIGEN |
|---|---|
| GBSB-I | Àrids procedents de residus ceràmics |
| GBSB-II | Àrids procedents majoritàriament de runes de formigó. |

Taula 5: Especificacions internacionals per als diferents tipus d'àrids [4, 10, 17-21, 26].

| REQUISITS | RILEM | | | Japó | | | Bèlgica | | Hong Kong | Alemanya | | | | Regne Unit | | Australia | Brasil | España |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tipus I | Tipus II | Tipus III | Tipus 1 | Tipus 2 | Tipus 3 | GBSB I | GBSB II | | Tipus 1 | Tipus 2 | Tipus 3 | Tipus 4 | RCA | RA | | | |
| Densitat seca (kg/m3) | ≥1500 | ≥2000 | ≥2400 | ≥2200 | | | ≥1600 | ≥2100 | ≥2000 | ≥2000 | | ≥1800 | ≥1500 | - | - | ≥2100 | - | - |
| Absorció (%) | ≤20 | ≤10 | ≤3 | ≤3 | ≤5 | ≤7 | ≤18 | ≤9 | ≤10 | ≤10 | ≤15 | ≤20 | - | - | - | ≤6 | ≤12 | ≤7 |
| Contingut de material de densitat <2200 kg/m3 (%) | - | ≤10 | ≤10 | | | | | ≤10 | | | | | | | | | | |
| Contingut de material de densitat <1800 kg/m3 (%) | ≤10 | ≤1 | ≤1 | | | | ≤10 | ≤1 | | | | | | | | | | |
| Contingut de material de densitat <1000 kg/m3 (%) | ≤1 | ≤0,5 | ≤0,5 | | | | ≤1 | ≤0,5 | ≤0,5 | | | | | ≤0,5 | ≤1 | | | ≤1 |
| Contingut de materials estranys (metalls, vidres, bituminosos) (%) | ≤5 | ≤1 | ≤1 | Requisits segons la taula 12 | | | ≤1 | | ≤1 | Requisits segons la taula 13 | | | | ≤1 | ≤1 | ≤2 | ≤3 | ≤1 |
| Índex de llenques | | | | | | | | | ≤40 | | | | | | | | | |
| Índex de Los Angeles | | | | | | | | | | | | | | | | | | <40 |
| Índex del 10% de fins | | | | | | | | | 100kN | | | | | | | | | |
| Contingut de metalls (%) | ≤1 | ≤1 | ≤1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contingut de matèria orgànica (%) | ≤1 | ≤0,5 | ≤0,5 | | | | ≤0,5 | | | | | | | | | | | |
| Contingut de fins (<0,063mm) (%) | ≤3 | ≤2 | ≤2 | | | | <5 | <3 | <4 | <4 | | | | <5 | <3 | | | ≤1,5 |
| Pèrdua per rentat (%) | | | | ≤1 | | | | | | | | | | | | <1 | | |
| Resistència a les gelades (%) | | | | ≤12 | ≤40 / ≤12 | - | | | | | | | | | | | | |
| Contingut de sorres (<4mm) (%) | ≤5 | | | | | | | | <5 | | | | | | | | | ≤5 |
| Contingut de sulfats (SO3) (%) | ≤1 | | | | | | <1 | | <1 | | | | | ≤1 | ≤1 | | ≤1 | ≤0,8 |
| Contingut de clorurs (%) | | | | | | | <0,06 | | <0,05 | <0,04 | | | <0,15 | | | | ≤1 | ≤0,05 |
| Contingut d'asfalt (%) | | | | | | | | | | | ≤1 | | | ≤5 | ≤10 | | | ≤1 |
| Contingut de material ceràmic (%) | ≤100 | | | | | | ≤100 | | | | ≤30 | ≤80 | | ≤100 | ≤100 | | | ≤5 |
| Desclassificats inferiors (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | ≤10 |

La norma anglesa BS 8600:02 "Specification for constituent materials and concrete" [19] estableix la classificació de l'àrid segons el seu origen, distingint entre àrid procedent de formigó (RCA) i àrid reciclat procedent de materials ceràmics o barreja d'ambdós (RA). En aquesta norma no es fixa un contingut màxim d'àrid reciclat, tot i que prescriu que l'àrid obtingut a partir d'una combinació d'àrid natural i àrid reciclat ha de complir les especificacions generals que s'estableixen per l'àrid natural, a més dels requisits que es recullen a la taula 5 per l'àrid reciclat.

La norma alemanya per la seva banda, estableix quatre categories d'àrid reciclat, en funció també de la composició d'aquest, segons els criteris que es recullen a la següent taula (Veure taula 6) [20].

Taula 6: Classificació dels àrids reciclats segons la norma DIN 4223.

| TIPUS | ORIGEN |
|---|---|
| TIPUS 1 | Àrids procedents majoritàriament de runes de formigó o àrids minerals (≥ 90%) i amb un contingut màxim de clinker, ceràmica i / o gres calcari del 10%. |
| TIPUS 2 | Àrids procedents majoritàriament de runes de formigó o àrids minerals (≥ 70%) i amb un contingut màxim de clinker, ceràmics i / o gres calcari del 30%. |
| TIPUS 3 | Àrids procedents majoritàriament de runes de ceràmics (≥ 80%), amb un contingut màxim de materials procedents de formigó o àrids minerals del 20%. |
| TIPUS 4 | Àrids procedents de la barreja de RCD amb un contingut mínim del 80% de material procedent de formigó, àrids minerals o productes ceràmics. |

### 2.7.2. Propietats dels àrids reciclats aplicats a la fabricació de formigó:

#### 2.7.2.1. Granulometria

La distribució granulomètrica té molta importància perquè té un efecte directe sobre les propietats del formigó, com ara la treballabilitat, la porositat, la permeabilitat, la resistència, el grau de compactació i la durabilitat [22-23]. Una distribució contínua indica que l'àrid està uniformement graduat per a totes les mides, el que permet una major ventall de possibilitats d'interacció entre les partícules, i proporciona un grau de compacitat i una resistència mecànica més elevats [5].

La granulometria dels àrids reciclats varia segons el procés de trituració que es realitzi, i pot ésser modificada mitjançant petits ajustaments de l'obertura de les trituradores. Tal i com s'ha comentat anteriorment, les trituradores d'impacte són les que redueixen de forma més notòria la mida de les partícules, alhora però, produeixen més quantitat de fins, seguides de les matxucadores de con i de les de mandíbules. El percentatge d'àrid gruixut que s'obté sol variar entre el 70% i el 90% de l'àrid total produït. Aquest percentatge depèn, també, de la mida màxima de l'àrid gruixut reciclat produït i de la composició del residu original. La fracció gruixuda té, en general, una corba granulomètrica adequada, que es pot englobar dins dels fusos granulomètrics que recomanen algunes normes internacionals (ASTM, prEN) [1].

LA EHE-08 [10] especifica les distribucions granulomètriques òptimes per a graves, sorres o fins que poden ser utilitzats per a la fabricació de formigó. És necessari que la relació D/d, on D i d són les mides màxima i mínima de l'àrid respectivament, sigui superior a 1,4. Aquesta norma té com a propòsit obtenir una classificació uniforme a totes les mides, la qual cosa condueix a una major compacitat, i per tant, una major resistència i durabilitat del formigó. Això implica que la corba de distribució granulomètrica sigui contínua i no uniforme, garantint així propietats òptimes tan al formigó fresc com a l' endurit.

També es recomana a la normativa espanyola que les sorres presentin unes corbes de distribució que es trobin dins els fusos estipulats per a aquesta tipologia.

Segons les recomanacions japoneses per a l'ús d'àrid reciclat [4], la granulometria de l'àrid s'ha d'ajustar als valors que apareixen a les següents taules, diferenciant les especificacions establertes per a formigó d'edificació (Taula 7) i formigó per a obra pública (Taula 8):

Taula 7: Requisits granulomètrics de l'àrid reciclat per a la fabricació de formigó per a edificació segons la norma japonesa [4].

| Mida màxima | Percentatge en pes que passa (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30 | 25 | 20 | 10 | 5 | 2,5 |
| 25 | 100 | 90-100 | 50-90 | 10-60 | 0-15 | 0-5 |
| 20 | - | 100 | 90-100 | 10-60 | 0-15 | - |

Taula 8: Requisits granulomètrics de l'àrid reciclat per a la fabricació de formigó en obra pública segons la norma japonesa [4].

| Mida màxima | Percentatge en pes que passa (%) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 40 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 2,5 |
| 40 | 100 | 95-100 | - | - | 35-70 | - | 10-30 | 0-5 | - |
| 25 | - | - | 100 | 95-100 | - | 30-70 | - | 0-10 | 0-5 |
| 20 | - | - | - | 100 | 90-100 | - | 20-55 | 0-10 | 0-5 |

La norma belga [18] estableix també els següents fusos granulomètrics per a l'àrid reciclat procedent de formigó (Taula 9):

Taula 9: Fusos granulomètrics per a l'àrid reciclat segons la norma belga.

| Mida màx. | Percentatge en pes que passa (%) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Garbell | 63 | 31,5 | 22,4 | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 |
| 0-4 | - | - | - | - | 100 | 90-98 | - | 50-85 | - | 0-20 | - |
| 4-8 | - | - | - | 100 | 90-100 | 0-20 | 0-2 | - | - | - | - |
| 4-16 | - | - | 100 | 95-100 | 30-65 | 0-15 | 0-5 | 0-4 | - | - | - |
| 4-32 | 100 | 98-100 | 70-95 | 45-75 | 15-40 | 0-10 | - | 0-4 | - | - | - |
| 8-16 | - | - | 100 | 90-100 | 0-20 | 0-2 | - | - | - | - | - |
| 16-32 | 100 | 90-100 | - | 0-20 | 0-2 | - | - | - | - | - | - |

En general, les granulometries dels àrids reciclats se situen dins dels fusos que fixen les diferents recomanacions tant per a àrid natural com per a àrid reciclat [2].

Els resultats obtinguts per Martín-Morales et al. [5] reflecteixen que, per una banda, les mostres d'àrids reciclats més gruixudes procedents de les plantes de la província de Granada presenten corbes contínues i no uniformes que garanteixen les propietats del formigó. D'altra banda, la sorra reciclada que estudien queda fora dels fusos a causa d'un percentatge baix de partícules de mides superiors a 0,5mm. Opten una modificació de la mostra, eliminant-ne les mides de partícula de més de 4 mm, provocant un augment de partícules a la zona on es produïa la desviació i, per tant, l'encabiment de les sorres dins els fusos permesos.

#### 2.7.2.2. Contingut de fins (<0.063mm)

L'àrid reciclat genera fins durant la seva manipulació a causa de l'aparició de petites partícules que es desprenen. Segons alguns assaigs espanyols [12], la generació de fins sobre fraccions gruixudes ja

classificades en el laboratori pot variar entre 0,27% i 1,14%, situant-se en la majoria dels casos per sota del límit de l'1,5% de l'àrid gruixut establert per la EHE. Segons la classificació de la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per a formigó" aquests àrids gruixuts es classifiquen dins la categoria $f_{1,5}$.

La presència de partícules fines a la superfície de l'àrid reciclat pot originar problemes d'adherència entre aquest i la pasta de ciment, a més de provocar un augment de la quantitat d'aigua de pastat necessària.

Les recomanacions o normes que inclouen especificacions sobre aquesta propietat (norma belga [18], anglesa [19], RILEM [17], alemanya [20] i recomanacions de Hong Kong [21]) estableixen un límit més alt de fins per l'àrid reciclat gruixut, admetent entre un 2% i un 5% segons es recull a la taula 5, afavorint així el compliment d'aquesta especificació.

Segons el grup d'investigació CLEAM [12], en canvi, els àrids reciclats mixts presenten un contingut de fins molt variable, comprès entre el 0,5% i el 18%. Asseguren que segons la classificació de la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per a formigó", el 85% dels àrids reciclats mixtos són de categoria $f_{10}$.

El percentatge de fins tenen un màxim del 1,5% en el cas d'àrids gruixuts o entre 6% i 16% per a les sorres, depenent del tipus (arrodonit o cantellut) i la classe d'exposició [10]. Totes les mostres de Martín-Morales i Col. [5] compleixen aquests requisits i es classifiquen dins la categoria $f_{1,5}$ a excepció d'una fracció. Per tant, conclouen que les mostres d'àrid reciclat emprades no compleixen tots els requisits EHE-08 en relació a l'avaluació dels fins. No obstant, si la fracció esmentada és considerada com a àrid fi, també compleix amb els requisits establerts i es troba a la categoria $f_{10}$.

#### 2.7.2.3. Contingut de sorres (<4mm)

Després d'obtenir la fracció gruixuda en l'àrid reciclat, aquest segueix presentant petits percentatges de sorra (partícules menors de 4 mm) degut a la disgregació que pateix l'àrid en manipular-se. Els valors més freqüents oscil·len entre 0,5-2% [24].

La Instrucció EHE admet per l'àrid convencional fins a un 10% de desclassificats inferiors, entre els que es podrien comptabilitzar també aquestes partícules de sorra generades en la manipulació de l'àrid reciclat. El percentatge de desclassificats admissible en l'àrid reciclat ha de ser inferior a causa del efecte perjudicial que ocasiona en les propietats del formigó.

Així doncs, les recomanacions de la RILEM [17] i les especificacions de Hong Kong [21] per a la utilització d'àrid reciclat, estableixen un límit del 5% per al contingut de partícules de mida inferior a 4 mm a l'àrid gruixut reciclat (Taula 5).

#### 2.7.2.4. Forma i textura superficial

La presència del morter que queda adherit als àrids del formigó original provoca que la textura dels àrids reciclats sigui més rugosa i porosa que la dels àrids naturals. El coeficient de forma de l'àrid reciclat és similar al que pot presentar l'àrid natural [25-27], trobant-se en els estudis consultats un rang de valors de [0,17-0,35]. La Instrucció espanyola EHE indica que el coeficient de forma de l'àrid gruixut no ha de ser inferior a 0,20; de manera que l'àrid reciclat complirà, en general, aquesta especificació.

Els estudis que han utilitzat el mètode de l'índex de llenques per determinar la forma de l'àrid gruixut han trobat, però, diferències entre l'àrid natural i l'àrid reciclat, sent menor el valor de l'índex de llenques en el cas del àrid reciclat [25]. Això es pot deure al fet que el morter que queda adherit a les cares planes que presenten les partícules tendeix a augmentar el gruix de les partícules amb forma de llosa i arrodonir-les, disminuint així el percentatge de llenques. Aquest percentatge pot situar-se al interval de 7-9%, complint el límit de 35% que estableix la EHE. Les úniques recomanacions que estableixen una especificació per a aquesta propietat són les de Hong Kong, que fixen un valor màxim de l'índex de llenques del 40% [2].

Els àrids reciclats presenten, en general, una forma adequada on, amb alguna excepció, la majoria pot classificar-se dins la categoria $Fl_{35}$ de la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per a formigó", amb índex de llenques entre el 10-45% [28-30]. El grup CLEAM [12] ha trobat uns índex de llenques a les seves mostres que oscil·len entre 6-30%. En general, com més gran és el contingut de material ceràmic, major és el contingut de llenques de l'àrid reciclat. En tots els casos, els àrids mixts analitzats pel grup CLEAM [12] pertanyen a la categoria $Fl_{35}$.

En el cas dels àrids reciclats, la forma de les partícules també ve determinada en gran mesura per l'equip de trituració. Els molins d'impacte utilitzats en les plantes de reciclatge produeixen àrids en forma de cub. L'experiència a les plantes de reciclatge ha demostrat que el formigó tendeix a trencar-se en petites blocs sense generar llenques.

Martín-Morales et al. [5] no determinen l'índex de llenques. Aquest estudi garanteix que els límits de la EHE-08, pel que fa a la forma de les partícules, són complerts per les seves mostres d'àrids d'estudi. El fet que els ho permet afirmar és que les seves mostres van ser produïdes en una planta de reciclatge amb un molí d'impacte i, com s'ha esmentat, les partícules tendeixen a trencar-se en petits blocs sense generar llenques.

#### 2.7.2.5. Densitat i absorció

La densitat de l'àrid reciclat [24] sol oscil·lar entre 2100 i 2400 kg/m$^3$, mentre que la densitat saturada amb superfície seca varia entre 2.300 i 2.500 kg/m$^3$, de manera que en tots els casos es poden considerar aquests àrids de densitat normal (no lleugers), per presentar una densitat superior a 2.000 kg/m3, segons estableix la norma UNE 146.120:97 "Áridos para hormigones. Especificaciones ".

L'absorció és una de les propietats físiques de l'àrid reciclat que presenta una major diferència pel que fa al àrid natural, a causa de l'elevada absorció de la pasta de ciment que queda adherida a l'àrid natural i dels ceràmics [2]. Els valors habituals d'absorció [24] estan compresos entre 4-10%, incomplint en la majoria dels casos el límit del 7% que estableix la EHE.

Els principals aspectes que influeixen tan en la densitat com en l'absorció de l'àrid reciclat són:

- La mida de les partícules: les fraccions més petites presenten menor densitat i una major absorció (per a un mateix d'origen) que les fraccions més gruixudes [2,27].

- La qualitat del formigó original: els formigons de baixa relació a/c (i per tant de elevada resistència), solen donar lloc a àrids reciclats de més qualitat, i per tant amb major densitat i menor absorció. Estudis realitzats [26] demostren que una mateixa planta que processi formigons de diferent

qualitat (10-50 N/mm2) pot produir àrids amb un rang del coeficient d'absorció molt ampli (entre 10% i 5% respectivament).

- Les tècniques de processat: quan en el processament de l'àrid gruixut reciclat es realitzen successives etapes de trituració, s'elimina un major contingut de morter i la qualitat del àrid millora substancialment, observant-se un descens de l'absorció i un increment de la densitat, que poden assolir valors propers als de l'àrid natural.

A la taula 5 es recullen les diferents especificacions que estableixen cadascuna de les recomanacions o normes sobre àrid reciclat. En ella s'observa que la majoria estableixen el control d'aquests àrids a través de la seva densitat i la seva absorció, a més de la composició i del contingut d'impureses. Totes elles estableixen límits més tolerants a l'absorció de l'àrid reciclat, que van des del 6% que estableix la "Guia Australiana per a la Utilització de Àrid Reciclat (RCA) per Formigó "[31], fins al 10% que estableix la RILEM [17] i altres recomanacions que han acceptat els seus criteris (Hong Kong) [21]. La densitat mínima limita també entre 2.000 kg/m3 (RILEM) i 2.200 kg/m3 (norma japonesa).

Segons el projecte de norma japonesa "Ús d'àrid reciclat i formigó reciclat "[4], per a l'ocupació d'àrid reciclat en formigó s'estableix una densitat mínima de 2.200 kg/m3 i diferents límits per a l'absorció en funció de la aplicació d'aquests àrids (taula 5).

Segons les especificacions de la RILEM [17], per als tipus I i II s'estableixen uns requisits més tolerants tant en absorció com en densitat, mentre que si s'utilitza l'àrid reciclat en combinació amb àrid natural (Tipus III) es realitza el control al àrid conjunt (barreja d'àrid natural i àrid reciclat), sense controlar directament l'àrid reciclat però establint requisits d'absorció més restrictius a la barreja. Segons aquestes recomanacions, tant l'àrid reciclat Tipus II com el Tipus III es poden emprar en formigó en massa i formigó armat. Per l'àrid Tipus III no s'estableix limitació a la resistència del formigó i per l'àrid tipus II es limita la classe resistent a H-50, sempre que es compleixin els requisits addicionals de durabilitat quan el formigó hagi d'estar exposat a ambients agressius.

Les especificacions belgues [18] exigeixen al primer grup d'àrids, GBSB-I, una absorció inferior al 18% i al segon, GBSB-II, una absorció màxima del 9%. Les aplicacions d'aquest últim tipus es limitarien a formigons de classe resistent H-30 per a interiors i ambients no agressius. Aquestes especificacions, tot i que segueixen la mateixa tendència que la RILEM, són menys tolerants tant en la qualitat de l'àrid com en la qualitat del formigó reciclat.

La norma japonesa [4] és la més restrictiva de les tres, ja que admet un valor màxim de la absorció del 7% i estableix a més una classificació més detallada de l'àrid reciclat, arribant a exigir fins a un límit màxim d'absorció del 3% per a aplicacions estructurals.

La norma alemanya [20], per la seva banda, estableix les especificacions sobre la densitat i absorció que es recullen a la taula 5. Per als àrids procedents, majoritàriament, de formigó (Tipus 1 i Tipus 2) la màxima absorció permesa és del 10% i 15% respectivament. En ambdós casos, la densitat mínima exigida és 2.000 kg/m$^3$. Aquesta norma, a diferència de la resta, estableix especificacions per a l'absorció d'aigua després de 10 minuts. Aquest fet, juntament amb els elevats valors que permet, fa d'aquesta norma la menys restrictiva en termes de coeficient d'absorció de l'àrid reciclat.

Estudis espanyols [24] i la EHE [10] indiquen que un límit recomanable per a l'absorció de l'àrid reciclat seria del 7%. Aquest límit selecciona àrids reciclats de major qualitat, que a més presentaran un menor coeficient dels Angeles, un menor contingut de fins i de partícules lleugeres.

Pel que fa referència als àrids mixtos, l'absorció és una de les propietats físiques que presenta una major diferència pel que fa al àrid natural. La major part de les normes internacionals estableixen límits a l'absorció dels àrids reciclats mixtos, si bé no hi ha consens entre elles (taula 5), variant entre un 12% i un 20%, molt per sobre del límit que estableix actualment la EHE- 08 del 7% tant per a formigons estructurals com no estructurals.

L'absorció d'aigua dels àrids reciclats mixtos analitzats en l'estudi del grup CLEAM [12] varia entre un 2% i un 14% considerant les 36 mostres analitzades. Només el 36% d'aquestes mostres compleixen el límit del 7% d'absorció. Asseguren, per tant, que s'hauria d'establir un nou límit més adequat per a les aplicacions no estructurals, sempre que es garanteixi una qualitat adequada del formigó, i així es permeti donar sortida per a aquesta aplicació a un major volum de material granular reciclat.

A més de l'absorció, les normatives estableixen també límits a la densitat seca dels àrids reciclats, entre 1500 i 1600 kg/m3 per als àrids ceràmics, i una densitat mínima de 1.800 kg/m3 per als àrids mixtos (taula 5). Tots els resultats experimentals del grup CLEAM [12] compleixen aquests requisits, en canvi, d'altres valors recopilats en l'estudi bibliogràfic [28-29] presenten densitats inferiors i absorcions, en general, superiors a les recomanades.

A l'estudi de Martín-Morales et al.[5], els valors de l'absorció d'aigua varien d'una fracció a l'altre. Tot i això, els valors obtinguts es troben a la franja compresa entre 3-12%, la qual és una franja similar als valors esmentats anteriorment. Van trobar resultats superiors als límits establerts per la EHE-08 a totes les mostres excepte a una fracció de partícules de mida inferior. Asseguren observar valors d'absorció més elevats a les mostres amb partícules de mida superior. Una possible explicació a aquest fet seria l'elevada quantitat de morter adherit als àrids en mostres de partícules de mides més grans i, per tant, amb una capacitat d'absorció d'aigua elevada. Tal i com disminueix la mida de les partícules, la quantitat de partícules de ciment adherides també disminueix alhora que també ho fa la capacitat d'absorció.

#### 2.7.2.6. Coeficient de Los Angeles

L'àrid reciclat presenta un elevat coeficient de Los Angeles ja que durant l'assaig s'elimina tot el morter que queda adherit al àrid, a més de la pèrdua de pes pròpia de l'àrid natural [35].

El coeficient de Los Angeles s'usa per a avaluar la resistència a l'abrasió, el desgast, i l'impacte dels agregats. El valor esperat de l'àrid reciclat és superior al de l'àrid natural i pot situar-se en un rang molt ampli, entre 25-45% [12,25-27], depenent entre altres factors de la grandària de partícula i la qualitat del formigó original, així com del propi coeficient de Los Angeles de l'àrid natural que contingui.

Generalment, el coeficient de Los Angeles augmenta en les fraccions de menor mida [27], ja que són les que presenten un major percentatge de morter adherit a l'àrid natural. En disminuir la relació a/c del formigó original, el coeficient de Los Angeles també disminueix, i es poden trobar diferències en el valor del coeficient de fins a un 10% en els resultats corresponents a un ampli rang de relacions aigua/ciment (1,2-0,4) [2].

La EHE estableix un coeficient màxim de 40% per a la seva aplicació en formigó estructural i no estructural, de manera que l'àrid gruixut reciclat, en general, podrà complir aquesta especificació, tot i que cal realitzar controls per detectar aquelles partides que ho incompleixin. En aquest sentit, la limitació del 7% d'absorció selecciona partides amb coeficient de Los Angeles sempre menor de 40% [24].

Segons s'observa a la taula 5, les normatives consultades no estableixen especificacions addicionals al coeficient de Los Angeles, establint algunes d'elles, com la australiana o la de Hong Kong un altre tipus d'assajos per avaluar la resistència dels àrids.

En general, els valors més elevats corresponen a mostres amb un elevat contingut de partícules amb morter, i els valors més reduïts a mostres majoritàriament d'origen ceràmic. Totes les mostres examinades pel grup CLEAM [12]s'inclouen en la categoria $LA_{50}$ però cal destacar que el 70% es troba dins de la $LA_{40}$ que recull la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per formigó".

Els resultats de la prova de Los Angeles per a les mostres estudiades per Martín Morales et al. [5] compleixen els requisits de la normativa i són similars als dels altres estudis. Totes les mostres d'aquest estudi presenten coeficients de Los Angeles superiors a 20, el valor típic d'àrids naturals d'alta qualitat [32-33]. Asseguren que la presència de residus de ceràmica i de morter adherit a les partícules d'àrid natural en les mostres del seu estudi causen una menor resistència a la fragmentació. Tot i així, es poden classificar dins la categoria $LA_{30}$.

#### 2.7.2.7. Contaminants i impureses

Un dels majors problemes que plantegen els àrids reciclats és que sovint poden incorporar impureses i contaminants que influeixen negativament en les propietats del formigó. Aquests contaminants poden ser molt variats, com ara plàstic, fusta, guix, maons, vidre, matèria orgànica, alumini, asfalt, etc.

Aquestes impureses produeixen en tots els casos un descens de la resistència del formigó, més accentuat si es tracta de calç o argila, i en menor mesura quan es tracta d'asfalt o pintures. A més de reduir la resistència, depenent del tipus de impuresa es poden donar altres problemes, com reaccions àlcali-àrid (vidre), atac per sulfats (guix), despreniments superficials (fusta o paper), elevada retracció (sorres argiloses) o mal comportament glaç-desglaç (maons) [1-2].

La presència d'impureses depèn en gran mesura del tipus d'àrid reciclat. L'àrid procedent de runes de formigó presenta generalment un reduït contingut de impureses, mentre que la incorporació de runes ceràmiques, tot i ser en petits percentatges, augmenta generalment la presència de diferents materials com fusta, guix o vidre. Cal afegir que les fraccions més fines solen incorporar-ne un major contingut.

Per determinar el contingut d'impureses en funció de la seva naturalesa, es poden adoptar els normes següents:

- Per determinar el contingut d'impureses més gran es pot adaptar la norma UNE-EN 933-7:99 "Determinació del contingut de petxines" o bé la UNE 7133-58 "Determinació de terrossos d'argila". Caldrà quantificar i classificar les impureses que contingui l'àrid reciclat, com ara vidre, metall o asfalt.

- S'ha elaborat un projecte de norma europea específica per a la determinació de la composició dels àrids reciclats, prEN 933-11 *"Test for geometrical properties of Aggregates". Part 11: Classification test form the constituents of coarse Recycled Aggregates "*. Aquesta norma estableix la següent classificació per als constituents de l'àrid reciclat:

Taula 10: Classificació dels materials constituents de l'àrid reciclat segons EN 933-11.

| DESIGNACIÓ | ORIGEN |
|---|---|
| Rc | Formigó, productes de formigó i morter. |
| | Unitats d'obra de formigó |
| Ru | Àrids no tractats, pedra natural. |
| | Àrids tractats amb conglomerats hidràulics |
| Rb | Unitats d'obra d'argila (maons, teules, etc.) |
| | Unitats d'obra de silicat càlcic |
| | Formigó airejat no flotant |
| Ra | Materials bituminosos |
| Rg | Vidre |
| Rx | Altres: cohesius (argiles i sorres) |
| | Varis: Metalls, fusta, plàstic i cautxú. |
| | Guix |

No hi ha uniformitat en les limitacions al contingut d'impureses de les diferents normatives, establint límits entre l'1% i el 5% (Taula 5).
La EHE [10] estableix els següents continguts màxims per als diferents tipus d'impureses esmentades anteriorment en l'àrid gruixut:

- Contingut màxim de partícules lleugeres: 1% del pes total de la mostra.
- Contingut màxim de terrossos d'argila: 0,25% del pes total de la mostra.
- Compostos totals de sofre expressats com S: 1% del pes total de la mostra (contingut de sulfats solubles en àcid expressats com $SO_3^{=}$: inferior al 0,8%).

Segons les recomanacions per a la utilització d'àrid reciclat *"Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production"* d'Austràlia [31], s'estableix un contingut màxim d'impureses totals (incloent ceràmics, asfalt i altres contaminants) del 2% per als àrids.

Altres especificacions com la RILEM per als àrids tipus II i III [17], les de Hong Kong [21] o les normes Belgues [18], estableixen per a l'àrid procedent de runes de formigó un contingut màxim de impureses de l'1% (en les que s'inclouen metalls, vidre, materials lleugers i asfalt). La RILEM també proposa un límit del 5% per als àrids tipus I. I la norma Belga indica, a més, que el contingut de pedra natural, formigó, maçoneria o materials ceràmics (exclòs asfalt) ha de ser superior al 95% per als dos tipus de àrids que inclou aquesta norma (GBSB I i GBSB II).

A més, s'estableixen límits al contingut màxim de materials de densitat inferior a 2.200 kg/m3, 1.800 kg/m3 i 1.000 kg/m3, controlant així, indirectament, el contingut d'impureses. Totes aquestes especificacions relatives a la composició de l'àrid reciclat estan recollides a la taula 5.

La norma BS 8500-2:02 "*Specification for constituent materials and concrete*" [19], estableix igualment uns continguts màxims per als diferents materials que componen l'àrid reciclat, establint una distinció entre àrid reciclat procedent de formigó (RCA) i àrid reciclat procedent de residus ceràmics o barreja (RA) segons es recull a la següent taula (Veure taula 11). Per al primer dels tipus, RCA, quan el material s'obté del processament de formigó amb característiques conegudes, i l'àrid no tingui contaminants, els únics requisits seran la granulometria i el contingut de fins.

Taula 11: Composició dels àrids reciclats segons la norma BS 8500-2:02

| ELEMENTS | MÀXIM CONTIGUT D'IMPURESES % PROPORCIÓ EN MASSA | |
|---|---|---|
| | RCA | RA |
| Material ceràmic | 5 | 100 |
| Partícules lleugeres | 0,5 | 1 |
| Asfalt | 5 | 10 |
| Altres materials (vidre, plàstic, metalls, etc.) | 1 | 1 |

La norma japonesa [4] sobre àrid reciclat estableix valors màxims pel contingut d'impureses en funció de la seva naturalesa. Així, es distingeixen els següents grups (Veure taula 12):

Taula 12: Composició dels àrids reciclats segons la norma japonesa.

| ELEMENTS | MÀXIM CONTIGUT D'IMPURESES % PROPORCIÓ EN MASSA |
|---|---|
| Contingut de guix o altres impureses de densitat <1950kg/m³. | 10 kg/m³ |
| Contingut d'asfalt, fusta, plàstics, paper, pintura i d'altres partícules retingudes al tamís 1,2 mm o de densitat <1200kg/m³. | 2 kg/m³ |

La norma alemanya DIN 4223 limita també el contingut d'impureses de l'àrid reciclat, segons els requisits recollits a la taula (Veure taula 13):

Taula 13: Composició dels àrids reciclats segons la norma DIN 4223.

| ELEMENTS | | MÀXIM CONTIGUT D'IMPURESES % PROPORCIÓ EN MASSA | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | TIPUS 1 | TIPUS 2 | TIPUS 3 | TIPUS 4 |
| Formigó, àrids minerals en conformitat amb DIN 4226-1 | | ≥90 | ≥70 | ≤20 | ≥80 |
| Clinker, ceràmics sense porus. | | ≤10 | ≤30 | ≥80 | |
| Gres calcari | | | | ≤5 | |
| Contingut de materials com ceràmics o formigó lleuger o porós, estuc, ciment, escòria porosa o pumita. | | ≤2 | ≤3 | ≤5 | ≤20 |
| Continguts externs | Asfalt | ≤1 | ≤1 | ≤1 | |
| | Mineral: com vidre, ceràmics, escòria de metall o guix d'estuc. | ≤2 | ≤2 | ≤2 | |
| | No mineral: com goma (cautxú), matèria plàstica artificial, metall, fusta, restes de plantes, paper o altres materials. | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤1 |

Els valors habituals per al contingut total d'impureses en assaigs espanyols [12,24] oscil·len entre 4-12% en àrids procedents de runes de formigó amb ceràmics, i entre 0,4-2,4% en àrids procedents exclusivament de runes de formigó.

Com és previsible la composició dels àrids reciclats mixtos és més variable que la dels procedents de formigó. Els àrids reciclats mixtos poden presentar una gran heterogeneïtat en les seves propietats a causa, principalment, de la qualitat del material que entra a la línia de reciclatge i del tipus de

processament efectuat a la planta. No obstant, mitjançant el control d'aquests dos paràmetres, es pot obtenir un àrid d'una qualitat adequada per a certes aplicacions.

Els àrids reciclats mixtos analitzats a l'estudi del grup CLEAM [12] contenen entre 2-54% de materials ceràmics a la seva composició. Altres components majoritaris són els àrids procedents de formigó (amb un percentatge d'àrid més morter entre 17-75%), i àrids naturals (entre 2-73%).

El contingut de partícules lleugeres de l'àrid reciclat mixt pot ser elevat, el grup d'investigació CLEAM ha obtingut percentatges entre 1-14% [12]. Tot i que, reconeixen que la major part de les partícules detectades al seu assaig corresponen a partícules de morter lleugeres i partícules ceràmiques amb densitat inferior a 2000kg/m$^3$, per la qual cosa, no es considera un assaig adequat per avaluar el contingut de partícules que poden donar lloc a la formació de butllofes i espellofats superficials. Aconsellen la seva determinació a través de l'assaig de composició de l'àrid reciclat o mitjançant l'assaig de partícules amb densitat inferior a 1000kg/m$^3$, mantenint el límit de l'1% establert en la EHE-08.

Al mateix estudi del grup CLEAM [12], les impureses que presenten majors percentatges en les mostres analitzades són l'asfalt i el guix, amb percentatges de fins a un 17% i un 19% respectivament. L'actual limitació al contingut d'asfalt (1%) de la EHE és molt exigent per als àrids mixts i, de les mostres del seu estudi, un 57% incompleix aquest requisit. Recomanen, per tant, augmentar aquest límit al 5% (valor que estableix la normativa anglesa).

El contingut de guix màxim, encara que limitat pel contingut màxim de sulfats, pot prendre un valor orientatiu del 2,1% obtingut a partir de la relació estequiomètrica (% de $SO_3$ procedent del guix x 2,15 = % de guix). Els valors obtinguts pel grup CLEAM oscil·len entre 1-10%, en la seva majoria, tot i trobar mostres que presentaven un 19%. Per la seva banda, el contingut de vidre obtingut de les seves mostres ha estat inferior a l'1% en el 80% de les mostres analitzades. I finalment, els continguts d'altres impureses presenten uns totals entre 0,2 i 3%.

Tal i com s'ha comentat, la qualitat del material que arriba a la planta de reciclatge influeix de forma considerable sobre la quantitat d'impureses presents al àrid resultant. Vegas et al. [15] han observat que en general, els àrids reciclats procedents de plantes que només accepten RCD seleccionats presenten baixos nivells d'impureses, amb un contingut inferior al 3% en totes les seves mostres analitzades.

A l'estudi de Vegas [15], han trobat una àmplia gamma de nivells d'impureses dins les plantes que accepten RCD barrejats i les que n'accepten de molt barrejats. Es tracta de mostres que presenten un contingut de partícules no desitjades, com ara guix, argila i terra i/o material asfàltic, que pot representar mínims entre el 2-3% i màxims del 8% a les plantes de RCD barrejat i del 10% a les de RCD molt barrejat.

### 2.7.3. Propietats dels àrids reciclats aplicats a ferms de carreteres

#### 2.7.3.1. Composició dels àrids reciclats

En l'estudi de Jiménez et al. [11], es comparen el àrids reciclats de formigó i mixtes com a material per a subbases de carreteres seguint les prescripcions del PG-3.

Pel que fa a la composició dels àrids reciclats de formigó, presenten una naturalesa molt pura, ja que més del 96% de les partícules són de formigó; dels quals el 71-76% són àrids naturals amb morter

adherit i del 20 a 25% són àrids naturals sense ciment adherit. Els components restants que són considerats impureses resulten molt baixos, entre 1,6 i 3,5% de material ceràmic, entre 0 i 0,3% d'asfalt, entre 0 i 0,1% de guix, i quantitats menyspreables de fusta, vidre, plàstic, metall, sòl natural i partícules lleugeres. S'afirma que la presència d'impureses en àrids reciclats procedents d'una planta de reciclatge fixa és normal, encara que el baix percentatge d'aquests components és deu al fet que els residus de formigó van ser processats separadament dels mixtos.

La composició trobada a les mostres d'àrid mixt examinades per Jiménez et al. [11] no divergeix gaire de les trobades en mostres del mateix tipus esmentades en l'apartat anterior. El percentatge d'àrids naturals amb ciment adherit (formigó i morter) varia entre un 15-51%, l'àrid natural sense morter de ciment adherit entre un 22-53%, i els materials ceràmics, que en aquest tipus d'àrid no es consideren com a impureses, entre un 21-27%. El contingut d'impureses dels àrids mixtes amb els que han treballat presenten nivells superiors als valors que han trobat en àrids procedents de formigó. Les impureses totals que han mesurat representen: 0,4-1,5% de guix, 0,9-9,2% d'asfalt, 0,2-2,1% de terra natural, i menys del 0,1% de fusta, vidre, plàstic, metall i partícules lleugeres.

En l'estudi de Vegas et al. [34] d'àrids mixts per a carreteres, s'han examinat 18 mostres d'àrids reciclats mixtes procedents de plantes de reciclatge del País Basc. Les dades resultants mostren una presència predominant de formigó, amb valors migs situats al voltant del 57%. A més, el material de naturalesa ceràmica constitueix el 19%, el àrids no consolidats, aproximadament, el 16%, l'asfalt volta el 6%, mentre que la suma dels percentatges de guix, vidre, metall i fracció orgànica (fusta, plàstic i paper) és menor o igual al 2%. Tenint en compte la dispersió que existeix en els resultats de composició en mostres de àrids mixtes, els resultats de Vegas no suposen tampoc cap contradicció.

#### 2.7.3.2. Granulometria

Perquè els àrids reciclats es puguin utilitzar com a material granular en subbases de carreteres, la seva granulometria ha d'estar compresa en algun dels fusos granulomètrics fixats per l'article 510 del PG-3 [9], i que es designen com ZA25 i ZA20.

Tots els àrids estudiats per Jiménez et al. [11] es troben dins el fus granulomètrics ZA25, exceptuant una de les mostres d'àrids mixtes que és dins el fus granulomètric ZA20, motiu que assignen al seu contingut de partícules fines. Així doncs, totes les seves mostres, tant de formigó com mixtes, compleixen els requisits granulomètrics establerts a la norma.

Una altra condició que cal acomplir és que el material garbellat pel sedàs 0,063 mm de la UNE-EN 933-2:1996 sigui menor que els dos terços del garbellat pel sedàs 0,250 mm de la mateixa norma. Tots els àrids reciclats, de formigó i mixtes de Jiménez et al. [11] compleixen aquesta condició.

Els àrids reciclats mixtes estudiats per Vegas et al. [34] estan definits per unes distribucions granulomètriques continues amb percentatges de la fracció fina (<4 mm) per sota del 30%. Tot i això, la distribució inicial de la granulometria dels àrids reciclats es veu modificada durant el procés de compactació, amb un increment del percentatge de fins procedents dels materials menys resistents, com ara la pasta de ciment, els ceràmics i el guix. En aquesta situació, els fins de les mostres d'aquest estudi arriben a valors propers al 60% en condicions de densitat màxima i humitat òptima.

#### 2.7.3.3. Coeficient de Los Angeles

Tal i com s'ha comentat, el coeficient de Los Angeles depèn principalment de l'abrasió soferta pels àrids naturals, el formigó i els materials ceràmics. Es posa de manifest que en l'assaig de Los Angeles tot el morter adherit dels àrids reciclats de formigó es polvoritza. Aquest efecte pot ser atribuïble a la seva naturalesa porosa, a les esquerdes i a una menor resistència del morter adherit [35].

D'aquests àrids reciclats estudiats per Jiménez et al. [11] només els que provenen de formigó (33-34%) i una sola mostra d'àrids mixtes (31%) aconsegueixen valors dins la normativa (35%). La resta de mostres d'àrids reciclats mixtes superen el límit del coeficient de Los Angeles, obtenint valors al voltant del 40%. Suposen al seu estudi que l'excepció del 31% que observen en una mostra de reciclat mixt es deu, probablement, a un major contingut d'àrids naturals i asfalt. Els resultats són similars als obtinguts per Vegas et al. [30]: 41-43%. D'acord amb això, el coeficient de Los Angeles l'identifiquen com una de les propietats més limitants pels àrids reciclats mixtos d'aquests estudis.

Vegas et al. [34], d'altra banda, estableix relacions entre la composició i la resistència a la fragmentació. Àrids reciclats mixtes amb un percentatge de ceràmics entre el 20% i el 30% mostren valors de resistència a la fragmentació, en la majoria dels casos, entre 35% i 40%. Els àrids reciclats de naturalesa mixta amb percentatges de ceràmics per sota del 5% i amb un contingut d'asfalt superior al 8% presenten resistències a la fragmentació menors a un 35%. Verifiquen la influència de la quantitat de ceràmics sobre la resistència a la fragmentació ja que en els seus resultats es pot corroborar com existeix una relació lineal entre els dos paràmetres esmentats. D'altra banda, la generació d'una major quantitat de fins ceràmics té un efecte favorable en la consolidació del material compactat, pel fet que aquests fins ajuden a desencadenar la reacció putzolànica [34].

#### 2.7.3.4. Relació entre humitat i densitat

Les corbes que relacionen la humitat i la densitat seca obtingudes a partir de l'assaig Pròctor modificat són més pronunciades i, alhora, més sensibles als canvis en el contingut d'humitat en àrids naturals i àrids reciclats de formigó. En canvi, els àrids reciclats mixts es caracteritzen per corbes més planes i menys sensibles als canvis, la qual cosa concorda amb d'altres estudis internacionals[11].

Els àrids reciclats de formigó tenen una major densitat seca i menor absorció d'aigua que els mixts. En els àrids reciclats de formigó, la densitat de partícules després del assecat a l'estufa de la fracció gruixuda és major que la de la fracció fina, mentre que en els mixts ambdues densitats són similars. En els àrids reciclats de formigó l'absorció d'aigua de la fracció fina és superior a la de la fracció gruixuda, mentre que en els mixtos no s'aprecien diferències significatives. En l'assaig Pròctor modificat l'àrid reciclat de formigó té una major densitat seca màxima i menor contingut d'humitat òptima que els àrids mixts, tot i que, les diferències són mínimes.

Segons Vegas et al. [34] àrids reciclats mixtes mostren densitats màximes i humitats òptimes de compactació similars a les de sòls naturals i altres tipus de material granular. En el seu treball es pot observar com augmenta la humitat òptima alhora que augmenta la suma de material ceràmic i de ciment dels àrids reciclats mixts.

D'altra banda, aquests components semblen induir una major densitat de compactació, com a conseqüència d'un augment en la generació de fins procedents de la fragmentació d'aquests

components. Aquests resultats mostren tendències similars als obtinguts al treball portat a terme per Poon i Chan [36] amb mescles de formigó i maons.

#### 2.7.3.5. California Bearing Ratio (CBR)

Els àrids reciclats compactats a la humitat òptima són sotmesos a l'assaig Califòrnia Bearing Ratio (CBR) sota condicions de 4 dies d'inundació i usant una sobrecàrrega de 4,5. Tots els àrids reciclats assajats per Jiménez et al [11] tenen una alta capacitat de càrrega, coincidint amb els resultats d'altres autors [34,36]. Els reciclats de formigó tenen un valor major (97-138%) que els mixts (62-94%), probablement a causa de la menor resistència de les partícules de formigó i ceràmiques. L'inflament després de 4 dies d'inundació resulta inferior al 0,06%, el que es pot considerar insignificant i garanteix l'estabilitat de les capes estructurals.

Segons altres autors aquesta alta capacitat de càrrega es pot atribuir tan a les reaccions putzolàniques comentades anteriorment com a certes propietats hidràuliques que es mantenen gràcies al ciment contingut a les partícules de formigó de l'àrid. Però Vegas et al. [34] es decanten més pel segon motiu després d'observar resultats similars en àrids amb diferents continguts de material ceràmic.

#### 2.7.3.6. Altres propietats:

Els àrids reciclats estudiats per Jiménez et al. [11] són no plàstics, i el seu coeficient de forma, partícules triturades i equivalent de sorra compleixen els límits establerts al PG-3. El coeficient de forma en els reciclats de formigó és més petit que en els mixtes.

En referència a la plasticitat, els agregats reciclats mixtes de Vegas et al [34] resulten ser no plàstics, coincidint amb els resultats obtinguts en l'estudi anterior.

Vegas et al. [34] afirmen que les diverses mostres d'àrids reciclats mixtes presenten valors de coeficients de forma que es troben per sota del límit (35), establert en l'article 510 del PG3 per al seu ús en subbases. També demostren que els àrids reciclats obtinguts a partir d'una composició del 100% de runa ceràmica presenta un índex de llenques al voltant de 40 [34].

El coeficient de netedat no és una propietat crítica segons Jiménez et al. [11]. Els àrids reciclats, en general, compleixen els límits establerts per la norma (art. 510 del PG-3), excepte els que presenten un major percentatge de partícules fines.

L'índex de col·lapse i inflament lliure mesurat per Vegas et al. [34] de les mostres amb un alt contingut de sal soluble es troben, respectivament, dins els límits de l'1% i 3%, que s'estableixen com a límits superior i inferior en l'article 330 del PG3. Aquesta evidència constitueix l'argument bàsic per explicar l'absència d'efectes nocius per la inestabilitat associada a un contingut de sals solubles a partir d'un 4%.

Finalment, Vegas et al. [30] també identifiquen el contingut de compostos de sofre totals com una propietat crítica dels àrids reciclats. No obstant això, el contingut de compostos de sofre totals dels àrids reciclats de formigó (0/2mm) trobats per Jiménez et al. [11] està per sota del límit del PG-3 (1%). Però totes les mostres d'àrids reciclats mixts contenen més de l'1% de compostos de sofre totals, fins i tot una mostra els presenta un màxim d'un 6%. Aquest màxim contingut en una mostra d'àrid mixt l'atribueixen a la major proporció de guix a les fracció més gruixudes i, també, al procés de tractament a

la seva planta de procedència. La introducció del pregarbellat en el procés de fabricació de l'àrid reciclat permet l'eliminació de la fracció fina, que generalment conté més quantitat de guix, el qual és el responsable de l'alt contingut de compostos de sofre totals dels àrids reciclats.

## 2.8. ÀMBIT D'APLICACIÓ DELS ÀRIDS RECICLATS

Encara que a Espanya, per exemple, l'ús d'aquest tipus de residus s'està convertint en una pràctica comuna, els àrids procedents de RCD s'utilitzen per a aplicacions no exigents i, principalment, com material per a bases i subbases en la construcció de carreteres o abocadors de residus sòlids.

Fins ara, molts investigadors han estudiat l'ús de formigó estructural realitzat amb àrids reciclats [23]. Alguns estudis es centren en les propietats dels formigons d'acord a les diferents proporcions dels àrids reciclats utilitzats i altres se centren en les característiques de l'àrid fi o gruixut que s'utilitza.

Pocs estudis han abordat situacions en què és necessari l'ús de formigó no estructural, especialment en la fabricació d'elements prefabricats que no estan subjectes a alts exigències mecàniques. Aquests casos presenten però un gran potencial per ser desenvolupats: l'ús com a blocs, llits de morter, paviments i altres finalitats no estructurals, com ara teules, peces per a canals, etc.

Encara que la indústria amb prou feines ha inclòs l'ús d'àrids reciclats en aquest tipus de producció, aquestes aplicacions dels RCD han de seguir desenvolupant-se i estenent-se. De fet, els avenços tecnològics obren possibilitats per a properes investigació sobre nous usos del RCD.

### 2.8.1. Fabricació de formigó

Moltes normatives no permeten l'ús d'àrids reciclats mixtes o ceràmics en formigó estructural. D'altres, com l'holandesa [2], toleren l'ús d'àrid reciclat ceràmic en formigons no estructurals ja que aquest tipus d'àrid es pot comparar a l'àrid lleuger. El seu ús provoca l'augment del contingut d'aire i obliga també a aplicar una relació aigua/ciment (a/c) superior. Alhora, la resistència a compressió i el mòdul d'elasticitat del formigó poden veure's afectats negativament [1].

L'únic tipus d'àrid reciclat que pot ser admissible per a formigó estructural és el de formigó i s'han imposat valors límits molt exigents per a les propietats que puguin tenir efectes negatius sobre la resistència i durabilitat. La resta de tipus d'àrids podrien ser utilitzats en altres aplicacions menys exigents.

L'ús de les fraccions fines de l'àrid reciclat implica, entre d'altres inconvenients, un augment molt notable de la retracció i de la fluència a causa de la major quantitat d'aigua que necessiten en la seva dosificació [2]. Per això, a Europa només es permet l'ús de les fraccions gruixudes, on es redueixen notablement les diferències respecte a un formigó amb àrids convencionals. En general, pot dir-se que els àrids reciclats de formigó de mida ≥ 4mm són potencialment aptes per a la fabricació de formigó, complint en el seu cas les especificacions complementàries per a cada aplicació concreta.

Per a la fabricació amb àrids reciclats procedents de formigó, Alaejos et al. [2, 23] asseguren que si la substitució de l'àrid gruixut convencional per àrid procedent del reciclatge de formigó és menor o igual al 20%, les propietats mecàniques romanen pràcticament constants. També afirmen que, quan s'utilitzin percentatges majors de substitució, els efectes sobre aquestes poden representar una limitació en diferents casos.

A l'estudi dut a terme per Khalaf i DeVenny [37], afirmen que sempre que les impureses dels àrids reciclats ceràmics es trobin dins dels límits acceptables, establerts per normes nacionals i internacionals, es poden dissenyar dosificacions per al formigó amb materials reciclats com a àrids gruixuts de la mateixa manera com es dissenyarien per a agregats tradicionals. No obstant això, afegeixen que és important que l'àrid reciclat es trobi en unes condicions de saturació amb superfície seca abans de l'inici de la fabricació, ja que els àrids reciclats ceràmics tenen una alta taxa d'absorció d'aigua. Recomanen avaluar les condicions d'humitat dels àrids reciclats ceràmics abans del seu ús per al formigó i, si s'escau, ruixar tot l'estoc d'àrids amb aigua per tal d'obtenir l'àrid en les condicions esmentades.

La revisió del mateix treball de Khalaf i DeVenny [37], demostra que el formigó es pot fabricar amb èxit utilitzant els àrids reciclats mixts. Conclouen que el formigó produït amb aquests àrids no respon tan bé com els formigons fabricats amb àrids naturals en termes de resistència. Tot i que, el formigó reciclat encara presenta una resistència adequada per a algunes aplicacions, amb l'avantatge afegit que els valors de densitat són menors. Suggereixen que aquestes característiques poden ser adequades per a situacions en què el pes propi és un problema i es requereix molt bona resistència al foc.

De la mateixa manera que Khalaf i DeVenny [37] pels ceràmics, el grup CLEAM [12] destaca la conveniència d'emprar els àrids presaturats fins a unes condicions de saturació amb superfície seca pels àrids mixts. Donada, també, l'elevada absorció que presenta l'àrid reciclat mixt, per evitar que durant el procés de pastat una certa quantitat d'aigua quedi retinguda pels àrids, generant un augment de la consistència i una reducció de la relació aigua/ciment efectiva, emeten aquesta recomanació inicial.

Conclouen que amb una dosificació adequada, es poden obtenir formigons de categoria resistent H15, amb un 100% d'àrid reciclat (amb fins a un 10% d'absorció). No obstant, la retracció del formigó reciclat pot assolir valors elevats. Això fa necessari que per a aplicacions on la retracció sigui una propietat important (especialment grans superfícies de formigonat) es prenguin mesures per evitar una fisuració excessiva del formigó.

La durabilitat d'aquest tipus de formigons és molt inferior a la d'un formigó convencional: la seva elevada porositat produeix uns valors molt alts en l'assaig de profunditat de penetració d'aigua, una elevada velocitat de carbonatació i una elevada penetrabilitat de clorurs. La resistència als sulfats resulta ser adequada, encara que lleugerament inferior al formigó convencional. Els assajos de lixiviació validen ambientalment la utilització d'àrids reciclats mixtos en la fabricació de formigons per a aplicacions en contacte amb el terreny [12].

L'estudi del CLEAM [12] recomana limitar l'ús de formigons reciclats amb àrids mixtes a formigons en massa. En el cas d'utilitzar algun tipus d'armadura, s'hauria de limitar el seu ús a una classe d'exposició I (no agressiva). Com a conclusió final, proposen una modificació en els requisits que actualment estableix la EHE-08 en el seu annex núm. 15 per als àrids reciclats, permetent la utilització d'àrids reciclats mixtos amb una absorció de fins a un 10% i un contingut d'asfalt inferior al 5%, eliminant l'especificació del 5% de material ceràmic.

La composició química dels àrids reciclats mixtes, en l'estudi de Martín-Morales et al. [5], és el seu punt més feble, sobretot pels valors alts de sulfats i clorurs. Afegeixen que per a complir els requisits de la EHE i augmentar la qualitat dels àrids reciclats haurien de barrejar-se amb àrids naturals. A més haurien de millorar-se mitjançant l'extracció manual de guix abans del procés de trituració dels RCD a la planta de tractament i mitjançant la immersió total en l'aigua per reduir els clorurs.

Poon i Chan [38] han presentat diferents estudis sobre la viabilitat d'usar àrids reciclats ceràmics, en forma d'àrid gruixut o bé, d'àrid fi. La majoria de maons i teules, després de la seva trituració, es transformen en àrids de partícules amb mida inferior a 5 mm, degut a les pobres propietats físiques que presenten.

Anteriorment, Poon i Chan [39] havien investigat l'ús de fins procedents de la trituració de maons per a la producció de blocs de formigó amb àrids reciclats de formigó per al paviment. Van concloure que l'ús de fins procedents de la trituració de ceràmics provocava una disminució de la densitat i de la resistència a compressió i un augment de l'absorció d'aigua dels blocs de paviment resultants. Tot i els inconvenients, asseguren que es possible substituir un 10% dels àrids fins reciclats de formigó per àrid fi procedent de la combinació maons i teules triturats per a la fabricació dels blocs de paviment i que aquests presenten un comportament satisfactori.

En el seu estudi, Poon i Chan [38], han avaluat els efectes de la substitució de fins naturals per fins ceràmics sobre les propietats del formigó fresc i endurit. No es recomana l'ús d'àrids fins reciclats juntament amb àrids gruixuts reciclats per a formigó. Troben pràctic reemplaçar només l'agregat fi natural per àrid fi reciclat, mentre que el contingut d'àrid gruixut natural es manté sense canvis.

Els resultats del seu estudi [38] els va permetre concloure que la resistència a compressió del formigó disminueix a partir de que l'àrid fi procedent de maons o rajoles triturades s'utilitza com a reemplaçament del 20% en pes de la sorra natural. El mòdul d'elasticitat del formigó elaborat amb àrid fi de maons i rajoles triturades és menor en comparació a la del formigó amb àrid natural. La contracció per assecat dels àrids en el formigó resulta inferior al 0,075%, el que indica que l'ús d'àrids fins de maons i rajola triturades amb un reemplaçament del 20% de sorra natural és adequat per a totes les aplicacions de formigó.

### 2.8.2. Ferms de carreteres:

Jiménez et al. [11] ha estudiat el potencial dels àrids reciclats procedents de RCD com materials per a la construcció d'esplanades i capes estructurals.

Els àrids reciclats procedents de residus de formigó i mixtos es classifiquen com a sòls tolerables [9] aptes per a la construcció de terraplens. A priori, afirmen que els àrids reciclats són materials que tenen una gran capacitat de suport (segons l'assaig CBR). En canvi, les principals propietats limitants esperades per aquests grup de treball són el contingut de sals solubles i de guix.

De les mostres assajades per Jiménez et al. [11], només els àrids reciclats de formigó compleixen els límits establerts al PG-3 per a capes granulars estructurals (subbase) a les categories de trànsit T3 i T4 (menys de 200 vehicles pesats / Dia).

Alguns àrids reciclats mixtes no compleixen per escàs marge algunes de les especificacions, a causa d'un alt contingut de compostos de sofre i a una menor resistència a la fragmentació. Recomanen el pregarbellat de la fracció fina abans de la trituració dels RCD mixtos per reduir el contingut de sofre total i millorar la qualitat. En canvi, troben que el pregarbellat dels RCD de formigó no té cap efecte sobre la qualitat dels àrids resultants. Finalment, tan sòls una de les mostra tampoc complia amb les especificacions les especificacions per al coeficient de neteja [11].

Vegas et al. [34] es proposen establir les normes tècniques que regeixin l'ús d'àrids reciclats mixtes en els trams de carretera, en concret, en capes d'anivellament no consolidades i aplicacions de subbase. [34]

Conclouen que els àrids reciclats mixts amb el contingut material de ceràmica per sota del 35%, el contingut de matèria orgànica per sota de 0.8%, i el contingut de sulfats solubles per sota de 0,4% constitueixen un material granular que és tècnicament viable per al seu ús en capes estructurals no consolidades de carreteres.

Aquest grup de treball pretén, a curt termini, continuar aquesta investigació centrant-se en les condicions d'ús d'àrids reciclats d'aquest tipus en aplicacions de capes consolidades amb ciment i calç. Aplicant, però, criteris més estrictes amb pel que fa al comportament mecànic i a la durabilitat.

Vegas i Col. [30] indiquen, en anteriors estudis, que les propietats més crítiques dels àrids reciclats de RCD per al seu ús com a material granular en capes estructurals són el contingut de sofre i la resistència a la fragmentació. Aquests resultats coincideixen amb les limitacions trobades per Jiménez et al. [11] i també comentades anteriorment.

Poon i Chan [36] aporten l'estudi de l'ús d'àrids reciclats que contenen proporcions variables de partícules de formigó i de maons triturats com materials per a subbase de carreteres. Aquesta experiència ha obtingut valors acceptables de CBR després d'inundació. En aquest estudi es troba que l'única desavantatge d'aquests àrids és que es desintegren completament durant l'assaig d'estabilitat de volum, la qual s'atribueix a la gran quantitat de morter adherit als àrids.

Arm [40] indica, també, que la rigidesa d'una capa de subbase d'àrid reciclat de formigó augmenta amb el temps a causa de les propietats auto-cimentants que té aquest material. Això corrobora les conclusions a les que havia arribat Vegas et al. [34] on afirmaven que la quantitat de ceràmics en la composició no influïa en la capacitat de càrrega.

Finalment, Sherwood [41] proposa que en carreteres de baix cost i volum de trànsit, la reducció raonada dels requisits de les normes nacionals podria augmentar l'ús de materials secundaris. Així, tot i que els àrids reciclats mixts no compleixin amb el coeficient de Los Angeles i el contingut de compostos de sofre totals per un estret marge, podrien ser utilitzats com a subbase en la construcció de camins rurals.

A diferència de les aplicacions anteriors, Pérez et al. [42] han estudiat les propietats mecàniques de mescles bituminoses en calent fabricades amb àrids reciclats de RCD. Han portat a terme una dosificació de mescles bituminoses que contenen un 50% en pes d'àrid reciclat en totes les fraccions.

Aquestes mescles han pogut acomplir els requisits que el PG-3 estableix per als paràmetres obtinguts en l'assaig Marshall en carreteres de baix trànsit gràcies a que tenen un contingut de betum superior al habitual amb àrids naturals i, a més, contenen una major quantitat de filler. Les deformacions plàstiques mesurades es troben dins els valors exigits, els valors del mòdul dinàmic són raonables, però en l'assaig de immersió-compressió presenten una pèrdua de resistència excessiva.

Veuen possible l'ús de mescles realitzades amb àrid reciclat en carreteres de baix trànsit, encara que creuen necessari introduir millores respecte el comportament davant l'aigua. Així doncs, presenten una sèrie d'alternatives per aconseguir resultats més favorables. Entre ells destaquen una selecció d'àrids reciclats de millor qualitat o una disminució de la seva proporció i la utilització de betums més durs i fillers d'aportació com ara calç o ciment.

# *Capítol 3*

# *PLANTES DE RECICLATGE*

## 3.1. INTRODUCCIÓ

Al següent apartat es descriuen les plantes de reciclatge de RCD que han proporcionat les mostres d'àrids reciclats que s'analitzen més endavant. Es tracta de sis plantes repartides per tot el territori català i que pertanyen a Gestora de Runes de la Construcció S.A.

Les plantes estudiades són:

- Planta de Les Franqueses del Vallès (Vallès Oriental).
- Planta de Manresa, el Callús (Bages).
- Planta de Montoliu (Segrià).
- Planta de Peralada (Alt Empordà).
- Planta del Port de Barcelona (Barcelonès).
- Planta de Sant Julià de Ramis (Gironès).

Gestora de Runes de la Construcció (GRC) és una empresa que gestiona la deposició controlada dels residus de la construcció, i que impulsa la seva valorització i selecció en origen a través d'una extensa xarxa de dipòsits controlats, plantes de reciclatge i plantes de transferència a tot el territori català.

GRC es va constituir l'any 1994 i, en l'actualitat, GRC està constituïda en un 45% per l'Agència de Residus de Catalunya i TERSA i un 55% per la Confederació Catalana de la Construcció i 107 empreses del sector de la construcció. Les instal·lacions amb les que compta la GRC des de finals de 2009 són un total de 27 dipòsits, 17 plantes de reciclatge i 9 plantes de transferència. Segons les últimes dades, van gestionar 4.952.753tn de terres i runes durant el 2009 [16].

En aquest treball només s'estudiaran les sis plantes de reciclatge esmentades ja que es tracta de les plantes més actives o més properes a la ciutat de Barcelona i que, per tant, presenten un interès major. Al següent mapa de Catalunya es situen totes les instal·lacions que pertanyen a la GRC i, a més, es destaquen les 6 plantes estudiades (Veure figura 11).

## 3.2. PLANTA DE LES FRANQUESES

La planta de reciclatge de Les Franqueses del Vallès (Vallès Oriental), situada en un polígon industrial a pocs quilòmetres de Granollers, es un referent a nivell català pel que fa al tractament integral dels residus de la construcció per ser la primera a Catalunya de les seves característiques. La planta va entrar en funcionament durant el 2007, amb una capacitat inicial de tractament de 150 mil tones anuals però amb possibilitat de tractar-ne fins a 200.000 [16].

La planta de tractament de residus de Les Franqueses del Vallès està tancada en una nau i disposa de sistemes per a què el trànsit de camions no afecti ni embruti l'entorn i d'equips que produeixen el

mínim impacte sonor. La planta no té dipòsits de runes propers i, per aquesta raó, tracta de valoritzar i minimitzar al màxim els residus ja que tot el que entra a la planta ha de ser gestionat a d'altres instal·lacions o bé comercialitzat. El tipus de residu que tracta va des del residu net (formigons i pedres) fins a residus mixtes i bruts.[43]

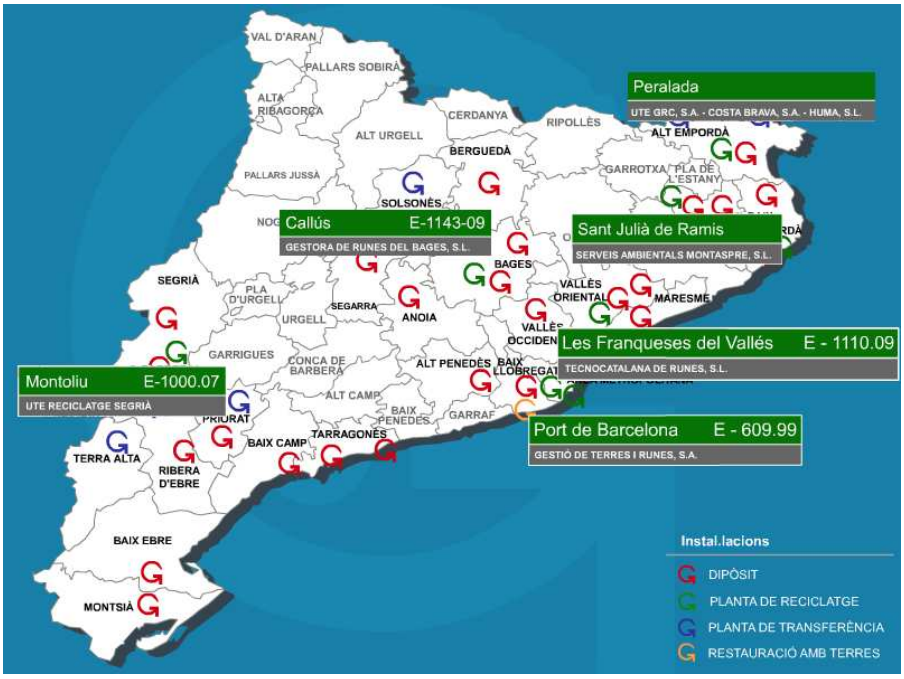

Figura 11: Mapa de localitzacions de les instal·lacions de GRC [16].

Amb 110.000 tones de residus prevists de ésser gestionats durant el 2010, la instal·lació atura la seva progressió cap al règim òptim d'entrades. Degut a l'aturada general del sector de la construcció, l'increment del 51% assolit el 2009 (112.000tn) respecte el 2008 (74.000tn) es veu transformat en una lleugera regressió propera al 2% segons les previsions per al 2010 [16,44].

- **La instal·lació (Veure figura 12) [16]:**

La instal·lació està configurada en tres zones, cadascuna de les quals va associada a una de les tres etapes en les que es pot dividir el processament dels RCD.

- Zona de recepció: Consta d'una bàscula per a quantificar l'entrada de runa a les instal·lacions de reciclatge.

- Zona de procés:

  - Zona de descàrrega: Esplanada per a la descàrrega sobre la tremuja dels camions amb la matèria prima. Esporàdicament permet una petita acumulació d'existències (encara que idealment cal evitar-ho).

  - Edifici de procés: En aquest edifici estan instal·lades totes les màquines i cintes de producció, així com el personal de producció.

  - Zona de material produït: El material produït s'apila alhora que va sortint de la línia de producció. Periòdicament es transporta a la zona d'apilament per a la seva venda.

- Zona d'apilament: En aquesta zona el material reciclat s'apila segons les seves mides i està adequada per a permetre el pas de camions i maquinària de càrrega.

Figura 12: Fotografia aèria de la planta de Les Franqueses del Vallès [16].

- **Procés de fabricació (Veure figura 13) [16]:**

La fabricació del producte es situa, bàsicament, en l'edifici de procés que està dividit, a grans trets, en dues zones o tractaments:

- Tractament primari:
  - Alimentació al procés: el material dipositat a la tremuja es transportat per un alimentador primari fins el pregarbellat.
  - Pregarbellat: separa el material de 0-150 mm del de mida superior a 150 mm. El de mida inferior cau sobre una cinta primària i el de mida superior avança cap al plat de triatge.
  - Triatge de voluminosos: el material de mida >150mm es situa sobre un plat de triatge on el personal manipula un braç-grua per realitzar la tria del material de rebuig voluminós i col·locar-lo segons la seva naturalesa als diferents contenidors de rebuig.
  - Molí d'impactes: realitza la trituració del material >150mm que no ha passat per les reixes del pregarbellat ni ha estat rebutjat. El material que surt del molí s'incorpora a la cinta primària juntament amb la resta de material.
  - Over-band: situada al capdavall de la cinta primària, realitza la separació dels possibles components metàl·lics de la resta d'elements gràcies a un camp magnètic. El material no imantat passa a la sitja d'emmagatzematge intermedi.

- Emmagatzematge intermedi: sitja de 100 $m^3$ per a l'acumulació del material triturat ja que la velocitat del procés primari (100Tn/h) és superior a la del procés secundari (75Tn/h) i es, per tant, necessari un regulador del procés.

- Tractament secundari:
  - Trommel inicial: realitza dos garbellats: un primer de 0-60 mm i un segon de 60-120 mm.
  - Triatge manual: El material que passa a través del garbellat del trommel inicial, és a dir, de mida superior a 120mm es fa passar per una cinta on, manualment, el personal de producció separa el material de rebuig segons la seva naturalesa en tres contenidors (fusta, banals i metall). El material restant és, novament, enviat a

l'entrada del molí d'impactes per tornar-se a triturar fins arribar a la mida de sortida del sistema.

- Trommel final: realitza un segon garbellat de 20-60 mm al material de 0-60mm procedent del primer trommel.
- Separadors d'aire: Els diferents materials obtinguts (tot-u de 20-60 mm i grava de 60-120 mm) es netegen de partícules lleugeres mitjançant separadors d'aire o aigua. Els fins no es netegen quedant com a material de rebuig (0-20 mm).
- Separadors per flotació: el material procedent del separador d'aire és submergit en un bany d'aigua per a l'eliminació del material menys dens.
- Cinta de transport final: condueix les diferents fraccions a l'estiba corresponent.

El règim de treball de la instal·lació és de 40 hores setmanals i es realitza amb el 4 membres del personal (2 peons, un maquinista i un encarregat que també fa funcions de recepció de material). La planta té una capacitat de tractament aproximada de 75Tn/h i una capacitat d'emmagatzematge de 10.000Tn.

Es pot concloure que la planta de reciclatge de Les Franqueses del Vallès es classifica, òbviament, com a planta fixa i presenta un nivell alt d'automatització i, per tant, es capaç de tractar materials de naturalesa variada. Aquests materials variats que entren a la planta fan que es trobi dins la categoria 2 segons el grau d'admissió ja que el material, tot i ser variat, presenta un major percentatge de matèria pètria.

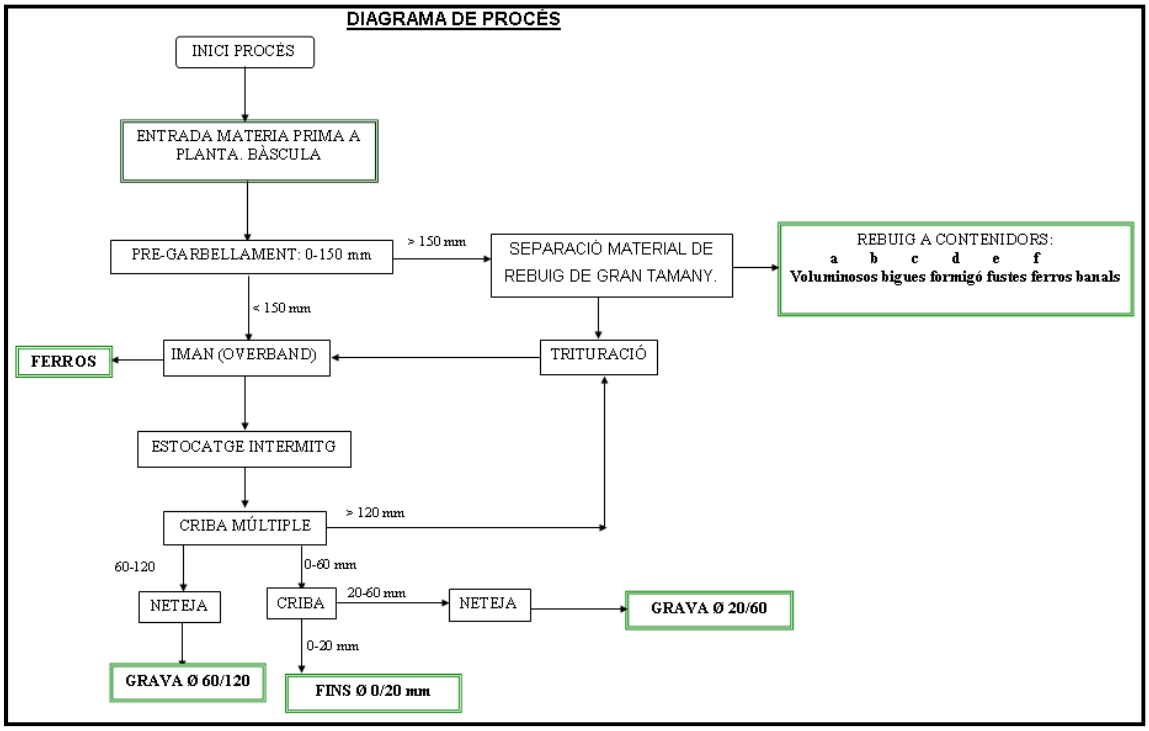

Figura 13: Esquema del procés de fabricació a la Planta de Les Franqueses del Vallès [16].

- **Aplicacions actuals [16]:**

Amb l'objectiu de diversificar l'ús de l'àrid reciclat i de garantir un règim de vendes estable, la planta de tractament efectua proves amb nous productes per llançar al mercat, tant per a obra civil com per a edificació, els quals donen un major valor afegit a l'àrid (terres abonades, àrids per a prefabricats, etc.).

La diversitat d'obres i aplicacions realitzades amb material procedent de la planta va des de terres abonades per a jardineria, bases de camps de futbol, drenatges, sorres per a rebles de canalitzacions, subbases per a vies amb trànsit poc intens, vials de polígons industrials, matèria primera per a prefabricats, etc.

## 3.3. PLANTA DE CALLÚS, MANRESA.

Situada a 10km al nord de Manresa la planta de Callús (Bages) compagina la deposició de les runes no valoritzables amb el tractament i reciclatge dels RCD. Es tracta de l'aposta més important de la GRC a la comarca per la recuperació de les runes i la producció d'àrid reciclat de qualitat que es comercialitza per les obres de la comarca. En l'exercici de 2008, aquest dipòsit del Bages va reciclar un total de 147.500tn. de materials. Durant el 2009, la producció va caure fins les 122.000, un 17% menys, i en la darrera previsió del 2010, corresponent al tercer trimestre, s'esperava repetir el volum de reciclats del 2009 [16,44].

- **La instal·lació (Veure figura 14) [43]:**

La instal·lació es pot classificar de nivell intermedi pel que fa al grau d'automatització ja que està configurada per maquinària mòbil però en un emplaçament fix. Els materials que entren a la planta són variats però presenten un major percentatge de matèria pètria i fan que es trobi, igual que la planta de Les Franqueses, dins la categoria 2 segons el grau d'admissió.

De la mateixa manera la instal·lació pot dividir-se en les tres zones, esmentades a la planta de Les Franqueses, però en formes més simplificades. La zona de recepció per quantificar el volum de RCD que es gestionen i la zona d'apilament no presenten, pràcticament, cap variació. En canvi, la zona de procés està formada únicament per quatre vehicles mòbils on s'executa el tractament.

Figura 14: Fotografia de la Planta de reciclatge de Callús, Manresa [43].

- **Procés de fabricació [43]:**

  - Triatge de voluminosos: la matèria prima que arriba a la planta s'estén sobre el sòl i el personal de la planta que manipula un braç-grua realitzar la tria del material de rebuig voluminós i el col·loca segons la seva naturalesa als diferents contenidors de rebuig.
  - Alimentació al procés: el material seleccionat es diposita amb l'ajuda de grues dins la tremuja d'alimentació i es transportat mitjançant cintes fins al següent vehicle on es troba el molí.
  - Molí d'impactes: realitza la trituració del material. El material que surt del molí s'incorpora de nou a una cinta transportadora.

- Over-band: situada al sobre la cinta procedent del molí, realitza la separació dels possibles components metàl·lics de la resta d'elements gràcies a un camp magnètic.
- Garbells: el material procedent del separador magnètic i que no ha quedat imantat realitza un circuit pels diferents garbells de forma que es dóna lloc a les diferents granulometries.
- Cintes de transportadores: condueixen les diferents fraccions entre vehicles o a fins l'estiba corresponent.

## 3.4. PLANTA DE MONTOLIU

La planta de reciclatge del Segrià està ubicada al terme municipal de Montoliu, complementant la tasca de dipòsit, en funcionament des de l'any 2004.

La planta ocupa un espai de sis hectàrees i té capacitat per tractar més de 80.000 tones anuals de residus de la construcció. Aquesta planta produeix un ventall més ampli d'àrids reciclats que permeten una diversificació més amplia de les aplicacions. Mitjançant una sèrie de processos de selecció, trituració i garbellat produeix entre d'altres, un material amb molta sortida: la sorra ceràmica (0-5mm), de característiques similars al sauló natural i que s'utilitza com a rebliment de canalitzacions d'instal·lacions i sanejament, així com aplicacions en jardineria [44].

Les instal·lacions són molt similars a les de la planta de Callús (veure figura 15), vehicles mòbils en un emplaçament fix, però incorporen una cabina de triatge situada a continuació del separador magnètic. Tot i això, la planta es continuaria classificant dins el nivell intermedi d'automatització. A diferència de les plantes anteriors, a més d'acceptar material de categoria 2, aquesta també executa el processament diferenciat de material de categoria 3 ja que el material que usen per a la fabricació dels àrids ceràmics es consideraria material seleccionat [16].

Figura 15: Fotografia de la Planta de reciclatge de Montoliu [16].

## 3.5. PLANTA DE PERALADA

La instal·lació de Peralada (Alt Empordà) està situada a 7km al nord-est de Figures i es va convertir en la primera planta de reciclatge integral de GRC a la província Girona. L'objectiu de la planta de revalorització de runes de Peralada és augmentar la quantitat i tipologia de RCD a tractar, separant els residus de formigó, que es tracten en una línia de trituració i garbellat diferenciada amb equips mòbils, dels materials mixtes i ceràmics procedents d'obres menors.

Fins el 2007 s'estimava una producció màxima d'unes 120.000 tones anuals. Al llarg de l'exercici 2007, el dipòsit de Peralada va gestionar més de 152.000 tones de terres i residus inerts, dels quals el 75%

(118.000tn) va ser destinat al seu tractament i reciclatge amb els equips, encara només mòbils, de la planta de reciclatge de Peralada. [45]

Durant el 2008, la planta va comptar amb inversions econòmiques per tal de millorar processos i optimitzar la gestió. Així doncs, es va instal·lar una planta fixa de classificació i neteja per a millorar no només la quantitat i tipologia dels RCD sinó també la qualitat del producte final que fins llavors es produïa amb equips mòbils. La planta pot tractar més de 500 tones diàries de residus de la construcció i demolició (RCD) i produir fins a 130.000 tones a l'any de materials reciclats.[44]

Tot i les inversions, la producció va caure ja el 2008 fins a les 89.000 tones i el 2009 va patir una davallada del 72% respecte l'any anterior, tan sols produint 25.000 tones d'àrid reciclat. Al tercer trimestre de 2010 ja s'havia assolit el nivell de producció del 2009 i les previsions per a final d'any auguraven una producció final de 38.000 tones, un 51% més que en 2009.

Les instal·lacions de la planta tal i com s'ha comentat presenten dues línies diferenciades, una de fixa destinada als RCD mixtes (veure figures 16 i 17) i una de mòbil (veure figura 18) destinada al processament dels residus de formigó. Ambdues línies segueixen un esquema de treball molt similar al de la planta de Callús però l'emplaçament fix, igual que a Montoliu incorpora una cabina de triatge manual per retirar del procés les fraccions de material de rebuig.

Figura 16: Fotografia de la instal·lació fixa de la Planta de reciclatge de Peralada [44].

Figura 17: Fotografia de detall de la instal·lació fixa de la Planta de reciclatge de Peralada [45].

Figura 18: Fotografia dels equips mòbils de la Planta de reciclatge de Peralada [45].

La planta es considera, de forma genèrica, de nivell alt d'automatització pel seu emplaçament fix. Cal diferenciar en la classificació segons el material d'admissió el que es destina a l'emplaçament fix del que es destina a la línia mòbil. Els RCD que arriben en el primer dels casos es classifica dins la categoria 2 per ser variats però amb un percentatge de material petri majoritari i, en canvi, els que arriben a l'emplaçament mòbil estarien a la categoria 3 per estar classificats.

## 3.6. PLANTA DEL PORT DE BARCELONA

Situada dins les pròpies instal·lacions del Port de Barcelona, aquesta planta de reciclatge i tractament esdevé possible gràcies a una estreta col·laboració amb l'Autoritat Portuària de Barcelona. Uns acords de col·laboració que fan possible un model d'ús de material reciclat a l'àmbit portuari de vital importància per al sector del reciclatge en general.

Al 2007, l'activitat de gestió de runes al Port de Barcelona va suposar la reutilització de més de 550.000 tones de RCD i 92.000 tones de terres d'excavació destinades a precàrregues i rebliments. Durant el 2007, es va potenciar, de manera significativa, el tractament i reciclatge de runes mitjançant l'adquisició i posada en servei de tres línies de matxucat i garbellat que van possibilitar elevats índexs de recuperació. Els materials reciclats es van reutilitzar en les mateixes obres portuàries, en substitució dels àrids naturals, resultat de l'esmentada col·laboració amb l'Autoritat Portuària.[45]

Al llarg de 2008, es van gestionar al Port de Barcelona un total de 810.000 tones de residu de construcció i demolició, que pràcticament en la seva totalitat van poder ésser aprofitades en diverses aplicacions com a material reciclat. Aquest valor va suposar un 45% més que en 2007 i la gestió de 1.020.000 tones de 2009 va suposar un increment del 26% respecte 2008 [16,44-45].

Les previsions per al 2010 de la planta del Port de Barcelona reflectien una davallada considerable respecte l'any anterior. Fins al tercer trimestre s'havien gestionat 587.000 tones i s'esperava que al tancament de l'exercici fossin 783.000 tones, un 23% menys. De forma més accentuada que a les altres plantes, les dades mostren el retrocés del sector durant aquest any [16].

Per poder dur a terme aquest volum de gestió de RCD les instal·lacions de reciclatge del Port compten amb diverses línies de producció. Una producció però amb un nivell d'automatització intermedi, molt semblant al de la planta de Callús, amb línies consistents en: una tremuja, un molí d'impactes, un separador magnètic i diversos garbells i cintes transportadores (veure figura 19).

Figura 19: Fotografia dels equips mòbils de la Planta de reciclatge del Port de Barcelona [45].

Cal apuntar també, que l'últim semestre de 2009 va entrar en funcionament la planta de reciclatge del Prat de Llobregat. La seva ubicació i la seva aptitud per al tractament de la runa bruta la fan una instal·lació complementària de l'activitat de GRC al Port de Barcelona. Des de la seva inauguració, ha assolit l'aprofitament del 96% del material rebut per la instal·lació, mitjançant la desviació de matèria primera tractada cap a la planta del Port i la segregació de la resta de materials de rebuig cap als gestors de residus corresponents. [16]

El material que entra a la planta del Prat de Llobregat pot considerar-se de categoria 1 degut al alt contingut de matèria de diversa naturalesa que gestiona. Un cop processat aquest material es desviat a la planta del Port per a la fabricació del propi àrid, per tant, el material que els arriba ja no és de categoria 1 sinó de categoria 2 perquè ja presenta un predomini de formigó, ceràmics o àrids naturals. També pot accedir directament a la planta del Port el material procedent d'una font fiable o, el que es el mateix, que presenti credencials de no contenir un elevat contingut d'impureses.

## 3.7. PLANTA DE SANT JULIÀ DE RAMIS

Durant el 2008, GRC va posar en funcionament una nova instal·lació de reciclatge i valorització les runes procedents de la construcció, ubicada a Sant Julià de Ramis, a la comarca del Gironès. La planta de reciclatge es va concebre per tractar unes 100.000 tones a l'any de material procedent de la construcció.

La planta s'ha vist afectada pel retrocés econòmic abans que la resta de plantes estudiades. Així, el màxim de gestió es va donar en el seu primer any de funcionament assolint un volum de 64.000tn. Durant el 2009, aquest volum de material que entrava a les instal·lacions ja es va veure reduït un 9% fins les 56.000 tones. I durant el 2010, les previsions auguraven un total de material gestionat encara inferior, 54.000 tones que es traduïen en un una regressió del 4% [16, 44].

La planta, que compta amb equips fixes i mòbils, combina diferents sistemes de garbellat com neteja, separació pneumàtica i separació manual per a una trituració final amb l'objectiu de classificar les diferents fraccions. D'esquema de producció molt similar a Peralada, la planta de Sant Julià també pot classificar-se com a planta de nivell d'automatització alt gràcies a les instal·lacions fixes que posseeix (veure figura 1).

La planta genera els productes reciclats habituals com tot-u, sorres o graves i que es destinen fonamentalment a la base de carreteres i camins, a l'anivellament de terrenys i a la formació de capes

drenants. Aquests productes són fruit del tractament de RCD mixts de categoria 2, amb un contingut petri predominant però no seleccionat [44].

# *Capítol 4*

# *ÀRIDS RECICLATS*

## 4.1. INTRODUCCIÓ

L'àrid reciclat procedent de les plantes de reciclatge de la GRC està compost majoritàriament per partícules de formigó, d'àrids naturals o de ceràmica i, en menor percentatge, per altres materials que es poden considerar impureses (asfalt, plàstics, fusta, vidre, metalls, etc.). Les seves propietats depenen fonamentalment de els components principals que presenten.

Els àrids reciclats analitzats contenen un part important d'àrids procedents de formigó (amb percentatges entre 21-53%) i àrids naturals (entre 10-44%) en la seva composició. El tercer component majoritari és el material ceràmic que es troba entre 2-64%. Es pot assegurar, per tant, que els àrids estudiats només poden ser classificats com a àrids mixts i que, tot i que s'observin predominis d'alguna tipologia de component, aquests no són prou significatius per a que se'ls pugui assignar la categoria d'àrid de formigó o ceràmic.

Amb els percentatges anteriors també poden classificar-se els àrids estudiats segons les normatives de cada país comentades a l'apartat 2.7.1.2. Així doncs, la normativa anglesa són de la categoria RA, àrids ceràmics o mixts. La RILEM i la norma belga no contemplen àrids de la composició dels estudiats i, per tant, es compararan els paràmetres amb els que assignen al tipus III i a la categoria GBSB-I, respectivament, que corresponen als àrids ceràmics. L'alemanya contempla més casos que la resta de normatives, de manera que alguns àrids poden classificar-se com a tipus 2 (>70% de formigó més àrids naturals), mentre que d'altres no arriben a assolir aquest percentatge i es classifiquen com a tipus 4. En darrer lloc, la norma japonesa considera les categories d'àrids segons la seva aplicació, així que, tan sòls es compararan els resultats amb les recomanacions per a les aplicacions menys restrictives (tipus 2 i tipus 3).

Per tal de dur a terme una comparació coherent entre les mostres estudiades, aquesta es durà a terme tenint en compte la seva classificació granulomètrica. Cal tenir en compte que la fracció fina sol presentar pitjor qualitat que la fracció gruixuda i, per això, les normatives consultades solen permetre únicament la utilització de l'àrid gruixut reciclat. Així doncs, a la taula següent pot observar-se un llistat de les mostres procedents de les plantes estudiades organitzades segons la seva classificació granulomètrica (veure taula 14).

Taula 14: Classificació de les mostres estudiades segons la seva categoria granulomètrica

| CLASSIFICACIÓ | PLANTES | REFERÈNCIA | MOSTRES |
|---|---|---|---|
| GRAVA | Les Franqueses | LF_G1 | Graveta 4/16mm |
| | Les Franqueses | LF_G2 | Grava 12,5/25mm |
| | Callús (Manresa) | CM_G1 | Graveta 4/22,5mm |
| | Montoliu | M_G1 | Graveta ceràmica 5/12,5mm |
| | Montoliu | M_G2 | Grava 16/31,5mm |
| | Peralada | P_G1 | Graveta 5/25mm |
| | Port de Barcelona | PB_G1 | Graveta 1 4/20mm |
| SORRA | Les Franqueses | LF_S1 | Sorra 0/2mm |
| | Callús (Manresa) | CM_S1 | Sorra 0/5mm |
| | Montoliu | M_S1 | Sorra Ceràmica 0/5mm |
| | Montoliu | M_S2 | Sorra Formigó 0/4mm |
| | Peralada | P_S1 | Sorra 0/4mm |
| TOT-U | Les Franqueses | LF_TU1 | Pregarbellat 0/12,5mm |
| | Les Franqueses | LF_TU2 | Tot-u 0/16mm |
| | Peralada | P_TU1 | Tot-u 0/20mm |
| | Sant Julià de Ramis | SJ_TU1 | Grava 1/25mm |

## 4.2. PROPIETATS DELS ÀRIDS RECICLATS:

En aquest apartat es descriuen les propietats físiques i químiques del l'àrid reciclat estudiat, comparant els resultats experimentals amb els límits establerts per les normes presentades a l'estat de l'art i amb els resultats experimentals obtinguts en l'experiència d'altres autors.

Els àrids reciclats mixtos poden presentar una gran heterogeneïtat en les seves propietats a causa, principalment, de la qualitat del material que entra en la línia de reciclatge i al tipus de processament en planta. Comparant els resultats experimentals (veure taula 15) amb els valors d'altres autors presentats a la bibliografia, en termes generals, s'observen rangs similars. A continuació, la taula 15 recull els valors obtinguts en les diferents assaigs als que s'han sotmès les mostres de cada planta.

### 4.2.1. Granulometria

Totes les mostres estudiades presenten una relació D/d, on D i d són les mides màxima i mínima de l'àrid respectivament, superior a 1,4 tal i com especifica la EHE [10]. En conseqüència, es pot assegurar una distribució granulomètrica de les mostres contínua i no uniforme.

Taula 15: Resum dels resultats obtinguts per les mostres en els assaigs de laboratori.

| PROPIETATS | | Asfalt (%) | Ceràmics (%) | Formigó (%) | Àrids naturals (%) | Argila (%) | Guix (%) | Altres (plàstic, vidre, fusta, etc.)(%) | Contingut de sulfats (SO3) (%) | Contingut de fins (<0,063mm) (%) | Contingut de sorres (<4mm) (%) | Densitat seca (kg/m3) | Absorció (%) | Índex de llenques | Índex de Los Angeles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PLANTES** | **MOSTRES** | UNE-EN 933-11 | | | | | | | UNE-EN 1744-1 | EN 933-2 | EN 933-1 | UNE-EN 1097-6 | | EN 933-3 | EN 1097-2 |
| **Les Franqueses** | Sorra 0/2mm | | | | | | | | | 6,62 | | 2010 | 13,1 | | |
| | Graveta 4/16mm | 15 | 35 | 33 | 13 | 1,6 | 1,7 | 0,3 | 1,14 | 2,1 | 3,73 | 2100 | 8,88 | 18 | 34 |
| | Grava 12,5/25mm | 2 | 14 | 48 | 34 | 1,3 | 0,4 | 0,0 | | 2,06 | 3 | 2260 | 6,5 | - | |
| | Pregarbellat 0/12,5mm | 14 | 9 | 37 | 36 | 1,5 | 2,2 | 0,1 | | 7,06 | 71 | 2190 | 6,7 | | |
| | Tot-u 0/16mm | 13 | 39 | 33 | 14 | 0,5 | 1,2 | 0,1 | | 2,36 | 41 | 2060 | 9,78 | 18 | 34 |
| **Callús (Manresa)** | Sorra 0/5mm | | | | | | | | | 23,83 | | 1960 | 16,1 | | |
| | Graveta 4/22,5mm | 4 | 22 | 53 | 20 | 0,0 | 0,2 | 0,8 | | 3,31 | 10 | 2110 | 9,85 | 16 | |
| **Montoliu** | Sorra Ceràmica 0/5mm | | | | | | | | | 9,05 | | 1850 | 16,15 | | |
| | Sorra Form. 0/4mm | | | | | | | | | 2,88 | | 1630 | 12,35 | | |
| | Graveta Cer. 5/12,5mm | 0 | 67 | 22 | 10 | 0,0 | 0,7 | 0,1 | | 0,85 | 3 | 1800 | 16,45 | 12 | 19 |
| | Grava 16/31,5mm | 0 | 54 | 26 | 19 | 0,3 | 0,5 | 0,0 | | 0,59 | 1 | 1920 | 13 | 6 | |
| **Peralada** | Sorra 0/4mm | | | | | | | | | 4,28 | | 2140 | 9,9 | | |
| | Graveta 5/25mm | 7 | 2 | 44 | 46 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | - | 0,17 | 1 | 2380 | 4,2 | 7 | 29 |
| | Tot-u 0/20mm | 7 | 2 | 44 | 46 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | | 4,6 | 38 | 2250 | 7,41 | | |
| **Port de Barcelona** | Graveta 4/20mm | 3 | 23 | 44 | 28 | 0,0 | 0,6 | 0,5 | 0,59 | 2,25 | 7,5 | 2070 | 9,79 | 12 | 25 |
| **Sant Julià de Ramis** | Tot-u 0,5/25mm | 10 | 36 | 42 | 11 | 0,0 | 0,9 | 0,1 | | 2,97 | 13,8 | 1480 | 10,25 | 15 | - |

En general, les corbes granulomètriques de les graves (veure figura 20) s'ajusten correctament als fusos corresponents en cada cas. Les mostres procedents de les plantes del Port de Barcelona (PB_G1), de Peralada (PB_G1) i la graveta de Montoliu (M_G1) queden perfectament emmarcades dins els límits pertinents dels fusos ASTM de la norma C33-07 "Concrete Aggregates". La graveta de Les Franqueses (LF_G1) i la mostra de Montoliu (M_G2) presenten una manca de partícules més grans que fa que se situïn sobre el límit superior del seu fus. En canvi, la mostra de grava procedent de Manresa (CM_G1) conté més partícules de mida inferior a 4mm, el que implica que la seva corba es trobi sobre el marge del fus superior per a les partícules més fines. En darrer lloc, la grava de Les Franqueses (LF_G2) és la única que presenta una desviació del seu fus, cal un contingut inferior de partícules de mida més gruixuda per a que es mantingui dins els límits.

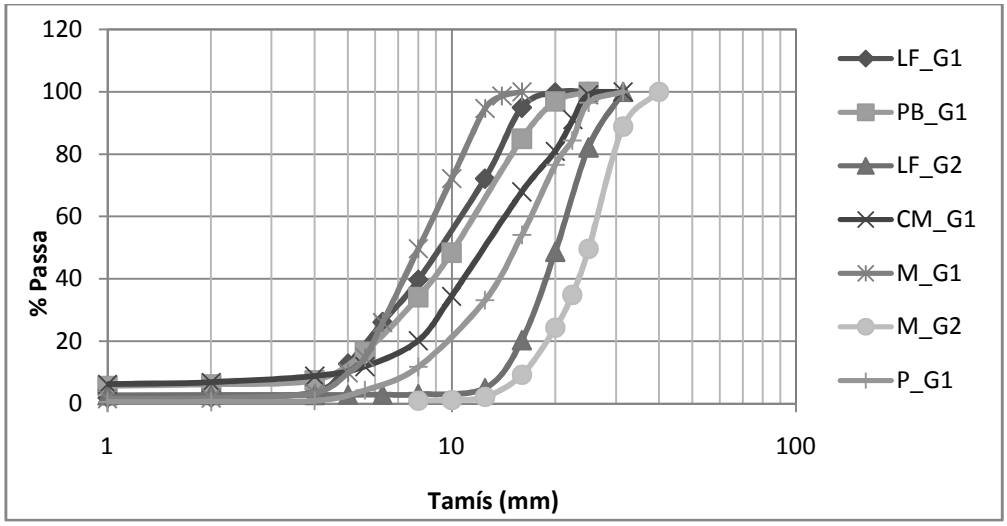


Figura 20: Corbes granulomètriques corresponents a les mostres de graves.
(Les corbes han estat comparades amb els següents fusos de la norma ASTM C33-07 "Concrete aggregates": 4:M-G2; 5:LF_G2; 57:CM_G1 i P_G; 67:LF_G1 i PB_G1; 7:M_G1).

Les mostres de sorra de les plantes també presenten unes corbes bastant adequades (veure figura 21). Les sorres de Les Franqueses i Peralada s'ajusten a la perfecció al fus establert per la EHE. Les dues sorres, ceràmica i de formigó, procedents de la planta de Montoliu es troben sobre el fus inferior entre 1 i 4mm, el que es pot traduir com un excés de partícules d'aquesta mida. Finalment, la única mostra que clarament es desvia de les corbes recomanades és la de la planta de Callús (Manresa), presenta una forma molt rectilínia que provoca una sortida del fus en els extrems. Aquest fet implica un excés tant de les partícules més fines com de les més gruixudes.

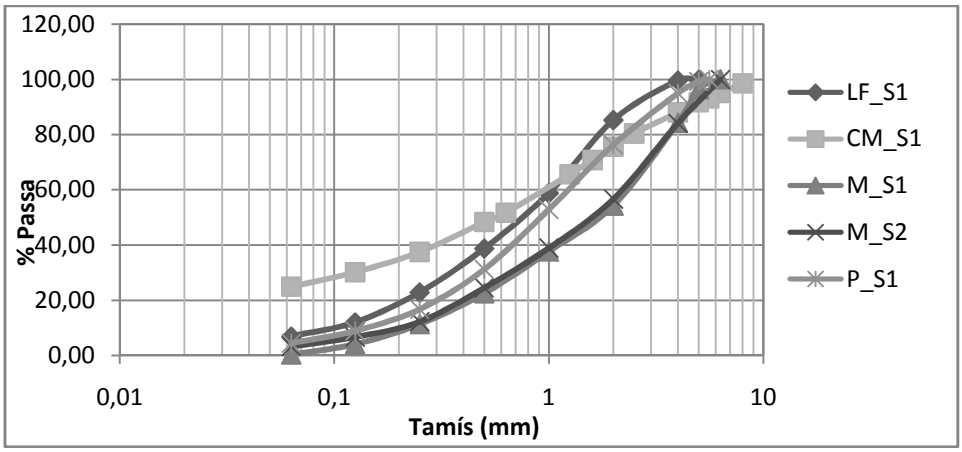


Figura 21: Corbes granulomètriques corresponents a les mostres de sorres.

Les granulometries corresponents al tot-u (veure figura 22) han estat comparades amb els fusos que proporciona el PG-3 i han resultat en un 50% dels dins els límits que s'estableixen per a tot-u i subbases. Les mostres que s'hi ajusten són els tot-u de Les Franqueses (LF_TU2) i de Peralada. D'altra banda, el pregarbellat de Les Franqueses (LF_TU1) requereix d'un contingut de partícules superiors a 1mm i, així, no quedar per sobre del límit superior en aquestes fraccions. Per últim, la mostra de Sant Julià queda fora en la seva totalitat, encara que de forma més accentuada en les fraccions fines. Cal justificar aquest fet dient que aquesta mostra de Sant Julià està contemplada com a grava pel fabricant però el seu elevat contingut en sorra provoca que hagi d'ésser classificat com a tot-u. Per aquesta raó, s'observa una manca de material fi (<1mm) com a tot-u o bé un excés de la fracció sorra (1-4mm) s'hi es considerés una grava.

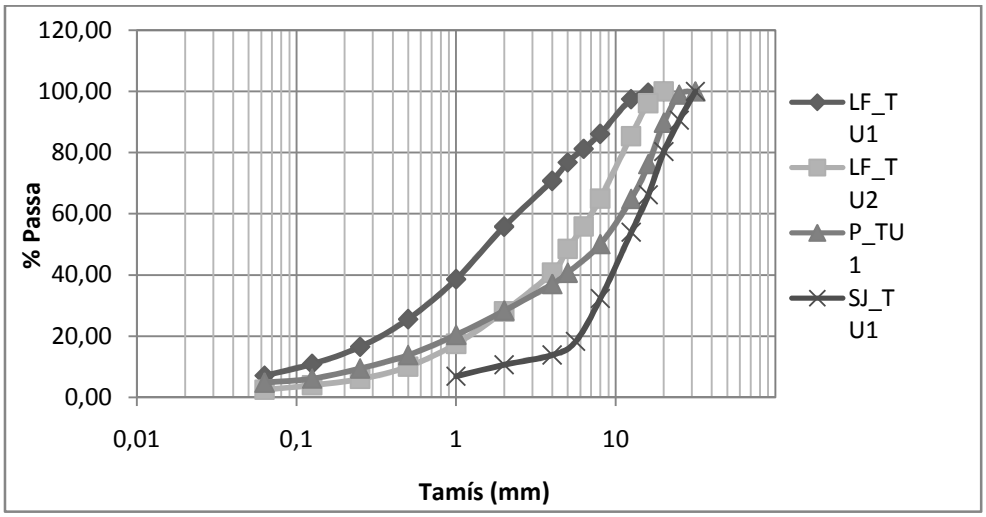


Figura 22: Corbes granulomètriques corresponents a les mostres de tot-u.

### 4.2.2. Contingut de fins (<0.063mm)

Com es d'esperar, els àrids reciclats presenten un contingut de fins molt divers segons la categoria granulomètrica a la que pertanyen. De forma que els valors per a les graves es troben entre 0,6-3,3% (veure figura 23), els de les sorres entre 2,9-23,8% (veure figura 24) i els dels tot-u entre 2,4-7,1% (veure figura 25).

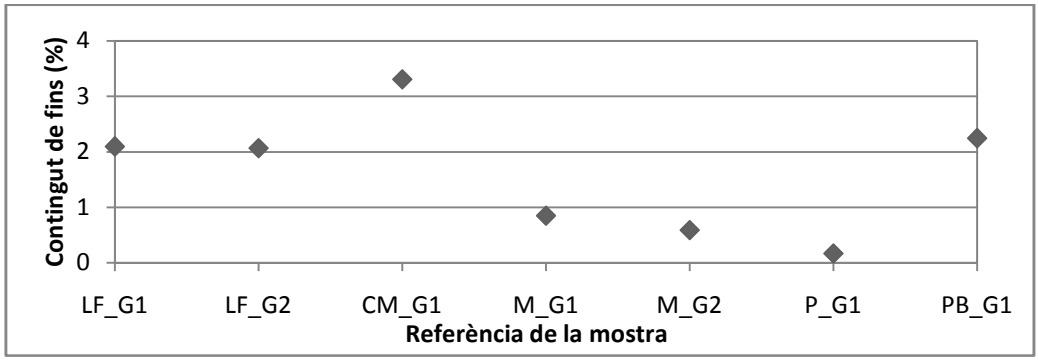


Figura 23: Contingut de fins (<0,063) en graves.

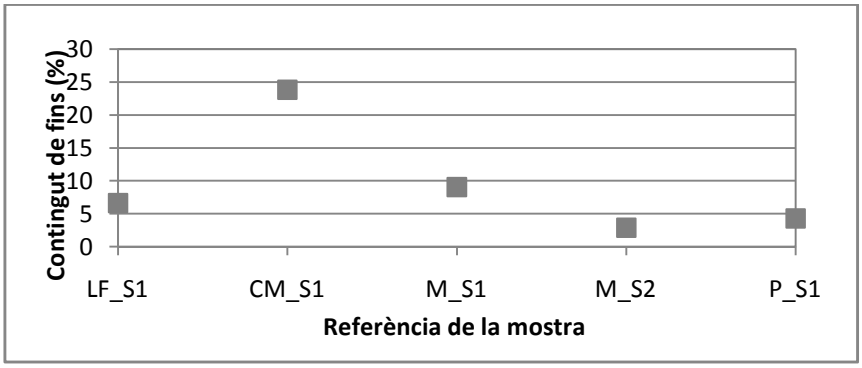


Figura 24: Contingut de fins (<0,063) en sorres.

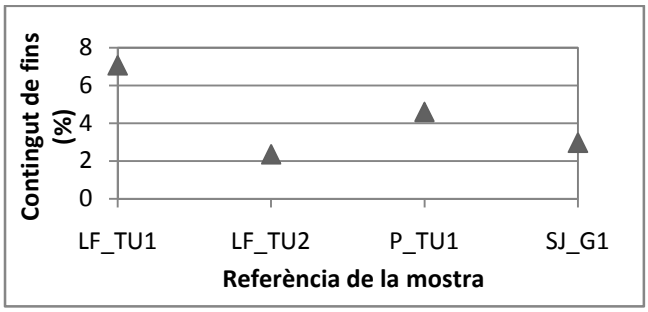


Figura 25: Contingut de fins (<0,063) en tot-u.

El 43% de les mostres d'àrids gruixuts es troba per sota del 1,5% de fins que es requereix a la EHE. Seguint les recomanacions de la RILEM, la norma belga i l'anglesa del 3% de fins ja tan sols queda una mostra que continua estan per sobre del límit del permès. Finalment, totes les mostres compleixen la obligació de situar-se sota el 4% tal i com indiquen les recomanacions de Hong-Kong [21] i la norma alemanya [20].

Comparant els resultats amb els obtinguts per altres autors, es pot afirmar que aquests es troben dins el conjunt de valors esperats. Es poden considerar resultats positius ja que es troben més propers als de d'autors com Matín-Morales et al. (<1.5%) [5] que no als del grup CLEAM (0,5%-18%) [12].

Segons la classificació de la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per a formigó", tots els àrids gruixuts estudiats es classifiquen dins la categoria $f_4$, però tres d'aquests també assoleixen els valors per a la categoria $f_{1,5}$, aquests tres àrids són els procedents de les plantes de Montoliu i Peralada.

Pel que fa als fins continguts en mostres de sorres o tot-u, totes les mostres, a excepció d'una, es troben per sota del 10%. Es tracta de valors situats dins un interval raonable pel que fa a la normativa espanyola que posa uns límits màxims situats entre 6-16%. L'excepció es presenta en la mostra de sorra procedent de la planta de Manresa i se situa, amb un 23,83%, molt per sobre del límit tolerable. Per tant totes les sorres, a excepció de la de Manresa, es classifiquen com a $f_{10}$ i els tot-u com a $f_{11}$.

Cal destacar que les dues mostres, sorra i grava, procedents de Manresa són les que presenten uns continguts de fins molt superiors als que s'observen en les altres plantes per a la mateixa granulometria, especialment, en les sorres que com s'ha comentat la diferència és molt important.

### 4.2.3. Contingut de sorres (<4mm)

Les fraccions gruixudes dels àrids reciclats presenten percentatges de sorra (partícules menors de 4 mm) situats entre l'1% i el 10% (veure figura 26). De les mostres estudiades, el 71,5% estan en conformitat amb el màxim establert del 5% segons la EHE, la RILEM i les recomanacions de Hong-Kong. La resta de mostres que no compleix aquesta norma, les procedents del Port de Barcelona i de Manresa, encara podrien complir amb el 10% de desclassificats inferiors que també marca la EHE encara que la mostra procedent de Manresa es troba al límit. Es repeteix el cas de que la de mostra de menys qualitat és la de Callús (Manresa) com en l'anterior apartat.

Els resultats obtinguts en el contingut de sorres no s'ajusten a l'afirmació de Sánchez de Juan [24] on es posa com a valors més freqüents els que oscil·len entre 0,5-2% ja que tan sòls dues mostres (P_G1 i M_G2) es troben dins aquest interval. Les altres cinc mostres restants es troben per sobre de forma clara.

Com és d'esperar, per definició, els continguts de sorres en els tot-u és molt elevat (veure figura 27). Les quatre mostres analitzades tenen entre 14-71% de sorres a la seva composició. Caldria aclarir que el 14% correspon a la mostra definida com a tot-u per la granulometria però fabricada a la planta de Sant Julià amb la intenció de ser grava, d'aquí el seu baix percentatge. I la mostra que presenta un 71% es el pregarbellat de Les Franqueses, que representa el material descartat durant el procés de producció i que resulta de pitjor qualitat perquè ha rebut els tractaments mínims. Resultats al voltant del 40% com les mostres de tot-u de Peralada i Les Franqueses serien més adients per a la seva categoria.

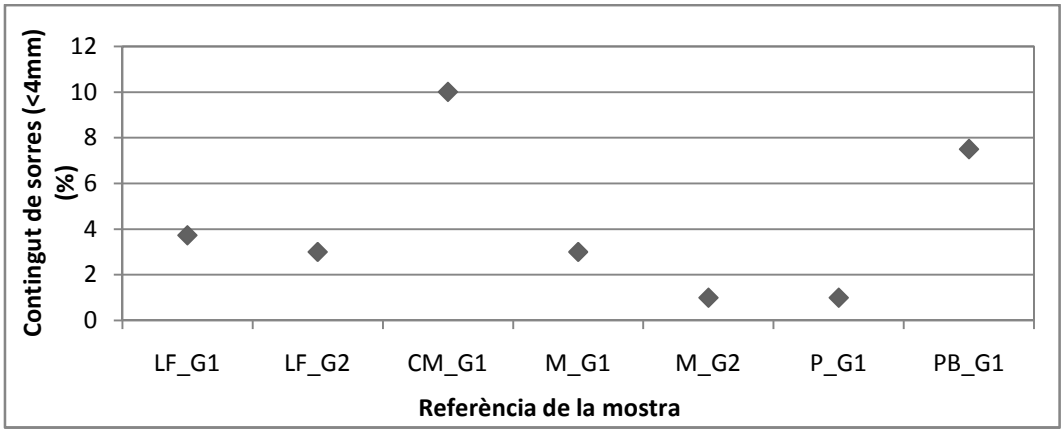


Figura 26: Contingut de sorres (<4mm) en graves.

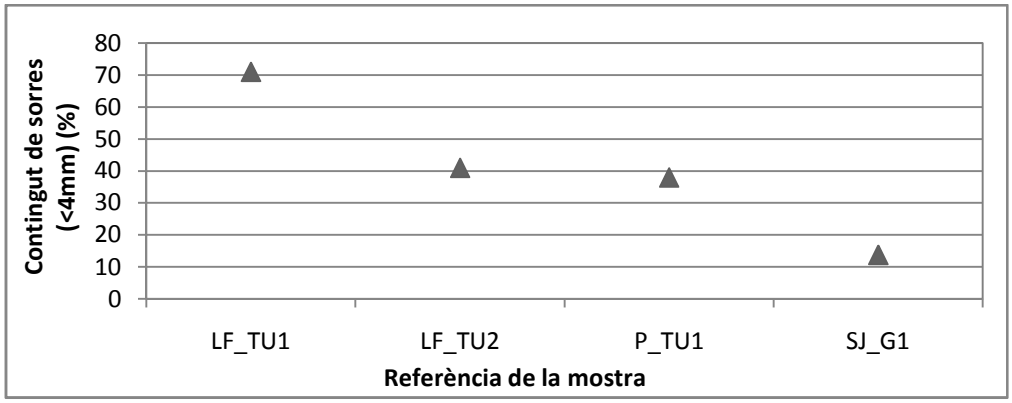


Figura 27: Contingut de sorres (<4mm) en tot-u.

### 4.2.4. Forma i textura superficial

En la caracterització dels àrids, s'ha utilitzat el mètode de l'índex de llenques per determinar la forma de l'àrid gruixut. Els percentatges obtinguts oscil·len entre 6-18% (veure figura 28), complint amb solvència el límit establert per la EHE del 35% o per les recomanacions de Hong-Kong del 40%. Els àrids reciclats presenten una forma molt adequada i la majoria pot classificar-se dins la categoria $Fl_{20}$ de la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per a formigó".

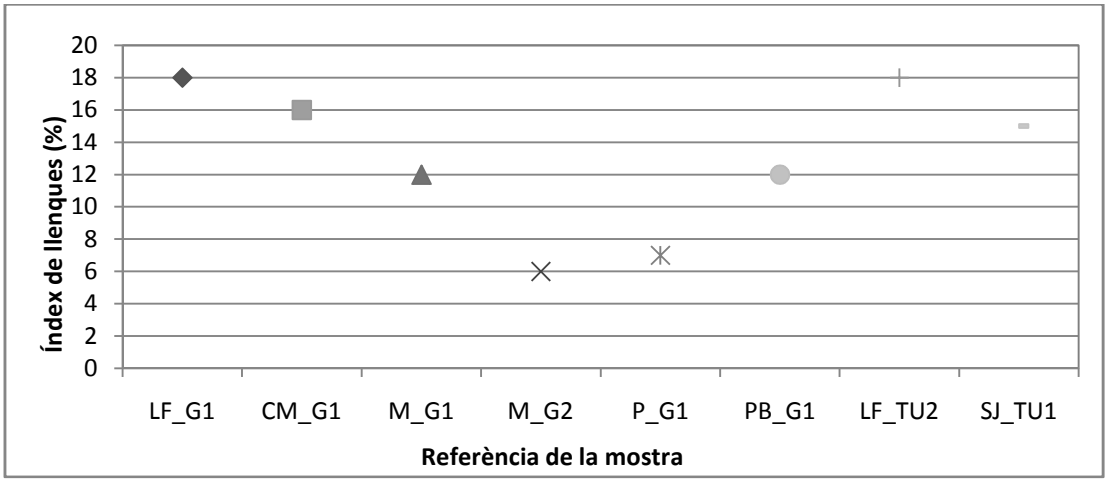


Figura 28: Índex de llenques per a graves i tot-u.

Alhora de comparar els resultats amb els d'altres autors, s'observa que els índex de llenques mesurats estan acotats més estretament ja que els valors presos de referència oscil·len entre el 6-45% [12, 28-30].

S'ha comentat que, en general, com més gran és el contingut de material ceràmic, major és el contingut de llenques de l'àrid reciclat. Analitzant el gràfic (veure figura 29) que relaciona ambdós paràmetres es podria arribar a confirmar però les dues mostres procedents de la planta de Montoliu, amb un contingut molt elevat de ceràmics, trenquen la tendència que s'observa als resultats de les mostres d'altres plantes.

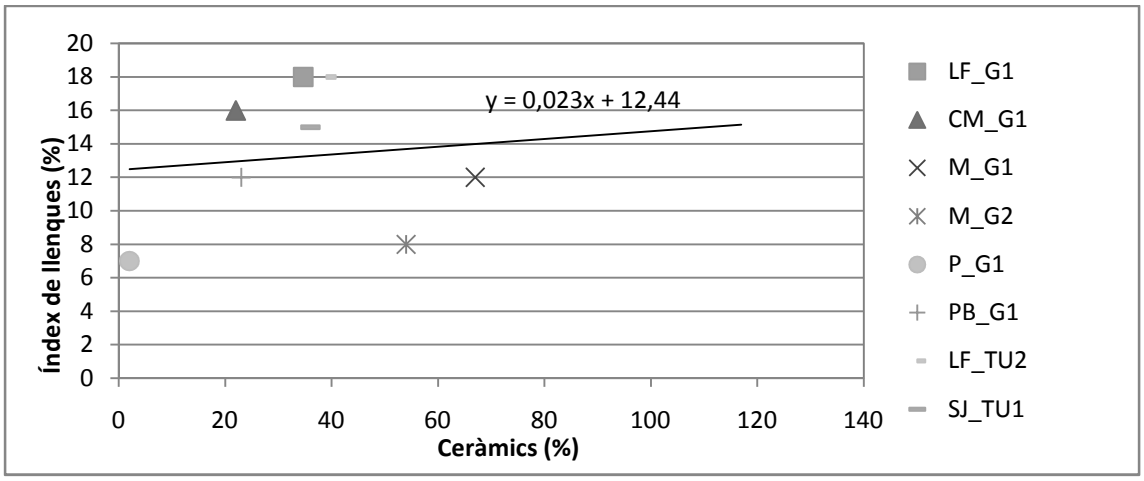


Figura 29: Relació entre índex de llenques i contingut de ceràmics.

Totes les plantes analitzades utilitzen molins d'impacte com a equips de trituració, fet al que s'atribueix una menor quantitat de partícules en forma de llenca i, per tant, uns valors de l'índex de llenques

inferiors. Alhora, totes les mostres compleixen amb els requisits establerts, el que implica que es pugui confirmar la concordança amb l'afirmació anterior.

### 4.2.5. Densitat i absorció

La densitat dels àrids reciclats mixtos analitzats oscil·len entre 1500 i 2400 kg/m$^3$, mentre que l'absorció d'aigua en aquest estudi varia entre un 4,2% i un 16,5% en considerar les 16 mostres analitzades.

Es pot establir una relació clara entre les dues propietats físiques, tal i com s'observa al gràfic, i aquesta es vàlida per a les diferents categories granulomètriques (Veure figura 30).

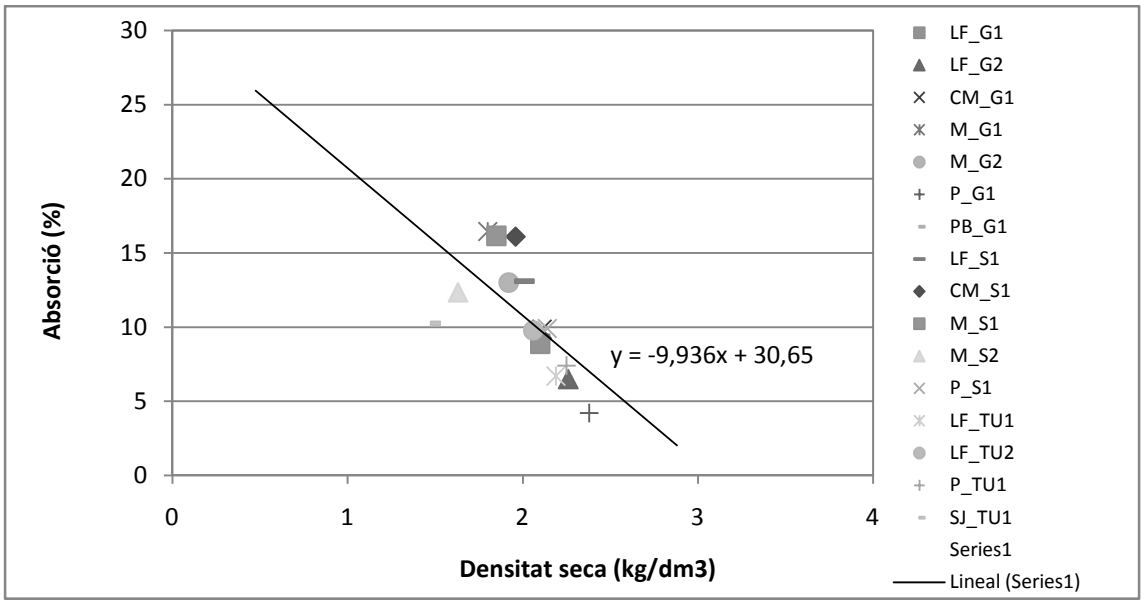


Figura 30: Relació entre densitat i absorció per a totes les mostres.

Analitzant els valors obtinguts en àrids gruixuts, s'observa que tan sòls dues de les set mostres compleixen el límit del 7% d'absorció que marca la EHE per a formigó estructural. Altres autors [12] ja han comentat que l'absorció és una de les propietats físiques del àrid reciclat mixt que presenta una major diferència amb l'àrid natural i que resulta crítica alhora de ser verificada seguint la norma espanyola.

Les normes internacionals que estableixen límits a l'absorció dels àrids reciclats són molt més tolerants que l'espanyola. Així que tots els àrids gruixuts compleixen els límits establerts per la RILEM i la norma belga del 20 i el 18%, respectivament. La norma alemanya permet l'ús d'àrids amb un 15% d'absorció en el qual s'hi encabirien totes les mostres exceptuant una de les graves procedents de Montoliu. Les darreres dues normes més permissives, les de Brasil [26] i Hong-Kong [21], amb límits de 12% i 10% respectivament, privarien l'ús d'ambdues mostres procedents de Montoliu, però permeten l'ús de la resta.

La densitat seca que varia entre 1800 i 2380 kg/m$^3$, però resulta ser un paràmetre menys limitant per als àrids que l'absorció. Per exemple, la norma alemanya permet l'ús d'àrids de més de 1500 kg/m$^3$ on s'hi inclouen tots els àrids. Tot i això, en aquest cas també serien les primeres mostres en no arribar als mínims les dues procedents de Montoliu, que no estarien permeses segons les recomanacions de Hong-Kong o d'Austràlia.

Aquestes dues mostres d'àrids gruixuts procedents de Montoliu per presentar una densitat inferior a 2.000 kg/m3 serien considerats àrids lleugers, segons estableix la norma UNE 146.120:97 "Áridos para hormigones. Especificaciones". Observant la seva composició es pot donar explicació a aquest fet per presentar els valors més elevats en el contingut de ceràmics, material que es caracteritza per ser menys dens que la resta de components i amb una alta absorció.

La mida de les partícules que com asseguren alguns autors [2,27] influeix en la densitat i absorció dels àrids fent que les fraccions més petites presentin menor densitat i major absorció queda, més ben reflectit a les mostres de Les Franqueses i Peralada. Com que d'aquestes plantes es té com a mínim una mostra de cada fracció es pot comparar la densitat i l'absorció de mostres amb un mateix origen. Es pot intuir que efectivament segueixen un mateix patró, on sorra, tot-u i grava segueixen aquest ordre de major a menor absorció i de menor a major densitat.

Com és lògic, la composició influeix clarament en la densitat i l'absorció, com ja s'ha dit les mostres de Montoliu que són les que presenten més quantitat de ceràmics són les que generen una absorció més elevada i una densitat menor. D'altra banda també es compleix que els àrids de Peralada, amb els continguts de formigó i àrids naturals més elevats, presenta densitats i absorcions molt més adequades i properes a les d'àrids naturals (veure figura 31).

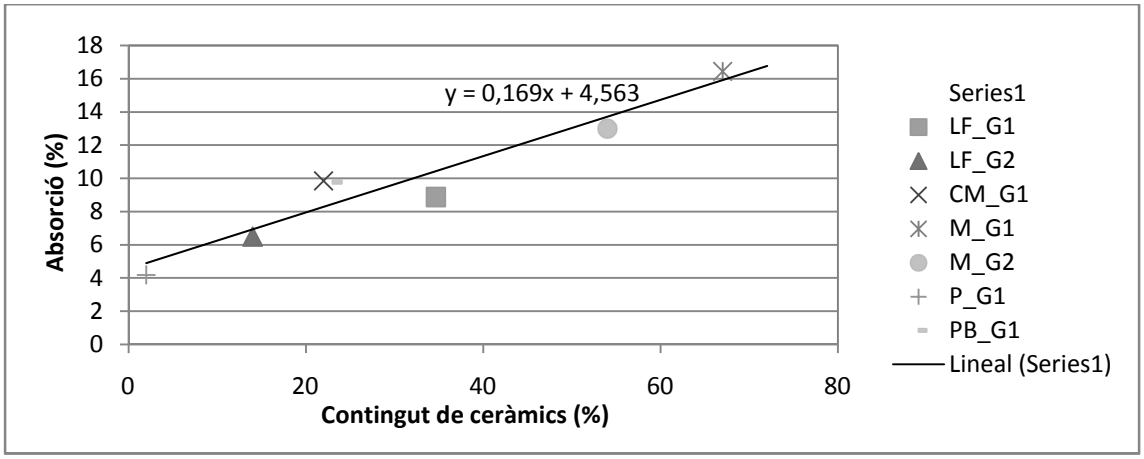


Figura 31: Relació entre contingut de ceràmics i absorció per a graves.

Els valors obtinguts de l'estat de l'art d'absorció estan compresos entre 2-14% [12,24], la qual cosa vol dir que els valors obtinguts al laboratori no són erronis però si que presenten uns límits del conjunt, mínim i màxim, una mica superiors. Respecte al fet que Martín-Morales et al.[5] trobi valors més elevats d'absorció en mostres amb partícules de mida superior, no es pot relacionar amb els resultats obtinguts ja que no s'ha donat cap cas similar, sinó com s'ha comentat anteriorment, es dóna el cas contrari.

### 4.2.6. Coeficient de Los Angeles

Els coeficients de Los Angeles de les mostres analitzades varia entre 19-34% (veure taula 32), complint en tots els casos el límit actual fixat en la EHE per a formigons no estructurals del 40% i s'inclouen en la categoria $LA_{35}$ que recull la norma UNE-EN 12620:03 "Àrids per formigó". Fins i tot, arriben a estar dins el límit del 35% que s'estableix per a subbases de carreters segons el PG-3.

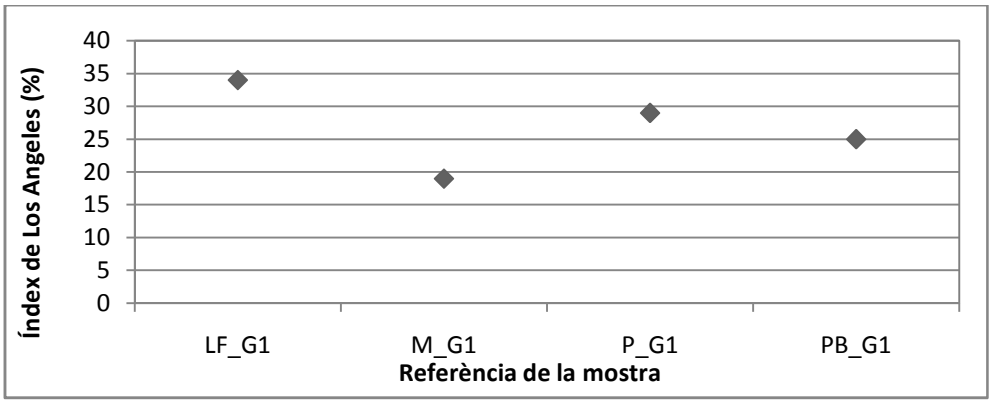


Figura 32:Resultats de l'assaig de Los Angeles.

Com havia afirmat el grup CLEAM [12], els valors més elevats corresponen a mostres amb un elevat contingut de partícules amb morter, i el valor significativament més baix correspon a la mostra procedent de Montoliu que conté un percentatge molt més elevat de ceràmics.

Els valors de Los Angeles obtinguts de les mostres d'àrid reciclat són lleugerament inferiors al rang establert a l'estat de l'art de 25-45% [12,25-27]. A més de la mostra de grava de Montoliu, la resta de mostres assajades també presenta un bon coeficient tenint en compte que altres estudis senyalaven aquest coeficient com un dels més limitants. Les raons de l'adequada resistència al desgast ha de buscar-se, doncs, en altres factors a part del contingut de ceràmics. Aquests factors poden ser la grandària de les partícula, la qualitat del formigó original, o el propi coeficient de Los Angeles de l'àrid natural que contenen.

S'observa també que el coeficient de Los Angeles més elevat correspon a la mostra de grava procedent de Les Franqueses i resulta que presenta la mida de partícula màxima més petita de totes les mostres. Així doncs, es compleix l'afirmació de que les fraccions de menor mida presenten coeficients de Los Angeles més elevats ja que són les que presenten un major percentatge de morter adherit a l'àrid natural [27].

### 4.2.7. Contaminants i impureses

La composició trobada a les mostres d'àrid mixt examinades seguint la norma EN 933-11 *"Test for geometrical properties of Aggregates". Part 11: Classification test form the constituents of coarse Recycled Aggregates "* s'exposa a la taula 15, però el contingut de vidre (Rg) ha estat afegit al contingut de varis ($Rx_2$) degut al seu contingut marginal. A la taula següent es representa un resum d'aquests continguts detallats a la taula 15 (veure taula 16) i, també, es representen gràficament (Veure figura 33).

Taula 16: Resum dels resultats obtinguts a la classificació de components.

| COMPOSICIÓ | GRAVA | TOT-U |
|---|---|---|
| Asfalt (%) | 0-15 | 7-14 |
| Ceràmics (%) | 2-67 | 2-39 |
| Formigó (%) | 21-53 | 33-43 |
| Àrids naturals (%) | 10-44 | 13-44 |
| Argila (%) | 0-1,6 | 0-1,5 |
| Guix (%) | 0,2-1,7 | 0,5-2,2 |
| Altres (plàstic, paper, vidre, fusta, etc.)(%) | 0-1 | 0-0,1 |

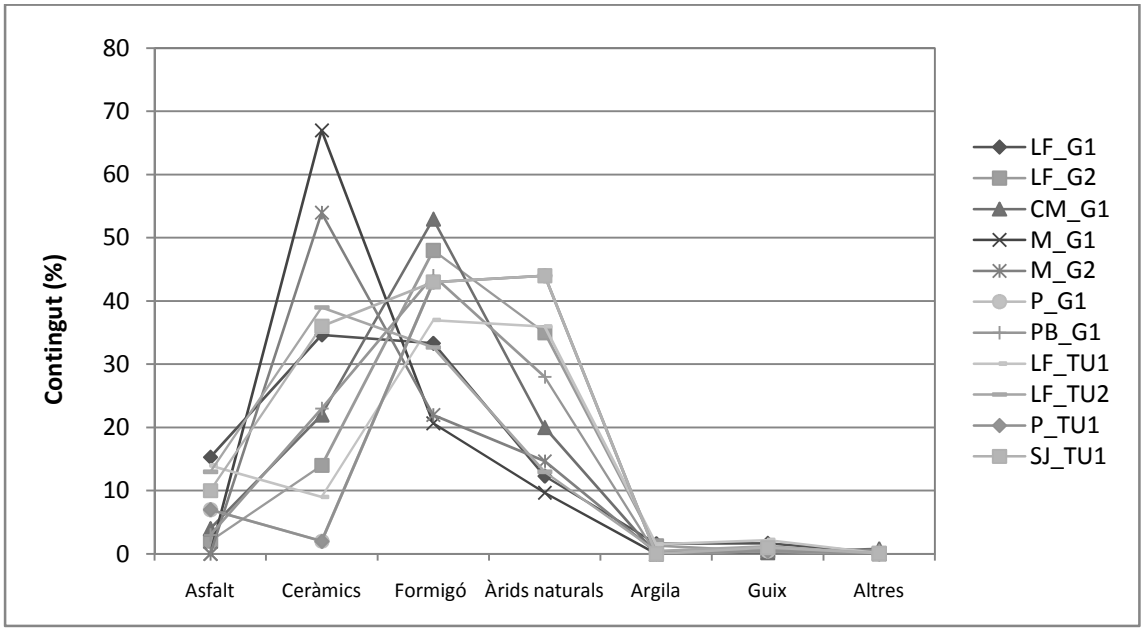


Figura 33:Resultats de la classificació de components.

Com la EHE estableix els continguts màxims per als àrids procedents de formigó, els límits per als diferents tipus d'impureses resulten, en alguns casos, il·lògics per als àrids mixts. Aquest és el cas del contingut en material ceràmic que està limitat a un 5%, però dins las categoria d'àrid mixt no està definit com a impuresa. Tan sols les mostres procedents de Peralada presenten un percentatge inferior a aquest 5%, les 9 mostres restants a les que s'ha analitzat la composició presenten percentatges molt allunyats d'aquest límit situant-se entre 9-64%. Totes les normatives internacionals recopilades i que en regulen el contingut permetrien l'ús d'àrids amb aquests nivells de ceràmics, exceptuant la categoria 2 alemanya on s'acceptaria l'ús del 50% que presenta valors inferiors al 30%, l'altre 50% es veuria relegat a la categoria 4. Aquests resultats obtinguts per les mostres de grava i tot-u són molt similars als continguts de ceràmics descrits (2-54%) pels autors comentats a l'estat de l'art [12,24].

La impuresa que presenta majors percentatges en les mostres analitzades és l'asfalt. Presenta uns continguts que van des del 0% de les mostres ceràmiques de Montoliu fins al 15% de la mostra de graveta de Les Franqueses. Només les mostres ceràmiques esmentades compliria, com és lògic, amb el màxim del 1% que determina la EHE. De les normes internacionals en destaca la norma anglesa per ser la més permissiva pel què fa a l'asfalt i en permet fins a un 10%. Aquest límit resulta molt més assequible per a les mostres analitzades i totes les plantes, exceptuant la de Les Franqueses, produeixen material amb un percentatge d'asfalt dins la tolerància. Com s'ha comentat, altres autors han trobat a les seves investigacions valors inferiors als de les plantes catalanes i recomanen per a una modificació de la EHE un límit del 5% per al contingut d'asfalt. En el cas de que es modifiqués aquest límit, tot i ser més tolerant, no suposaria l'aptitud de la majoria mostres perquè més del 50% continuaria sense complir-lo.

El contingut de guix màxim, tot i no estar establert a les normes, pot prendre un valor orientatiu del 2,1% segons alguns autors [12]. Aquest valor es podria dir que es compleix en totes les plantes de producció estudiades. Cal aclarir que la mostra tot-u de Les Franqueses que no ho compleix està quasi al límit (2,2%) i correspon a la mostra de pregarbellat 0/20 que es el resultat del rebuig de material que no pot ser tractat per aire ni aigua. Tota la resta de mostres, tractades, situen els seus continguts de guix a la franja 0,5-1,7%. Aquesta franja es molt similar a la que presenten les mostres de Vegas et al. (<2%) [34] o de Jiménez et al. (0,4-1,5%) [11] i s'allunya dels elevats percentatges obtinguts pel grup CLEAM (1-10%) [12].

Cal apuntar que la planta de Les Franqueses, malgrat tenir el nivell de tecnologia més elevat, és la que presenta percentatges més elevats de guix a les seves mostres, el que indica que la responsabilitat de l'alt contingut de guix recau en la matèria prima més que en el tractament de l'àrid.

Les normes internacionals regulen el contingut de sulfats, ja que aquests poden provocar reaccions de tipus expansiu en el formigó. Els límits establerts per al contingut de sulfats solubles en àcid és del 0,8% segons la EHE i del 1% per la resta de normes internacionals. Les dues mostres analitzades corresponen a les gravetes de Les Franqueses i Peralada, la primera en conté un 1,14% i la segona un 0,59. La mostra de Peralada compleix sense problema totes les normes, en canvi, la graveta de Les Franqueses supera els límits establerts però se situa bastant propera als màxims internacionals. Com s'ha comentat a l'estat de l'art, en l'adaptació de la norma espanyola per als àrids mixts es reclama una equiparació del contingut de sulfats a la resta de normatives. Fet que provocaria que el contingut de la mostra de Les Franqueses no estigués tant lluny de l'admissible dins el context espanyol.

Finalment, cal afegir que en cap de les mostres analitzades es dóna el cas de que la suma del contingut de vidre (Rg) i el dels classificats com a varis (plàstic, fusta, paper, etc.) ($Rx_2$) superi l'1% que estipulen les normatives consultades més restrictives amb aquesta categoria. En comparació amb els continguts trobats per Vegas et al. [34] i el grup CLEAM [12], fins al 2% o 3% respectivament, es pot dir que presenten una millor qualitat.

## 4.3. VARIACIÓ DE LES PROPIETATS DELS ÀRIDS DINS LES ESTIBES

Les propietats dels àrids depenen directament de la matèria prima que entra a la planta però aquesta matèria prima pot variar en funció del temps i de la procedència. Per tal de poder analitzar el seu efecte sobre el producte acabat, s'han pres dues mostres noves de la graveta de Les Franqueses 4/20mm i quatre mostres de la graveta 4/20mm del Port de Barcelona i se n'ha analitzat les propietats més crítiques (veure taula 17).

Taula 17:Resultats de les propietats per a l'anàlisi de la variació dins les estibes.

| | Les Franqueses | | | Port de Barcelona | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PROPIETATS** | Graveta inicial 4/16mm | Graveta 2 4/20mm | Graveta 3 4/20mm | Graveta inicial 4/20mm | Graveta 2 5/20mm | Graveta 5/10mm | Grava 1 10/25mm | Grava 2 10/25mm |
| Asfalt (%) | 15,3 | 0,7 | 3,5 | 3,0 | 26 | 4,4 | 14,4 | 27,7 |
| Ceràmics (%) | 34,7 | 38,6 | 30,6 | 23,0 | 5 | 10,4 | 14,4 | 13,5 |
| Formigó (%) | 33,3 | 42,8 | 38,9 | 44,0 | 47 | 28,2 | 34,3 | 34,5 |
| Àrids naturals (%) | 12,3 | 16,3 | 26,0 | 28,0 | 23 | 12,9 | 35,1 | 23,4 |
| Argila (%) | 1,63 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| Guix (%) | 1,70 | 0,40 | 0,16 | 1,00 | 0,3 | 0,07 | 0,30 | 0,30 |
| Altres (plàstic, paper, vidre, fusta, etc.)(%) | 0,27 | 1,13 | 0,63 | 1,00 | 0,0 | 0,03 | 0,30 | 0,44 |
| Contingut de fins (<0,063mm) (%) | 2,1 | - | - | 2,25 | 3,17 | - | - | - |
| Contingut de sorres (<4mm) (%) | 3,73 | - | - | 7,5 | 5,5 | - | - | - |
| Densitat seca (kg/m3) | 2,1 | 2,05 | 2,15 | 2,07 | 2,28 | 1,95 | 2,24 | 2,21 |
| Absorció (%) | 8,88 | 9,57 | 7,96 | 9,79 | 5,1 | 13,23 | 7,05 | 7,04 |

Les mostres noves de Les Franqueses van ser obtingudes el mateix dia però en estibes diferents per tal poder assegurar que la seva producció no havia estat a la mateixa jornada. La graveta 2 del Port de Barcelona va ser proporcionada per la planta per dur a terme el seu anàlisi setmanes més tard que la mostra inicial. Per últim, les tres darreres mostres del Port van ser preses el mateix dia però en estibes diferents i de granulometries diferents però compreses dins la 4/20 ja que, actualment, no es genera estoc de la granulometria estudiada.

Cal destacar de les mostres de Les Franqueses la millora en el contingut d'asfalt, una de les propietats més crítiques, és molt destacable. En la presa de mostres, es va tenir en compte aquest factor i es van obtenir d'estibes que en un cas presentessin poques partícules d'asfalt i que en l'altre en continguessin moltes. La mostra 2 presenta un nivell per sota dels límits establerts per la EHE i la mostra 3 per sota del 5% que recomanen alguns autors [12]. La mostra inicial presenta més de quatre vegades el contingut de la mostra amb més asfalt.

Destaca també la reducció del percentatge de guix de les mostres obtingudes. Probablement, aquests nivells de guix permetrien que els resultats del anàlisi de sulfats fossin acceptables per les diferents normes ja que amb el contingut anterior quedaven just per sobre del límit.

La resta de propietats estudiades no representa una variació destacable. Encara que es podria fer esment a un lleuger augment en el percentatge dels materials classificats com a altres (plàstic,fusta, vidre, etc.).

Observant els resultats de les mostres del Port de Barcelona, clarament, també destaca la gran variació del contingut d'asfalt. Per una mateixa granulometria (4/20), la mostra 2 presenta quasi nou vegades més asfalt que la seva homòloga de unes setmanes abans. En les mostres preses de diferents granulometries, la variació entre elles i respecte la inicial també és òbvia. Així doncs, es pot concloure que el contingut d'asfalt en la matèria prima que entra a la planta del Port és molt variable temporalment i que arriba a presentar percentatges molt nocius per a la fabricació de formigó.

Positivament destaca la reducció de les impureses varies i, sobretot la de guix en totes les mostres analitzades posteriorment a la inicial. Per a les mostres de granulometries diferents, la resta de resultats resulten els esperats, on densitat i absorció es corresponen amb la seva granulometria. En canvi, densitat i absorció obtenen valors diferents entre les mostres inicial i 2 que ja que es tracta de la mateixa granulometria, cal trobar el motiu en l'elevat contingut de ceràmics en detriment de l'asfalt de la mostra inicial i al contrari en la mostra 2.

Per últim, també s'ha efectuat l'assaig granulomètric de la mostra 2 del Port i s'observa que es redueix el contingut de sorres però augmenta el contingut de fins, tot i que sense sortir de la franja de resultats obtinguts.

# *Capítol 5*

# *PROPIETATS DELS MATERIALS I PRODUCCIÓ DE FORMIGÓ*

## 5.1. INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es detalla el procediment seguit per a la fabricació dels diferents tipus de formigons reciclats. Com s'ha exposat en els capítols anteriors, l'estudi es va iniciar amb la caracterització dels materials utilitzats en la fabricació dels diferents formigons. Un cop caracteritzats, es va procedir a la fabricació de formigons amb diferents dosificacions, mantenint la quantitat de ciment i aigua però reduint el percentatge d'àrid gruixut natural a mesura que s'augmentava el percentatge d'àrid reciclat. També és important destacar que tots els formigons van ser fabricats amb sorra natural i en cap cas es va substituir aquesta per sorra reciclada.

L'estudi es va realitzar en dues fases experimentals, en totes elles es va utilitzar el mateix tipus d'àrids naturals i reciclats. Els àrids reciclats mixtos es van obtenir de dues plantes de reciclatge de la província de Barcelona, la planta del Port de Barcelona i la de les Franqueses, i de la planta de Peralada situada a la província de Girona. A continuació es mostra una breu descripció de les fases:

- Fase 1: Es van fabricar formigons amb un 100% d'àrids reciclats produïts a la planta de les Franqueses. Es va utilitzar en tots els casos el mateix tipus de ciment CEM II A-L 42.5 R i una relació a/c efectiva que oscil·lava entre 0,50 i 0,58 amb la finalitat d'obtenir una dosificació adequada. Es va determinar la resistència a compressió de tots els formigons a 7 i a 28 dies.

- Fase 2: En aquesta fase es van utilitzar percentatges de substitució de l'àrid reciclat del 25%, 50% i 100% per valorar la seva influència en les propietats del formigó. Es van analitzar totes les plantes de reciclatge objecte d'aquest estudi. En tots els casos es va utilitzar el mateix tipus de ciment CEM II A-L 42.5 R i una relació a/c efectiva de 0,6. Es va analitzar la resistència a compressió a 7 i 28 dies de tots els formigons. La tracció indirecta i el mòdul d'elasticitat es van estudiar a 28 dies i, a més, es va analitzar la succió capil·lar i les seves densitats respectives.

Del plantejament sobre les fases experimentals executades, es pot apreciar la intenció d'una evolució en l'obtenció de resultats i profunditat de l'estudi. La primera fase va servir per determinar el mètode de dosificació més adequat a partir dels resultats obtinguts i establir les directrius de l'estudi. D'aquesta manera, es va poder corregir la dosificació i analitzar la influència dels àrids reciclats en les propietats del formigó tal com es planteja en la segona fase.

## 5.2. CARACTERITZACIÓ DELS MATERIALS

El primer pas de la fase experimental va ser la determinació de les propietats dels materials utilitzats. Un cop caracteritzats tots els materials el següent pas va ser determinar les dosificacions dels formigons posteriorment fabricats i, finalment, assajar les provetes per caracteritzar els formigons. A continuació

es mostren les propietats més importants de cada un dels materials utilitzats en la fabricació dels formigons.

### 5.2.1. Ciment

En les dues fases es va utilitzar el ciment CEM II A-L 42.5 R, les propietats del qual es detallen la taula que es mostra a continuació (veure taula 18).

Taula 18: Propietats físico-químiques del ciment utilitzat per a la fabricació del formigó.

| Propietats Químiques | |
|---|---|
| Composició | CEM II A-L 42.5 R (%) |
| $SiO_2$ | 19,0 |
| $Fe_2O_3$ | 3,7 |
| $Al_2O_3$ | 5,6 |
| CaO | 64,5 |
| MgO | 2,0 |
| $K_2O$ | 0,9 |
| $Na_2O$ | 0,1 |
| $SO_3$ | 3,2 |
| Propietats Físiques | |
| Finor (Blaine, $cm^2/g$) | 3,984 |

### 5.2.2. Àrids reciclats

A l'apartat 4, s'ha analitzat les característiques dels àrids reciclats existents a les plantes de reciclatge d'aquest estudi. No obstant, la gran majoria de les fraccions estudiades no són vàlides per a la fabricació de formigó i les que ho són, en alguns casos, han estat sotmeses a un pretractament perquè resultessin adequades. Aquest tractament ha consistit en el garbellat de les fraccions de tot-u per a l'eliminació de la sorra reciclada, ja que la seva presència causa efectes negatius tan en formigó fresc, provoca una pèrdua de treballabilitat, com en formigó endurit, augmenta la retracció i la fluència i comporta una pèrdua de resistència [2].

Dels àrids analitzats procedents de les diferents plantes de reciclatge estudiades s'ha optat, finalment, per utilitzar les següents fraccions:

- Tot-u 0/16 mm de Les Franqueses: S'ha garbellat per obtenir la fracció gruixuda de 4/16mm.
- Tot-u 0/20mm de Peralada: S'ha garbellat per obtenir la fracció gruixuda de 5/25mm.
- Graveta 4/20mm del Port Barcelona.

Com s'ha dit, el garbellat s'ha emprat a les mostres procedents de les plantes de les Franqueses i Peralada i no a la mostra de la planta del Port de Barcelona. Aquesta última ja disposa d'un sistema de garbellat apte per a l'obtenció de la fracció gruixuda adequada per a la fabricació de formigó. Es recomana que, en el cas de que les altres plantes estiguessin interessades en la utilització dels àrids reciclats per a la producció de formigó no estructural, seria convenient que disposessin d'equips de garbellat adequats per a la producció de les gravetes per a la seva comercialització.

A continuació es detallen les dades, exposades a l'apartat 4, que afecten a les mostres utilitzades en la fabricació de formigó. Les propietats per a la caracterització dels àrids utilitzats en la fabricació dels

formigons es basa en els mateixos els assaigs descrits anteriorment i es segueixen les mateixes normes UNE utilitzades.

- **Inspecció visual:** La Norma Europea (EN 933-11) especifica un mètode per a l'examen dels àrids gruixuts reciclats, amb la finalitat d'identificar i quantificar els seus components. Tal com es pot veure a la taula 19, cap dels àrids reciclats presenten impureses com ara fusta, vidres, plàstics, etc. La presència d'argiles és també molt baixa, encara que existeix, en un percentatge baix, la presència de guix com impureses perilloses. També es pot apreciar que l'àrid reciclat procedent de la planta de les Franqueses presenta un 14% de material asfàltic, podent ser aquesta una mica elevada per a ser utilitzada en algunes aplicacions de formigons no estructurals.

Taula 19: Detall taula 15. Classificació dels components dels àrids reciclats utilitzats per a la fabricació de formigó.

| **Classe de component (EN 933-11)** | LF_G1 | P_G1 | PB_G1 |
|---|---|---|---|
| Asfalt (%) | 15 | 7 | 3 |
| Ceràmics (%) | 35 | 2 | 23 |
| Formigó (%) | 33 | 43 | 44 |
| Àrids naturals (%) | 12 | 44 | 28 |
| Argila (%) | 1,6 | 0,0 | 0,0 |
| Guix (%) | 1,7 | 0,5 | 0,6 |
| Altres (plàstic, paper, vidre, fusta, etc.)(%) | 0,3 | 0,0 | 0,5 |

Tal com es pot veure a la taula 19, cap dels àrids reciclats presenten impureses com ara fusta, vidres o plàstics de forma significativa. La presència d'argiles és també molt baixa i sols existeix en una de les mostres. La presència de guix representa una de les impureses més perilloses i per determinar l'abast del possible efecte de la presència d'aquest en els àrids, també es va determinar el percentatge de sulfats solubles en àcid que s'exposen més endavant. També es pot apreciar que l'àrid reciclat procedent de la planta de les Franqueses presenta un 14% de material asfàltic, resultant ser una mica elevat per a ser utilitzat en algunes de les aplicacions de formigons no estructurals.

- **Granulometria:** La norma (UNE EN 933-1:1998) especifica les mides nominals i la forma de les obertures dels tamisos utilitzats per determinar la mida de les partícules dels àrids assajats. Per a la determinació de la granulometria dels àrids s'utilitzen els tamisos: 20, 16, 14, 10, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 i 0.063mm.

  A les figures 34 i 35 es mostra la distribució granulomètrica dels àrids de les diferents plantes de reciclatge estudiades. Es pot apreciar que la distribució granulomètrica dels tots materials està dins dels límit exigits per la norma ASTM C33-07 "Àrids per a formigó" per poder considerar els àrids adequats per a la fabricació de formigó.

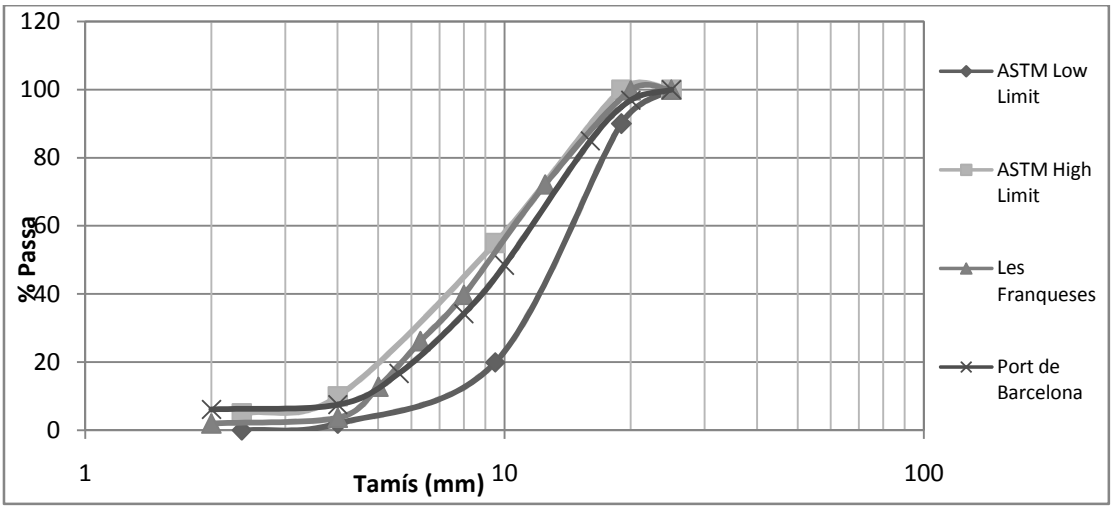


Figura 34: Distribució granulomètrica dels àrids reciclats de les plantes de Les Franqueses i el Port de Barcelona i els fusos inferior i superior núm. 67 de la norma ASTM C33-07 "Àrids per a formigó".

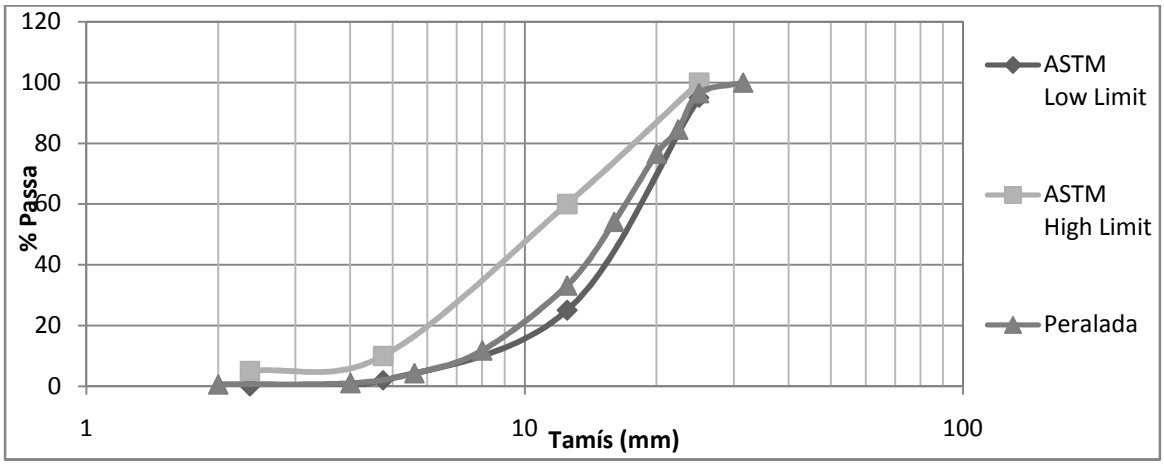


Figura 35: Distribució granulomètrica del àrid reciclat de la planta de Peralada i els fusos inferior i superior núm. 57 de la norma ASTM C33-07 "Àrids per a formigó".

- **Densitat i absorció:** Es determina d'acord a la normativa UNE EN 1097-6:2000, obtenint la densitat de partícules aparent, densitat després de l'assecat a l'estufa i densitat de partícules saturades amb superfície seca. L'absorció es defineix com la relació entre l'augment de la massa de la mostra d'àrids deguda a una imbibició parcial de l'aigua i la massa seca de la mateixa mostra.

  A la taula 20, s'il·lustren les propietats físiques de densitat seca i capacitat d'absorció dels àrids reciclats. Es pot apreciar que tots els àrids reciclats analitzats tenen una densitat menor que l'àrid natural calcari (aprox. 2.6 kg/dm3) que va ser utilitzat en aquest treball. Cal destacar que la capacitat d'absorció que tenen els àrids reciclats representa la característica que més divergeix respecte la de l'àrid calcari. Es pot veure que l'àrid procedent de la planta de les Franqueses i del Port té una capacitat (a 24 hores submergits) del 8.8% i 9.8% respectivament a causa d'una alta presència de material ceràmic a més de materials amb ciment. D'altra banda, la grava calcària utilitzada té un 0.45-1.3% d'absorció a 24 hores.

  Cal comentar que l'àrid reciclat absorbeix aproximadament un 75% al 80% de la seva capacitat en els primers 10 minuts. És molt important considerar aquest fet a l'hora de fabricar el formigó ja que degut a la capacitat d'absorció, el formigó perdrà la treballabilitat fàcilment en els primers minuts, dificultant la seva posada en obra.

- **Desgast de Los Angeles:** El seu objectiu és determinar la resistència a la fragmentació per xoc dels àrids gruixuts. Es determina d'acord a la normativa UNE EN 1097-2 i presenta valors adequats, dins els límits normatius (veure taula 20).

- **Índex de llenques:** Es determina d'acord amb la normativa UNE 933-3. Indica el la relació entre el pes de les partícules en forma de llenca respecte el pes total, tenint en compte diverses franges granulomètriques. Com s'ha comentat a l'apartat 4, totes les mostres presenten valors molt per sota dels màxims permesos (veure taula 20).

- **Sulfats solubles:** Es determina el percentatge de sulfats totals com els sulfats solubles en àcid d'acord a la norma EN-1744-1: 1998. Per valorar el possible efecte de la presència de guix en els àrids, s'han avaluat els continguts de sulfats solubles en àcid que es troben extensament normativitzats. De les dues mostres analitzades, la de Les Franqueses es podria considerar que està al límit del permès (veure taula 20).

Taula 20: Detall taula 15. Propietats físico-químiques dels àrids reciclats utilitzats per a la fabricació de formigó.

| PROPIEDADES | Norma | Les Franqueses 4/16mm | Peralada 4/30mm | Port de BCN 4/20mm |
|---|---|---|---|---|
| **Densitat seca (kg/dm$^3$)** | UNE-EN 1097-6 | 2,10 | 2,38 | 2,07 |
| **Densitat saturat s.s. (kg/dm$^3$)** | | 2,29 | 2,44 | 2,27 |
| **Absorció (%)** | | 8,88 | 4,15 | 9,79 |
| **Contingut de fins(%)** | EN 933-2 | 2,1 | 0,17 | 2,25 |
| **Coef. Los Angeles (%)** | EN 1097-2 | 33,6 | 29,4 | 25,3 |
| **Índex de llenques (%)** | EN 933-3 | 18,36 | 7,36 | 11,9 |
| **Sulfats solubles (%)** | UNE-EN 1744-1 | 1,14 | - | 0,59 |

### 5.2.3. Àrids naturals

Tots els àrids utilitzats en la fabricació dels formigons, tan la sorra natural com la graveta i la grava, són d'origen calcari. La sorra, la grava i graveta natural presenten la següent granulometria (veure taula 21).

Taula 21: Granulometria dels àrids naturals utilitzats en la fabricació de formigó

| Tamisos UNE-EN 933-2 | % que passa | | |
|---|---|---|---|
| **mm** | **Sorra 0-4** | **Graveta 4-10** | **Grava 10-20** |
| 22,4 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 100 | 100 | 93 |
| 16 | 100 | 100 | 42,8 |
| 12,5 | 100 | 99,7 | 12,4 |
| 8 | 100 | 76,4 | 2,1 |
| 5,6 | 99,4 | 22,0 | 1,5 |
| 4 | 98,4 | 3,3 | - |
| 2 | 83,2 | - | - |
| 1 | 54,6 | 0,3 | 0,9 |
| 0,5 | 34 | - | - |
| 0,25 | 20,9 | - | - |
| 0,125 | 12,1 | - | - |
| 0,063 | 5,4 | 0,1 | 0,3 |

A la figura 36 es poden veure les corbes granulomètriques dels àrids naturals utilitzats. La granulometria de tots els àrids naturals es adequada per al seu ús en la fabricació de formigons.

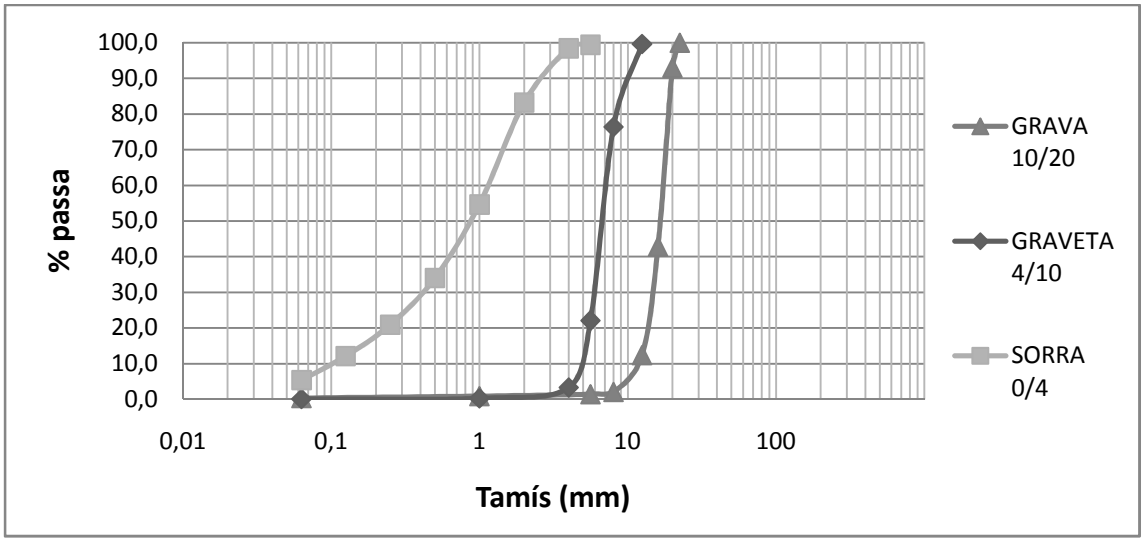


Figura 36: Distribució granulomètrica dels àrids naturals utilitzats per a la fabricació de formigó.

A la taula següent, es poden veure les propietats físiques, densitat i absorció, que cal determinar cada vegada que es fabrica formigó ja que pot variar segons la seva situació a l'estiba (veure taula 22).

Taula 22: Propietats físiques dels àrids naturals utilitzats per a la fabricació de formigó.

| Propietats | Grava | Graveta | Sorra |
|---|---|---|---|
| | 12/20mm | 5/12mm | 0/5mm |
| **Densitat aparent (g/cm3)** | 2,6 | 2,69 | 2,78 |
| **Densitat seca (g/cm3)** | 2,61 | 2,61 | 2,64 |
| **Densitat saturada s. s.(g/cm3)** | 2,61 | 2,61 | 2,69 |
| **Absorció (%)** | 0,45 | 1,3 | 1,7 |

### 5.2.4. Additius

En tots els formigons fabricats es va utilitzar un superplastificant com a additiu. En les diferents fases es van alternar dos tipus i, fins i tot, en alguns casos es van combinar. Els additius utilitzats van ser els següents:

- **Glenium Sky 549:** Està basat en policarboxilats especialment concebuts per a aplicacions en formigó preparat per millorar la treballabilitat i la capacitat de bombeig del formigó, fins i tot amb baixos continguts de ciment. Amb el seu elevat poder reductor d'aigua, permet la fabricació de gairebé tots els tipus de formigons, des de convencionals fins autocompactants. La dosificació recomanada és de 0.6-1.2%.

- **Glenium Sky 604:** Està basat en policarboxilats per a aplicacions en formigó preparat on es demani alta resistència inicial. La dosificació recomanada és de 0,3-1%.

## 5.3. FABRICACIÓ DE FORMIGÓ

La fabricació dels formigons s'ha dividit en dues fases experimentals. En la fase 1 es va realitzar la dosificació mitjançant el model teòric de Bolomey i tots els formigons es van fabricar utilitzant 250 kg de ciment per metre cúbic de formigó i una relació a/c efectiva compresa entre 0,5-0,6. Es van fabricar 9 pastades de formigó utilitzant àrids de la planta de reciclatge de Les Franqueses. La fase experimental es va dividir, alhora, en dues etapes de fabricació; en la primera, es van fabricar 5 formigons amb 100% de substitució de l'àrid reciclat (HRF 100) i un amb 50% (HRF 50). En la segona etapa, es va augmentar la quantitat de pasta afegint filler calcari (HRF 100F) per evitar les segregacions produïdes en la primera etapa.

En la fase 2 es va optar per realitzar dosificacions determinant els percentatges òptims dels àrids per a que la compacitat entre elles fos la màxima i, d'aquesta manera, evitar qualsevol risc de segregació en qualsevol dels formigons per fabricar sense haver d'afegir filler. Es va utilitzar 240 kg de ciment per metre cúbic de formigó i una relació a/c efectiva de 0.6 per als formigons amb percentatges de substitució d'àrid natural per àrid reciclat fins al 50%. En canvi, per a substitucions del 100% es va utilitzar 260 kg de ciment per metre cúbic de formigó i amb la mateixa relació a/c. Es van fabricar 6 pastades de formigó utilitzant àrids de les plantes de les Franqueses, Port de Barcelona i Peralada. Els percentatges de substitució de l'àrid reciclat en aquest cas van ser del 25%, 50% i 100%. A més es va fabricar formigó convencional.

A la taula 23 es mostra la nomenclatura utilitzada per identificar les tipologies de formigons fabricats en cadascuna de les fases experimentals plantejades.

Taula 23: Formigons estudiats amb la seva nomenclatura simplificada.

| Tipus de formigó | Nomenclatura |
|---|---|
| Formigó convencional | HC |
| Formigó amb un 100% de substitució per àrid reciclat de Les Franqueses | HRF100 |
| Formigó amb un 50% de substitució per àrid reciclat de Les Franqueses | HRF50 |
| Formigó amb un 25% de substitució per àrid reciclat de Les Franqueses | HRF25 |
| Formigó amb un 100% de substitució per àrid reciclat de Peralada | HRP100 |
| Formigó amb un 50% de substitució per àrid reciclat de Peralada | HRP50 |
| Formigó amb un 100% de substitució per àrid reciclat del Port de BCN | HRPB100 |
| Formigó amb un 50% de substitució per àrid reciclat de Port de BCN | HRPB50 |
| Formigó amb un 100% de substitució per àrid reciclat de Les Franqueses i addició de filler calcari | HRF100F |

### 5.3.1. Dosificació

- **Fase 1**

Per a tots els formigons fabricats es va utilitzar ciment CEM II / AL 42.5R, sorra calcària i, graveta i grava calcària que van ser substituïdes per àrid gruixut reciclat en funció del cas.

La utilització d'àrids reciclats per a la fabricació de formigons requereix una major quantitat d'aigua a causa de la seva capacitat d'absorció. És convenient utilitzar aquests àrids en estat de saturació amb superfície seca o amb una alta quantitat d'humitat, malgrat tot saturar els àrids abans de fabricar el

formigó és difícil en algunes situacions i en aquests casos cal afegir l'aigua suficient (aproximadament el 80% de la seva capacitat de absorció) per a que no es redueixi massa la treballabilitat del formigó fresc. En tots els formigons fabricats es va utilitzar un additiu superplastificant.

Tots els formigons fabricats en aquesta fase, excepte un formigó, es van realitzar utilitzant un 100% d'àrid reciclat procedent de la planta de les Franqueses. A la taula 24, es descriuen les dosificacions utilitzades, totes realitzades per Bolomey. La corba granulomètrica descrita pels percentatges utilitzats de sorra i d'àrids reciclats en la fabricació de formigons es compara amb la corba teòrica de Bolomey, que segueix una distribució contínua d'àrids. La figura 37 il·lustra les corbes de la dosificació HRF100-2.

Taula 24: Formigons de la fase 1 fabricats amb àrids de les Franqueses.

| FORMIGONS | Ciment (kg) | Aigua (kg) | Sorra (kg) | Graveta (kg) | Grava (kg) | AR (kg) | a/c efectiva |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **HRF100-1** | 250 | 180 | 969 | - | - | 947 | 0,58 |
| **HRF100-2** | 250 | 217 | 976 | - | - | 908 | 0,56 |
| **HRF50** | 250 | 189 | 968 | 295 | 266 | 452 | 0,58 |
| **HRF100-3** | 250 | 191 | 1076 | - | - | 860 | 0,50 |
| **HRF100-4** | 280 | 204 | 1043 | - | - | 834 | 0,50 |
| **HRF100-5** | 320 | 221 | 1000 | - | - | 800 | 0,50 |

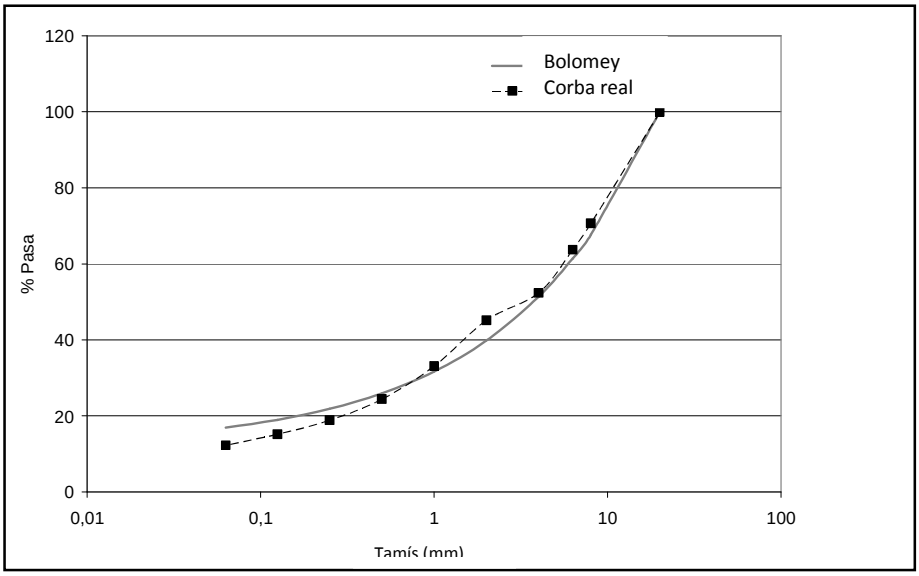


Figura 37: Corba de distribució granulomètrica de la mescla d'àrids del formigó HRF100-2.

Tots els formigons descrits a la taula 24 van obtenir una treballabilitat baixa afegint la quantitat de superplastificant recomanada pel fabricant, ja que l'additiu és, probablement, absorbit per l'àrid reciclat degut a la seva alta capacitat d'absorció. En els formigons HRF100-3 i en el HRF100-4 es va afegir una quantitat d'additiu superior a la recomanada pel fabricant per compensar aquesta pèrdua i, encara que es va aconseguir una millor treballabilitat, es va apreciar una petita segregació. Per compensar el risc de segregació es va plantejar l'augment de la quantitat de pasta afegint filler calcari, les dosificacions dels quals es poden veure a la taula següent (veure taula 25).

Taula 25: Formigons de la fase 1 fabricats amb àrids reciclats de Les Franqueses i amb addició de filler calcari en la fase 1.

| FORMIGONS | Ciment (kg) | Aigua (kg) | Filler calcari (kg) | Sorra (kg) | AR (kg) | a/c efectiva |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **HRF100F-1** | 250 | 195 | 175 | 930 | 761 | 0.50 |
| **HRF100F-2** | 280 | 208 | 175 | 917 | 750 | 0.50 |
| **HRF100F-3** | 250 | 214 | 175 | 926 | 758 | 0.55 |

Aquests formigons van obtenir una consistència fluida (mesurada amb el con de Abrams) en l'instant de fabricació. En el formigó HRF 100F-3, es va augmentar la relació aigua/ciment efectiva respecte a les dels HRF 100F-1 i HRF 100F-2 per aconseguir una millor treballabilitat. Tots els formigons es van fabricar en una pastera d'eix vertical amb capacitat de 50l. Es van fabricar 10 i 16 litres de formigó de manera que la desaparició de l'aigua va ser ràpida.

- **Fase 2**

Per valorar la influència de l'àrid reciclats en les propietats dels formigons es van fabricar formigons amb un 25%, 50% i 100% d'àrid reciclat en substitució de l'àrid gruixut natural. En aquesta fase de fabricació de formigons, es van utilitzar els àrids reciclats de les plantes de les Franqueses, del Port de Barcelona i Peralada. Totes les dosificacions es van realitzar determinant els percentatges òptims dels àrids perquè la compacitat entre ells fos la màxima i d'aquesta manera evitar qualsevol risc de segregació en qualsevol dels formigons a fabricar. Per exemple, amb els formigons fabricats amb 100% d'àrid reciclat, es va determinar que el percentatge òptim de sorra i àrid gruixut reciclat d'acord a la màxima compacitat obtinguda entre ells s'aconseguia amb la barreja del 55% de sorra i el 45% d'àrid reciclat.

A tots els formigons es va utilitzar la mateixa relació a/c efectiva, no obstant la relació a/c total dels formigons amb elevats percentatges d'àrid reciclat va ser superior degut a la humitat que presentaven els àrids i a l'aigua afegida, a l'hora de formigonar, que va ser absorbida pels mateixos àrids. Tal i com es pot apreciar a la taula següent (veure taula 26), en els formigons amb 100% d'àrid reciclat es va utilitzar una major quantitat de ciment (25kg/m³ més que a la resta dels formigons).

Taula 26: Dosificacions de formigons fabricats en la fase 2

| Tipus formigó | Ciment | Aigua | Sorra | Graveta | Grava | AR* | a/c efectiva |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0-4mm | 4-10mm | 10-20mm | | |
| **HC** | 240 | 144 | 1018 | 305 | 713 | - | 0,6 |
| **HRF25** | 240 | 144 | 1018 | 229 | 535 | 266 | 0,6 |
| **HRF50** | 240 | 144 | 1018 | 153 | 356 | 456 | 0,6 |
| **HRPB50** | 240 | 144 | 1018 | 153 | 356 | 444 | 0,6 |
| **HRP50** | 240 | 144 | 1018 | 153 | 356 | 450 | 0,6 |
| **HRF100** | 265 | 159 | 979 | - | - | 801 | 0,6 |
| **HRPB100** | 265 | 159 | 965 | - | - | 790 | 0,6 |
| **HRP100** | 265 | 159 | 1063 | - | - | 870 | 0,6 |

*L'àrid reciclat pot ésser procedent de la planta de les Franqueses (F), del Port de Barcelona (PB) o de Peralada (P).

### 5.3.2. Fabricació

La fabricació de tots els formigons s'ha realitzat al laboratori de Materials de Construcció del departament d'Enginyeria de la Construcció de la UPC. Per a la fabricació de provetes es va utilitzar una mescladora d'eix vertical.

En tots els formigons s'ha utilitzat el mateix ordre de pastat. Primer s'introdueixen a la mescladora les dues fraccions d'àrid més grans (grava i graveta), a continuació s'aboca la fracció més fina i després el ciment realitzant un primer cicle de barreja (mescla seca). Un cop realitzada aquesta barreja d'àrids amb el ciment, es realitza un últim cicle intentant afegir l'aigua en el menor temps possible des de la posada en marxa de la mescladora. L'additiu s'afegeix en última instància, s'aboca si es creu necessari en els casos en que el formigó pot presentar una consistència seca.

Després del pastat s'ha comprovat la consistència del formigó fresc mitjançant el con d'Abrams. Amb aquest assaig es verifica que el formigó fabricat estigui en les condicions adequades per a realitzar les provetes.

La mesura de la consistència del formigó amb el con d'Abrams s'executa d'acord a la norma UNE-EN 83-313-90. Consisteix en omplir un motlle de forma troncocònica de 30 cm d'altura en tres capes de quantitat similar de formigó cadascuna, compactant cada capa amb una barra de ferro mitjançant 25 cops. Un cop s'ha omplert tot el motlle, s'enrasa superiorment i es procedeix a aixecar el con verticalment sense moviments bruscos. La mesura de la consistència s'obté mitjançant la mesura, en centímetres, de l'assentament del formigó que hi havia al motlle respecte a l'alçada d'aquest. En funció d'aquest descens, es pot definir la consistència del formigó segons els valors de la taula següent (veure taula 27):

Taula 27: Consistència del formigó en funció del assentament del con d'Abrams.

| Consistència | Assentament (cm) |
|---|---|
| Seca | 0-2 |
| Plàstica | 3-5 |
| Tova | 6-9 |
| Fluida | 10-15 |

A la següent taula, es mostren els resultats a l'assaig de con d'Abrams obtinguts per a tots els formigons fabricats, juntament amb el percentatge d'additiu afegit a cada formigó. Cal tenir en compte que un excessiu ús de l'additiu pot donar lloc a la segregació del formigó, per aquest motiu les limitacions pròpies de cada additiu són facilitades pel fabricant. Hi ha certs formigons als quals no se'ls ha afegit additiu perquè s'ha decidit en el moment de la fabricació que presentaven una consistència tal que resultaven prou treballables per omplir les provetes.

Taula 28: Resultats de l'assaig del con de Abrams i la quantitat d'additiu utilitzat.

| Tipus de formigó | | Con (cm) | Additiu (%) |
|---|---|---|---|
| FASE 1 | HRF100-1 | - | 2,3 |
| | HRF100-2 | 6 | 2,2 |
| | HRF100-3 | 15 | 8 |
| | HRF100-4 | 13 | 4,5 |
| | HRF100-5 | 12 | 1,7 |
| | HRF50 | 6 | 1,3 |
| | HRF100F-1 | - | 4 |
| | HRF100F-2 | - | 2,8 |
| | HRF100F-3 | - | - |
| FASE 2 | HC | 10 | 0,8 |
| | HRF25 | 15 | 1,2 |
| | HRF50 | 8,5 | 1,2 |
| | HRPB50 | 10 | 1,3 |
| | HRP50 | 8,5 | 1,1 |
| | HRF100 | 9 | 1,1 |
| | HRPB100 | 8 | 1,2 |
| | HRP100 | 11,5 | 1,1 |

Veient els resultats, s'observa que:

- El superplastificant ha estat utilitzat en les dosificacions recomanades pel fabricant en la majoria dels casos exceptuant algun formigó que requeria una major quantitat del mateix per aconseguir una consistència adequada.

- La consistència de tots els formigons fabricats és acceptable.

- La gran majoria dels formigons fabricats presenten consistència tova o fluida a l'instant de la fabricació, però després de 20-30 minuts la consistència passa a ser plàstica-seca.

- A la vista dels resultats obtinguts s'ha acceptat totes les dosificacions.

### 5.3.3. Omplert de provetes, compactació i conservació

En aquest estadi, es va prendre com a referència la norma UNE-EN 12390-2:2001 "Assaigs de formigó endurit. Part 2: Fabricació i curat de provetes per a assajos de resistència".

Un cop pastat, s'introdueix el formigó en els motlles per a la seva conservació a la cambra humida. Previ a l'ompliment de les provetes, les parets i bases dels motlles s'impregnen d'un oli que facilita l'operació de desemmotllar posterior. El procés de emmotllat consisteix en la introducció de la pasta en els motlles en dues capes cadascuna de les quals ha de ser compactada amb 25 cops de la mateixa barra que s'ha utilitzat anteriorment per a la mesura de la consistència. A més s'ha de colpejar els motlles per la seva part exterior amb una maça amb l'objectiu d'expulsar l'aire reclòs en el formigó. Posteriorment s'enrasa perfectament cada un dels motlles perquè la cara superior sigui el més llisa possible.

Els motlles utilitzats en les fases experimentals han estat:

- Cilíndrics (10x20cm): Per a assaigs de compressió, tracció indirecta i mòdul d'elasticitat.

- Cúbics (10x10cm): Per a assaigs de succió capil·lar i densitats.

#### 5.3.3.1. Compactació

La compactació s'efectua immediatament després de l'abocament del formigó en el motlle, de manera que s'obtingui una compactació completa sense una excessiva segregació, ni aparició d'un flux de beurada en excés.

Les provetes són compactades en un nombre mínim de dues capes amb un gruix superior a 100 mm. Aquest procés es realitza amb la barra de compactar de manera que els cops es distribueixen d'una manera uniforme sobre la secció transversal del motlle.

El formigó s'aboca als motlles en un nombre mínim de capes que depèn de les dimensions de les provetes, després de compactar cada capa, es colpeja lateralment el recipient, de manera acurada, amb una maça fins que les bombolles d'aire més grans cessen d'aparèixer a la superfície i s'eliminen les depressions deixades per la barra de compactar.

#### 5.3.3.2. Conservació, desemmotllatge i transport de provetes

Les provetes es conserven durant aproximadament un dia en els motlles cobertes per una xarpellera humida, de manera que la temperatura estigui compresa entre 16 º C i 27 º C. A més s'afegeix un plàstic al damunt perquè es mantingui la humitat.

Transcorregudes 24 hores s'extreuen dels motlles les provetes i es marquen de manera que no s'alterin les superfícies que han d'estar en contacte amb els plats de la premsa d'assaig. Posteriorment les provetes es transporten a la cambra humida, on s'emmagatzemen fins a la realització dels assaigs. La càmera humida es manté en condicions estacionàries de 21 º C i quasi el 95% d'humitat.

#### 5.3.3.3. Recapçat

El recapçat de les provetes es realitza amb morter de sofre. Es realitza una barreja composta en parts iguals en pes de sofre i sorra silícica fina, on la major part de les partícules passa pel garbell de 250 micres i és retinguda pel garbell de 125 micres d'acord amb la Norma ISO 3310-1.

#### 5.3.3.4. Marcatge de les provetes

Es va establir un codi per classificar les provetes i saber en quin moment es devien retirar de la cambra humida (on es realitza el curat a les condicions esmentades) per a realitzar els corresponents assajos.

El criteri és uniforme per a totes les fases ja que els àrids reciclats utilitzats eren de la mateixa procedència. El criteri es basa principalment en diferenciar la planta de reciclatge a la qual pertanyen els àrids reciclats i el percentatge de substitució d'àrid reciclat. D'aquesta manera es troben les següents nomenclatures:

• HC: Formigó convencional fabricat amb àrids naturals sense substitució d'àrid reciclat.

• HRF - X%: Formigó amb àrid reciclat de la planta de les Franqueses, amb una substitució del X% en pes de l'àrid natural per àrid reciclat on X pot ser 0, 25, 50 o 100 depenent de la fase experimental.

• HRP - X%: Formigó amb àrid reciclat de la planta de Peralada, amb una substitució del X% en pes de l'àrid natural per àrid reciclat on X pot ser 0, 25, 50 o 100 depenent de la fase experimental.

• HRPB - X%: Formigó amb àrid reciclat de la planta del Port de Barcelona, amb una substitució del X% en pes de l'àrid natural per àrid reciclat on X pot ser 0, 25, 50 i 100 depenent de la fase experimental.

# *Capítol 6*

# *ASSAIGS I CARACTERITZACIÓ DEL FORMIGÓ*

## 6.1. INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es desenvolupen i detallen els assaigs realitzats sobre el formigó endurit a diferents edats de maduració, així com els resultats obtinguts d'aquests assajos i les observacions corresponents a aquests.

## 6.2. FORMIGÓ ENDURIT

Els assaigs que es van dur a terme sobre formigons en aquest estudi van ser els següents:

- Densitat i absorció
- Compressió
- Tracció indirecta (brasiler)
- Mòdul d'elasticitat
- Succió

A continuació es detallen els assaigs que es van realitzar en cadascuna de les fases descrites en aquest estudi:

- **FASE 1**

Assaigs de compressió a les edats de 7 i 28 dies.

- **FASE 2**

Assaigs de compressió a les edats de 7 i 28 dies, tracció indirecta (assaig brasiler) i mòdul d'elasticitat a 28 dies. També es va determinar la densitat, absorció i la succió capil·lar del formigó endurit.

### 6.2.1. Assaigs de densitat, absorció i porus accessibles

Per a la determinació de la densitat, l'absorció d'aigua i els porus accessibles del formigó endurit es van assajar 3 provetes cúbiques de 10x10x10cm de cada tipus de formigó, seguint les especificacions de la norma UNE 83-312-90 i també es va consultar la norma ASTM C642 -97. Va ser necessària una balança hidrostàtica equipada amb una cistella per a pesar la mostra en aigua.

La mostra es va pesar de tres formes diferents per a la determinació de la seva massa:

- Submergint-la en aigua a 20 ± 2 º C fins no observar cap increment de massa per després assecar la mostra utilitzant un drap humit de manera que es retiri l'aigua superficial obtenint la massa de la mostra saturada amb superfície seca ($m_1$).

- Assecant la mostra a l'estufa a 105 ± 5 º C fins no observar variació en la massa (mínim 24 hores) obtenint la massa de la mostra assecada a l'estufa ($m_2$).

- Mitjançant la balança hidrostàtica, mantenint la mostra totalment submergida en aigua, després d'haver-la tingut submergida durant 4 dies per arribar a la seva saturació obtenint la massa hidrostàtica ($m_3$).

A partir d'aquestes dades, es van determinar les següents densitats:

- Densitat de la mostra saturada: $\rho_1 = \left[\frac{m_1}{m_1 - m_3}\right] \cdot \rho_w$ (1)

- Densitat de la mostra assecada a l'estufa: $\rho_2 = \left[\frac{m_2}{m_1 - m_3}\right] \cdot \rho_w$ (2)

- Densitat de la mostra aparent: $\rho_3 = \left[\frac{m_2}{m_2 - m_3}\right] \cdot \rho_w$ (3)

On

$\rho_w$ és la densitat de l'aigua.

### 6.2.2. Assaig de compressió

Es va avaluar la resistència a compressió dels formigons a edats de 7 i 28 dies. Per a cada edat i cada tipus de formigó, es van assajar 3 provetes cilíndriques de 10x20cm d'acord amb la norma UNE-EN 12390-3.

L'assaig consisteix en comprimir les provetes aplicant una càrrega fins a la ruptura de les mateixes en una màquina de premsat com la de la figura següent (veure figura 38):

Figura 38: Màquina de premsat per a morters i formigons

La màquina disposa de dos plats d'acer amb cares planes i de superfície superior, com a mínim, en un 3% a la de la proveta a assajar. El gruix dels plats ha d'assegurar la indeformabilitat dels mateixos durant l'assaig.

Després de posar la proveta, s'aplica la càrrega de forma contínua i sense salts bruscs, de manera que l'augment de tensió mitjana sobre la proveta sigui de 0.5 ± 2 MPa/s (N/mm$^2$s). La velocitat de càrrega ha de ser constant fins que la proveta es deformi ràpidament abans del trencament. Es pren com a càrrega de ruptura la màxima aconseguida i es calcula la resistència a compressió del morter.

Per a la correcta execució de l'assaig, com s'exerceix la càrrega sobre una de les bases circulars de la proveta que va ser enrasada a mà amb l'espàtula i poden existir irregularitats a la superfície, cal recapçar les provetes prèviament a la realització de l'assaig.

El recapçat es realitza amb morter de sofre sobre la cara rugosa tal i com s'ha descrit en capítols anteriors, de manera que les dues superfícies oposades quedin totalment planes.

### 6.2.3. Assaig de tracció indirecta (assaig brasiler)

Es va avaluar la resistència a tracció indirecta dels formigons a 28 dies d'edat. Per a cada tipus de formigó es van assajar 3 provetes cilíndriques de 10x20cm d'acord a la norma UNE 83-306-85. L'assaig consisteix a comprimir les provetes aplicant una càrrega fins a la ruptura a la mateixa màquina de premsat que s'utilitza en els assaigs de compressió (figura 38).

La proveta, en canvi, es col·loca horitzontalment recolzada en el plat inferior de manera que les superfícies planes quedin perpendiculars al plat de càrrega. Amb aquesta col·locació s'aconsegueix que la càrrega s'apliqui únicament sobre una generatriu. A continuació s'aplica la càrrega de forma contínua i sense augments bruscos de manera que la progressió de la tensió de tracció indirecta sigui de 0,3 ± 0,1 kp/cm$^2$/s (0,03 ± 0,01 MPa/s).

Per al càlcul de la tensió de la tracció indirecta es va emprar la següent expressió:

$$f_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d}$$

On

$f_{ti}$ la tensió de tracció indirecta

$P$ la càrrega aplicada

$l$ la longitud de la proveta

$d$ el diàmetre de la proveta

La tensió de ruptura a tracció indirecta s'arrodonirà a 1 kp/cm$^2$ (0,1 MPa).

### 6.2.4. Assaig del mòdul d'elasticitat

Es va avaluar el mòdul d'elasticitat a compressió a l'edat de 28 dies. Per a cada tipus de formigó es van assajar 3 provetes cilíndriques de 10x20cm d'acord amb la norma UNE 83-316-96.

S'utilitza una màquina que compleix les especificacions dels assaigs anteriors, capaç d'aplicar la càrrega d'assaig a la velocitat especificada i de mantenir-la en l'esglaó corresponent. A més, es necessiten instruments per mesurar els canvis de longitud, tenint una base de mesura no menor a dos terços del

diàmetre de la proveta d'assaig i que permeti la seva col·locació de tal forma que els punts de mesura siguin equidistants a les bases de la proveta i a una distància no inferior a un quart de l'alçada de la mateixa.

Previ a aquest assaig s'ha d'obtenir el valor de la resistència a la ruptura per compressió seguint les especificacions de la UNE 83-304-84.

S'apliquen 3 cicles de càrrega fins a una tercera part del valor de la tensió de ruptura per compressió obtinguda. La tensió s'incrementa uniformement a una velocitat de 0,5 ± 0,2 N/mm²/s fins a aquest valor màxim, en el qual es manté durant 60 segons i es registra la deformació mesurada, prenent lectures de cada línia de mesura en intervals de 30s.

### 6.2.5. Assaig de succió capil·lar

Es va avaluar la succió capil·lar dels diferents tipus de formigó a partir de 2 provetes cúbiques de 10x10x10cm de cada tipus.

La succió es defineix com la relació entre el volum d'aigua absorbit per unitat d'àrea entre l'arrel quadrada del temps:

$$\frac{1}{\Theta}\int F dt = S \cdot t^{1/2}$$

On $S$ és la succió.

L'assaig consisteix a submergir una proveta de formigó en aigua de manera que aquesta només pugui ser absorbida per la part inferior de la proveta, per a això s'impermeabilitzen uns 2 centímetres de la part inferior a les cares laterals. El nivell de l'aigua ha de ser 5mm superior a la superfície de formigó en contacte amb aigua, tal com es pot veure a la figura 39.

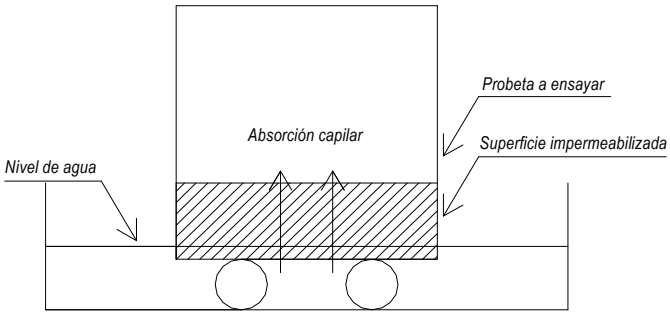


Figura 39: Esquema de l'assaig de succió

Es prenen mesures en els temps 0 (inici), 10, 30, 60, 90 i 120 minuts i es continua a les 6, 24, 48 i 72 hores. Es pesa la mostra en cadascun d'aquests instants, de manera que l'increment de pes de la mateixa, és directament el pes de l'aigua absorbida.

Inicialment, les mostres han d'estar completament seques, per això després del període de curat a la cambra humida de 28 dies, s'introdueixen en un forn a 50 º C durant 4 dies més. D'aquesta manera, el procés d'assecat és lent i no produeix fissures, la qual cosa podria provocar resultats erronis.

## 6.3. RESULTATS I DISCUSSIÓ DE LES PROPIETATS DEL FORMIGÓ ENDURIT

En aquest apartat s'analitzen tots els resultats obtinguts dels assaigs descrits en l'apartat anterior.

### 6.3.1. Propietats físiques: Determinació de la densitat

La determinació de la densitat dels formigons es va realitzar a la fase 2. Totes les mesures es van realitzar en provetes cúbiques de 10 cm de costat i 10 cm d'alçada. Els resultats expressats a la taula següent són la mitjana de dues mesures (veure taula 29).

Taula 29: Densitat dels formigons de la fase 2.

| Tipus de formigó | Densitat a 28d [kg/dm³] |
|---|---|
| **HC** | 2,41 |
| **HRP25** | 2,39 |
| **HRF25** | 2,35 |
| **HRF50** | 2,29 |
| **HRP50** | 2,35 |
| **HRF100** | 2,21 |
| **HRPB100** | 2,16 |
| **HRP100** | 2,28 |

D'acord als resultats obtinguts es pot destacar que:

- A mesura que s'augmenta la substitució de l'àrid natural per qualsevol dels tipus d'àrid reciclat, la densitat del formigó resultant és menor a causa de la menor densitat d'aquests àrids respecte els àrids naturals.

- Els formigons amb àrids de la planta de Peralada van ser els que van obtenir densitats més similars a les del HC, encara que van resultar lleugerament inferiors a aquest i de forma més notable a mesura que augmenta el percentatge de substitució. Això ve causat per l'alt percentatge de material procedent de formigó i àrids naturals detectats a la caracterització dels àrids, que suposen aproximadament el 87% dels components de la fracció granulomètrica.

- Els formigons de les plantes de les Franqueses i el Port de Barcelona van obtenir densitats similars però inferiors a les de Peralada. Això és degut a una alta quantitat de material ceràmic a la seva composició.

### 6.3.2. Propietats mecàniques: Trencament a compressió

- **Fase 1**

Com s'ha comentat anteriorment, en aquesta fase es van assajar a compressió tots formigons fabricats a 7 i 28 dies. A continuació, es detallen els valors de les resistències a compressió obtingudes (veure taula 30).

Taula 30: Resistència a compressió fase 1.

| FORMIGONS | Compressió (MPa) | |
|---|---|---|
| | 7 dies | 28 dies |
| **HRF100-1** | 18,00 | 24,98 |
| **HRF100-2** | 16,60 | 23,41 |
| **HRF50** | 18,00 | - |
| **HRF100-3** | 25,52 | 35,53 |
| **HRF100-4** | 26,50 | 34,36 |
| **HRF100-5** | 22,45 | 29,35 |
| **HRF100F1** | 24,77 | - |
| **HRF100F2** | 24,51 | - |
| **HRF100F3** | 14,86 | 20,9 |

Per veure-ho des d'un altre punt de vista, s'ha elaborat la figura 40, on s'aprecia l'evolució de la resistència amb el pas del temps entre els 7 dies i els 28 dies de maduració.

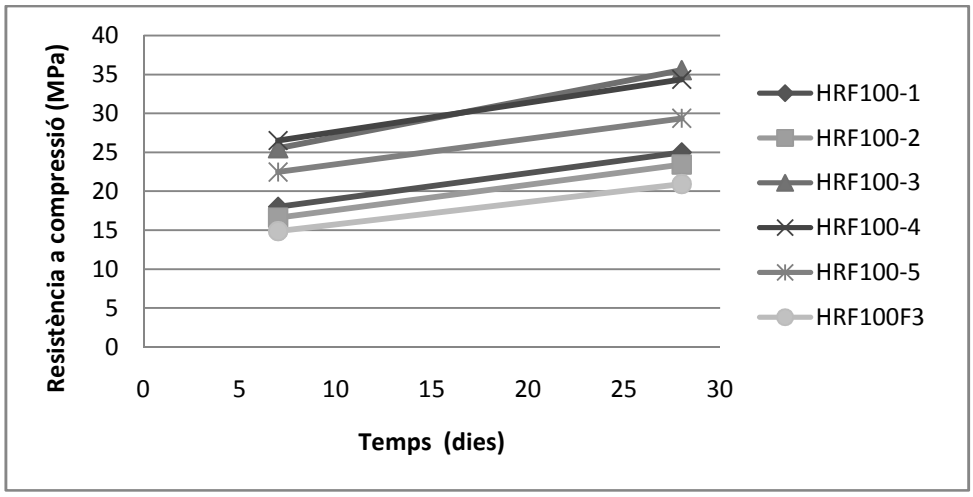


Figura 40: Evolució de la resistència a compressió en el temps per a la fase 1.

S'ha detallat també el percentatge d'increment de la resistència que pateixen els formigons en la seva maduració de 7 a 28 dies (veure taula 31).

Taula 31: Increment de la resistència a compressió de 7 a 28 dies en la fase 1.

| FORMIGONS | Increment de compressió de 7 a 28 dies (%) |
|---|---|
| **HRF100-1** | 27,94 |
| **HRF100-2** | 29,09 |
| **HRF50** | - |
| **HRF100-3** | 28,17 |
| **HRF100-4** | 22,88 |
| **HRF100-5** | 23,51 |
| **HRF100F1** | - |
| **HRF100F2** | - |
| **HRF100F3** | 28,90 |

En vista de totes les figures i taules mostrades dels resultats, s'observa que:

- Els formigons HRF 100-1 i HRF 100-2 van obtenir unes resistències a compressió a 7 i 28 dies inferiors a la resta de formigons fabricats del mateix tipus (HRF 100-3, HRF 100-4, HRF 100-5). Això és degut a que en els dos primers es van utilitzar relacions a/c grans.

- Dels formigons fabricats amb l'addició de filler calcari per evitar segregacions es va observar que les resistències obtingudes són similars a les anteriors exceptuant el HRF 100F3 que és el que presenta la resistència més baixa de tots els formigons fabricats en aquesta fase, pel fet que es va utilitzar una relació a/c major que en els altres casos.

- Tots els formigons fabricats en aquesta fase van tenir una evolució de la resistència a compressió en el temps semblant encara que les dosificacions siguin diferents en cada cas i en alguns casos s'afegís filler calcari. Els increments de resistència observats són molt semblants i estan compresos entre el 20-30%.

- **Fase 2**

Com s'ha comentat anteriorment, en aquesta fase es van assajar a compressió tots els formigons fabricats a 7 i 28 dies. A continuació, es detallen els valors de les resistències a compressió obtingudes en aquesta segona fase (veure taula 32).

Taula 32: Resistència a compressió fase 2.

| FORMIGONS | Compressió (MPa) | Compressió (MPa) |
|---|---|---|
| | 7 dies | 28 dies |
| **HC** | 24,8 | 27,41 |
| **HRF25** | 25,42 | 28,51 |
| **HRP25** | 25,93 | 27,04 |
| **HRF50** | 20,57 | 22,9 |
| **HRPB50** | 17,35 | 19,42 |
| **HRP50** | 23,04 | 26,74 |
| **HRF100** | 21,25 | 21,3 |
| **HRPB100** | 13,82 | 20,07 |
| **HRP100** | 19,51 | 21,66 |

Per veure-ho des d'un altre punt de vista, s'ha elaborat la figura 41, on s'aprecia l'evolució de la resistència amb el pas del temps entre els 7 dies i els 28 dies de maduració.

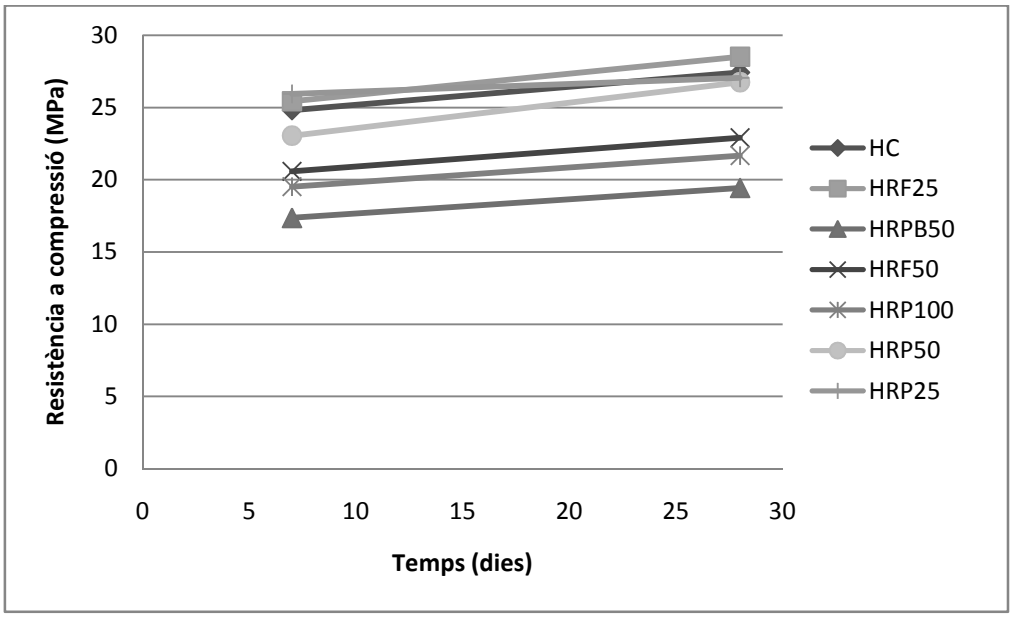


Figura 41: Evolució de la resistència a compressió en el temps per a la fase 2.

S'ha detallat, també, el percentatge d'increment de la resistència que pateixen els formigons en la seva maduració de 7 a 28 dies (veure taula 33).

Taula 33: Increment de la resistència a compressió de 7 a 28 dies en la fase 2.

| FORMIGONS | Increment de compressió de 7 a 28 dies (%) |
|---|---|
| **HC** | 9,52 |
| **HRF25** | 10,84 |
| **HRP25** | 4,11 |
| **HRF50** | 10,17 |
| **HRPB50** | 10,66 |
| **HRP50** | 13,84 |
| **HRF100** | 0,23 |
| **HRPB100** | 31,14 |
| **HRP100** | 9,93 |

I per poder fer un anàlisi comparatiu més exacte s'ha elaborat la figura 42, en la qual es comparen tots els formigons amb el HC i on es detallen l'augment o disminució que presenten els diferents formigons respecte del convencional en valors relatius.

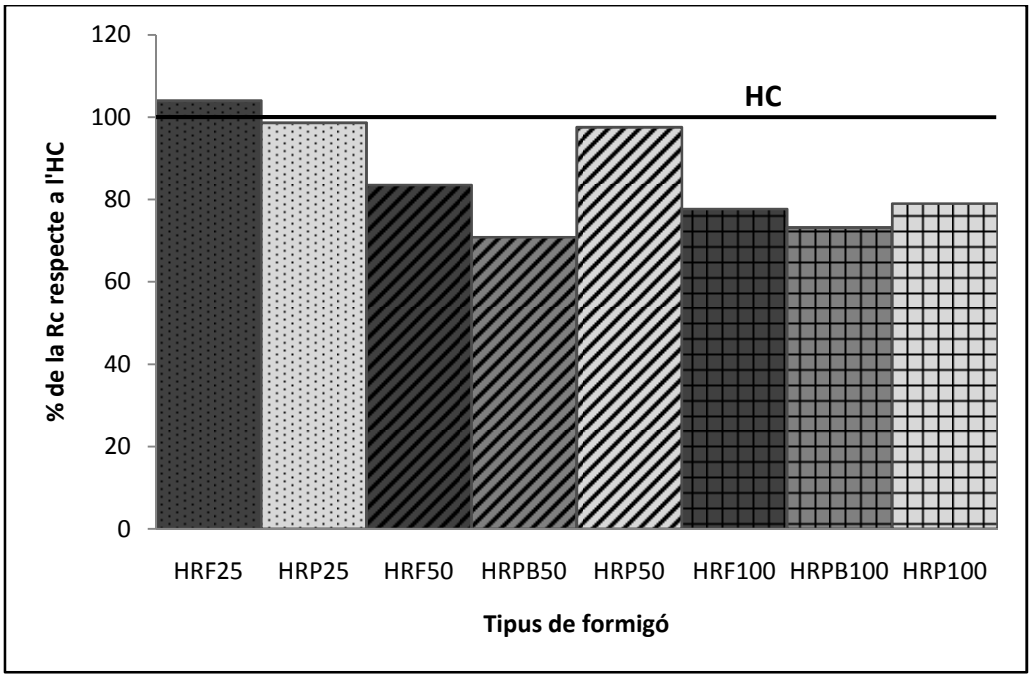


Figura 42: Anàlisi comparatiu de la resistència a compressió a 28 dies respecte a el HC per a la fase 2.

En vista de totes les figures i taules mostrades dels resultats, s'observa el següent:

- Els formigons fabricats amb un 25% d'àrid reciclat mixt van obtenir resistències similars o superiors al formigó convencional tant a 7 dies com a 28 dies.

- Els formigons fabricats amb àrids reciclats amb percentatges iguals o superiors al 50% van obtenir resistències inferiors al HC, exceptuant el HRP50 que manté una resistència semblant a la del HC.

- S'observa que els formigons fabricats amb àrids de la planta de reciclatge del Port de Barcelona (HRPB50 i HRPB100) no arriben als 20MPa als 7 dies d'edat del formigó. A més, a 28 dies la resistència a compressió d'ambdós és aproximadament de 20MPa, mentre que la resta de formigons arriba a resistències lleugerament superiors.

- De la mateixa manera que en la fase 1 l'evolució de la resistència a compressió en el temps és molt semblant per a tots els formigons estudiats, independentment de l'àrid reciclat utilitzat i el percentatge de substitució adoptat pel mateix. En aquesta fase, l'increment de resistència és similar en tots els formigons però ronda sobre un 10% per sota de les dades obtingudes per als formigons de la fase 1. Hi ha dues excepcions,HRF100 i HRPB100, però són pel fet que l'assaig es va realitzar a edats diferents del formigó, 15 i 40 dies respectivament.

- Si es comparen els resultats obtinguts dels diferents formigons fabricats amb els del HC, s'observa que a mesura que augmenta el percentatge d'àrids reciclats en el formigó els resultats empitjoren i es distancien més dels corresponents al HC.

- Es va observar que els formigons amb àrids de Peralada van ser els que van patir una menor caiguda de resistència respecte al HC fins al percentatge de substitució de l'àrid reciclat del 50%, però amb el 100% de substitució els resultats de les tres plantes van ser similars.

### 6.3.3. Propietats mecàniques: Resistència a tracció indirecta

Els resultats obtinguts en la fase 2 es descriuen a continuació.

- **Fase 2**

A la taula 11, es poden veure els resultats obtinguts en tots els formigons fabricats. Es van assajar provetes cilíndriques de 20 cm d'alt i 10 cm de costat. El resultat expressat és la mitjana dels dos valors obtinguts per cada mostra (veure taula 34).

Taula 34: Resistència a tracció en la fase 2.

| FORMIGONS | Tracció (MPa) |
|---|---|
| | 28 dies |
| **HC** | 2,5 |
| **HRF25** | 3,01 |
| **HRP25** | 2,91 |
| **HRF50** | 2,61 |
| **HRPB50** | 2,08 |
| **HRP50** | 2,71 |
| **HRF100** | 2,25 |
| **HRPB100** | 1,81 |
| **HRP100** | 2,2 |

Per poder fer un anàlisi comparatiu més exacte, s'ha elaborat la figura que segueix, en la qual es compara la resistència a tracció de tots els formigons respecte al HC (veure figura 43).

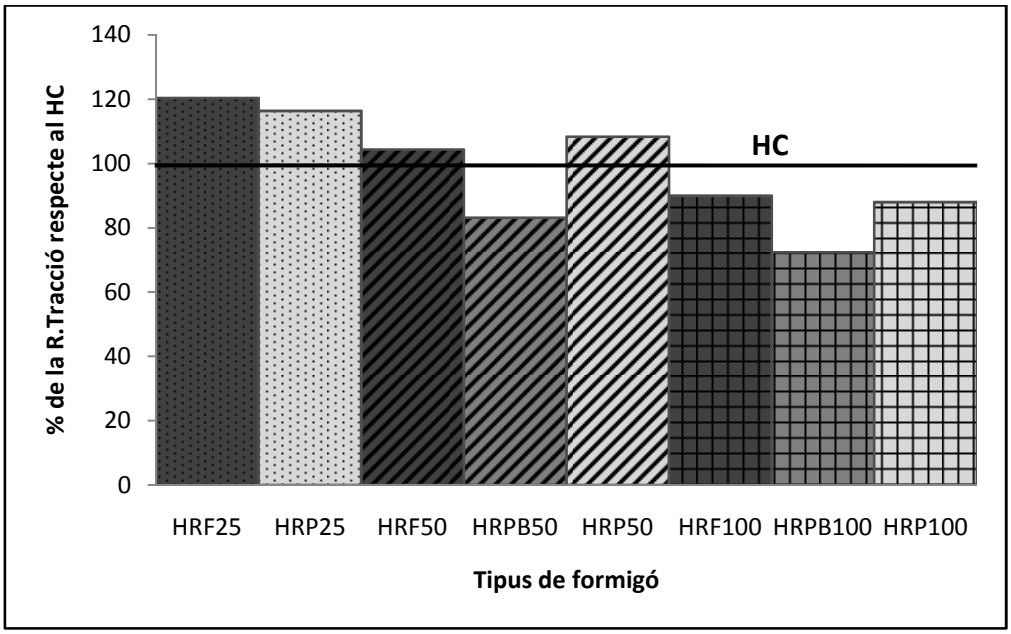


Figura 43: Anàlisi comparatiu de la resistència a tracció a 28 dies respecte al HC per a la fase 2

En els resultats obtinguts s'observa:

- El formigó HRF25 és el que té una major resistència a tracció, mentre que HRPB100 és el que té una menor resistència.

- Els formigons de les plantes de Peralada i les Franqueses amb una substitució fins al 50% (HRF25, HRP25, HRF50, HRP50) ofereixen resistències a tracció superiors a les del HC. No obstant això, quan la substitució per àrid reciclat és del 100% la caiguda de resistència d'ambdós formigons és semblant, al voltant del 10%.

- Els formigons de la planta del Port de Barcelona tenen un major descens de resistència a tracció respecte a el HC, el HRPB50 del 20% i HRPB100 del 30%.

### 6.3.4. Propietats mecàniques: Mòdul d'elasticitat

Els resultats obtinguts es descriuen a continuació.

- **Fase 2**

Els resultats obtinguts per al mòdul d'elasticitat en la fase 2, es presenten a les taules i figures que apareixen a continuació (veure taula 35).

Taula 35: Mòdul d'elasticitat en la fase 2.

| FORMIGONS | Mòdul (MPa) |
|---|---|
| | 28 dies |
| **HC** | 34602 |
| **HRF25** | 31472 |
| **HRP25** | 31711 |
| **HRF50** | 25699 |
| **HRPB50** | 24237 |
| **HRP50** | 26550 |
| **HRF100** | 21007 |
| **HRPB100** | 20225 |
| **HRP100** | 26424 |

Com s'ha fet tant en l'anàlisi de la resistència a compressió com en l'anàlisi de la resistència a tracció, s'ha cregut convenient en aquest cas realitzar, també, una taula que relacioni els mòduls desenvolupats per tots els formigons amb àrids reciclats amb el mòdul del formigó patró amb àrids naturals (veure figura 44).

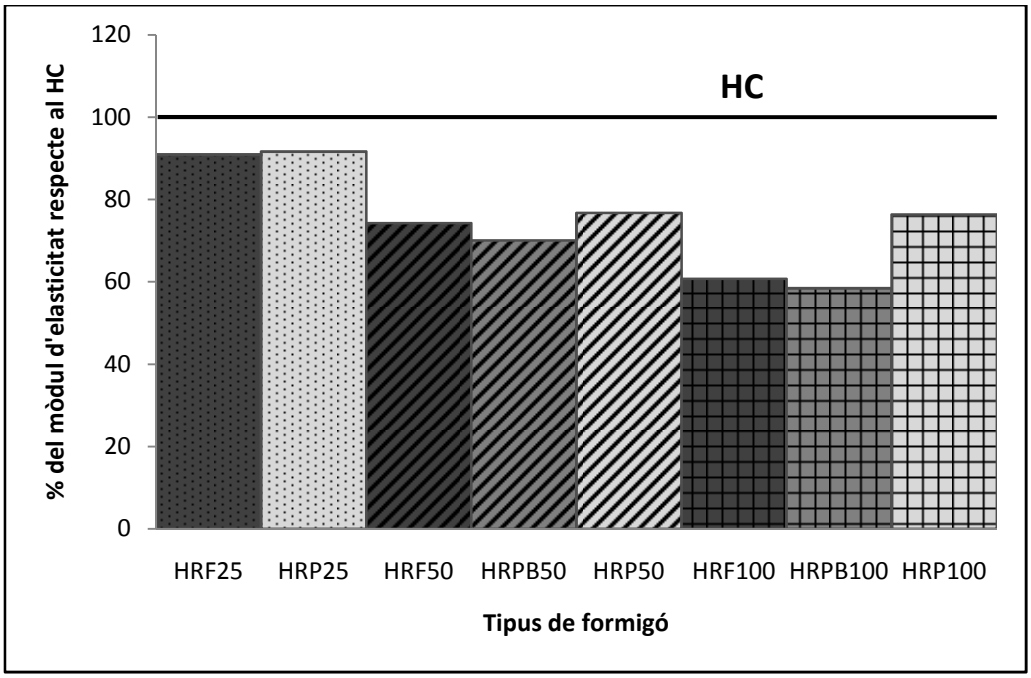


Figura 44: Anàlisi comparatiu del mòdul d'elasticitat a 28 dies respecte al HC per a la fase 2.

Pel que s'ha exposat fins ara es pot deduir que:

- Tots els formigons fabricats amb àrids reciclats van obtenir menor mòdul elàstic que l'obtingut pel formigó convencional.

- Es va apreciar que a major substitució d'àrid natural per àrid reciclat la reducció del mòdul era major. Exceptuant els formigons fabricats amb àrids de Peralada, HRP, on el mòdul d'elasticitat es manté constant entre el 50 i el 100% de substitució, amb una reducció del mòdul del 25% del mòdul respecte a el HC.

- Els formigons fabricats amb 25% i 50% d'àrid reciclat procedent de les plantes de les Franqueses i Peralada van obtenir un comportament similar. Els formigons HRF25 i HRP25 la caiguda va ser del 10% respecte al HC mentre que els formigons HRF50 i HRP50 va ser del 25%. En canvi per HRF100 la disminució va ser del 40% del mòdul respecte a el HC.

- Els formigons fabricats amb àrids procedents de la planta del Port de Barcelona, HRPB50 i HRPB100, van ser els que van obtenir menys mòdul elàstic, amb una reducció del 30 i el 40% respecte al formigó convencional.

### 6.3.5. Succió capil·lar

Aquest assaig també es va realitzar a la fase 2. Per a dur-lo a terme, es va disposar de dues provetes cúbiques de cada formigó i després es van impermeabilitzar els laterals de la part inferior de la proveta, tal i com indica la norma. Es van obtenir les dades de succió , inicialment amb una major freqüència, als 10, 30, 60, 90 i 120 minuts i, posteriorment, a les 6, 24 i 72 hores. Les dades de l'assaig es van prendre a una edat del formigó de 4 mesos.

A continuació, es detallen els valors de la succió obtinguts per a cada tipus de formigó (veure figura 45):

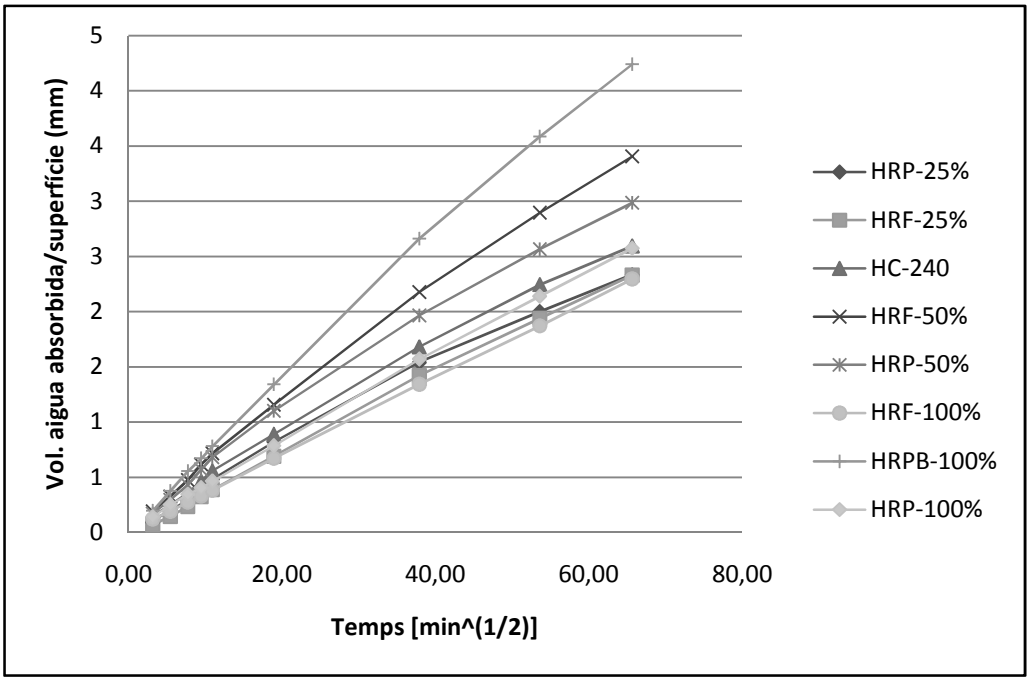


Figura 45: Succió capil·lar a 72h en la fase 2.

Per obtenir el coeficient de succió de cada tipus de formigó, es van utilitzar les dades de succió relatives a les primeres dues hores d'exposició de les provetes a l'aigua. A la figura 46, es representa el volum d'aigua absorbida per unitat de superfície respecte l'arrel quadrada del temps. A partir d'aquesta figura, es va obtenir una línia de tendència polinòmica de grau 1 per a cada tipus de formigó, essent el pendent d'aquesta mateixa línia el coeficient de succió determinat.

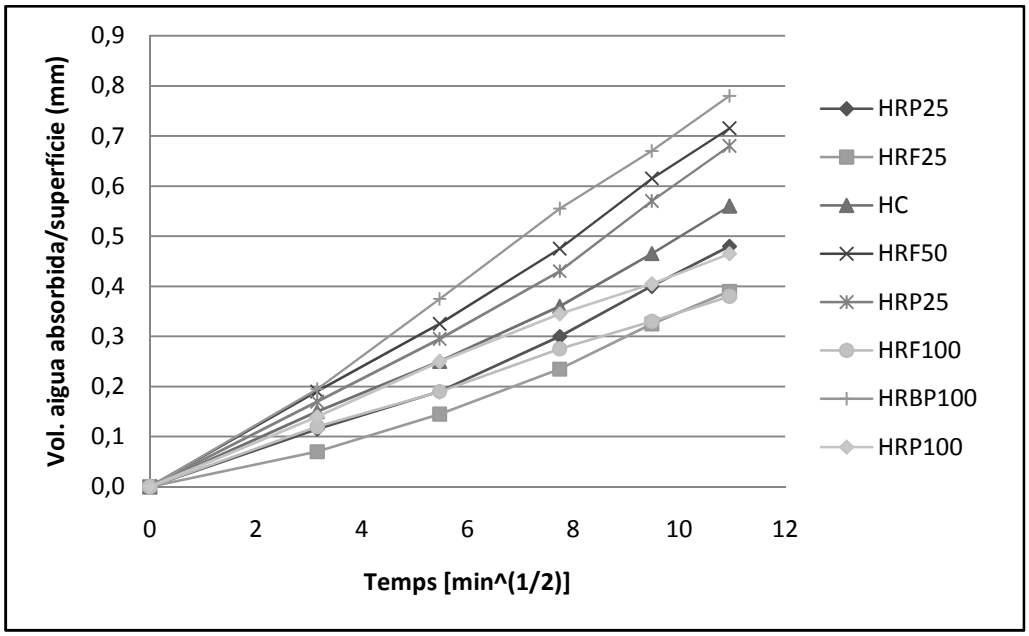


Figura 46: Succió capil·lar a 2h en la fase 2.

S'observa com el pendent de totes les rectes és superior a l'inici del procés. Això es deu a la saturació que es produeix en els porus de les provetes exposades a l'aigua amb el pas del temps.

Les línies de tendència i els coeficients de succió determinats per a cada tipus de formigó es recullen en la següent taula (veure taula 36):

Taula 36: Línies de tendència i coeficients de succió.

| Formigó | Línia de tendència | Coef. de succió |
|---|---|---|
| **HC** | y = 0,052x - 0,028 | 0,052 |
| **HRF25** | y = 0,033x + 0,010 | 0,033 |
| **HRP25** | y = 0,065x - 0,054 | 0,065 |
| **HRF50** | y = 0,068x - 0,037 | 0,068 |
| **HRP50** | y = 0,047x - 0,053 | 0,047 |
| **HRF100** | y = 0,041x - 0,073 | 0,041 |
| **HRPB100** | y = 0,074x - 0,037 | 0,074 |
| **HRP100** | y = 0,041x + 0,017 | 0,041 |

A la vista dels resultats de la gràfica es pot observar el següent:

- Tots els formigons presenten una evolució de la succió molt similar durant l'assaig.
- Els formigons amb major succió capil·lar són els fabricats amb àrids del Port de Barcelona.
- Els formigons fabricats amb àrids de les Franqueses i Peralada tenen una succió capil·lar similar.

# *Capítol 7*

# *APLICACIÓ PRÀCTICA*

## 7.1. INTRODUCCIÓ

Després d'haver realitzat la fase experimental, analitzada en profunditat en els capítols anteriors, queda patent que els àrids de les plantes de reciclatge són aptes per ser utilitzats per a la fabricació de formigons no estructurals. Amb aquest motiu, els dies 29 i 30 de juny de 2010 es va dur a terme per part de FCC (Fomento de Construcciones y Contratas) la construcció, com a prova pilot, d'una vorera de formigó amb àrid reciclat situada davant el mar a Bac de Roda (Barcelona).

Abans de la fabricació del formigó reciclat i la construcció de la vorera, es va realitzar la caracterització de la composició. Per realitzar l'anàlisi complet dels formigons fabricats, es van determinar les propietats físiques més importants dels àrids reciclats utilitzats.

La fabricació dels formigons es va realitzar en sec. En totes les pastades realitzades, abans de la posada en obra del formigó, es va determinar la consistència del formigó fresc mitjançant el con d'Abrams. Per a la caracterització del formigó en estat endurit, en cada tipus de formigó fabricat, es va determinar la resistència a compressió a 7 dies.

## 7.2. CARACTERITZACIÓ DELS ÀRIDS RECICLATS

Abans de la utilització d'àrids reciclats en la fabricació dels formigons s'ha d'obtenir la seva caracterització. Es va determinar la classificació dels components dels àrids reciclats d'acord amb la norma EN 933-11. Les propietats físiques (densitat i la capacitat d'absorció) van ser determinades d'acord la normativa prEN 1097-6:2000 i la granulometria d'acord amb la norma UNE 933-1. A més, es va determinar el percentatge de sulfats totals i solubles en àcids (UNE-EN 1744-1) per la possible presència de guix en aquests àrids.

### 7.2.1. Classificació dels components dels àrids reciclats

A la taula 37, es mostra la classificació de components de les partícules dels àrids reciclats estudiats. Els resultats donats representen la mitjana de tres valors obtinguts als assaigs.

D'acord a la classificació dels principals components (EN 933-11), tan el contingut total d'asfalts, argila-terra, vidre, fusta com guix es consideren impureses per a la fabricació de formigons.

Tal com es pot veure a la taula 37, l'àrid reciclat utilitzat en la construcció de la vorera no porta impureses com ara fusta, vidres, plàstics, etc. La presència d'argiles i de guix també és molt baixa. La presència de material asfàltic és del 5%, un percentatge acceptable per a la fabricació de formigons no estructurals. La normativa anglesa DIGEST 433 estableix el límit màxim en un 5% per a àrids procedents de formigó.

Per reforçar el possible efecte de la presència de guix en els àrids, es va determinar tan el percentatge de sulfats totals com els sulfats solubles en àcid d'acord a la norma EN-1744-1: 1998. És d'esperar, deguda a la baixa presència de guix en els àrids reciclats (<0.2%), que la quantitat de sulfats solubles en àcids sigui també baixa i gairebé segur menor al 0,8% establert com a màxim admissible per la EHE.

Taula 37: Classificació de components de l'àrid utilitzat.

| **Classe de components (EN 933-11)** | Àrid reciclat mixt |
|---|---|
| Asfalt (%) | 5 |
| Ceràmics (%) | 39 |
| Formigó (%) | 33 |
| Àrids naturals (%) | 22 |
| Argila (%) | 0,9 |
| Guix (%) | 0,1 |
| Altres (plàstic, paper, vidre, fusta, etc.)(%) | 0 |

### 7.2.2. Anàlisi físico-mecànic

A la taula 38, s'il·lustren les propietats físiques de densitat i capacitat d'absorció dels àrids reciclats. Es pot apreciar que tots els àrids reciclats analitzats tenen una densitat menor que l'àrid natural calcari (densitat aprox. de 2.6 kg/dm$^3$) que s'utilitzen generalment en la fabricació de formigons. Consegüentment, la capacitat d'absorció d'aigua que té l'àrid reciclat és torna a confirmar com la característica amb més divergència respecte la de l'àrid calcari. Es pot veure a la taula 38 que l'àrid procedent de la planta de reciclatge té una capacitat d'absorció (estant submergit 24 hores) de l'11.5% a causa d'una alta presència de material ceràmic i ciment. La grava calcària utilitzada té aproximadament entre 0,5-0,7% d'absorció a 24 hores. L'àrid reciclat absorbeix aproximadament d'un 75% a un 85% de la seva capacitat en els primers 10 minuts. Com s'ha comentat, és molt important considerar-ho a l'hora de fabricar el formigó ja que la seva capacitat d'absorció pot provocar, fàcilment, una pèrdua de treballabilitat del formigó en els primers minuts i dificultar la seva posada en obra.

Taula 38: Propietats físiques i mecàniques dels àrids reciclats.

| **PROPIETATS** | **Normativa** | **AR** |
|---|---|---|
| **Densitat seca (kg/dm$^3$)** | UNE-EN 1097-6 | 1,95 |
| **Densitat saturada s.s. (kg/dm$^3$)** | | 2,18 |
| **Absorció (%)** | | 11,5 |
| **Contingut de fins(%)** | UNE-EN 933-2 | 6,4 |

La figura 47 mostra la distribució granulomètrica de l'àrid reciclat utilitzat. Es pot apreciar que la distribució granulomètrica de l'àrid reciclat és més fina que el definit per la ASTM C33-07 com a àrid gruixut. La fracció utilitzada en la fabricació d'aquest formigó és defineix com a fracció 2/16mm. Però

per a la fabricació del formigó reciclat, la fracció d'àrid reciclat es barreja amb una fracció 12/20 mm de grava natural de forma que es compleix la granulometria exigida per la ASTM C33-07.

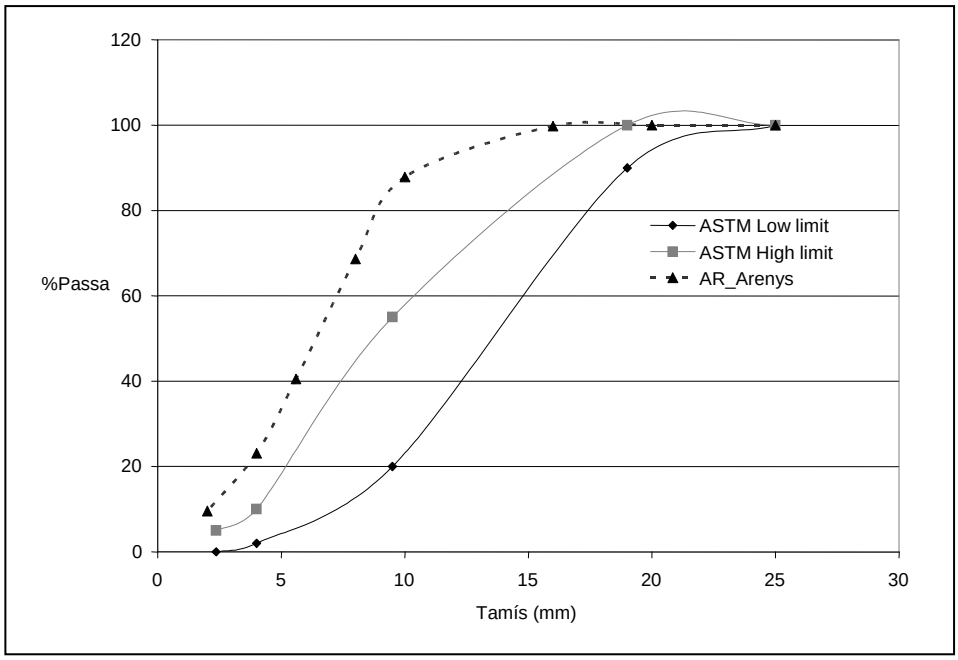


Figura 47: Distribució granulomètrica de l'àrid reciclat.

## 7.3. DOSIFICACIÓ DEL FORMIGÓ

La construcció de la vorera es va dur a terme durant 2 dies, 29 i 30 de juny, mitjançant la realització de 2 pastades cada dia. Les dues pastades del primer dia van ser realitzades del tipus de formigó 1 (H1), mentre que en el segon dia es va fabricar el tipus de formigó 2 (H2). Les dues dosificacions (H1 i H2) es descriuen a la taula 39.

Tots els formigons es van fabricar amb CEM I 42.5, i es van utilitzar 260 kg de ciment per metre cúbic de formigó (una quantitat major de ciment que en un formigó convencional per a aquesta mateixa aplicació). Els àrids naturals utilitzats (sorra i grava 12/20mm) van ser calcaris. Al H1 i H2 es van utilitzar un 43% i un 39% (en pes) d'àrid reciclats en substitució de l'àrid natural (fracció 4/12), respectivament. Als dos formigons es va utilitzar una relació aigua/ciment de 0,65.

Taula 39: Pes (kg) de cadascun dels materials per a la fabricació de 1m ³ de formigó

| | Formigó 1 (H1) | Formigó 2 (H2) |
|---|---|---|
| | Fabricat (29/06/2010) | Fabricat (30/06/2010) |
| Ciment (kg/m3) | 260 | 260 |
| Aigua (l) | 170 | 169 |
| Sorra (Vallcarca) (kg) | 960 | 960 |
| Graveta (12/20) (kg) | 540 | 580 |
| Àrid reciclat (kg) | 400 | 370 |
| Plastificant (l) | 1.5 | 2.080 |
| Superplastificant (Glenium C313) (l) | 2 | 2.340 |
| % àrid reciclat/àrid gruixut (en peso) | 43 | 39 |
| Relació aigua/ciment | 0.65 | 0.65 |

## 7.4. PROPIETATS DEL FORMIGÓ

Tal com s'ha esmentat anteriorment, cadascun dels dies de fabricació es van realitzar dues pastades. A la taula 40, es descriu la consistència que es va obtenir en cadascun dels formigons i pastades realitzades. Es pot apreciar que els formigons amb un 43% d'àrid reciclat (H1) va obtenir una treballabilitat baixa, pel que va ser necessari, d'acord amb aquests resultats, reduir el percentatge de substitució a un 39% (H2) per obtenir més treballabilitat, a priori, per no augmentar la quantitat d'aigua en la fabricació del formigó.

Per a la caracterització de la resistència a compressió a 7 dies del formigó endurit, es van fabricar provetes de 15x30cm i els resultats obtinguts es poden veure a la taula 40. Per a una aplicació d'aquestes característiques es demana obtenir uns 20 MPa de resistència a compressió a 28 dies, sent el H2 la més adequada d'acord a la resistència a compressió, així com a la treballabilitat obtinguda.

Taula 40: Consistència obtinguda (Con d'Abrams) i resistència a compressió en els formigons fabricats

| Formigons | | Consistència amb Con d'Abrams (cm) | Resistència a compressió (Mpa) |
|---|---|---|---|
| H1 | N- Albarà 66496608 | 5 | 22,3 |
| | N- Albarà 66496609 | 7 | 16,3 |
| H2 | N- Albarà 66496628 | 10 | 16,3 |
| | N- Albarà 66496629 | 8 | 18,6 |

## 7.5. MODIFICACIÓ DE LA DOSIFICACACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS

En la fabricació del formigó H2 (pastada 2) del 30 del juny 2010, en el moment de la seva posada en obra es va necessitar afegir més aigua a la cisterna per obtenir una treballabilitat adequada per la seva col·locació. Aproximadament es van afegir 100l d'aigua per a 7m³ de formigó i, per tant, es pot dir que va augmentar 14,28l/$m^3$ de formigó (es realitzen els càlculs amb 15l). Si es consideren els 15l d'aigua afegits per $m^3$ de formigó, l'aigua total passa a ser de 18 litres i, en conseqüència, la relació aigua/ciment utilitzada va ser aproximadament de 0,70.

A continuació es descriu, mitjançant algunes fotografies, la posada en obra de la pastada 2 de l'H2 (veure figura 48).

a) Formigó inicial (consistència seca).

b) Abocament del formigó amb més aigua.

c) Abocament des del camió.

d) Col·locació del formigó fresc.

e) En el formigó es detecten zones no homogènies

f) Es detecten zones no homogènies i requereixen barreja manual (ampliació de foto e)

g) Compactació

h) Fissures de retracció plàstica

Figura 48: Sèrie de fotografies (a-h) de la posada en obra del formigó reciclat a la Mar Bella.

Per definir la dosificació, la substitució de l'àrid natural per l'àrid reciclat es va realitzar en pes. S'ha de tenir en compte que els àrids reciclats tenen menor densitat que els àrids naturals a causa de la gran presència de material ceràmic i ciment. Per això qualsevol substitució del àrid natural per l'àrid reciclat realitzat en pes correspon a un volum superior d'àrid reciclat que el volum d'àrid natural substituït. En aquest cas en concret, al H1 es va utilitzar un 50% (en volum) d'àrid gruixut reciclat i al H2 aproximadament un 46%.

D'acord als resultats en la fase experimental, per a formigons fabricats amb 250 kg de ciment per m³, amb un 50% (en volum) d'aquest tipus d'àrid reciclat en substitució de l'àrid natural per a l'obtenció d'una adequada treballabilitat i una resistència de 20-23MPa a 28 dies (propietats adequades per a

aquesta aplicació), caldria una relació aigua/ciment total de 0,70-0,72 (ja que una part important de l'aigua és absorbida per l'àrid reciclat), essent superior a la relació aigua/ciment definida inicialment en el projecte (0,65).

En els formigons fabricats per a la construcció de la vorera no es va corregir l'aigua que seria absorbida per l'àrid de manera que a l'hora de fabricar es va haver d'afegir més aigua que no va ser controlada amb precisió.

Cal tenir en compte l'aigua que serà absorbida per l'àrid reciclat (capacitat d'absorció en 10 minuts) i que aquesta quantitat d'aigua sigui afegida a l'hora de fabricar el formigó per evitar una reducció de la treballabilitat i una forta retracció en el formigó. Es pot apreciar a la imatge h de la figura 48 com apareixen fissures a poques hores de fabricar el formigó. S'ha d'aclarir que el formigó estava exposat al sol (per sobre de 30 º C) i a primera línia de mar produint-se , en conseqüència, una evaporació forta i una alta necessitat de curat.

D'acord a possibles problemes de durabilitat en aquest formigó, es va analitzar la quantitat de guix present en els àrids i resultava realment baix (0.1%), a més, no es van detectar presències destacables d'altres contaminants com vidre, alumini, etc. Pel fet que es descarten possibles problemes de durabilitat per causes internes del mateix formigó.

# *Capítol 8*

# *CONCLUSIONS GENERALS*

## 8.1. INTRODUCCIÓ

Després de tot el presentat fins ara, en aquest capítol es pretén recollir les conclusions extretes del treball realitzat. Aquestes conclusions s'exposen, a continuació, de forma concisa i ordenada, seguint els diferents punts tractats a l'estudi. En darrer lloc, també s'exposen les futures línies de recerca que es consideren convenients per a l'estudi exhaustiu de l'ús d'àrids reciclats, principalment, en la fabricació de formigons.

## 8.2. CONLUSIONS

### 8.2.1. Àrids

- La majoria de mostres presenta unes corbes granulomètriques adequades. Només la grava 12,5/25 i el pregarbellat 0/12.5 de Les Franqueses, la sorra 0/5 de Callús i el tot-u 1/25 de Sant Julià queden fora dels fusos granulomètrics definits per la ASTM d'àrid per formigó.

- Gairebé la meitat de les mostres de grava compleix la limitació de contingut de fins de la EHE del 1,5% i totes compleixen amb les normes internacionals menys restrictives en aquest aspecte (Alemanya i Hong-Kong).

- Aproximadament un 70% de les mostres de grava està en conformitat amb el màxim contingut de sorres habitual (5%). Les mostres del Port de Barcelona i Manresa que no hi són incloses podrien considerar-se encara acceptables per trobar-se dins els límits dels desclassificats inferiors.

- Els percentatges obtinguts a l'assaig de l'índex de llenques compleixen amb solvència el límit establert per la EHE del 35% en tots els casos.

- Seria recomanable realitzar, en futurs estudis, l'assaig del coeficient de forma per confirmar els bons resultats obtinguts a l'índex de llenques. Ja que s'observen partícules, principalment ceràmiques, en forma de llenca que podrien provocar problemes d'adherència amb el morter però que no queden reflectides en l'assaig de l'índex de llenques.

- Els valors d'absorció obtinguts en àrids gruixuts resulten crítics alhora de ser verificats seguint la norma espanyola. Les principals normatives internacionals que permeten l'ús d'àrid reciclat proposen valors d'absorció que serien assolits per les mostres analitzades. Així que resulten raonables les recomanacions d'alguns autors per a l'adequació de la normativa espanyola.

- La mida de les partícules influeix en la densitat i l'absorció dels àrids, fraccions més petites d'un mateix origen presenten menor densitat i major absorció.

- Els coeficients de Los Angeles de les mostres analitzades s'estableixen, en tots els casos, per sota del límit actual fixat en la EHE i, fins i tot, arriben a estar dins el límit del 35% que s'estableix per a subbases de carreteres segons el PG-3.

- Els valors més elevats del coeficient de Los Angeles corresponen a mostres amb un elevat contingut de partícules amb morter, i els valors més baixos, a les mostra amb un percentatge més elevat de ceràmics.

- La impuresa que presenta majors percentatges en les mostres analitzades és l'asfalt i sols les mostres ceràmiques de Montoliu compleixen l'1% que estableix la EHE.

- En el cas de que s'ampliés el límit d'asfalt al 5% proposat, no suposaria l'aptitud de la majoria mostres perquè més del 50% continuaria sense complir-lo.

- Totes les mostres analitzades contenen un percentatge de guix inferior al recomanat.

- Els límits establerts per al contingut de sulfats solubles en àcid del 0,8% segons la EHE i del 1% per la resta de normes internacionals es compleixen a la mostra de graveta del Port de Barcelona però la de Les Franqueses es troba al límit de complir les internacionals.

- S'observa que tots els àrids utilitzats per a la fabricació de formigons no excedeixen els límits imposats per les normes pertinents.

### 8.2.2. Plantes

- Les plantes de les Franqueses i Callús han d'ajustar el garbellat de les seves mostres per a que totes compleixin amb els fusos normatius. La planta de Sant Julià ha de millorar significativament aquest sistema de garbells per a produir la granulometria correcta i prevista de les seves mostres.

- Les mostres de sorra i grava procedents de Manresa presenten uns continguts de fins molt superiors als que s'observen en les altres plantes per a la mateixa granulometria. És recomanable la revisió del sistema de pregarbellat i garbellat per a la seva correcció.

- Totes les plantes analitzades utilitzen els equips de trituració òptims per a l'obtenció de partícules de forma adequada.

- La planta de les Franqueses, tot i tenir el nivell de tecnologia més elevat, és la que presenta percentatges més elevats de guix a les seves mostres, tot i complir amb els requisits. Per millorar aquest aspecte, és molt recomanable la instal·lació d'un sistema d'infrarojos que permeti la detecció i eliminació de les partícules de guix o bé la major restricció de la matèria primera que entra la planta i una selecció de les runes més exhaustiva.

- Els resultats de les mostres destinades a analitzar la variació de les propietats dels àrids revelen una important influència temporal en el contingut d'asfalt i, en menor rellevància, en el de guix.

- El control del residu que entra a la planta ha de ser més estricte per obtenir un material final de qualitat. Les plantes han de censurar l'entrada d'asfalt ja que només pot ser eliminat a través de processos manuals.

- Destaca la qualitat dels àrids produïts a les plantes de la GRC ja que en comparació amb els resultats obtinguts per altres autors i recopilats a l'estat de l'art presenten valors molt semblants o millors que àrids processats en altres plantes amb nivells tecnològics superiors.

### 8.2.3. Formigó fresc

- Tots els formigons amb el mateix tipus d'àrid reciclat s'han comportat de manera similar en totes les fases.

- La treballabilitat és bastant difícil de controlar en formigons fabricats amb més del 50% d'àrid reciclat. Per controlar-la es recomana utilitzar els àrid amb una alta quantitat d'humitat i afegir, a l'hora de fabricar, l'aigua que serà capaç d'absorbir en 10 minuts.

- La consistència de tots els formigons fabricats és acceptable amb additiu. La gran majoria dels formigons fabricats presenten consistència tova o fluida l'instant de la fabricació però aproximadament en 20-30 minuts la consistència passa a ser plàstica seca.

- Els formigons amb àrids del Port de Barcelona són els menys treballables de tots i, per tant, als que més additiu se'ls ha d'afegir per contrarestar aquest efecte.

### 8.2.4. Formigó endurit

- Respecte a la densitat del formigó fabricat amb àrid reciclat, es pot dir que com més gran és el percentatge d'àrid que s'utilitza menor és la densitat del formigó reciclat. A més, a menor densitat de l'àrid reciclat es dóna menor densitat del formigó, per això els formigons fabricats amb formigons procedents de la planta de Peralada obtenen densitats majors als formigons fabricats amb àrids reciclats procedents de les plantes de Les Franqueses o el Port de Barcelona.

- D'acord a les propietats mecàniques, es pot destacar que els formigons fabricats amb àrids procedents de la planta de Peralada obtenen millors resistències que les corresponents als formigons fabricats amb àrids de Les Franqueses o el Port de Barcelona.

- A causa d'una mida menor i una forma més adequada de l'àrid procedent de la planta de Les Franqueses que el produït a la planta del Port, els formigons HRF obtenen millors propietats que els formigons HRPB. No obstant, tots els formigons fabricats, tant amb el 50% com el 100% de l'àrid de la planta de Port, obtenen resistències superiors a 20 MPa.

- No es detecta una caiguda de resistència a compressió i tracció significativa entre els formigons fabricats amb àrids de Peralada amb substitucions de l'àrid reciclat del 50 i 100%, probablement a causa de la fabricació de formigó amb baixa quantitat de ciment, una relació aigua/ciment alta i, en conseqüència, una pasta de ciment poc densa, podent ser aquesta no molt diferent a l'existent en els àrids.

- Els formigons fabricats amb àrids de Peralada són els que tenen un millor comportament en la resistència a tracció dels formigons. Probablement a causa d'una molt bona interfase.

- La resistència a tracció del formigó fabricat amb 50% i 100% de l'àrid reciclat de la planta de les Franqueses tenen un comportament pràcticament similar als de Peralada, possiblement, com a conseqüència d'una adequada interfase.

- Tots els formigons estudiats pateixen un descens del mòdul elàstic en augmentar el percentatge de substitució per àrid reciclat i el menor descens és el produït pels formigons fabricats amb àrids de Peralada.

- Respecte a la capacitat i absorció capil·lar, es detecta que el formigó fabricat amb l'àrid del Port de Barcelona té el pitjor comportament. Els formigons fabricats amb un percentatge menor al 50% d'àrid reciclat obtenen un coeficient de succió similar al del formigó convencional.

### 8.2.5. Aplicació pràctica

Després de la fabricació de la vorera amb àrids reciclats es poden extreure les següents conclusions:

- Abans de la utilització dels àrids reciclats en substitució àrids naturals per a la fabricació de formigó és necessari determinar: la composició, les propietats físiques de densitat, absorció i granulometria i la quantitat de sulfats solubles en àcid. És recomanable que la quantitat de material ceràmic present en els àrids reciclats sigui inferior al 45% i l'absorció no sigui superior al 10% als 10 minuts d'exposició. (Els àrids mixts utilitzats en aquest cas complien aquestes recomanacions).

- Abans de la fabricació del formigó s'ha de determinar la humitat dels àrids reciclats. A causa de l'alta capacitat d'absorció que presenten els àrids, és recomanable utilitzar-los humits per reduir la seva capacitat d'absorció a l'hora de la fabricació del formigó i d'aquesta manera poder controlar més fàcilment la treballabilitat i la relació aigua/ciment. Per tant, s'ha de controlar la quantitat d'aigua total en el formigó. També per això és necessari determinar la humitat dels àrids a més de mesurar i controlar l'aigua afegida a la cisterna. Aquest exercici és necessari per poder reproduir la fabricació del formigó amb facilitat.

- Als formigons fabricats amb un 50% (en volum) de substitució de l'àrid natural pel tipus d'àrid reciclat utilitzat (quantitat elevada de material ceràmic i ciment), la relació aigua/ciment total necessària per aconseguir els requisits de treballabilitat i resistència mínima per a aquest tipus de formigons hauria de ser una mica superior a l'escollida per a la fabricació (0,65).

- S'aconsegueixen resistències a compressió a 28 dies superiors a les recomanades per l'Ajuntament de Barcelona per a l'execució de paviments de formigó per a voreres.

## 8.3. FUTURES LÍNIES DE RECERCA

En línies presents de treball, s'està estudiant l'efecte del tipus de ciment sobre les propietats del formigó. Alhora també s'està assajant provetes de formigó a flexo-tracció ja que representa un propietat molt rellevant per a la seva aplicació en paviments. Finalment, altres línies previstes d'execució però que encara no s'estan efectuat tracten, principalment, d'estudiar els diferents aspectes que afecten a la durabilitat del formigó, com poden ser l'atac per sulfats i els fenòmens d'expansió.

## ***BIBLIOGRAFÍA***

1. Hendriks, Ch.: "The Building Cycle". Aeneas Tech.Pbl.The Netherlans, 2000.
2. Grupo de trabajo *"Hormigón reciclado"*.: "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Universitat Politècnica de Catalunya. Noviembre, 2002.
3. Del Río Merino, M.; Izquierdo Gracia P.; Salto Weis Azevedo, I.: "Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered". *Waste Management & Research*, 28 (2010): 118–129. ISSN 0734–242X.
4. Kasai, Y.: "Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan". *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994: 93-104.
5. Martín-Morales, M.; Zamorano, M.; Ruiz-Moyano, A.; Valverde-Espinosa, I.: "Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08". *Construction and building materials*. (2010). ISSN 0950-0618.
6. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. "Plan Nacional Integrado de Residuos para el periodo 2008-2015", BOE, nº 49 (2009), pp. 19893-20016.
7. Ministerio de la Presidencia: "RD 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición", BOE, nº 38 (2008), pp. 7724-7730.
8. Solis Guzman, J.; Marrero, M.; Montes-Delgado, M.V.; Ramirez-de-Arellano, A.: "A Spanish model for quantification and management of construction waste", *Waste Management & Research*, 29 (2009): 2542–2548.
9. Ministerio de Fomento: "Orden/FOM/891 por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, relativos a firmes y pavimentos", BOE, nº 83 (2004), pp. 14446-14509.
10. Ministerio de Fomento: "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)", BOE, nº 203 Suplemento (2008): 1-304.
11. Jiménez, J.R.; Agrela, F.; Ayuso, J.; López, M: "Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para subbases de carreteras". *Materiales de construcción,* (2010). ISSN: 0465-2746.
12. Sánchez de Juan, M.; Alaejos, P.; Geraldes, V.L. et al.: "Conclusiones sobre reciclado de residuos de construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales". En publicación. Ihobe, 2010.
13. GERD: "Editorial. Demolición y Reciclaje". 2007.
14. Tertre, I.: "Reciclado de materiales de Construcción. Manual de Demoliciones, Reciclado y Manipulación de materiales". Ed. Fueyo Editors. 2003.
15. Vegas, I.; Lisbona, A.; Sánchez de Juan, M.; Carvajal, M.D.: "Characterization of mixed recycled aggregates for use in non-estructural concrete: influence of the treatment process". International Rilem Conference on Progress of Recycling in the Built Environment. Sao Paulo, Brasil. December, 2010.
16. Gestora de runes de la construcció, S.A. "Memòria 2009".
17. RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): "Specifications for Concrete with Recycled Aggregates". *Materials and Structures*, 27 (1994): 557-559.
18. Vincke, J.; Rousseau, E.: "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994: 57-69.

19. BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete". 2002.

20. DIN 4226-1:2000: "Concrete Aggregate". 2000.

21. HONG KONG: "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates". Works Bureau Technical Circular 12/2002.

22. Tam, VWY.; Wang, K; Tam, CM.: "Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis". *Hazard Materials*, 152 (2008):703–714.

23. Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M.: "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled agrégate concrete". *Cement and Concrete Research*, 37 (2007): 735-742.

24. Sànchez de Juan, M.: "Estudio sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2005.

25. González, B.: "Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante". Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña, 2002.

26. BRAZIL: "Recycled Aggregate Standardization in Brazil". Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté. 2002.

27. Barra; M.: "Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 1996.

28. Chen, H.J.; Yen, T.; Chen. KH.: "Use of buildings rubbles as recycled aggregates". *Cement and Concrete Research*, 33 (2003): 125-132.

29. Debieb, F.; Kenai, S.: "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete". *Construction and Building Materials,* 22 (2008): 886-893.

30. Vegas, I.; Ibañez, J.A.; San José, J.T.; Urzelai, A.: "Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction". *Waste Management*, 28 (2008): 565-574.

31. Sagoe-Crentsil, K.; Brown, T.: "Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production". CSIRO, Building, Construction And Engineering. Ecorecycle, Victoria. September, 1998.

32. Tabshand, SW.; Abdelfatah, AS.: "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". *Construction and Building Materials*, 23 (2009):1163–1167.

33. Chini, A.R.; Kuo, S.S.; Armaghani, J.M.; Duxbury, J.P.: "Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track". *J. Transport Eng.,*127 (2001):486–92.

34. Vegas, I.; Ibañez, J.A.; Lisbona, A. et al.: "Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections". *Construction and Building Materials*, 25 (2011): 2674-2682.

35. Sanchez, M.; Alaejos, P.: "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate". *Construction and Building Material*, 23 (2009): 872-877.

36. Poon, C.S.; Chan, D.: "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road subbase". *Construction and Building Material*, 20 (2006), 578-585.

37. Fouad, M.; Khalaf H.A.; DeVenny, A.S.: "Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete". *J. Materials and Civil Eng.*,v16(2004):331–340.

38. Poon, C.S.; Chan, D.: "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong". *Conservation and Recycling*, 50 (2007): 293-305.

39. Poon, C.S.; Chan, D.: "Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick". *Construction and Building Materials*, 20 (2006): 569-577.

40. Arm, M.: "Self-cementing properties of crush demolished concrete in unbound layers: results from triaxial test and field test". *Waste Management*, 1 (2000): 579-587.
41. Sherwood, P.T.: "Alternative materials in road construction". Thomas Telford, London, (2001).
42. Pérez, I.; Toledano, M.; Gallego J.; Taibo, J.: "Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición". *Materiales de Construcción*, 57 (2007): 17-29. ISSN: 0465-2746
43. Gestora de runes de la construcció, S.A. "Memòria 2006".
44. Gestora de runes de la construcció, S.A. "Memòria 2008".
45. Gestora de runes de la construcció, S.A. "Memòria 2007".