

**Regina Célia
Espinosa Modolo**

Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil





Regina Célia

Espinosa Modolo

**Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em
produtos da construção civil**



**Regina Célia
Espinosa Modolo**

**Valorização de resíduos do sector de pasta e papel
em produtos da construção civil**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Víctor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Vogais

Doutor Delfim Fernandes Soares
Professor Auxiliar da Universidade do Minho

Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira (Orientador)
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

*O gasto é inevitável,
O desperdício é opcional.*

Inspirado em Carlos Drummond de Andrade

Palavras-chave Resíduos, valorização, materiais, construção civil.

Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação enquadra-se no objectivo geral de valorização de resíduos provenientes de unidades de pasta kraft de eucalipto, nomeadamente dregs, grits e areias do leite fluidizado.

Em concreto, avaliaram-se diferentes alternativas para valorização de subprodutos introduzidos em produtos do sector da construção civil, tais como cimento, argamassas e misturas betuminosas para pavimentos rodoviários.

A metodologia adoptada inclui as seguintes fases: caracterização química e mineralógica dos subprodutos e dos materiais da construção civil incorporados, ensaios laboratoriais, e caracterização dos provetes obtidos.

Dos resultados laboratoriais de caracterização dos subprodutos avaliaram-se as potencialidades em relação ao enquadramento destes às especificações exigidas para as áreas de aplicação. Com os resultados da caracterização dos provetes ensaiados foi possível avaliar o comportamento dos provetes com resíduos incorporados comparativamente aos provetes sem incorporação.

Em relação à introdução de grits em cimento, o trabalho foi de incorporação destes resíduos nas matérias-primas tradicionais de produção de cimento Portland, tendo os grits a vantagem de serem constituídos essencialmente por CaCO_3 que faz parte da matéria-prima deste produto, considerado como uma solução de escoamento de elevadas quantidades. É de destacar as boas características dos grits também para a área de vias e pavimentos rodoviários, incorporados em misturas betuminosas para camada de regularização.

Foram obtidos bons resultados relativamente à utilização de areias de leite fluidizado na produção de argamassas de maior valor acrescentado. As areias foram analisadas ao nível laboratorial e a sua incorporação após lavagem parece ser relativamente inócua em relação aos requisitos fundamentais de uma argamassa.

Os dregs foram testados em argamassas e em misturas betuminosas para a camada de regularização ao nível laboratorial e os resultados apresentaram baixo potencial de aplicação em argamassa e potencialidades mais elevadas para as vias e pavimentos rodoviários.

Key-words

Wastes, valorisation, materials and civil construction

Abstract

The work developed in this dissertation is related to the general aim of valorisation of residues coming from the production of paper and pulp, namely dregs, grits and sands from the fluidised bed.

Different alternatives were evaluated for valorisation these by-products by introducing them in products of the civil construction sector, such as cement, mortars and mixtures for roads pavements.

The adopted methodology includes the following phases: chemical and mineralogical characterization of the cellulose industry by-products and civil construction and tests of samples formulations for each specific product at the laboratorial level.

From the laboratory results of by-products characterization, its potential was evaluated in relation to the specifications demanded for these application areas. It was possible to evaluate the behaviour of the products incorporating these wastes compared with samples without any incorporation.

In relation to the grits introduction in cement, the work involved the incorporation in the traditional raw materials of Portland cement production, since they have the advantage of being constituted essentially by CaCO_3 , which is part of the natural raw material constitution, Portland Cement is a good solution for eliminating high waste amounts. It should also be stressed the good potential of the grits for the incorporation in the roads and pavements sector, for mixtures used in regularization layers.

Good results were obtained relatively to the use of fluidised bed sands in the production of mortars of larger value, an added solution. The sand was analyzed and its incorporation after washing procedure seems to be harmless .for the basic requirements demanded in the mortars sector.

Dregs were also tested in mortars and in mixtures for the regularization layer of roads pavements and the results presented a lower application potential in mortars. but a satisfactory potential for roads and asphalt pavements.

Índice

Índice de Tabelas	iv
Índice de Figuras	v
1 Introdução.....	1
1.1 Objectivo	2
1.2 Metodologia geral do trabalho	2
2 Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos.....	3
3 Enquadramento.....	6
3.1. Indústria da pasta e do papel	6
3.1.1 Processo de produção de pasta kraft.....	8
3.1.2 Identificação dos resíduos sólidos processuais	11
3.1.2.1 Areias do leite fluidizado	12
3.1.2.2 Dregs	14
3.1.2.3 Grits	15
3.1.3 Gestão de resíduos sólidos na indústria de pasta e papel	16
3.2 Sector da construção civil.....	19
3.2.1 Produtos da construção de base cimentícia	19
3.2.1.1 Cimento	19
3.2.1.2 Argamassa	26
3.2.2 Vias e pavimentos rodoviários.....	31
3.2.2.1 Mistura betuminosa	34
3.2.2.2 Tipos de misturas betuminosas	39
4 Procedimento Experimental	43
4.1 Metodologia	43
4.2 Recolha e Caracterização de matérias-primas	43
4.2.1 Natureza dos resíduos.....	45
4.2.2 Composição Mineralógica	45
4.2.3 Análise térmica	45
4.2.4 Distribuição Granulométrica.....	46
4.2.5 Massa Volúmica ou densidade aparente	46
4.2.6 Grau de impureza e sensibilidade à água	47
4.2.7 Sólidos Totais Voláteis	48
4.3 Incorporação em cimento	48
4.3.1 Estudo da máxima incorporação de grits em cimento	49
4.3.2 Processamento e Formulações ensaiadas	49
4.3.3 Resistência Mecânica.....	50
4.4 Incorporação em argamassa.....	50
4.4.1 Trabalhabilidade.....	52
4.4.2 Tempo de Início de Presa	53

4.4.3	Resistência Mecânica-----	53
4.4.4	Teor em sais -----	53
4.4.5	Metais Pesados -----	54
4.4.6	Ensaio de Incorporação em Argamassas Industriais (WEBER)-----	54
4.5	Incorporação em misturas betuminosas-----	55
4.5.1	Processamento e Formulações Ensaçadas-----	56
4.5.2	Caracterização das misturas sem betume-----	59
4.5.3	Caracterização das misturas com betume-----	59
4.5.3.1	Ensaio Marshall -----	59
4.5.3.2	Baridade Máxima Teórica-----	60
4.5.3.3	Porosidade -----	61
4.5.3.4	Volume de Vazios na Mistura de Agregados (VMA) -----	61
4.5.3.5	Força de rotura -----	61
4.5.3.6	Deformação -----	62
5	Resultados e Discussão -----	63
5.1	Caracterização de Matérias-primas -----	63
5.1.1	Caracterização dos resíduos do sector de pasta e papel-----	63
5.1.1.1	Natureza dos resíduos-----	63
5.1.1.2	Composição mineralógica -----	64
5.1.1.3	Análises térmicas -----	66
5.1.1.4	Distribuição granulométrica -----	68
5.1.1.5	Massa volúmica -----	70
5.1.1.6	Pureza do material e sensibilidade à água -----	70
5.1.2	Caracterização de materiais da construção civil -----	71
5.1.2.1	Distribuição granulométrica -----	71
5.1.2.2	Massa volúmica -----	73
5.1.2.3	Sensibilidade à água -----	74
5.2	Incorporação em cimento -----	75
5.2.1	Máxima incorporação de grits-----	75
5.2.2	Resistência mecânica-----	77
5.3	Incorporação em argamassas -----	77
5.3.1	Trabalhabilidade-----	77
5.3.2	Tempo de início de presa -----	79
5.3.3	Resistência Mecânica-----	80
5.3.4	Teor em sais -----	81
5.3.5	Metais pesados-----	82
5.4	Ensaio pré-industrial com argamassas -----	83
5.4.1	Argamassa cola C2-----	83
5.4.2	Reboco de projecção -----	83

5.5	Incorporação em misturas betuminosas-----	84
5.5.1	Caracterização de misturas sem betume -----	84
5.5.1.1	Sensibilidade à água e grau de impurezas-----	84
5.5.2	Caracterização de misturas com betume -----	85
5.5.2.1	Baridade Média e Baridade Máxima Teórica -----	85
5.5.2.2	Porosidade (N) -----	86
5.5.2.3	Grau de Saturação em betume e Volume de Vazios na Mistura de Agregados (VMA) 87	
5.5.2.4	Força de rotura -----	91
5.5.2.5	Deformação -----	92
6	Conclusões -----	93
7	Bibliografia -----	96

Índice de Tabelas

Tabela 3-1 Soluções de valorização dos resíduos da indústria de pasta e papel. (Machado, 2002)-----	18
Tabela 3-2 Extensão da rede rodoviária nacional (PRN2000). (Pereira & Picado-Santos, 2002) --	32
Tabela 3-3 Propriedades e exigências para os diferentes tipos de betumes. -----	39
Tabela 3-4. Fuso granulométrico para mistura betuminosa com característica de regularização. -	42
Tabela 4-1 Resumo dos métodos de preparação das amostras. -----	43
Tabela 4-2 Resumo dos parâmetros usados na caracterização dos resíduos ($\sqrt{}$ - realizado, ___- desnecessário). -----	44
Tabela 4-3 Composição do Cimento Portland 42.5 I. (Coutinho, 1997)-----	50
Tabela 4-4 Modalidades ensaiadas e codificação das amostras. -----	51
Tabela 4-5 Quantidade de material usado para produção de provetes de argamassa. Razão água/cimento igual a 0.5. -----	51
Tabela 4-6. Quantidades de material usado para produção de provetes de argamassa. Razão água/cimento igual a 0.45. -----	52
Tabela 4-7 Ensaio de caracterização das argamassas. -----	52
Tabela 4-8. Formulações para cada tipo de mistura betuminosa ensaiada: quantidade (g) e percentagem de material usado na confecção do provete. -----	57
Tabela 5-1 Resultados de Humidade e Sólidos Totais Voláteis* (Paulo, 2005)-----	63
Tabela 5-2. Resultados de massa volúmica dos resíduos da pasta e papel-----	70
Tabela 5-3. Resultados do ensaio de Azul-de-metileno-----	71
Tabela 5-4. Resultados de massa volúmica dos materiais da construção civil.-----	74
Tabela 5-5. Resultados do ensaio de azul-de-metileno para os agregados. -----	74
Tabela 5-6. Resultados de resistência mecânica à compressão feitos na SECIL-----	77
Tabela 5-7. Média correspondente aos valores obtidos no ensaio de resistência à flexão e à compressão aos 7 e 28 dias (areias do leito fluidizado). -----	80
Tabela 5-8- Média correspondente aos valores obtidos no ensaio de resistência à flexão e à compressão aos 7 e 28 dias de argamassas formuladas com dregs.-----	81
Tabela 5-9. Quantificação dos metais pesados nos eluatos de lixiviação das argamassas. -----	82
Tabela 5-10. Resultados obtidos em ensaio com argamassas <i>cola</i> que incorporam 12% de ALF. -----	83
Tabela 5-11. Características relevantes de argamassas de reboco preparadas com 15% de ALF. -----	84
Tabela 5-12. Resultados dos ensaios de caracterização das misturas sem betume preparadas co grits (G) e dregs (D)-----	85
Tabela 5-13. Propriedades relevantes das misturas betuminosas com dregs (D) e grits (G); Baridade Máxima Teórica (BMT), Baridade Média (BM), Teor volumétrico em betume (TVB), Volume de vazios na mistura de agregados (VMA), Saturação em betume (Sb), Força de rotura (Fr), Deformação (Def) e Razão Força-Deformação (Fr/Def).-----	85

Índice de Figuras

Figura 2-1. Prioridades nos processos de gestão de resíduos sólidos	4
Figura 3-1. Distribuição da produção anual de resíduos no sector de pasta e papel (% ponderal)..	8
Figura 3-2. Esquema simplificado do processo de produção de pasta kraft e resíduos em estudo por ele gerados.....	10
Figura 3-3. Esquema ilustrado de uma caldeira de leiteo fluidizado (ECOCEL, 2000).....	13
Figura 3-4 Geração e gestão de resíduos sólidos na indústria de pasta e papel. (Pöyry, 1997)....	17
Figura 3-5. Fábricas de Cimento no Brasil e em Portugal (Toraya, 1999)	19
Figura 3-6. Fabricação de cimento por via húmida (Adaptado de Aspdin, 2004)	21
Figura 3-7. Fabricação de cimento por via seca (Adaptado de Aspdin, 2004).....	21
Figura 3-8. Diagrama ilustrado do processo de fabrico do cimento (adaptado de CCI, 2004)	22
Figura 3-9. Instalações e maquinaria de homogeneização da matéria-prima (adaptado de CCI, 2004).....	23
Figura 3-10. Operações de exploração da matéria-prima (adaptado de Aspdin, 2004)	23
Figura 3-11. Homogeneização da matéria-prima através da sua mistura em proporções correctas (adaptado de Aspdin, 2004)	24
Figura 3-12. Fabrico do clínquer, Forno, Esquematização da Maquinaria de ligação ao Forno de Queima da matéria-prima (adaptado de CCI, 2004).....	25
Figura 3-13. Moagem do cimento, Equipamento de mistura de componentes para preparação dos vários tipos de cimento Portland, Produtos finais (adaptado de CCI, 2004).....	26
Figura 3-14. Basílica de São Pedro fundada em 324 (Roma) e Pathernon (Grécia)	27
Figura 3-15. Silo de dupla-câmara e silo de câmara única.....	29
Figura 3-16. Esquema em corte de uma fábrica de argamassas industriais.....	29
Figura 3-17. Argamassa autonivelante, argamassa de assentamento e argamassa celulósica.....	30
Figura 3-18. Camadas que constituem um pavimento: (a) Estrutura de pavimento flexível de base granular, (b) estrutura de pavimento flexível de base betuminosa, (c) estrutura de pavimento rígido. BD: Betão betuminoso em camada de desgaste; MBD: Mistura betuminosa densa em camada de regularização; BG: Base granular em betão britado de gravilha extensa; SbG: Sub-base granular em material britado de gravilha extensa; MB: Macadame betuminoso em camada de base; BC: betão de cimento; BP: Betão pobre; AGECE: Agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento; Sc: Solo-cimento....	34
Figura 3-19. Diagrama de produção de betumes asfálticos (Adaptado de Lombardi, 1993).....	38
Figura 3-20. Estaleiro para agregados das misturas betuminosas. (Caltrans, 2005)	40
Figura 4-1. Método usado no ensaio de equivalente de areia.....	48
Figura 4-2. Curvas com as percentagens dos agregados para as misturas betuminosas.....	58
Figura 4-3. Provetes das misturas betuminosas.....	58
Figura 5-1. Resultados dos Sólidos totais voláteis (STV) das areias do leiteo fluidizado	64
Figura 5-2 Difractograma dos dregs.	65
Figura 5-3 Difractograma das areias do leiteo fluidizado.....	65
Figura 5-4. Difractograma dos grits.....	66
Figura 5-6. Curvas de análise térmica para Dregs tal e qual.....	67

Figura 5-7. Curvas de análise térmica para Dregs Lavados.....	67
Figura 5-8. Curvas de distribuição granulométrica dos grits.....	68
Figura 5-9. Curvas de distribuição granulométrica dos dregs.....	69
Figura 5-10. Curvas de distribuição granulométrica das areias do leito fluidizado.....	69
Figura 5-11. Curva de distribuição granulométrica do “filler”.....	72
Figura 5-12. Curva de distribuição granulométrica do pó-de-calcário.....	72
Figura 5-13. Curva de distribuição granulométrica da gravilha grande.....	73
Figura 5-14. Curva de distribuição granulométrica da gravilha pequena.....	73
Figura 5-15. Impacto da incorporação de grits na composição do cimento, em termos de SO ₃	75
Figura 5-16. Impacto da incorporação de grits na composição do cimento, em termos de Na ₂ O.....	75
Figura 5-17. Impacto da incorporação de grits na composição do cimento, em termos de Cl.....	76
Figura 5-18. Resultados do Índice de espalhamento de argamassas com adição de areias de leito fluidizado.....	78
Figura 5-19. Resultados do Índice de espalhamento de argamassas com adição de dregs, lavados e tal qual são recolhidos.....	78
Figura 5-20. Resultados do ensaio de Vicat para argamassas com ALF.....	79
Figura 5-21. Resultados do ensaio de Vicat para argamassas com dregs.....	79
Figura 5-22. Teor de sulfatos em argamassas com ALF.....	81
Figura 5-23. Baridade média das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D). ...	86
Figura 5-24. Baridade máxima teórica das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).....	86
Figura 5-25. Porosidade das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).	87
Figura 5-26. VMA das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).....	88
Figura 5-27. Grau de saturação em betume das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).....	89
Figura 5-28. Mistura betuminosa sem resíduos (fotografia tirada na lupa com ampliação de 10 vezes).....	89
Figura 5-29. Mistura betuminosa sem resíduos (fotografia tirada em microscópio com ampliação de 50 vezes).....	90
Figura 5-30. Mistura betuminosa com grits (fotografia tirada na lupa com ampliação de 10 vezes).....	90
Figura 5-31. Mistura betuminosa com grits (fotografia tirada em microscópio com ampliação de 50 vezes).....	90
Figura 5-32. Mistura betuminosa com dregs (fotografia tirada na lupa com ampliação de 10 vezes).....	91
Figura 5-33. Mistura betuminosa com dregs (fotografia tirada em microscópio com ampliação de 50 vezes).....	91
Figura 5-34. Resultado da força de rotura.....	92
Figura 5-35. Deformação das misturas betuminosas com dregs (D) e grits (G).	92

1 Introdução

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação enquadra-se no esforço global do sector de pasta e papel de Portugal em encontrar soluções de valorização para os resíduos gerados no processo de produção. Estas soluções visaram aplicações em produtos do sector da construção civil, nomeadamente, em produtos de origem cimentícia e de origem betuminosa.

A primeira parte do trabalho envolve todo um contexto que enquadra teoricamente os dois sectores, o da pasta e papel, onde é focado o processo de geração de resíduos assim como algumas possíveis soluções de valorização e o sector da construção civil, no qual se faz uma síntese em relação aos produtos e aplicações, assim como uma breve descrição dos processos de produção exemplificando as diversas formas nas quais estes produtos podem ser encontrados.

Numa segunda fase, o trabalho envolve um estudo ao nível laboratorial, no qual foram testadas algumas possíveis formas de aplicação dos resíduos com intuito de encontrar soluções de valorização, incorporando-os em produtos da construção civil como argamassas, cimento e misturas betuminosas.

Espera-se que, das conclusões relativamente aos resultados em laboratório, se caminhe para aplicações ao nível industrial. Esta fase foi aqui ainda iniciada com a colaboração de uma empresa (WEBER-cimenfix), estando outras tentativas em ramos diferentes (vias e pavimentos rodoviários) a serem iniciadas também com a colaboração do Instituto de Investigação da Floresta e Papel (RAIZ) pertencente ao grupo Portucel/Soporcel.

1.1 Objectivo

Este trabalho tem por objectivo, encontrar soluções de valorização de resíduos do processo de produção de pasta e papel em aplicações relativas a materiais do sector da construção civil, como o cimento e argamassas e ainda em misturas betuminosas para vias e pavimentos rodoviários.

1.2 Metodologia geral do trabalho

Este trabalho está dividido nas seguintes fases principais:

Em primeiro lugar efectuou-se uma síntese em que se salientam aspectos importantes de Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos, efectuando-se de seguida, um enquadramento dos sectores da pasta e papel e da construção civil de modo a perceber melhor qual o papel que os dois podem desempenhar nesta área de Reciclagem e Valorização de resíduos.

Os capítulos que se seguem apresentam o procedimento experimental, os resultados obtidos e uma discussão, bem como as conclusões principais daí decorrentes. Assim, em termos de metodologia experimental utilizada, pode-se salientar as seguintes etapas:

- Caracterização dos resíduos e dos materiais da construção civil onde se pretendia incorporá-los;
- Incorporação em cimento – requisitos e propriedades;
- Incorporação em argamassas – Incorporação laboratorial e ensaio pré-industrial;
- Incorporação em vias e pavimentos rodoviários – ensaios de caracterização e incorporação em misturas com e sem betume para camadas de regularização de vias rodoviárias.

Estas etapas foram realizadas em parceria com o RAIZ e as empresas WEBER-cimex na área das argamassas, SECIL na área de produção de cimento e Vieira & Bacalhau em misturas betuminosas.

2 Gestão Ambiental e Valorização de Resíduos

A utilização racional dos recursos naturais, a partir da consciência, comprometida com a responsabilidade ambiental, é um dos maiores desafios da humanidade na actualidade. O paradigma da busca de soluções de valorização de resíduos, como alternativa de produção, que minimizem os danos ao ambiente e permitam a renovação de seus recursos, tem ganho importância crescente.

A Gestão Ambiental surge como ferramenta que pode contribuir com a transformação deste cenário, com implicações na mudança comportamental envolvida na tomada de decisão e desenvolvimento de mecanismos, a fim de garantir a sustentabilidade nos processos produtivos e, sobretudo, reservar às gerações futuras um ambiente que lhes propicie qualidade de vida e perspectiva de futuro. (Virtuoso, 2004)

Relativamente aos resíduos sólidos (RS) gerados por diferentes processos os principais tipos de tratamento/destino final a que podem ser sujeitos são: reutilização, reciclagem, valorização energética, compostagem e aterro, devendo apostar-se também na diminuição e substituição dos materiais utilizados na produção por materiais recicláveis, desenvolvendo mercados para estes.

A União Europeia (UE) considera a prevenção da criação de resíduos e o fomento da sua reutilização e reciclagem como estratégias fundamentais de gestão, correspondendo o aterro à alternativa menos desejável como destino final dos RS pela perda do valor potencial de alguns componentes depositados e pela ocupação de grandes áreas. Contudo este é ainda o destino mais frequente para os RS (após o encerramento crescente de lixeiras). (Figura 2-1)

Para além das pressões de natureza legal, as empresas do sector passaram a considerar o ambiente uma área de gestão de grande importância para a sustentabilidade da actividade, o que se traduziu na implementação de sistemas de gestão ambiental e na obtenção da certificação, de acordo com normas e referências internacionais, sendo o referencial mais utilizado a norma NP EN ISO 14001 – “Sistemas de Gestão Ambiental – especificação e linhas de orientação para a sua utilização”. Neste contexto, a gestão de resíduos surge como uma das áreas prioritárias, uma vez que:

- Os aumentos de produção conduzem ao aumento dos quantitativos de subprodutos;
- Os métodos adoptados para a minimização de impactes ambientais traduzem-se em muitos casos na sua transferência para a forma sólida (lamas de tratamento de efluentes, cinzas recolhidas em equipamentos de despoejamento);
- Os princípios de redução, reutilização e reciclagem ainda não estão totalmente implementados com as infra-estruturas e soluções tecnológicas existentes, nomeadamente no que diz respeito à estruturas de tratamento coordenado entre subsectores industriais diversos.



Figura 2-1. Prioridades nos processos de gestão de resíduos sólidos

Deste modo, a identificação, avaliação e implementação de soluções técnicas e economicamente viáveis para redução, reutilização ou reciclagem dos resíduos gerados é uma das prioridades de investigação e desenvolvimento do sector.

A gestão de resíduos sólidos reveste-se ainda de uma componente económica importante, uma vez que, em última análise, estes podem ser considerados fonte de matéria-prima.

A produção de resíduos, para além de constituir uma forma de poluição, representa também uma perda importante de recursos, motivo pelo qual se atribui prioridade absoluta à prevenção. Os princípios de gestão devem ser implementados de acordo com uma hierarquia preferencial, na qual seguidamente à prevenção, vem a reutilização e a reciclagem, a recuperação energética e finalmente a deposição adequada dos resíduos. (Machado, 2002)

Tem-se, portanto, que reconhecer os resíduos como recursos e perceber que o resíduo tem valor, tanto em termos económicos como ambientais. Um processo de pesquisa e desenvolvimento de um novo material ou produto a partir de um resíduo que venha a estabelecer-se como uma alternativa de mercado viável, é uma tarefa complexa que envolve conhecimentos multidisciplinares. (Ângulo)

Em muitos países desenvolvidos, devido ao constante aumento de custo das matérias-primas e redução dos recursos naturais, a reutilização de resíduos é uma alternativa potencial na indústria da construção civil (exemplos: resíduos de construção e demolição, escórias de alto forno, sucata de aço, cinzas volantes, etc.). (Mannan, 2004; Pinto, 2004)

3 Enquadramento

Este capítulo tem como objectivo abordar o processo de geração e gestão de resíduos da indústria de pasta e papel, indicando o seu destino final, mas também fazer uma abordagem generalizada da indústria da construção civil em termos dos produtos de origem cimentícia e dos produtos de origem betuminosa, (envolvidos em pavimentos rodoviários), possíveis de funcionarem como matriz de incorporação.

3.1. Indústria da pasta e do papel

A produção de pasta e papel é um dos sectores de actividade com maior exposição às questões relativas ao meio ambiente. Em primeiro lugar por estar dependente da gestão sustentável de um recurso natural renovável – a floresta – que detém um papel importante na fixação de carbono, mas também do papel, no final do seu ciclo de vida, ser susceptível de ser valorizado através da reciclagem ou recuperação de energia e, por último, pelos impactes específicos do processo industrial de produção de pasta e papel. (Machado, 2002)

O sector da pasta e papel é uma das mais fortes marcas de Portugal no mercado europeu e no mundo, responsável por 0,8% do PIB nacional, por 4,5% do PIB industrial e por 4,6% de todas as exportações portuguesas de mercadorias. Tem-se assumido claramente como um dos sectores estruturantes da economia nacional. O Grupo Portucel/Soporcel é uma peça fulcral no sector: no seu conjunto, o Grupo gera um volume de negócios anual superior a 1000 milhões de euros, dispendo de uma capacidade produtiva de 1 milhão de toneladas de papel e de 1,4 milhões de toneladas de pasta (das quais cerca de 700 000 integradas em papel), além de ser responsável pela gestão de mais de 130 mil hectares de floresta. Actualmente, o Grupo exporta mais de 900 milhões de euros, para 82 países, o que representa cerca de 93% das suas vendas totais.

A floresta, fonte da matéria-prima, é uma área estratégica para o Grupo que, através de uma gestão florestal responsável, contribui para a competitividade de um sector decisivo para a economia do País.

No campo da Investigação e Desenvolvimento, destacam-se os trabalhos desenvolvidos pelo RAIZ – Instituto da Investigação da Floresta e Papel, empresa onde o Grupo detém uma participação de 94%, nomeadamente na área do melhoramento genético do eucalipto, matéria-prima de excelência para o fabrico de papéis de elevada qualidade, e na melhoria das práticas de gestão florestal.

A estrutura produtiva industrial do Grupo corresponde a três complexos industriais, localizados em Setúbal, Fig.^a da Foz e Cacia, que constituem uma referência de qualidade a nível internacional pela sua dimensão e sofisticada alta tecnologia. O complexo industrial da Fig.^a da Foz é o maior centro fabril integrado produtor de papéis de escritório e de papéis para a indústria gráfica da Europa, sendo esta unidade fabril a fornecedora de um dos resíduos a serem testados, nomeadamente areias do leite fluidizado. Os dregs e grits tiveram como origem a unidade de Cacia.

Relativamente ao ciclo produtivo do papel, muitos esforços têm sido feitos na gestão sustentável da floresta, no tratamento dos efluentes e das emissões gasosas, na redução do consumo de água e energia, na gestão dos resíduos, na recuperação de papéis usados e na reciclagem, entre outros (Pinto, 2005). Mesmo com estes esforços técnicos e financeiros, Portugal mantém neste sector a necessidade de buscar soluções de valorização para uma série de resíduos, neste caso, resíduos sólidos do processo de produção de pasta e papel (Figura 3.1).

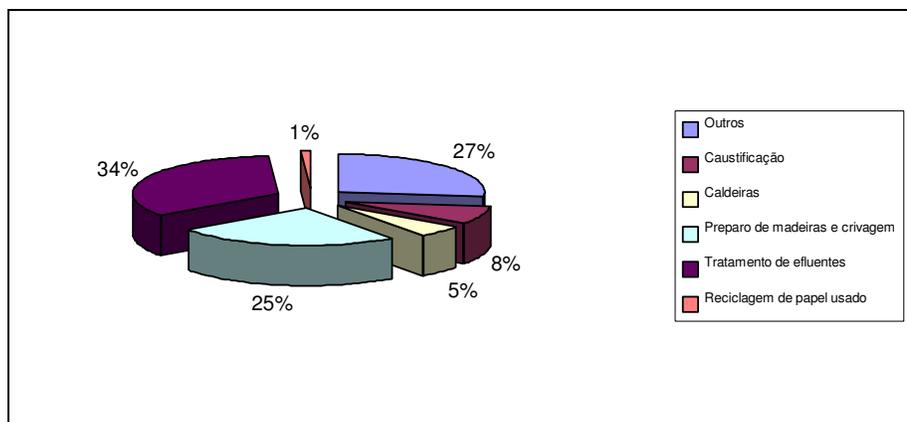


Figura 3-1. Distribuição da produção anual de resíduos no sector de pasta e papel (% ponderal)

Os resíduos da indústria de pasta e papel são gerados em grandes quantidades e provêm de diversas fases do ciclo de produção. O destino dado aos resíduos é diversificado, sendo a agricultura (35%) e a deposição em aterro (29%) os mais comuns para o processo. (Pinto, 2005)

Devido à elevada geração destes resíduos, constata-se a necessidade de encontrar soluções que garantam um escoamento com capacidade de lidar com estas proporções, sendo a indústria da construção civil, sem dúvida, um destes casos.

3.1.1 Processo de produção de pasta kraft

O processo de produção de pasta (kraft) é constituído por diversas etapas, a começar pela preparação da madeira e cozimento das aparas com a obtenção de pasta crua, seguindo-se a fase de branqueamento, e a transferência para a fábrica de papel, e inclui a recuperação de energia e químicos. O processo envolve ainda a fase de produção de dióxido de cloro e o tratamento de efluentes.

As etapas do processo kraft englobam as seguintes operações (figura 3-2):

- Corte dos troncos de madeira e transporte para a fábrica;
- Separação da casca através de jactos de água à pressão ou por outros métodos;
- Transformação dos troncos em aparas ou cavacos nos destroçadores;

- Armazenamento de aparas (para o abastecimento do processo);
- Entrada das aparas na zona de baixa pressão dos digestores, onde, em contracorrente com o vapor, aquecem na descida. É nesta etapa que se inicia a libertação e recuperação dos produtos voláteis da madeira;
- As aparas passam à zona de impregnação, onde, à pressão de cerca de 9kgf/cm^2 e à temperatura de 155 a 170°C , ficam em contacto com a lixívia de digestão durante cerca de 1h30min;
- A digestão é interrompida por um rápido arrefecimento com lixívia fria e descompressão. Neste estágio, a pasta produzida com a lixívia aderente apresenta uma cor de tom castanho claro;
- Lavagem, com remoção de nós da madeira e dos pedaços mal digeridos em crivos centrífugos pressurizados. Saída da pasta espessa e adensada;
- Na recuperação de químicos activos (reutilização) e de matéria orgânica (combustível do processo), a lixívia negra, proveniente da digestão é recirculada;
- A pasta é então branqueada por oxidação (principalmente pelo dióxido de cloro) e destruição dos pigmentos da madeira;
- A seguir ao branqueamento, a pasta é novamente lavada, espessada e armazenada em torres de abastecimento de máquinas de fabricação de papel, ou ainda, convertida em mantas de enrolar e enfardar, para transporte para as fábricas de papel.

Para que a pasta seja transformada em papel, ou seja, para a produção do papel, é necessário que haja refinação da pasta, através de processos que envolvem a dispersão das fibras e durante os quais faz-se a homogeneização da mistura (pasta + aditivos). Em seguida, há o processamento da mistura em máquinas de fabrico contínuo, que a transformam em papel, com as características, acabamento e dimensões específicas para cada tipo de aplicação.

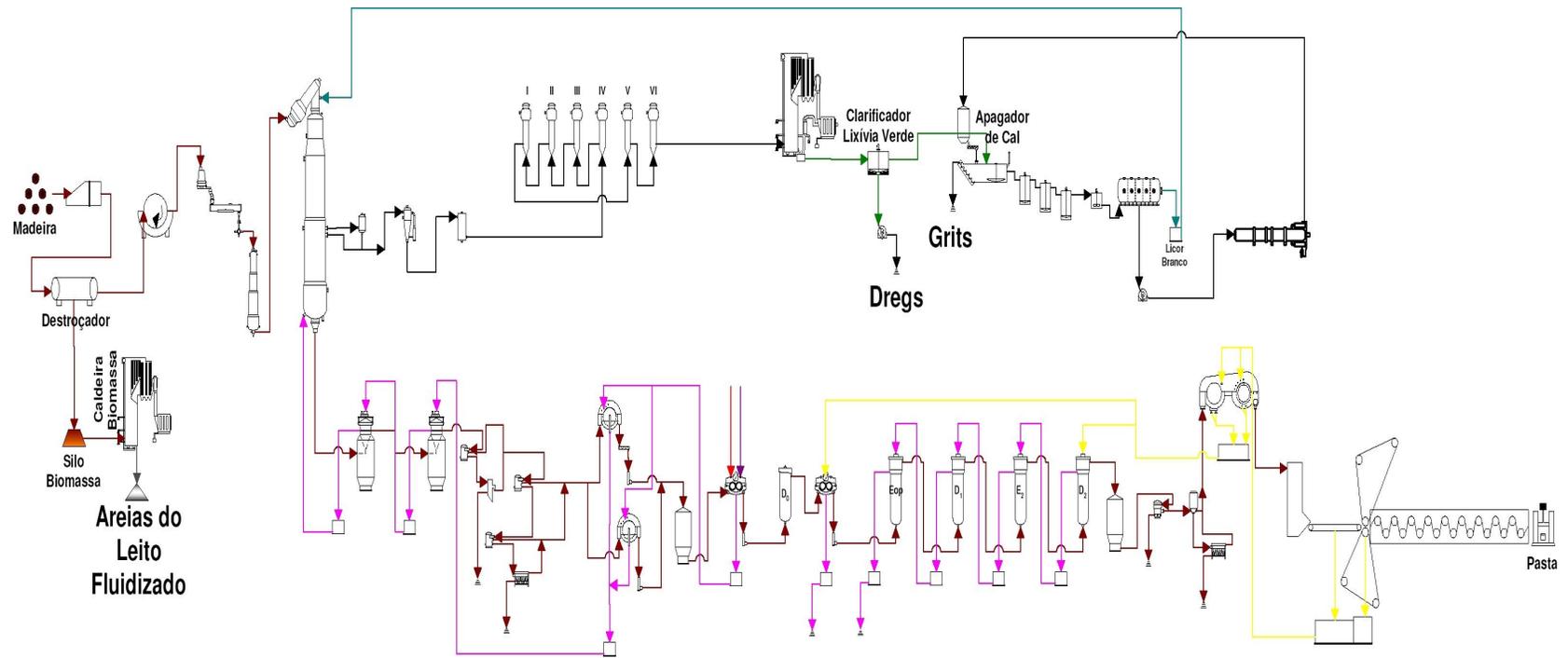


Figura 3-2. Esquema simplificado do processo de produção de pasta kraft e resíduos em estudo por ele gerados.

3.1.2 Identificação dos resíduos sólidos processuais

Para facilitar o entendimento relativamente aos diferentes tipos de resíduos gerados no processo de produção de pasta apresenta-se, na Figura 3-2, um esquema simplificado deste processo identificando quais são e onde são gerados estes resíduos. Para efeitos de identificação, os resíduos são estes:

Rejeitos da crivagem de madeira

No processo de transformação de madeira em pasta, para além das fibras individualizadas resultam, ainda em pequena percentagem, aglomerados de fibras de maiores ou menores dimensões que têm de ser removidos por crivagem. Os rejeitos da crivagem são constituídos essencialmente por agregados de fibras, deformações da madeira e pedaços de madeira incozida por sobreesspessura.

Resíduos da clarificação de licor verde e apagamento da cal (“dregs” e “grits”)

Os “dregs” constituem o resíduo que não é solúvel no licor verde, sendo compostos essencialmente por precipitados como carbonato, hidróxido ou sulfuretos de sódio. Os “grits” são impurezas (areias, calcário e outras escórias) introduzidas pelo “make-up”(total de massa por unidade de tempo adicionada ao sistema para compensar perdas) de calcário. Estes resíduos são normalmente depositados em aterro.

Lamas do tratamento de efluentes

O tratamento de efluentes gera, essencialmente, dois tipos de lamas: lamas provenientes do tratamento primário e lamas provenientes do tratamento biológico. As operações destinadas a remover os sólidos de grandes dimensões e as areias, juntamente com a medição do caudal, constituem o que se chama tratamento primário preliminar e é parte integrante do tratamento primário (Hester, 1995). Após a operação de desarenação, o efluente ainda contém matéria orgânica e inorgânica juntamente com outros sólidos

suspensos (fibra, carbonatos, cálcio, resíduos de casca do parque de madeiras). Estes sólidos são pequenas partículas que podem ser removidas, em grande parte, no tanque de sedimentação primária onde se depositam formando as *lamas primárias*. (EPA, 1998)

A *lama biológica* é essencialmente matéria orgânica separada nos decantadores secundários. Esta lama é difícil de desidratar, sendo espessada em conjunto com a lama primária. As lamas biológicas podem ser aplicadas na agricultura (mais ricas em nutrientes que as lamas primárias), incineradas juntamente com a casca ou colocadas em aterro.

Cinzas

As cinzas são recolhidas nos equipamentos de redução de emissões atmosféricas, tais como multiciclones, filtros ou precipitadores electrostáticos. As cinzas resultam essencialmente da combustão de casca na caldeira auxiliar, uma vez que as cinzas recolhidas na caldeira de recuperação e forno de cal são recirculadas no processo.

Areias do leito fluidizado

São resíduos produzidos por substituição das areias que constituem o leito fluidizado das caldeiras auxiliares.

Casca de eucalipto

Neste trabalho foram utilizados três dos resíduos descritos, a detalhar adiante.

3.1.2.1 Areias do leito fluidizado

Estes resíduos são produzidos pela renovação das areias que constituem o leito fluidizado das caldeiras auxiliares deste tipo. As caldeiras auxiliares

queimam essencialmente biomassa proveniente das etapas de preparação da madeira (nomeadamente casca e serrim).

Nas fábricas de produção de pasta na fase de processamento da madeira, são geradas cascas de madeira e resíduos de madeira de pequenas dimensões (designados como finos) que são queimados em caldeiras específicas que permitem a produção de vapor de alta pressão que depois de expandido em turbina permite a produção de energia eléctrica e térmica (vapor de diferentes pressões) utilizado no processo de produção.

As fornalhas de caldeiras utilizadas para queima de biomassa (casca e finos) nas fábricas de pasta são de grelha ou de leito fluidizado. As primeiras têm sido substituídas recentemente pelas segundas. No grupo Portucel/Soporcel as unidades da Figueira da Foz (Soporcel) e Setúbal fizeram alterações em fornalhas de grelhas e na antiga caldeira de recuperação para funcionamento com leito fluidizado (Figura 3-3).

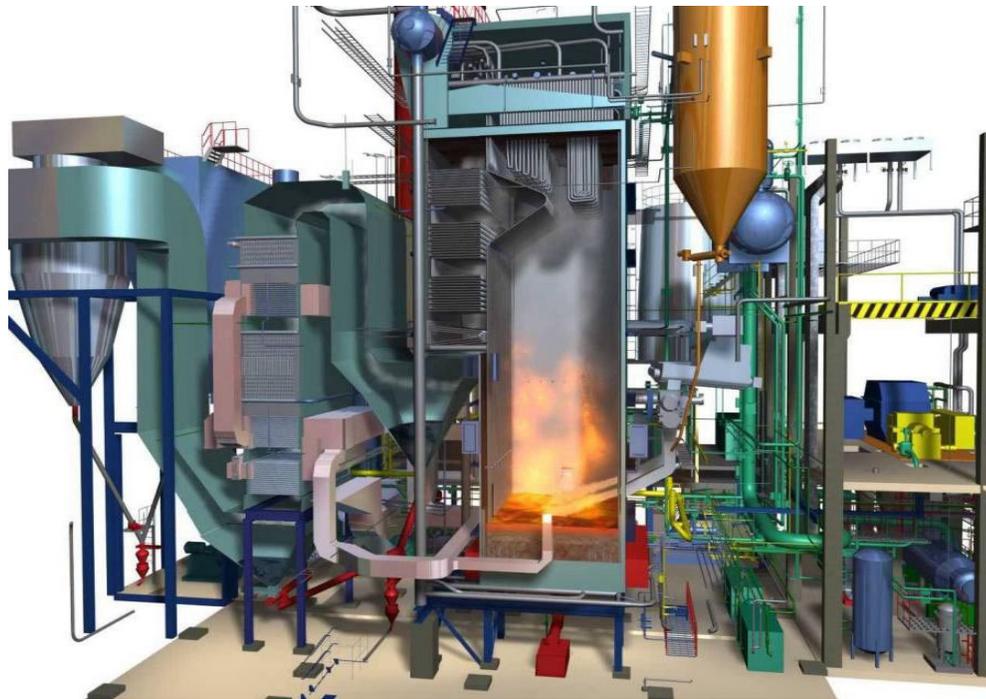


Figura 3-3. Esquema ilustrado de uma caldeira de leito fluidizado (ECOCEL, 2000).

O resíduo designado como areia de leito fluidizado corresponde à purga para renovação das areias em utilização no leito. Para além das próprias areias é constituído por produtos de combustão de dimensões superiores e cinzas. A quantidade produzida deste subproduto no grupo Portucel/Soporcel encontra-se estimada em cerca de 15000 t (base seca) /ano.

A fluidização da areia na caldeira recorrendo ao ar soprado pelo fundo é o que permite a formação de um leito onde é introduzido o combustível e que no seu percurso neste leito permite a sua secagem e combustão com elevada eficiência. A manutenção de características do leito (nomeadamente sua altura) requer a utilização de areia de granulometria muito homogénea de acordo com o caudal de ar utilizado. Esta areia após a utilização constitui-se como resíduo.

3.1.2.2 Dregs

As etapas de evaporação, combustão e caustificação constituem o processo de recuperação de químicos e de energia.

Durante o processo de evaporação, a concentração de sólidos dissolvidos no licor negro resultante do cozimento da madeira é aumentada de 13-17% para aproximadamente 70% através de evaporadores de múltiplo efeito. Desta forma, o licor concentrado pode ser queimado na caldeira de recuperação. O objectivo é não só a combustão completa da matéria orgânica do licor negro, mas também, a recuperação do conteúdo de sódio e enxofre numa forma que possibilite a regeneração dos químicos utilizados para o cozimento. (Pinto, 2005)

As reacções da combustão total podem ser representadas por:



O smelt (NaCO_3 e NaS_2) formado nesta fase de evaporação é dissolvido em licor branco fraco no tanque de dissolução (tanque de smelt) produzindo uma solução denominada licor verde. Este licor contém impurezas sólidas

designadas por dregs que são constituídos por carbonatos de cálcio e sódio, carvão da combustão incompleta da Caldeira de recuperação, sílica, sulfuretos de metais e outros sais provenientes da caldeira. A sua concentração no licor é normalmente entre 800 a 1200ppm.

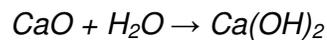
Os dregs, separam-se durante a preparação do licor verde, na fase de clarificação, onde sedimentam-se, sendo posteriormente removidos. Estes resíduos, depois de retirados do tanque de clarificação das lixívias verdes, são adensados e filtrados e, em seguida descarregados para o exterior normalmente com uma humidade entre os 45 e 60% sendo, finalmente, depositados em aterros. É um material sólido, de cor escura do tipo das escórias, donde lhe vem o nome.

3.1.2.3 Grits

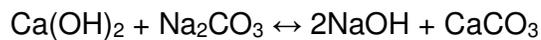
Os "grits" são impurezas (areias, calcário e outras escórias) introduzidas pelo "make-up" de calcário, como mostra a Figura 3.2.

O processo de geração dos grits ocorre da seguinte forma (*adaptado de Pinto, 2005*):

Após a clarificação do licor verde, é adicionada cal viva (CaO) ao licor, proveniente dos fornos da cal, no apagador de cal, dando-se a reacção:



Ao mesmo tempo ocorre a reacção de caustificação do carbonato de sódio, recuperando a soda cáustica necessária ao processo de cozimento kraft:



O licor é bombeado através de permutadores para o apagador, onde é aquecido com vapor.

Durante o processo de hidratação da cal ocorre a sua desidratação, aumentando a superfície sólida disponível para a reacção e libertação de inertes para posterior remoção.

Estes resíduos têm a sua origem no forno da cal e na preparação do hidróxido de cálcio para a caustificação do licor verde. Como referido, é no forno da cal que é feita a calcinação, quer do calcário, quer das lamas de cal. Aqui atingem temperaturas da ordem dos 1200°C e, dado que as lamas de cal apresentam sódio residual, este, fundindo, provoca a granulação (peletização) da cal, formando-se os grits. Estes são posteriormente recolhidos e retirados para o exterior, ao mesmo tempo que o hidróxido de cálcio do forno da cal terminar o processo de caustificação da lixívia verde, sendo igualmente encaminhados para aterros. Trata-se de um material de cor acinzentada, apresentando-se com cerca de 15% de humidade, podendo variar de acordo com a unidade fabril, e atingir teores de até 25%.

3.1.3 Gestão de resíduos sólidos na indústria de pasta e papel

Os principais destinos dos diferentes tipos de resíduos sólidos processuais gerados são, até a data, a combustão/incineração e os aterros. Os dados são baseados em informação proveniente de um número limitado de fábricas mas podem ser considerados como típicos. (Pöyry, 1997) (Figura 3-4)

A incineração e a deposição em aterro são os métodos dominantes de gestão destes resíduos sólidos. As percentagens de resíduos incinerados devem-se essencialmente a quantidades elevadas de casca e outros resíduos de madeira que são utilizadas como combustível para produção de energia. As lamas do tratamento de efluentes têm sido incineradas em quantidades crescentes. A aplicação nos solos é por vezes utilizada como método opcional e sazonal. Os resíduos inorgânicos (“dregs” e “grits”) são na sua maioria depositados em aterro. (Pöyry, 1997)

Na Suécia, Finlândia e Canadá o método de eliminação mais utilizado no sector é a incineração. No entanto, quando a casca é excluída da análise, a deposição em aterro passa a ser o processo de eliminação dominante, chegando a 70% do total no Canadá. Nestes países, os resíduos inorgânicos

são praticamente todos depositados em aterro. O recurso significativo à deposição em aterro na Suécia, Finlândia e Canadá pode ser explicado pelo facto da disponibilidade de área ainda não se ter tornado um problema crítico. Para além da casca, são ainda incinerados resíduos como lamas do tratamento de efluentes (40-50% Suécia e 40% Canadá). (Machado, 2002)

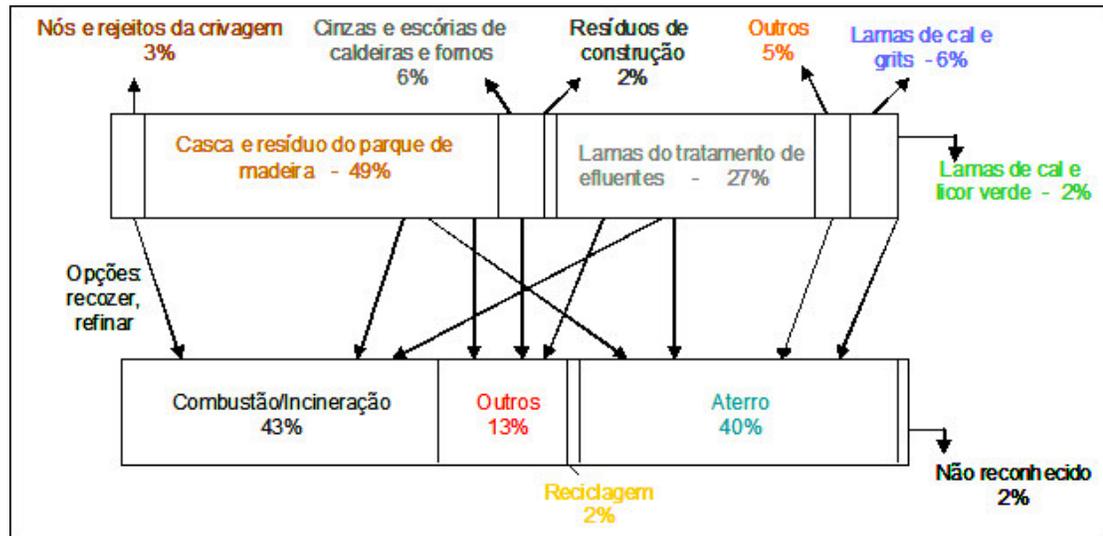


Figura 3-4 Geração e gestão de resíduos sólidos na indústria de pasta e papel. (Pöyry, 1997)

A situação na Alemanha difere da anterior, em primeiro lugar porque a indústria tem apenas uma pequena percentagem de produção de fibra a partir da madeira. Como consequência, a quantidade de casca gerada é relativamente pequena, sendo cerca de 50% incinerada e 50% compostada. Os resíduos inorgânicos são essencialmente cinzas e lamas de destintagem. É razoável assumir que problemas na disponibilização de área para aterro estarão na base de uma maior reutilização dos resíduos produzidos (incorporação em cimento e em materiais de construção, assim como compostagem de resíduos orgânicos). (Machado, 2002)

No Japão somente uma pequena parte dos resíduos é depositada em aterro, principalmente pela indisponibilidade de áreas para instalação dos aterros.

Em Portugal, a situação de referência para a gestão de resíduos do sector é ainda a deposição em aterro controlado. No entanto, é de referir a promoção e

participação da Portucel/Soporcel em projectos de investigação e desenvolvimento (projecto Prai-Centro e ECOCEL) onde foram identificadas soluções de valorização técnica e economicamente viáveis (Tabela 3-1) que têm potencialidade para reduzir em 70% a quantidade enviada para aterro. (Machado, 2002)

Em particular, do primeiro projecto efectivou-se transferência de tecnologia na forma de incorporação de lama secundária na produção de agregados leves.

Tabela 3-1 Soluções de valorização dos resíduos da indústria de pasta e papel. (Machado, 2002)

<i>Resíduo</i>	<i>Novos produtos/ processos</i>
"Dregs"	Correctivo Alcalinizante Incorporação em cimento
"Grits"	Correctivo Alcalinizante Agregados leves e incorporação em cimento
Cinzas	Correctivo Mineral/ Fertilizante Florestal Incorporação em tijolo Incorporação em cimento
Lamas biológicas	Aubos orgânicos Aubos minerorgânicos Correctivo Mineral/ Fertilizante Florestal Agregados leves e Incorporação em tijolo
Casca de eucalipto	Incineração Digestão Anaeróbia Substratos para viveiro Incineração

3.2 Sector da construção civil

3.2.1 Produtos da construção de base cimentícia

3.2.1.1 Cimento

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles. Já em 1818, o francês Louis Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, através de uma mistura de compostos argilosos e calcários, tendo recebido o título de inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as numa mistura que, após ser seca, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor com o nome de Cimento Portland, nome escolhido por apresentar cor e propriedades de dureza semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. (Battagin, 2005)

Com o tempo, o tipo de material e as técnicas utilizadas nas construções evoluíram ainda mais. A partir dos elementos da natureza, o Homem desenvolveu materiais como o tijolo, a telha, o asfalto e os polímeros, tendo-se industrializado industrialmente a sua produção (Figura 3-5). Actualmente, estes materiais são utilizados em larga escala na construção civil para o fabrico de casas, edifícios, pontes e outras obras de engenharia. (Domingos, 2003)

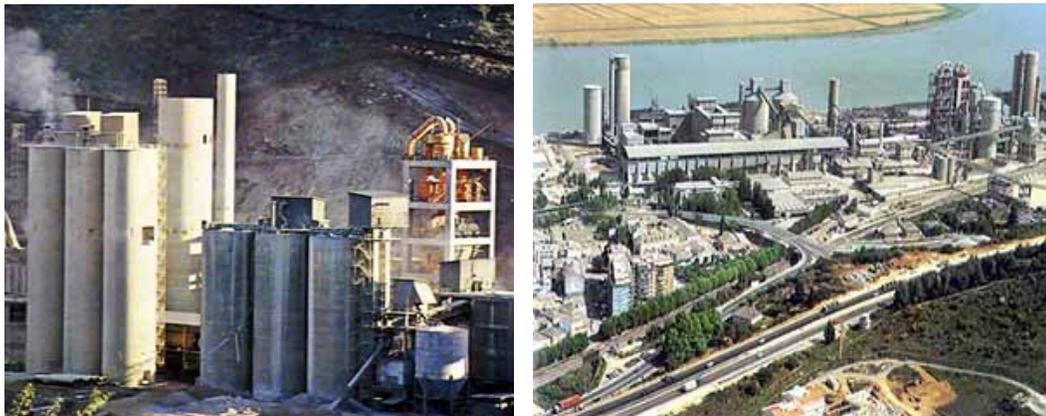


Figura 3-5. Fábricas de Cimento no Brasil e em Portugal (Toraya, 1999)

Em termos de estrutura e composição o cimento é um material existente na forma de pó fino, que resulta da mistura com outras substâncias, como o gesso ou escórias siliciosas, em quantidades que dependem do tipo de aplicação e das características desejadas para o cimento. O cimento portland simples é, geralmente composto por aproximadamente 96% de clínquer e 4% de gesso.

O clínquer é uma rocha artificial obtida através de um tratamento térmico (cozedura), num forno rotativo, de matéria-prima (calcário e argilas) misturada e finamente moída.

Utilizando como combustível principalmente carvão mineral e coque de petróleo, a temperatura chega a ser superior a 2000°C. Para evitar fugas de material e produtos de combustão ao longo do processo, toda a linha funciona em subpressão.

Existem dois tipos principais de instalações de produção de clínquer: por via húmida e por via seca. Nos dois métodos os materiais são extraídos das minas e britados de forma mais ou menos parecida, no entanto a grande diferença encontra-se no processo de moagem, mistura e queima. Dos dois métodos produz-se clínquer e o cimento final é idêntico. (Aspdin, 2004)

O forno de um processo por via seca é mais curto do que um forno por via húmida (figura 3-6 e 3-7), contudo as suas instalações de moagem e cozedura são muito mais complexas. A homogeneização é mais difícil e as instalações requerem equipamento de despoeiramento muito mais complexos (Aspdin, 2004).

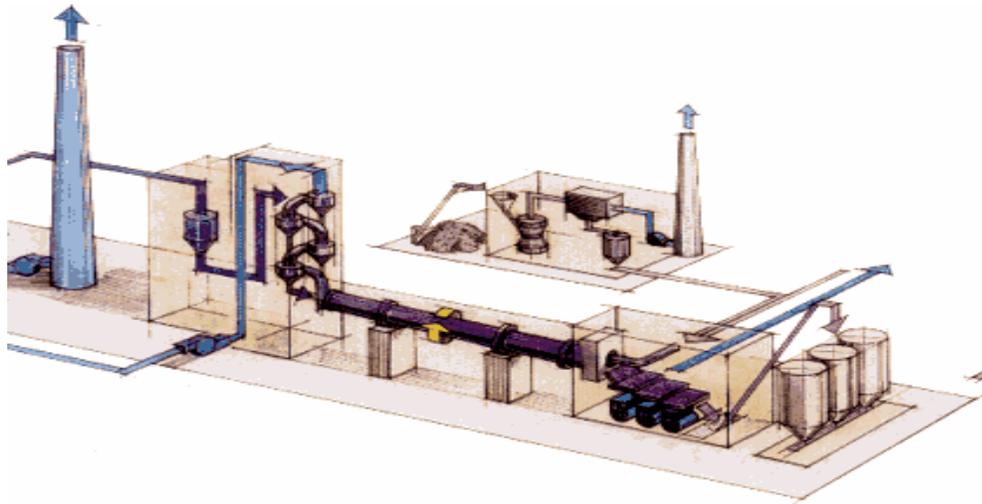


Figura 3-6. Fabricação de cimento por via húmida (Adaptado de Aspdin, 2004)

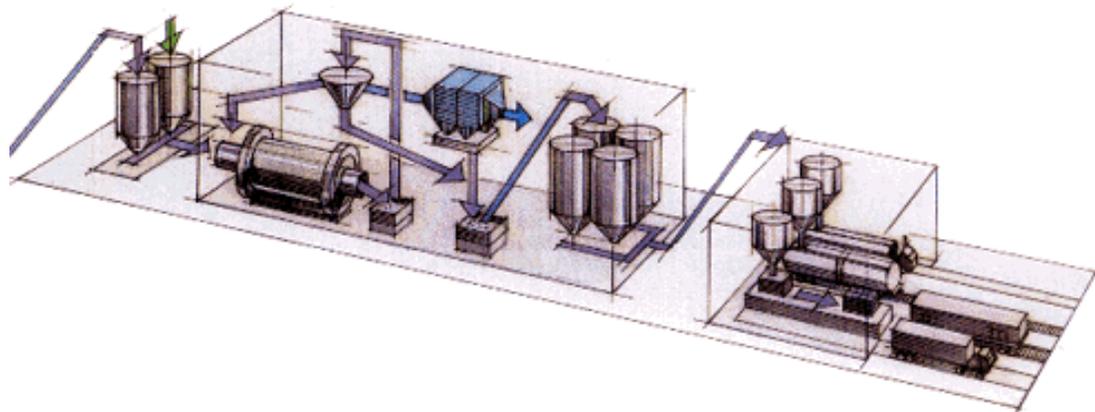


Figura 3-7. Fabricação de cimento por via seca (Adaptado de Aspdin, 2004)

Tendo em conta que em Portugal todas as cimenteiras funcionam com processos por via seca, ir-se-á fazer referência somente a este tipo de instalações. Assim, as várias etapas de produção do cimento Portland, por via seca (figura 3-8), incluem (ECC, 1994):

- Aquisição de Matéria-prima;
- Pré-homogeneização e Homogeneização da matéria-prima (trituração/moagem);
- Processamento e Queima da matéria-prima para produção de clínquer;
- Arrefecimento e armazenamento do clínquer;
- Moagem do cimento;

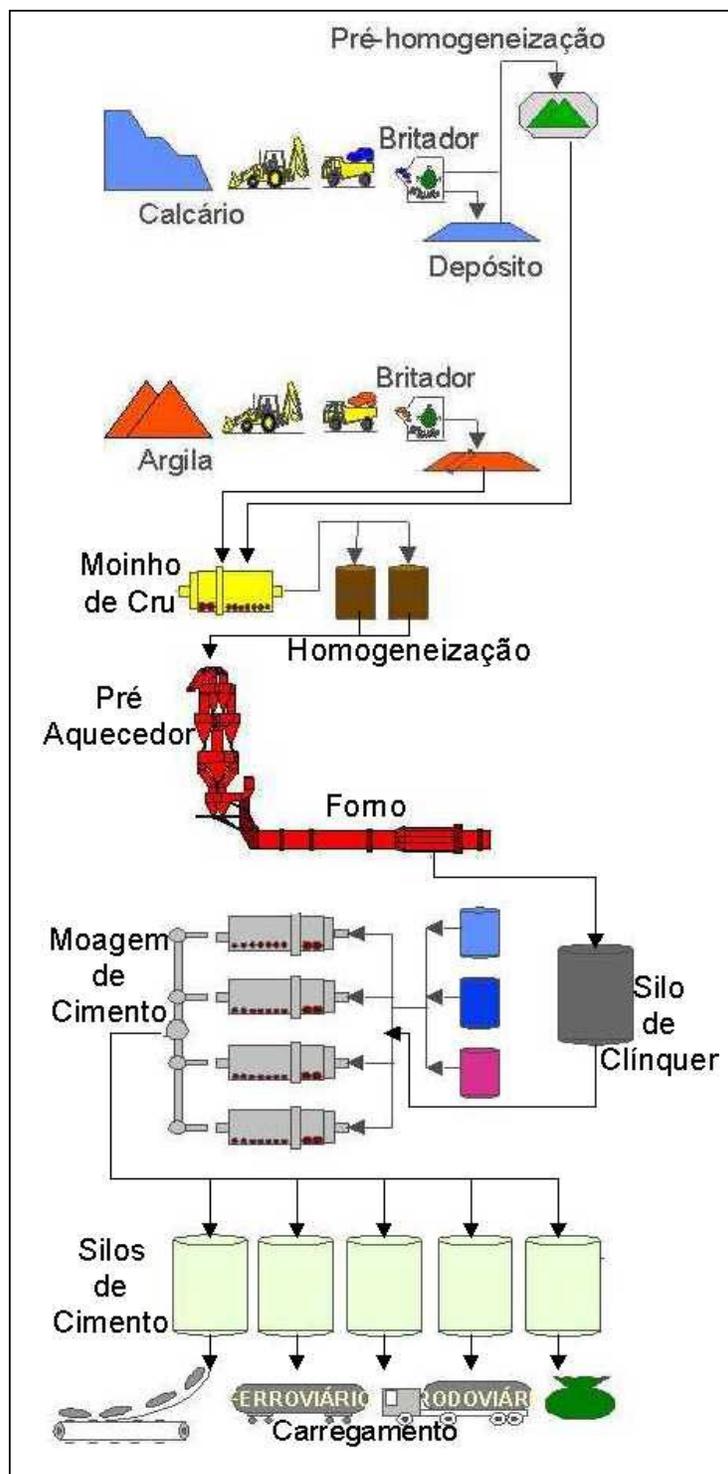


Figura 3-8. Diagrama ilustrado do processo de fabrico do cimento (adaptado de CCI, 2004)

Nos sistemas por via seca a matéria-prima é extraída de pedreiras locais, geralmente anexas às instalações de fabrico de cimento, podendo ser

constituída pelos seguintes grupos de materiais: calcário, sílica, alumina e ferro (figura 3-9) (Reding *et al.*, 1977).

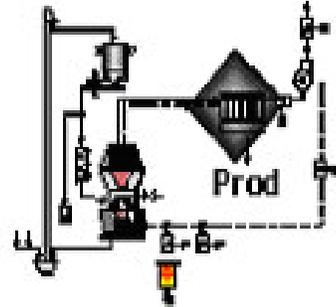


Figura 3-9. Instalações e maquinaria de homogeneização da matéria-prima (adaptado de CCI, 2004)

A disposição das instalações fabris devem possibilitar a minimização dos custos de transporte. As operações de exploração que ocorrem na pedreira são: perfuração, escavação, manuseamento, transporte/expedição, trituração, separação do material, acondicionamento e armazenamento (figura 3-10) (Reding *et al.* 1977).

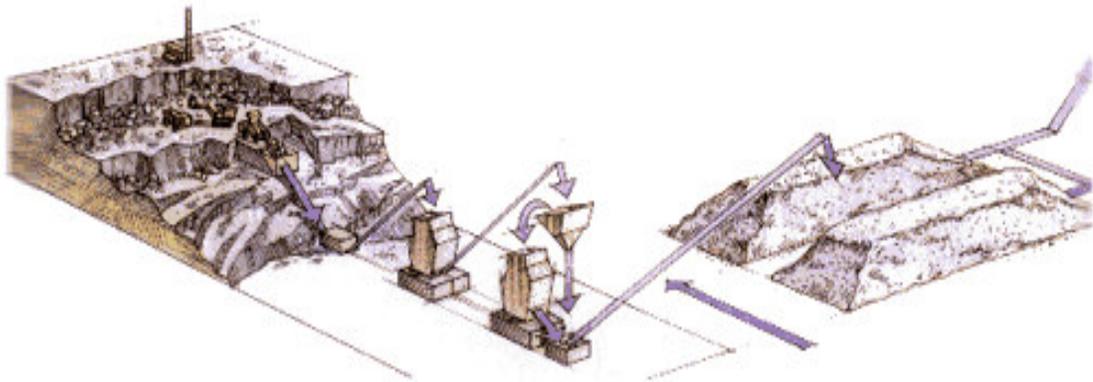


Figura 3-10. Operações de exploração da matéria-prima (adaptado de Aspdin, 2004)

A matéria-prima para o fabrico do clínquer é primeiro moída grosseiramente e misturada com outros materiais como a areia, minério de ferro, argila, alumina, cinzas de centrais termoeléctricas, etc. de modo a obter uma composição otimizada para a produção do clínquer (figura 3-11). Posteriormente, a

matéria-prima é moída finamente em moinhos de cru de vários tipos, para ficar preparada para a calcinação e queima (CCI, 2004).

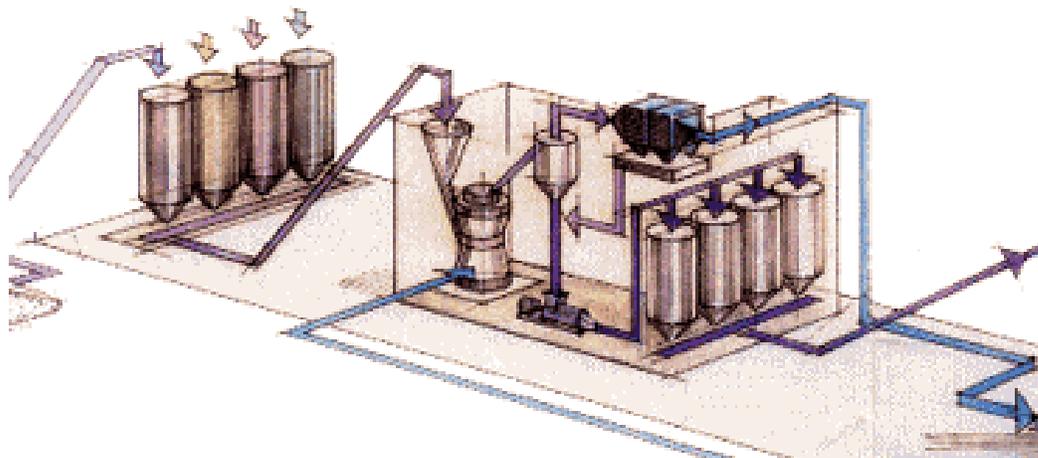


Figura 3-11. Homogeneização da matéria-prima através da sua mistura em proporções correctas (adaptado de Aspdin, 2004)

Em muitos processos os próprios gases de combustão servem para separar e arrastar o material já moído, a farinha, conduzindo-o para sistemas de separação e despoeiramento, sendo os gases expelidos para o exterior, pela chaminé, e a matéria-prima conduzida ao forno para tratamento térmico (CCI, 2004).

Na queima, a matéria-prima misturada é aquecida para a produção do clínquer. O processo envolve três etapas: secagem ou pré-aquecimento, calcinação e a queima ou sinterização (Reding *et al.*, 1977).

Entre temperaturas de 500-900°C procede-se à descarbonatação do material calcário, com produção de óxido de cálcio (CaO) e libertação de CO₂ gasoso. A temperaturas entre os 850-1250°C dá-se a sinterização, reacção entre o óxido de cálcio e as substâncias silico-aluminosas, com a formação do produto final ou clínquer, constituído por silicatos di-cálcicos (2CaO.SiO₂), aluminatos tri-cálcicos (3CaO.Al₂O₃) e ferro-aluminatos tetra cálcicos (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃). (ECC, 1994)

No forno rotativo (figura 3-12) existem, como já se referiu, duas zonas distintas, uma inicial de calcinação e outra final de sinterização. Os gases resultantes da combustão têm nestes fornos tempos de residência de 4-6 segundos a temperaturas acima dos 1200°C, saindo pela chaminé com valores na ordem dos 150-250°C (ECC, 1994).

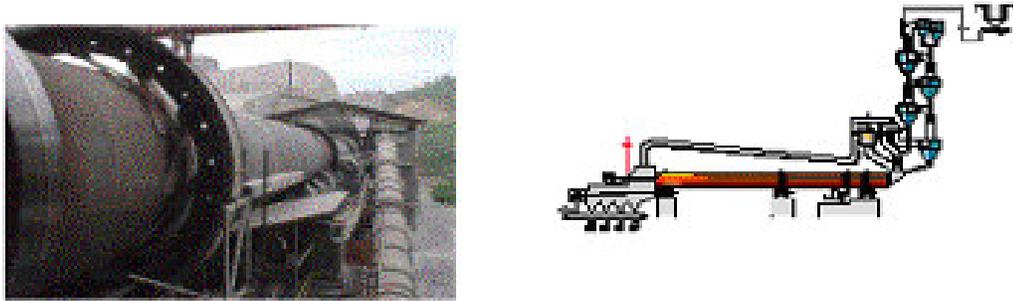


Figura 3-12. Fabrico do clínquer, Forno, Esquemática da Maquinaria de ligação ao Forno de Queima da matéria-prima (adaptado de CCI, 2004)

Para evitar fugas de material e produtos de combustão ao longo do sistema, toda a linha funciona em subpressão, sendo o movimento dos fluidos gasosos efectuado pelo vácuo gerado por ventiladores colocados na parte inicial da linha, imediatamente antes da chaminé (AWMA, 1992).

A energia necessária às três etapas do processo de queima da matéria-prima para obtenção do clínquer (secagem, calcinação e sinterização) é obtida pela queima de uma variedade de combustíveis, dos quais os mais comuns em Portugal são o carvão mineral e o coque de petróleo (pet-coque). Outros combustíveis também usados na Europa são o fuel, o gás natural e combustíveis alternativos como pneus usados, papel velho, resíduos de madeira, etc. Uma fracção importante da energia térmica libertada na combustão é utilizada para a descarbonatação do calcário, uma reacção endotérmica. Assim, uma tonelada de clínquer necessita de um mínimo de 1700-1800 MJ de energia para o seu processamento. (CCI, 2004).

O clínquer arrefecido é armazenado em depósitos de grandes dimensões, designados por silos, e posteriormente moído em moinhos onde se juntam os aditivos, como o gesso e outros.

A capacidade de armazenamento do clínquer é baseada na situação do mercado, a infra-estrutura fabril para o efeito consegue armazenar normalmente 5-25% da capacidade produtiva anual de clínquer.

Durante o final da etapa de produção do cimento Portland conhecida como moagem final (figura 3-13), o clínquer é misturado com outros materiais (cujas quantidades vão definir as características do produto final, obtendo-se assim os diferentes tipos de cimento Portland de que o mercado dispõe) num pó fino. Aproximadamente 5% de gesso e/ou anidrite natural é adicionado para regular o tempo de endurecimento (presa) do cimento. Outros químicos regulam a capacidade de fluência. (Reding *et al.*, 1977)



Figura 3-13. Moagem do cimento, Equipamento de mistura de componentes para preparação dos vários tipos de cimento Portland, Produtos finais (adaptado de CCI, 2004)

3.2.1.2 Argamassa

Conceptualmente, considera-se argamassa, uma rocha artificial constituída por fragmentos de rocha de dimensões relativamente pequenas, agregadas por um ligante que mantém a forma do conjunto e lhe confere solidez. A água, a areia ou outros agregados são misturados com minerais naturais que permitem produzir a “rocha artificial”. O *design* da argamassa é normalmente baseado na premissa que os vazios existentes no volume de agregados (geralmente

rondam 25-40%) devem ser preenchidos com ligante, geralmente gesso, cal ou cimento, que vai também proporcionar coesão à mistura final. (Warren, 1999)

Historicamente a argamassa surge como a ideia de misturar um material aglomerante, a pozolana (cinzas vulcânicas), com materiais inertes sendo estas argamassas hidráulicas muito usadas pelas civilizações Romanas e Gregas (Figura 3-14). (Moropolou, 2005), (Bayer, 2003)



Figura 3-14. Basílica de São Pedro fundada em 324 (Roma) e Pathernon (Grécia)

Em 1893 foi registada a primeira patente de manufactura de argamassas secas na Europa. No entanto, ainda hoje, o cimento e os agregados são enviados para as obras de forma separada, sendo misturados com água no momento da aplicação. (Bayer, 2003)

No entanto após 1960, tanto na Europa Central como nos EUA, a nova indústria da construção, com maior exigência em qualidade e execução, iria obrigar à substituição da mistura dos componentes das argamassas na obra, por argamassas secas prontas a aplicar. (Marzo, 1997)

A estabilização destas argamassas é conseguida à base de adjuvantes retardadores de presa e introdutores de ar. Os componentes destas argamassas, doseados em peso, normalmente numa central de betonagem,

são transportados para a obra e então depositados em recipientes específicos, os quais têm por norma uma cubicagem de 250 a 350 litros cada, ou seja, $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{3}$ de metro cúbico.

Estas argamassas estabilizadas podem ser utilizadas num prazo que oscila entre as 12, 24 e 32 horas. Todavia o seu mercado tem vindo a ser substituído gradualmente pelo das argamassas secas, as quais permitiram um novo acréscimo qualitativo e uma especialização que as argamassas estabilizadas não conseguem oferecer. (Paulo, 2006)

Ambas as argamassas *secas* e *estabilizadas* resultam da mistura de um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos, agregados, cargas, aditivos e/ou adjuvantes, doseados e misturados em centrais especializadas. (Paulo, 2006)

As primeiras centrais produziam argamassas a partir de agregados húmidos e secos, utilizando para este fim dois tipos de silos:

- Silo de Dupla Câmara (Figura 3-15), para areias húmidas, sendo neste caso a dosificação de duas formas: contínua por volume e descontínua por peso.
- Silo de Única Câmara (Figura 3-15), para as areias secas, utilizando-se neste caso dois tipos de silos: o de gravidade e o pressurizado.

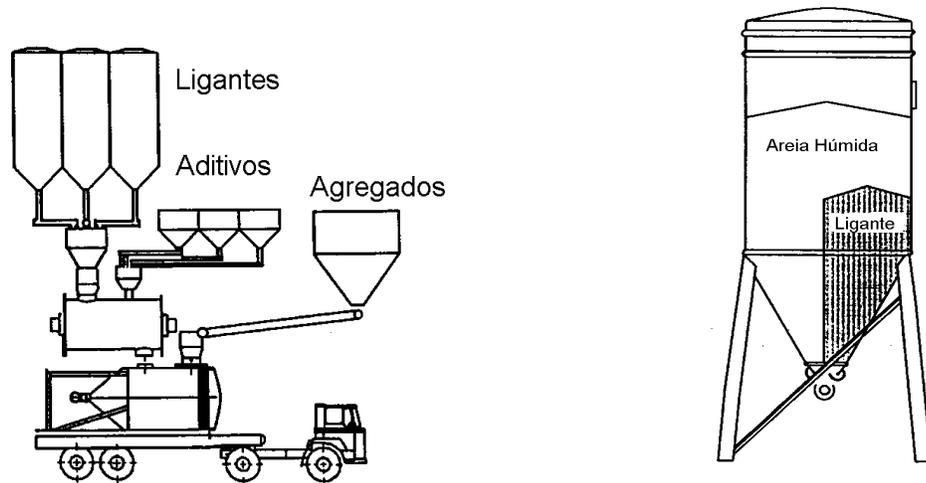


Figura 3-15. Silo de dupla-câmara e silo de câmara única.

Com o avanço da tecnologia no domínio dos equipamentos fabris e face às quantidades envolvidas na produção, as argamassas passaram a ser produzidas em fábricas desenhadas especialmente para esta nova indústria. (Figura 3-16)

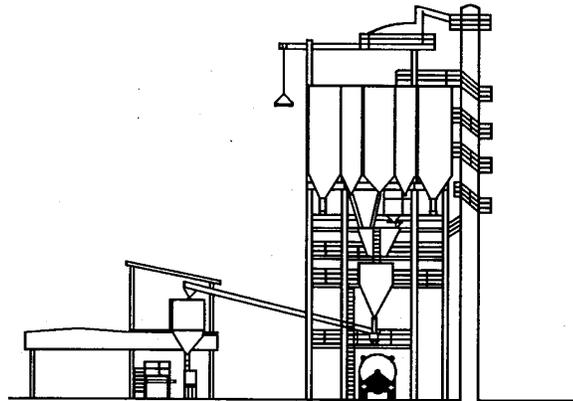


Figura 3-16. Esquema em corte de uma fábrica de argamassas industriais

Se originalmente as argamassas eram fabricadas com base na cal e nas areias, o natural desenvolvimento das formulações fez com que novas argamassas feitas em fábrica se baseassem em agregados minerais, ligantes de vários tipos, como o cimento, a cal hidráulica, a cal hidratada, gesso e adjuvantes químicos. Assim, têm-se multiplicado na Europa os fabricantes de Argamassas Industriais, geralmente localizados junto dos grandes centros consumidores. (Paulo, 2006)

Na Europa, a indústria de argamassas produz actualmente mais de 100 tipos de argamassas. Estas apresentam-se em diferentes formas, oferecendo propriedades químicas e mecânicas além de características especialmente adaptadas à grande variedade de construções e obras de engenharia civil.

Muitos estudos que têm sido realizados em torno das argamassas referem o uso milenar deste tipo de material actuando como isolante para cisternas, aquedutos, diques, depósitos, etc., como material de suporte para pavimentos e mosaicos, como estuque, interior ou exterior, para suporte de pinturas e frescos (reboco) ou como materiais de junção em estruturas de alvenaria. Podem distinguir-se três grandes grupos de argamassas: de alvenaria, de revestimento (estuque e reboco), e de suporte para pavimentos. (Mateus, 2002) (Figura 3-17)



Figura 3-17. Argamassa autonivelante, argamassa de assentamento e argamassa celulósica

Dos diferentes tipos de argamassas podemos citar argamassa de reboco, argamassa de alvenaria, argamassa autonivelante, de assentamento, para revestimento, para suporte de pavimentos, de juntas, de injeção, de enchimento, cimento-cola, de entre outras e ainda um tipo de argamassa com incorporação de celulose. (Technical Dictionary, 2001)

O processo produtivo abrange as seguintes etapas:

- Preparação de matérias-primas e Ensilagem
- Dosagem e Mistura
- Ensilagem e expedição,

Ambas as etapas são acompanhadas de um controlo e automação durante todo o processo.

Dada esta ampla variedade de argamassas, assim como as diferentes aplicabilidades, e ainda, por ser um produto cujas características permitem uma flexibilidade na substituição dos agregados que a compõem, torna-se sugestiva a tentativa de valorizar resíduos da indústria de pasta e papel em substituição parcial ou total de agregados como, por exemplo, a areia convencionalmente utilizada.

3.2.2 Vias e pavimentos rodoviários

As vias de comunicação e, em particular, a rede rodoviária, constituem a infraestrutura fundamental para o desenvolvimento global de qualquer país. Durante muitas décadas a rede rodoviária portuguesa constituiu um factor de estrangulamento do desenvolvimento do país, apesar da sua relativamente grande extensão, tendo em conta as suas modestas características geométricas e uma quase generalizada deficiente qualidade. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

Comparativamente a outros países europeus, a rede rodoviária nacional tinha uma elevada extensão, com uma reduzida percentagem a ser utilizada por um grande volume de tráfego, de elevada agressividade para os pavimentos. Esta situação conduzia à dificuldade de manter a sua qualidade e, ao mesmo tempo, implementar um adequado programa de ampliação da rede. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

Hoje encontra-se em execução em Portugal o Plano Rodoviário 2000 (PRN 2000), cuja atenção é voltada para a necessidade de promover o desenvolvimento de zonas fronteiriças ainda com carências de acessibilidade, procurando também estabelecer alternativas às estradas com portagem, para além de melhorar a acessibilidade nas zonas urbanas. (Tabela 3-2)

Tabela 3-2 Extensão da rede rodoviária nacional (PRN2000). (Pereira & Picado-Santos, 2002)

<i>Rede Rodoviária</i>		<i>PRN1985</i> (km; %)	<i>PRN2000</i> (km; %)	<i>Diferença</i> (%)
Rede Fundamental	IP's	2635; 26,7	2536; 22,1	-3,8
	IC's	2439; 24,7	3470; 30,2	+42,3
Rede Complementar	OE's	4807; 48,6		
	EN's		5472; 47,7	+13,8
Total		9881; 100	11478; 100	+16,2
Estradas Regionais	ER's		5029; 30,5	
Total		9881; 100	16507; 100	+67,1

IP's – Itinerários Principais; OE's – Outras estradas; IC's – Itinerários Complementares; EN's – Estradas Nacionais.

Com estes dados é possível ter uma ideia generalizada da amplitude do escoamento das misturas betuminosas, levando em conta a continuidade da construção de pavimentos rodoviários distribuídos por todo país, bem como o potencial de criar soluções de valorização de resíduos.

De acordo com Pereira & Picado-Santos (2002), a função principal dum pavimento consiste em assegurar a existência duma superfície de rolamento que possibilite a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um certo período (a vida do pavimento), em determinadas condições ambientais e sob a acção das solicitações do tráfego. Assim, é necessário que os materiais que constituem as camadas de pavimento tenham determinadas propriedades e garantam determinados desempenhos para que o pavimento no seu conjunto ofereça as condições para que foi concebido. (Figura 3-18)

Entende-se por pavimento rodoviário, uma estrutura constituída por várias camadas de estrutura finita, apoiada na fundação constituída pelo terreno natural. Possui características de elevada resistência, baixa deformabilidade, permeabilidade e aderência adequadas à circulação de veículos, tendo em atenção determinados parâmetros como:

- Intensidade de tráfego;
- Tipo de tráfego (veículos ligeiros, pesados ou ambos);
- Velocidade máxima permitida;
- Tipo de clima predominante.

De acordo com esses parâmetros, o pavimento pode ser mais ou menos reforçado, sendo este reforço feito com o aumento das espessuras das camadas que o constituem, ou com repetição de alguma camada.

De um modo genérico, existem dois tipos principais de pavimentos, rígidos e flexíveis.

A diferença fundamental entre eles reside basicamente no tipo de material que constitui as camadas superiores. No caso dos pavimentos rígidos as camadas superiores são constituídas por betão (mais ou menos enriquecido conforme as necessidades), já o pavimento flexível, as camadas superiores são constituídas por misturas betuminosas (vulgarmente designadas por asfaltos). Em ambos os pavimentos assim citados, sob as camadas superiores encontram-se normalmente duas camadas de material britado, nomeadamente sub-base e base. Estas camadas são constituídas por agregados britados, ou seja, pelo produto resultante da fragmentação de rocha em centrais de britagem.

A Figura 3-18 representa a constituição esquemática de dois pavimentos flexíveis e um pavimento rígido, respectivamente. (adaptado do Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional – MACOPAV, 2002)



a.....b.....c

Figura 3-18. Camadas que constituem um pavimento: (a) Estrutura de pavimento flexível de base granular, (b) estrutura de pavimento flexível de base betuminosa, (c) estrutura de pavimento rígido. BD: Betão betuminoso em camada de desgaste; MBD: Mistura betuminosa densa em camada de regularização; BG: Base granular em betão britado de gravilha extensa; SbG: Sub-base granular em material britado de gravilha extensa; MB: Macadame betuminoso em camada de base; BC: betão de cimento; BP: Betão pobre; AGEC: Agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento; Sc: Solo-cimento.

3.2.2.1 Mistura betuminosa

As misturas betuminosas são constituídas geralmente por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica e misturados numa central com a quantidade de ligante previamente determinada. Após misturados, estes materiais são transportados, espalhados e compactados constituindo então as camadas do pavimento. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

Em termos gerais, são exigidas às misturas betuminosas as seguintes características: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade. Porém, outras características importantes das misturas podem ser determinadas com base em grandezas elementares como: as massas de cada agregado (g), a massa de betume (g), volume de material agregado (cm^3), volume de betume (cm^3), volume de vazios (cm^3), volume total (cm^3) e VMA (cm^3), que corresponde à soma do volume de vazios no esqueleto de agregado que compõe a mistura. Tais características são: massa volúmica, teor em betume, baridade máxima teórica da mistura compactada (BMT) e baridade aparente da mistura compactada, porosidade,

volume de vazios na mistura de agregados (VMA), estabilidade (através do ensaio de compressão) e deformação (através do ensaio de compressão).

As misturas betuminosas contêm basicamente três componentes: *agregados*, *betume* e *ar*. Para um melhor entendimento apresenta-se de seguida uma síntese dos diferentes tipos de agregados e também do ligante, material este de importância inquestionável numa mistura betuminosa.

➤ **Agregados**

A utilização de agregados tem como objectivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à acção do tráfego, sendo a sua resistência devida ao imbricamento dos grãos entre si. O material agregado que constitui as misturas betuminosas para pavimentação rodoviária é geralmente da ordem de 90 a 95% do seu peso, correspondendo a valores de 75 a 85% do seu volume. Os agregados podem classificar-se de vários modos dependendo do ponto de vista que se considere: petrográfico, massa volúmica, baridade, modo de obtenção e dimensão das partículas.

Conforme o modo como são obtidos podem classificar-se em naturais (rolados de origem aluvionar) e britados. Os primeiros são sedimentares obtidos por extracção directa (por exemplo junto a leitos de rios e ribeiros) enquanto os segundos são obtidos por fractura mecânica (nas estações de britagem) de rochas. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

Dos diferentes tipos de agregados utilizados para o fabrico das misturas betuminosas, podem-se citar:

- **Gravilhas:** material granular cujas partículas têm o valor de diâmetro equivalente (diâmetro equivalente, quando definido por peneiração, é o comprimento do lado da malha quadrada de menores dimensões através do qual passa a partícula) entre 5 e 37.5 mm;
- **Pó-de-pedra:** também chamado agregado fino (os mais usuais em Portugal são de origem calcária) e corresponde ao material cujo diâmetro equivalente é inferior ou igual a 5 mm;

- **Filler:** parcela de partículas que têm um diâmetro equivalente inferior a 0.07 mm. Os fillers comerciais mais usados são calcário moído e cal hidráulica.

Algumas características são determinantes para a escolha de materiais para compor uma mistura betuminosa, como por exemplo a granulometria, resistência aos choques, forma das partículas, a limpeza e a adesividade ao ligante. Estes parâmetros podem ser medidos através de ensaios como:

- Análise granulométrica
- Desgaste de Los Angeles
- Índice de forma
- Equivalente de areia, e
- Azul-de-metileno.

A análise granulométrica é um método que permite separar as partículas por tamanhos, possibilitando distinguir os materiais de maior dimensão dos mais finos.

O teste de Los Angeles permite caracterizar a resistência dos materiais, dando informação sobre a resistência ao choque, ao atrito entre as próprias partículas e ao desgaste provocado pelo tráfego.

A limpeza do material mede-se pela realização do ensaio de equivalente de areia ou, mais eficazmente pelo ensaio de azul-de-metileno. (Castelo Branco, 1996)

O valor de “Equivalente de Areia” (EA) é um parâmetro que permite avaliar a quantidade de matéria muito fina associada aos materiais, permitindo definir com rapidez se um agregado está limpo ou não.

O VAS “valor de azul-de-metileno de um agregado” é um valor que define a maior ou menor sensibilidade à água, ou seja, no caso de agregados, o maior ou menor grau de limpeza ou existência de materiais sensíveis à água no seio do agregado.

Os agregados, provenientes da exploração de formações homogéneas, devem ser limpos, duros, pouco alteráveis sob a acção dos agentes climáticos, com

adequada adesividade ao ligante, de qualidade uniforme e isentos de materiais decompostos, de matéria orgânica ou outras substâncias prejudiciais. (JAE, 1998)

➤ **Ligante**

O betume é o ligante mais usado em obras de pavimentação rodoviária. Kett (1998) assume como definição para betume, mistura de hidrocarbonetos de origem natural ou pirogénica, ou combinação de ambas, frequentemente acompanhadas pelos derivados não-metálicos, podendo ser gasosos, líquidos, semi-sólidos, ou sólidos, sendo completamente solúveis em sulfureto de carbono.

Picado-Santos (2002) conceitua betume como um aglutinante betuminoso obtido a partir da destilação do petróleo bruto que é uma mistura complexa de hidrocarbonetos, cujas massas moleculares são diferentes. Este aglutinante existe em numerosos petróleos, onde se encontra, em solução, sendo obtido após a eliminação dos óleos que servem de solventes.

Um dos processos mais usados para a produção de betume é a destilação directa ou fraccionada do petróleo bruto, a qual é apresentada em esquema na Figura 3-19.

As fracções mais leves do petróleo bruto permanecem no estado de vapor, enquanto que as mais pesadas, de elevada massa molecular, são extraídas sob a forma de resíduo, no fundo da torre. O produto recuperado no fundo da coluna designa-se por “bruto reduzido” ou primeiro resíduo. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

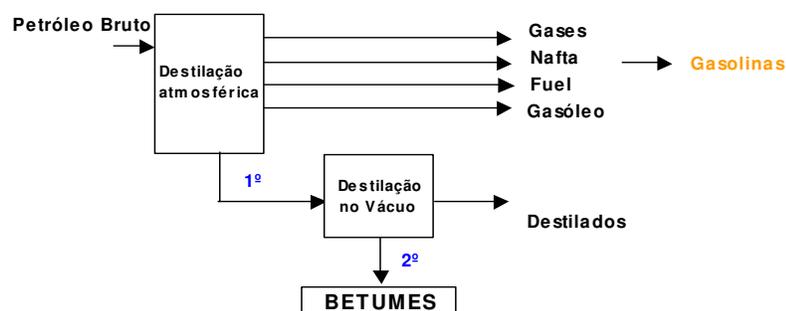


Figura 3-19. Diagrama de produção de betumes asfálticos (Adaptado de Lombardi, 1993)

Em seguida, o material obtido é aquecido a uma temperatura entre 350°C e 400°C e é enviado para uma coluna em que existe uma pressão negativa entre 10 mm e 100 mm de mercúrio. A pressão usada destina-se a obter uma separação física dos constituintes sem os degradar térmicamente, obtendo-se desta forma o segundo resíduo que será então utilizado na fabricação de diferentes tipos de betumes asfálticos. (Lombardi, 1993)

O teor de betume numa mistura betuminosa pode ser expresso como o peso do ligante contido na mistura betuminosa, em percentagem do peso total, incluindo o ligante, ou então como o peso de ligante contido na mistura betuminosa, em percentagem do peso do agregado.

Os betumes usados em pavimentação rodoviária devem apresentar características que respeitem os critérios estabelecidos nas especificações aplicáveis, de modo a que seja possível prever o seu comportamento. Em Portugal, estes dados estão presente na especificação LNEC E-80 de 1997.

Relativamente aos diferentes tipos de betumes de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade, são apresentadas estas especificações na Tabela 3-3.

A composição média varia de acordo com a origem do petróleo bruto usado como matéria-prima para o fabrico do betume e com os tratamentos realizados no final do processo de produção. Contém em média 80 a 85% de carbono, 10 a 15% de hidrogénio, 2 a 3% de oxigénio e em menores quantidades, enxofre e

azoto, bem como vestígios de metais como vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

Tabela 3-3 Propriedades e exigências para os diferentes tipos de betumes.

Propriedade (Condições de Ensaio)	Tipos de Betumes e Exigências de Conformidade								
	Tipos	10/20	20/30	35/50	50/70	70/100	100/ 150	160/ 220	250/ 330
Penetração (0.1 mm) [25°C, 100g, 5s]	Mín.	10	20	35	50	70	100	160	250
	Máx.	20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento Método anel e bola (°C)	Mín.	63	55	50	46	43	39	35	30
	Máx.	76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática (mm ² /s) [135°C]	Mín.	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)	Mín.	99	99	99	99	99	99	99	99
Temperatura de inflamação (°C)	Mín.	250	240	240	230	230	230	220	220
Varição de massa (% , ±)	Máx.	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	1.0	1.0
Resistência ao Endurecimento Penetração (% p.o.) [25°C, 100g, 5s]	Mín.	60	55	53	50	46	43	37	35
Temperatura de Amolecimento	Mín.	65	57	52	48	45	41	37	32
Aumento da temperatura de amolecimento (°C)	Máx.	8	10	11	11	11	12	12	12

Para favorecer o entendimento relativamente aos diferentes tipos de camadas que compõem um pavimento rodoviário, descrevem-se sucintamente três delas, dando maiores esclarecimentos sobre a camada que irá ser objecto de desenvolvimento neste trabalho.

3.2.2.2 Tipos de misturas betuminosas

As principais características das misturas são função directa das proporções dos componentes misturados (agregados e betume) e das suas propriedades. Assim, há que ter um conhecimento prévio do tipo de misturas que se pretende

aplicar, procurando as características mais convenientes para as mesmas. (Picado, 2002)

A figura 3-21 apresenta um estaleiro onde se encontram agregados que irão ser utilizados para o fabrico de misturas betuminosas.



Figura 3-20. Estaleiro para agregados das misturas betuminosas. (Caltrans, 2005)

➤ **Betão Betuminoso para Camada de Desgaste**

Designa-se por camada de desgaste a camada de betão betuminoso que se encontra na superfície do pavimento, directamente em contacto com os pneus dos veículos. Os agregados que a compõem têm dimensão máxima de 16mm. Os teores em betume utilizados situam-se entre 5 e 6%, enquanto que a porosidade varia entre 3 e 6%. O valor do VMA (Volume de vazios na mistura de agregados) não deve ser inferior a 14%. Assim pode-se dizer que a camada de desgaste é uma camada considerada mais exigente relativamente às outras camadas.

➤ **Macadame Betuminoso**

Este tipo de mistura vem sendo utilizado em Portugal desde 1987 na construção de camadas de base (Azevedo, 1993). Trata-se de uma estrutura de agregados com uma granulometria extensa, com uma dimensão máxima de

37,5mm ou, em alternativa, de 25mm. A percentagem de finos (material de dimensões inferiores a 0,075 mm) geralmente varia no intervalo de 2 a 8%. O teor em betume situa-se habitualmente entre 4 e 5% e a porosidade em geral pode apresentar valores correspondidos entre 4 e 8%.

Esta camada é menos exigente quanto às características dos agregados que entram na sua composição.

➤ **Mistura Betuminosa Densa**

A mistura betuminosa densa é formada por um agregado com uma granulometria do tipo 0/19 que se emprega na realização de camadas de regularização. O teor em betume usado é geralmente acima de 5%, sendo a sua porosidade de 3 a 5% e o VMA não inferior a 13%. As características que o CEIEP (Caderno de Encargos do Instituto de Estradas de Portugal) exige para a mistura, obtida a partir de provetes Marshall moldados com 75 pancadas em cada extremo, são:

- Força de ruptura (8000 a 15000N);
- Deformação máxima (4mm);
- Valor de VMA mínimo (13%);
- Porosidade (3 a 6%);
- Relação ponderal filler/betume (1.1 a 1.5)
- Resistência conservada mínima (75%).

Neste trabalho, optou-se por estudar a incorporação dos resíduos nesta mistura betuminosa densa para camada de regularização, por ser uma camada cujas características, em termos de agregados, favorece a aplicação face à localização estrutural, por se encontrar entre a camada de desgaste e a camada de base granular, não estando sujeita à acções climáticas, nem às exigências específicas da camada superior.

Segundo o Caderno de Encargos da JAE (Junta Autónoma de Estradas), as características que se torna pertinente verificar são:

- Granulometria dos agregados (deve estar dentro do fuso estipulado, Tabela 3-4);
- % de filler;
- EA da mistura de agregados sem adição de filler comercial ($\geq 50\%$); e
- Valor de Azul-de-metileno no material de dimensão inferior a $75\mu\text{m}$ (≤ 0.8)

Tabela 3-4. Fuso granulométrico para mistura betuminosa com característica de regularização.

Abertura das malhas de peneiros ASTM	Percentagem acumulada do material que passa
25.0 mm (1")	100
19.00 mm (3/4")	85 - 100
12.5 mm (1/2")	73 - 87
4.75 mm (nº4)	45 - 60
2.00 mm (nº10)	32 - 16
0.425 mm (nº40)	16 - 27
0.180 mm (nº80)	9 - 18
.075 mm (nº200)	5 - 10

4 Procedimento Experimental

4.1 Metodologia

A metodologia adoptada envolveu a recolha e caracterização das matérias-primas (resíduos e material convencional) e elaboração das formulações a serem testadas para as devidas áreas distintas, assim como a caracterização dos corpos de prova com ensaios específicos para cada tipo de formulação.

4.2 Recolha e Caracterização de matérias-primas

Foram utilizados resíduos de duas das três unidades fabris do Grupo Portucel/Soporcel, sendo o trabalho com as argamassas desenvolvido com resíduos da fábrica Soporcel (Figueira da Foz) e as misturas betuminosas preparadas com resíduos da fábrica Portucel (Cacia).

A recolha foi realizada directamente nas fábricas, mais propriamente nos locais de saída dos resíduos, sendo os dregs recolhidos à saída do clarificador de licor verde e os grits, do apagador de cal. As areias do leito fluidizado foram recolhidas à saída da caldeira. Em seguida, foram convenientemente armazenados em contentores escuros e sacos plásticos de pequeno porte até à sua utilização.

Para a utilização dos resíduos no trabalho, foram necessários tratamentos prévios colocando-os em condições de aplicação. A Tabela 4.1 resume os métodos de preparação para cada amostra.

Tabela 4-1 Resumo dos métodos de preparação das amostras.

Amostras	Métodos de preparação das amostras		
	Secagem	Moagem	Lavagem
Areias do leito fluidizado	✓	—	✓
Grits	✓	✓	
Dregs	✓	✓	✓

A secagem das amostras foi efectuada numa estufa, à temperatura de 85°C.

Os dregs, em aplicação na área da construção civil, foram utilizados de duas formas, a primeira, tal e qual, conforme vieram da fábrica, mantendo as suas características químicas e físicas; a segunda, após uma lavagem prévia para diminuição do teor em sais. O procedimento envolve a preparação de uma solução aquosa com dregs (100g de amostra em 2 litros de água), a qual é agitada manualmente e em seguida filtrada. Após filtração total, retira-se o material sólido, troca-se o filtro e repete-se a operação. Este processo garante a redução do teor em sais, especificamente cloretos.

Relativamente à área de vias e pavimentos, os dregs, após terem sido secos em estufa, foram ligeiramente desagregados num almofariz com pilão de cerâmica. Os grits foram utilizados somente secos em estufa (85°C).

Para a incorporação de grits em cimento, estes sofreram uma moagem feita em moínho de disco, para adquirirem as características granulométricas adequadas.

O material utilizado na formulação dos provetes para misturas betuminosas (pó-de-calcário, britas e filler), foi cedido pela empresa Manuel Vieira & Bacalhau, especializada na fabricação de pavimentos rodoviários.

A Tabela 4-2 resume os parâmetros utilizados para a caracterização dos resíduos.

Tabela 4-2 Resumo dos parâmetros usados na caracterização dos resíduos (√- realizado, ___- desnecessário).

Resíduos	Humidade	Massa volumica	Equivalente de Areia	Azul-de-Metileno	Difracção por Raios X	ATD e ATG	Granulometria	Sólidos Totais Voláteis
ALF	√	√	—	—	√	—	√	√
Grits	√	√	√	√	√	—	√	—
Dregs	√	√	—	√	√	√	√	—

4.2.1 Natureza dos resíduos

Para análise da natureza dos resíduos da celulose foram determinados os seguintes parâmetros: humidade e total de sólidos voláteis. Para a determinação do total de sólidos voláteis nas areias do leito fluidizado utilizou-se o método da perda de massa em mufla a 500°C, obtendo-se o resultado por diferença de massa (Standard Methods, 2540, E, 1998).

Verificou-se a humidade dos dregs para que fosse possível corrigir, em peso seco, a quantidade correspondente de material a ser substituído.

4.2.2 Composição Mineralógica

A análise mineralógica foi efectuada por Difracção de Raios-X (DRX), para as amostras dos resíduos. O aparelho de medição utilizado foi um *Rigaku-Geigerflex* com velocidade de varrimento de 3°2 θ /min e radiação K α Cu ($\lambda=1,5418$) que utiliza ficheiros de dados de Raios-X do tipo JCPDS. Os resultados foram registados entre 4 e 80° (2 θ).

4.2.3 Análise térmica

O comportamento térmico dos dregs foi efectuada através de análise térmicas gravimétrica (ATG) e diferencial (ATD) nas formas tal e qual e lavados.

As amostras foram secas à 110°C e posteriormente moídas e peneiradas. Para as análises de ATG e ATD, foram feitos os testes a uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 1200°C em atmosfera de ar, num aparelho do tipo *Setaram Labsys DTA-TG/DSC*.

O objectivo deste ensaio foi avaliar as transformações que ocorrem durante o tratamento térmico dos resíduos.

4.2.4 Distribuição Granulométrica

A análise granulométrica dos materiais (LNEC E 196) feita por peneiração, permitiu a obtenção de uma distribuição de tamanhos da amostra em crivos sobrepostos em ordem decrescente.

A classificação granulométrica dos resíduos permitiu verificar a sua adequação às diferentes aplicações em estudo, assim como, indicar aos parceiros industriais na identificação de produtos onde esta característica poderia ser melhor aproveitada ou, então, para a necessidade de pré-processamento do subproduto antes da incorporação. Para determinação da distribuição granulométrica das matérias-primas, todas as amostras foram secas, com dregs a sofrerem moagem prévia. Os peneiros utilizados para a realização do ensaio variaram de acordo com o tipo de amostra e com a finalidade do uso.

No caso da aplicação em pavimentos rodoviários, o método utilizado para a brita 1 (gravilha grande), foi o que consta da norma NP EN 933-1:2000, aplicável a partículas de diâmetro <45 mm. Para as matérias-primas, brita 2 (gravilha pequena), pó-de-calcário, filler, grits e dregs, seguiu-se a norma NP EN 933-2:1999 aplicável a partículas de diâmetro <2mm.

Atendendo a que a substituição do agregado pelo resíduo se faz na fracção < 4,76 mm, mantendo-se inalteradas as características da componente acima desta dimensão, cujo comportamento é já conhecido, foi somente necessário verificar a conformidade das novas misturas nas características influenciadas por esta fracção (< 4,76 mm – ASTM)

4.2.5 Massa Volúmica ou densidade aparente

A massa volúmica, ρ , indica a massa de matéria existente por unidade de volume.

O método utilizado para a brita 1 (partículas cujo diâmetro varia entre 19 e 45 mm), foi o da especificação (E 581-LNEC), e para as matérias-primas

denominadas como brita 2, pó-de-calcário, filler, grits e dregs, usou-se a especificação (E 248-LNEC), aplicável a partículas de diâmetro <2mm.

4.2.6 Grau de impureza e sensibilidade à água

Para determinar o grau de impurezas do material e ainda verificar se este apresenta sensibilidade à água, foi realizado o ensaio de Azul-de-metileno e o Equivalente de Areia para os agregados (norma NP EN 933-9/2002). O primeiro consiste na adsorção do azul-de-metileno pelas partículas finas (material que passa no peneiro 200, partículas de tamanho inferior a 0,075mm) de um agregado. Neste teste dá-se uma permuta iónica entre os catiões (de cálcio, sódio, magnésio ou potássio, por exemplo) existentes na superfície dessas partículas e os catiões resultantes da dissociação da molécula de azul-de-metileno em solução aquosa.

O valor de azul-de-metileno define, de forma eficaz, a maior ou menor sensibilidade à água, ou seja, no caso de agregados, o maior ou menor grau de limpeza ou de existência de materiais sensíveis à água.

Para os agregados de uma mistura betuminosa, existe um valor de azul-de-metileno considerado como limite de adsorção ($\leq 0,8$ MACOPAV).

Em relação ao segundo ensaio, o valor de “Equivalente de Areia” (EA) é um parâmetro que permite avaliar a quantidade de matéria muito fina associada a materiais mais grosseiros, o que permite definir com rapidez se um agregado está ou não “limpo”. Por exemplo, para uma areia pura EA = 100%, decrescendo seu valor à medida que aumenta o teor de impurezas ou de finos. Para argilas EA é praticamente nulo.

Duma forma simples, consiste em fazer, numa proveta, uma suspensão floculante de 120g de agregado passado no peneiro 4.75 mm (n.º 4), e deixar a proveta em repouso por 20 minutos. O material grosseiro deposita-se rapidamente e o material fino fica em suspensão durante muito tempo. (Pereira & Santos, 2002). Determina-se assim a relação entre o volume de “areia” e

volume de areia mais o volume de finos que se separam da areia e flocculam:
 $EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100$, sendo h_1 o material fino em suspensão e h_2 o material grosseiro depositado. Em síntese, o EA dá uma indicação da qualidade do material. (Pereira & Santos, 2002).

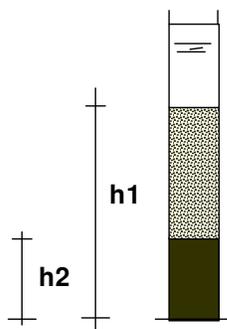


Figura 4-1. Método usado no ensaio de equivalente de areia.

4.2.7 Sólidos Totais Voláteis

Este parâmetro foi obtido somente para as areias do leito fluidizado através da recolha de amostras aleatoriamente espalhadas pelo monte em aterro sanitário. Foram recolhidas dez amostras as quais passaram por um processo de secagem em estufa a 105°C e, em seguida, foram pesadas em cadinhos. Estes cadinhos contendo as amostras foram levados à temperatura de 500°C numa mufla permanecendo aproximadamente duas horas. Em seguida, pesou-se a amostra e por diferença de peso, obtiveram-se os resultados relativos ao teor de sólidos totais voláteis.

4.3 Incorporação em cimento

Foram realizados ensaios no laboratório industrial SECIL (Maceira) que simularam a utilização de grits como aditivo na produção de cimento em teores de 5 e 10%. Com estas misturas foram preparados provetes de argamassas que permitiram a determinação de resistências mecânicas a 1 e 7 dias.

4.3.1 Estudo da máxima incorporação de grits em cimento

Foi realizado um trabalho teórico antes do ensaio de incorporação que relacionou a composição química dos grits com a composição química do cimento portland (CEM I 42,5 R).

Como existem limites em relação a certos elementos no cimento (ex. cloro), então, sabendo a composição dos grits e adoptando os limites máximos de cada composto no cimento, foram elaborados gráficos que dão a indicação do acréscimo à composição do cimento oferecido pela incorporação de grits (em percentagem).

4.3.2 Processamento e Formulações ensaiadas

Verificou-se o efeito dos Grits após moagem, incorporados em cimento como uma fonte de carbonato de cálcio (CaCO_3), na resistência mecânica do cimento com o intuito de promover a utilização do resíduo como matéria-prima, quando adicionado directamente na pedra ou como aditivo ao clínquer juntamente com o gesso e o calcário. Para a preparação dos provetes de argamassa, utilizou-se o método descrito na Norma Portuguesa EN 196-7.

As formulações ensaiadas foram:

Ensaio I: 5% de grits (amostra 1427D)

Mistura: 95% CEM I 42,5R (85% clínquer, 5% CaCO_3 e 5% gesso) + 5% Grits.

Formulação: Para preparar 3 provetes de argamassa utilizou-se a seguinte formulação para o cimento: 427,5g CEM + 22, 5g Grits. A razão cimento/areia (C/A)=1:3 e a razão água/cimento (A/C)=1:4.

Ensaio II: 10% de grits (amostra 1428D)

Mistura: 90% CEM I 42,5R (80% clínquer, 5% CaCO_3 e 5% gesso) + 10% Grits.

Formulação: Para se preparar 3 provetes de argamassa utilizou-se a seguinte formulação para o cimento: 405g CEM + 45g Grits. As razões C/A e A/C foram as mesmas.

4.3.3 Resistência Mecânica

Para a determinação da resistência mecânica à compressão após 1 e 7 dias de cura, utilizou-se o método estabelecido pelo LNEC-E 226-227/1968.

4.4 Incorporação em argamassa

Em todo o trabalho desenvolvido no fabrico de produtos cimentícios utilizou-se o Cimento Portland I 42.5R como ligante, e este foi cedido pela SECIL (Maceira), empresa portuguesa fabricante de cimento. A composição média de um cimento portland 42,5 I tradicional, encontra-se na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 Composição do Cimento Portland 42.5 I. (Coutinho, 1997)

<i>Composição do Cimento Portland 42.5 I</i>	%
CaO	60 - 68
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	2 - 9
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6
MgO	0 - 2
K ₂ O	0.5 - 1.5

Os códigos das argamassas com resíduos constam na Tabela 4-4.

Para a preparação dos provetes, foi utilizado o método descrito pela Norma Portuguesa EN 196-7.

Tabela 4-4 Modalidades ensaiadas e codificação das amostras.

Área de aplicação	Resíduo	Modalidade	Código da amostra
Argamassa (UA)	Areias do Leito Fluidizado	Referência: amostra em branco (razão água/cimento = 0.5)	A1Ref
		Amostra com 100% de incorporação do resíduo em substituição da areia normal;	A1alf100%
		Amostra com 30% de substituição do resíduo em substituição da areia normal	A1alf30%
	Dregs	Referência: amostra em branco (razão água/cimento = 0.45)	A2REF
		Amostras com 5% e 10% de incorporação de dregs lavados em substituição da areia; normal	A3DL5%, A3DL10%
		Amostras com 5 e 10% de incorporação de dregs tal qual em substituição da areia normal.	A4DTQ5%, A4DTQ10%
Argamassa (Weber)	Areias do Leito Fluidizado	Incorporação em argamassa cola C2 (12 % da argamassa)	—
		Incorporação em reboco de projecção (15 % da argamassa)	—

As Tabelas 4-5 e 4-6 mostram as quantidades dos diferentes componentes.

Tabela 4-5 Quantidade de material usado para produção de provetes de argamassa. Razão água/cimento igual a 0.5.

Referência	Cimento (g)	Areia convencional (g)	Resíduo (areia do leite fluidizado) (g)	Água (g)
A1-ref	875	2625	0	437.5
A1alf	875	0	2625	437.5
A1alf30%	875	1837.5	787.5	437.5

Tabela 4-6. Quantidades de material usado para produção de provetes de argamassa. Razão água/cimento igual a 0.45.

<i>Referência</i>	<i>Cimento (g)</i>	<i>Areia (g)</i>	<i>A/C</i>	<i>Água a adicionar (g)</i>	<i>Água nos dregs (g)</i>	<i>Água total (g)</i>	<i>Dregs base seca (g)</i>	<i>Dregs base húmida (g)</i>
A3DL5%	875	2493.7	0.45	290.625	103.125	393.75	131.25	234.375
A3DL10%	875	2362.5	0.45	187.5	206.25	393.75	262.5	468.75
A4DTQ5%	875	2493.7	0.45	290.625	103.125	393.75	131.25	234.375
A4DTQ10%	875	2362.5	0.45	187.5	206.25	393.75	262.5	468.75
Ref2	875	2625	0.45	393.75	—	393.75	—	—

Os corpos de prova foram caracterizados por métodos normalizados (Tabela 4-7), sendo descritos sucintamente adiante.

Tabela 4-7 Ensaios de caracterização das argamassas.

<i>Produtos</i>	<i>Ensaios</i>				
	<i>Trabalhabilidade (NP EN 196-3/1990)</i>	<i>Vicat (NP EN 196-3/1990)</i>	<i>Resistência à flexão e compressão (LNEC-E 226-227/1968)</i>	<i>Teor em sais (Gravimetria e potenciometria)</i>	<i>Metais pesados (ICP)</i>
Argamassa com incorporação de areias do leito fluidizado	√	√	√	√	√
Argamassa com incorporação de dregs	√	√	√	√	√
Argamassa Weber	√	√	√	√	—

4.4.1 Trabalhabilidade

Este parâmetro é determinado com o provete de argamassa ainda verde, ou seja, logo após o término da mistura, enquanto esta encontra-se em estado trabalhável. A trabalhabilidade da argamassa medida pelo espalhamento é um

parâmetro que permite verificar a capacidade de manuseamento da argamassa na sua preparação e aplicação em obra. A gama limite aceitável para a trabalhabilidade de uma argamassa situa-se entre 100 e 130 mm de espalhamento. O método baseia-se na Norma Portuguesa EN 196-3/1990 – Determinação do índice de consistência da argamassa normal. Consiste numa mesa provida de um excêntrico, através do qual a mesa recebe um movimento ascendente, caindo de 14 mm de altura. O movimento de subida e queda da mesa é realizado girando a manivela no sentido horário.

4.4.2 Tempo de Início de Presa

Para determinação do início de presa, foi utilizado o Método de Vicat descrito na Norma Portuguesa EN 196-3/1990. Este parâmetro teve como objectivo avaliar a influência dos resíduos em relação ao aumento ou diminuição do tempo de início do processo de rigidificação do cimento.

4.4.3 Resistência Mecânica

A resistência mecânica foi determinada por ruptura à flexão e compressão (método LNEC-E 226-227/1968), cujo objectivo era avaliar a influência dos resíduos nas argamassas em relação à amostra padrão, sem adição de resíduo.

4.4.4 Teor em sais

Para determinação de cloretos através de potenciometria, o método utilizado é descrito no “Standard Methods 4500 D Cl^- ”, e os sulfatos foram pelo método gravimétrico 4500 D SO_4^{2-} em eluatos de argamassas com incorporação de ALF e Dregs.

O método que descreve o procedimento para a preparação do eluato das amostras a partir de lixiviação encontra-se na Norma DIN 38414-S4.

A presença de sais como cloretos e sulfatos pode alterar as propriedades e comportamento da argamassa produzida. Os cloretos alteram o tempo de presa enquanto que os sulfatos podem reagir com a alumina do cimento ou do inerte originando o sulfoaluminato de cálcio, provocando uma reacção expansiva. (Coutinho, 1997). Os cloretos são também agentes corrosivos dos reforços em aço.

Na caracterização das areias do leito fluidizado realizada pela Weber foram detectado níveis apreciáveis de cloretos que são coerentes com a redução do tempo de presa registada nos ensaios da UA e da própria Weber. No entanto, a lavagem que já hoje é realizada no processamento de areias convencionais permite a redução deste efeito tornando-a compatível com esta aplicação.

Para determinação de sulfatos a partir do eluato da amostra aplicou-se o método gravimétrico, e cloretos foram avaliados por potenciometria padronizado com AgNO_3 .

4.4.5 Metais Pesados

A análise para quantificar os metais pesados foi feita a partir do “ICP” (Inductively coupled plasma) da marca Jobin-Yvon, que permite uma análise por espectrometria de emissão atómica a partir da amostra digerida em água régia (3:1). A mostra é assim digerida para que haja a mineralização da matéria orgânica e dissolução da parte mineral.

4.4.6 Ensaio de Incorporação em Argamassas Industriais (WEBER)

A nível industrial pretende-se testar as areias do leito fluidizado na produção de argamassa de cimento-cola e argamassa para reboco, sendo o parceiro industrial a empresa WEBER-cimenfix.

A aplicação em argamassas implicou um estudo laboratorial inicial na empresa, onde se utilizou o resíduo (areia do leito fluidizado) previamente “tratado” da seguinte forma:

- Peneiração para remoção dos resíduos acima de 1,250mm;

- Lavagem do material com água destilada e secagem a 100°C (até grau de humidade inferior a 0.10%)

As argamassas estudadas com a utilização deste resíduo partem de formulação de argamassas já comercializadas pela WEBER-cimenfix, sendo a utilização do resíduo feita em substituição directa da areia na formulação respectiva.

Previamente, foram também recolhidas 10 amostras aleatórias de areia do leito fluidizado no monte em aterro. Utilizando uma porção (250g) de cada uma das dez amostras recolhidas foi feita uma análise granulométrica para obtenção do intervalo de variações para cumprimento das exigências de formulações do parceiro industrial, de modo a garantir uma matéria-prima o mais homogénea possível.

No ensaio pré-industrial utilizou-se uma taxa de adição de 12% de areias do leito fluidizado em argamassa cola e 15% em argamassa de reboco de projecção, ambas em substituição parcial da areia convencional pela empresa utilizada.

4.5 Incorporação em misturas betuminosas

Descrevem-se aqui as etapas que constituem o trabalho de incorporação de resíduos da indústria de pasta e papel no fabrico de misturas betuminosas para a camada de regularização de um pavimento rodoviário, envolvendo a formulação em laboratório de misturas betuminosas a quente com incorporação de resíduos e a sua caracterização física e mecânica.

O trabalho subdivide-se em duas etapas, para além da caracterização das matérias-primas:

- *Primeira etapa:* Caracterização de misturas com incorporação de dregs e grits sem adição de betume.
- *Segunda etapa:* Caracterização de misturas com incorporação de dregs e grits com adição de betume.

4.5.1 Processamento e Formulações Ensaçadas

Os materiais brita grande, brita pequena, pó-de-calcário, filler e betume utilizados para a obtenção dos provetes para ensaios foram cedidos pela empresa Manuel Vieira & Bacalhau, LDA, e os resíduos grits e dregs (também utilizados como agregados), pela empresa Portucel de Cacia.

No que se refere a agregados para as misturas formuladas, estes foram antes descritos. O ligante para todas as misturas foi o betume.

As misturas foram caracterizadas com os seguintes critérios de avaliação:

- A granulometria dos agregados deve obedecer ao fuso granulométrico para as misturas betuminosas de acordo com a camada de aplicação,
- Para o ensaio de equivalente de areia, a mistura de agregados deve apresentar um EA $\geq 50\%$;
- É necessário que a mistura de agregados apresente um valor de adsorção de azul-de-metileno ≤ 0.8 g por 100g de mistura;

Seguiu-se a preparação e caracterização das misturas com betume. Foi utilizada uma mesma percentagem ponderal de betume para todas as misturas ensaiadas.

Dos métodos empíricos utilizados para a determinação da resistência de misturas betuminosas, o de uso mais frequente é o Método de Marshall (NP-142), pois permite uma boa previsão do seu comportamento. (Pereira & Picado-Santos, 2002)

Para a obtenção do material pretendido há que misturar várias fracções de agregados finos e grossos, produzindo um material que respeite as especificações aplicáveis à mistura betuminosa que se pretende fabricar. No caso actual, trata-se de uma mistura betuminosa densa para camada de regularização. Para isso, deve-se saber em que proporções devem entrar cada

uma das fracções, de modo a obter uma curva de distribuição dentro do fuso especificado.

Salienta-se que cada provete deve conter uma massa de material (incluindo o betume) de 1200g.

A Tabela 4-8 apresenta as formulações das misturas betuminosas obtidas através da maior aproximação da curva referencial (MSBRef) para a preparação dos provetes, com as respectivas percentagens dos agregados e dos resíduos juntamente com os valores em massa de cada. A figura 4-2 representa as curvas que correspondem às misturas.

Tabela 4-8. Formulações para cada tipo de mistura betuminosa ensaiada: quantidade (g) e percentagem de material usado na confecção do provete.

Referência	Modalidades	Betume (g)	Agregados (g)				Resíduos (g)	
			Brita 2 (g)	Brita 1 (g)	Pó-de-pedra (g)	Filler (g)	Grits (g)	Dregs (g)
MBRef	Mistura betuminosa sem adição de resíduo	64.8	261,096 (23%)	272,44 (24%)	556,24 (49%)	45,40 (4%)	0	0
MBG5%	Mistura betuminosa com 5% de incorporação de Grits	64.8	261,09 (23%)	283,8 (25%)	499,48 (44%)	34,05 (3%)	56,76 (5%)	0
MBD5%	Mistura betuminosa com 5% de incorporação de Dregs	64.8	272,44 (24%)	283,8 (25%)	488,13 (43%)	34,05 (3%)	0	56,76 (5%)
MBG10%	Mistura betuminosa com 10% de incorporação de Grits	64.8	261,09 (23%)	283,8 (25%)	442,72 (39%)	34,05 (3%)	113,52 (10%)	0
MBD10%	Mistura betuminosa com 10% de incorporação de Dregs	64.8	283,8 (25%)	295,15 (26%)	420,02 (26%)	34,05 (2%)	0	113,52 (10%)

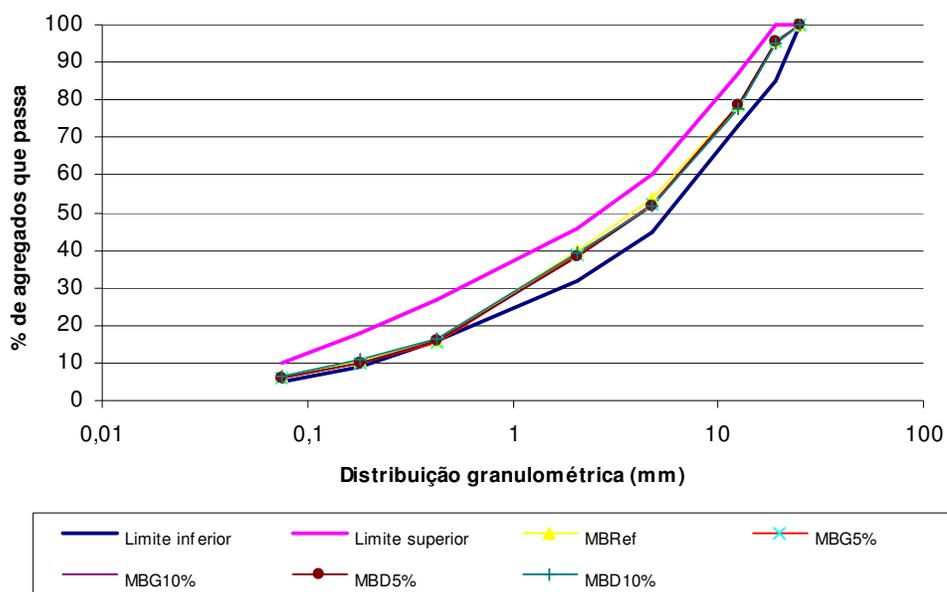


Figura 4-2. Curvas com as percentagens dos agregados para as misturas betuminosas.

O Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1983) propõe a realização de conjuntos de três provetes, porém para diversos cadernos de encargos em Portugal obrigam à realização de 4 provetes para comparar as características médias. Neste trabalho foram confeccionados 4 para cada tipo de amostra somando um total de 20 provetes (Figura 4-3), fazendo-se variar a percentagem de resíduos e mantendo a percentagem de betume em 5.4% para todas as misturas.



Figura 4-3. Provetes das misturas betuminosas

Em termos de procedimento, o método envolve uma secagem dos agregados em estufa entre 175° a 190°C, mistura com betume, também aquecido a uma temperatura entre 120 e 140°C garantindo a viscosidade ideal do ligante e compactação das amostras sob condições normalizadas.

Foram consideradas as tolerâncias admissíveis nas operações de fabrico, relativamente ao valor óptimo de betume a utilizar, adoptando-se a percentagem de 5,4%.

4.5.2 Caracterização das misturas sem betume

Antes de qualquer estudo de composição, onde se inclui o procedimento Marshall, para além das características físicas exigidas para os agregados, é necessário a obtenção de um material granular cuja curva granulométrica esteja dentro do fuso especificado pelos cadernos de encargos e apresente uma distribuição que cumpra com as exigências estabelecidas para dar continuidade ao trabalho. Para isto foram realizados os respectivos ensaios de granulometria, massa volúmica aparente dos agregados, azul-de-metileno e equivalente de areia das misturas de agregados.

Os métodos utilizados para o ensaio da massa volúmica aparente dos agregados tiveram como suporte as normas NP 581 – LNEC e Especificação 248 – LNEC referentes às Massas volúmicas e absorção de água de britas e Massas volúmicas e absorção de água de areias, respectivamente, sendo ambas utilizadas para determinação deste parâmetro em se tratando de agregados para misturas betuminosas.

4.5.3 Caracterização das misturas com betume

4.5.3.1 Ensaio Marshall

O método Marshall (NORMA Portuguesa 142-1968) consiste na determinação, a partir de ensaios realizados sobre os provetes das misturas betuminosas, de grandezas de natureza física e mecânica que caracterizam a mistura betuminosa a estudar, sendo:

Grandezas de natureza física:

- Massa volúmica ou baridade aparente (baridade é um termo usado em obras de construção civil), baridade máxima teórica (BMT), a porosidade e o volume de vazios na mistura de agregados (VMA) e grau de saturação em betume.

Grandezas de natureza mecânica:

- Força de rotura (estabilidade) e deformação

Antes da realização dos ensaios destrutivos que integram o método Marshall, todos os provetes foram pesados dentro e fora de água, e a partir dos valores da massa e do volume obtidos, calculou-se através da fórmula abaixo, a baridade aparente (E-267 LNEC, 1973). A partir da baridade máxima teórica determinada pelo método do picnómetro de vácuo (norma ASTM D 2041), calculou-se a porosidade e o VMA.

$$\rho = m_1 / (m_1 - m_2)$$

Onde:

ρ = baridade aparente; m_1 = massa do provete ao ar; m_2 = massa do provete na água.

4.5.3.2 Baridade Máxima Teórica

A Baridade Máxima Teórica é determinada pela norma ASTM D 2041 (método do picnómetro de vácuo). Este parâmetro dado em g/cm^3 , e é obtido pela fórmula:

$$\rho_{max} = (M_b + M_a) / (V_b + V_a)$$

Onde:

M_b = massa de betume (g), M_a = massa de material agregado (g), V_b = volume de betume (cm^3) e V_a = volume de material agregado (cm^3).

4.5.3.3 Porosidade

A porosidade é um parâmetro representado pelos vazios na mistura de agregados [$100 \cdot (V_v/V_t)$] incluindo o ligante e é expresso em percentagem.

O ensaio para obtenção do parâmetro porosidade é descrito pela Norma ASTM D 2041. De acordo com o MACOPAV, este valor pode variar de 3 a 6% na mistura obedecendo os requisitos para o tipo de camada a qual está a ser estudada.

4.5.3.4 Volume de Vazios na Mistura de Agregados (VMA)

O VMA indica o volume de vazios na mistura de agregados sem betume ($V_v + V_b$). Este parâmetro permite obter uma indicação da durabilidade e desempenho das misturas compactadas. O VMA é todo o volume de vazios da mistura compactada que resultaria retirando-se todo o betume sem que se alterasse a posição dos agregados. Ele permite quantificar o espaço entre as partículas dos agregados de uma mistura compactada, ou seja, o volume de vazios e o volume de betume efectivo (betume que garante a ligação entre as partículas do agregado excluindo a quantidade absorvida pelos poros do agregado), expresso como percentagem do volume total (NP EN 1097-3).

4.5.3.5 Força de rotura

A força de rotura é também chamada de estabilidade, é determinante para a capacidade da mistura resistir às deformações produzidas pelas cargas a que fica sujeita em serviço. Esta propriedade depende essencialmente da fricção interna dos materiais e da sua coesão, resistências que dependem da textura dos materiais, da granulometria dos agregados, da forma das partículas e da quantidade e tipo de betume. A fricção interna é um fenómeno que resulta da combinação do atrito e do imbricamento entre os grãos do agregado que constitui a mistura. O atrito aumenta com a rugosidade das partículas de agregado e também com a área de contacto entre elas. O imbricamento depende fundamentalmente da forma das mesmas. Esta propriedade está

directamente relacionada à compactação da mistura, quanto melhor compactada, maior é a força exercida para a rotura do provete, ou seja, mais resistente as forças externas que, a camada pode vir a sofrer.

4.5.3.6 Deformação

Este parâmetro é determinado a partir do ensaio Marshall de quebra dos provetes das misturas betuminosas e permite a obtenção da máxima deformação sofrida pelo provete medida por um deflectómetro.

O valor encontrado deve corresponder a uma deformação dentro dos limites impostos pelas especificações de acordo com o tipo de camada betuminosa. No caso da camada em estudo esta deformação pode atingir 4%.

5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização de Matérias-primas

5.1.1 Caracterização dos resíduos do sector de pasta e papel

5.1.1.1 Natureza dos resíduos

Os resíduos do sector de pasta e papel são misturas complexas, que possuem na sua composição metais, não metais, compostos orgânicos e fibra celulósica.

Na Tabela 5.1 apresentam se os valores obtidos para os parâmetros analisados nos diferentes resíduos.

Tabela 5-1 Resultados de Humidade e Sólidos Totais Voláteis* (Paulo, 2005)

<i>Resíduos (g)</i>	<i>Humidade %</i>	<i>Sólidos Totais Voláteis (500 ± 25°C) %</i>
Grits	15	0.0*
Dregs	44	6.5*
ALF	<0.8	~0.7

Os sólidos totais voláteis foram medidos somente nas areias do leito fluidizado para cumprimento de um dos critérios estabelecidos para o ensaio industrial. Fez-se uma recolha aleatória de 10 amostras no monte em aterro para que fosse possível obter um intervalo de variação no que se refere a este indicador. A partir destas amostras obteve-se a média para os STV para este resíduo, que pode ser verificada na Figura 5.1.

Os três resíduos apresentam uma percentagem de humidade muito distinta. Os grits apresentam uma humidade três vezes mais baixa que os dregs. As diferenças entre os dregs tal qual são recolhidos e pré-lavados são muito ténues.

As areias, de uma maneira geral, quase não apresentam humidade.

Relativamente ao segundo parâmetro, os grits não contêm sólidos totais voláteis, enquanto que as areias apresentam um valor muito baixo.

No processo de geração deste resíduo crescem aparas de madeira, que sofrem decomposição à temperatura especificada no ensaio.

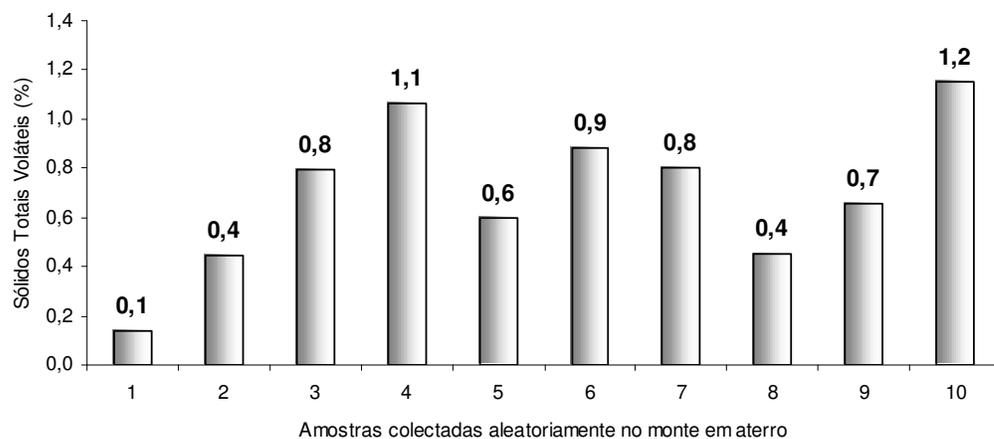


Figura 5-1. Resultados dos Sólidos totais voláteis (STV) das areias do leito fluidizado

5.1.1.2 Composição mineralógica

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5-4 se apresenta a caracterização mineralógica efectuada a cada um dos resíduos secos por difracção de Raios-X (DRX)

Os difractogramas dos resíduos dregs e grits são bastante semelhantes uma vez que a fase mineralógica encontrada foi a calcite (CaCO_3). (Figuras 5-2 e 5-4)

A figura 5-4 representa o difractograma de raios-X da areia do leito fluidizado. Trata-se de uma areia essencialmente constituída por quartzo com alguma calcite.

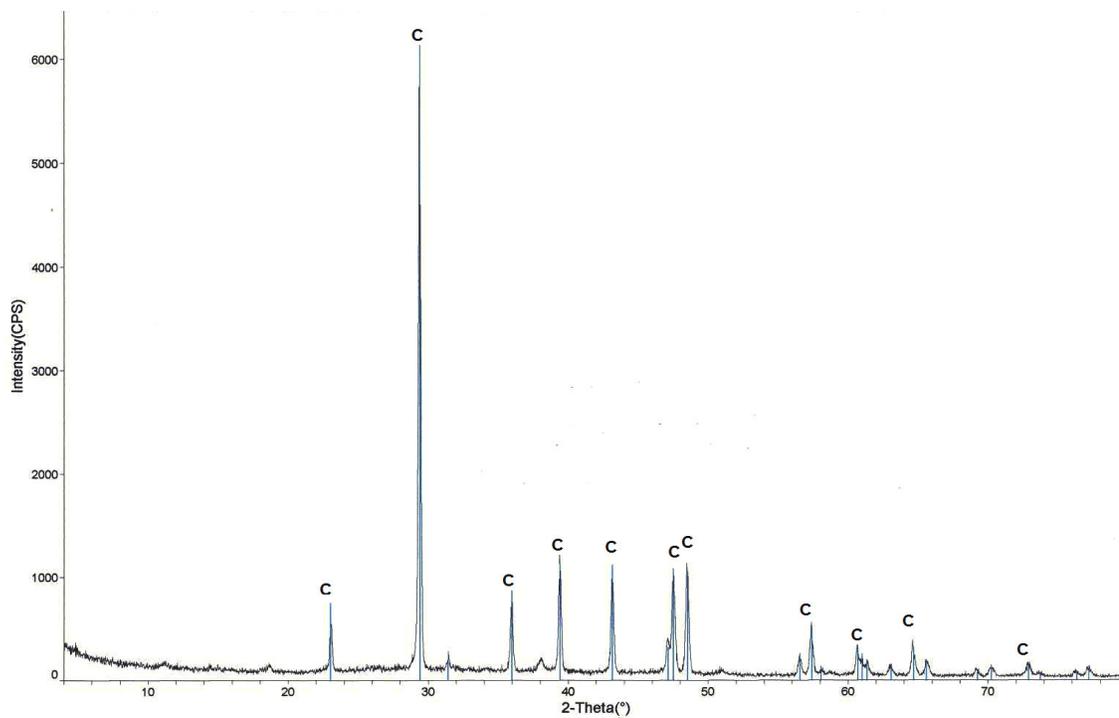


Figura 5-2 Difractograma dos dregs.

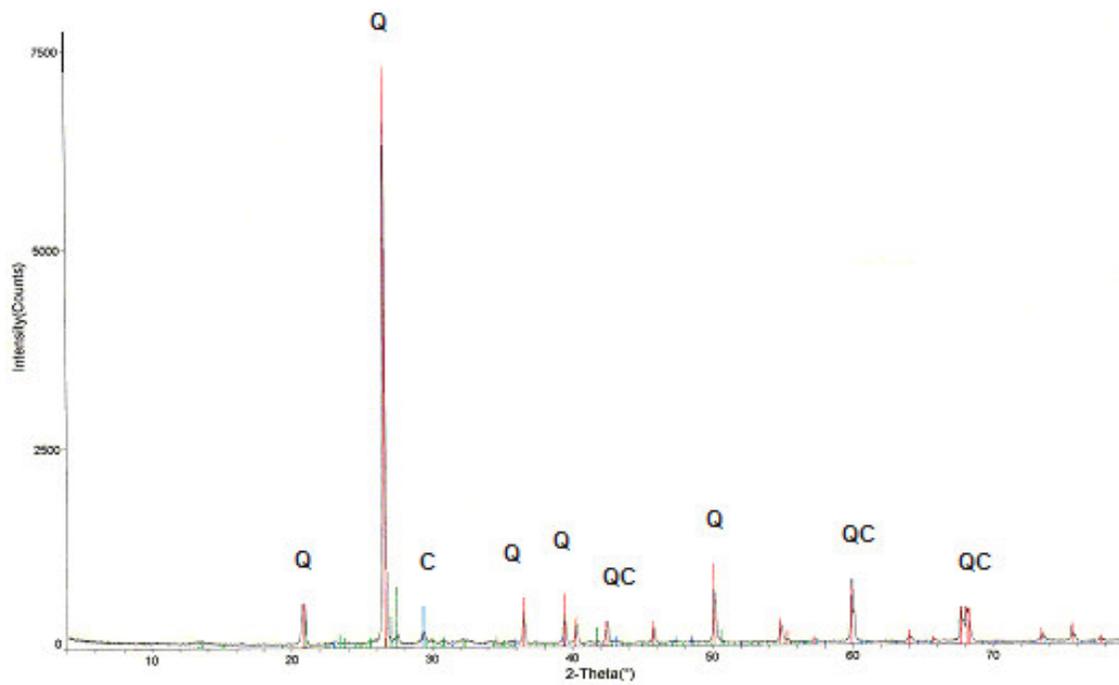


Figura 5-3 Difractograma das areias do leito fluidizado.

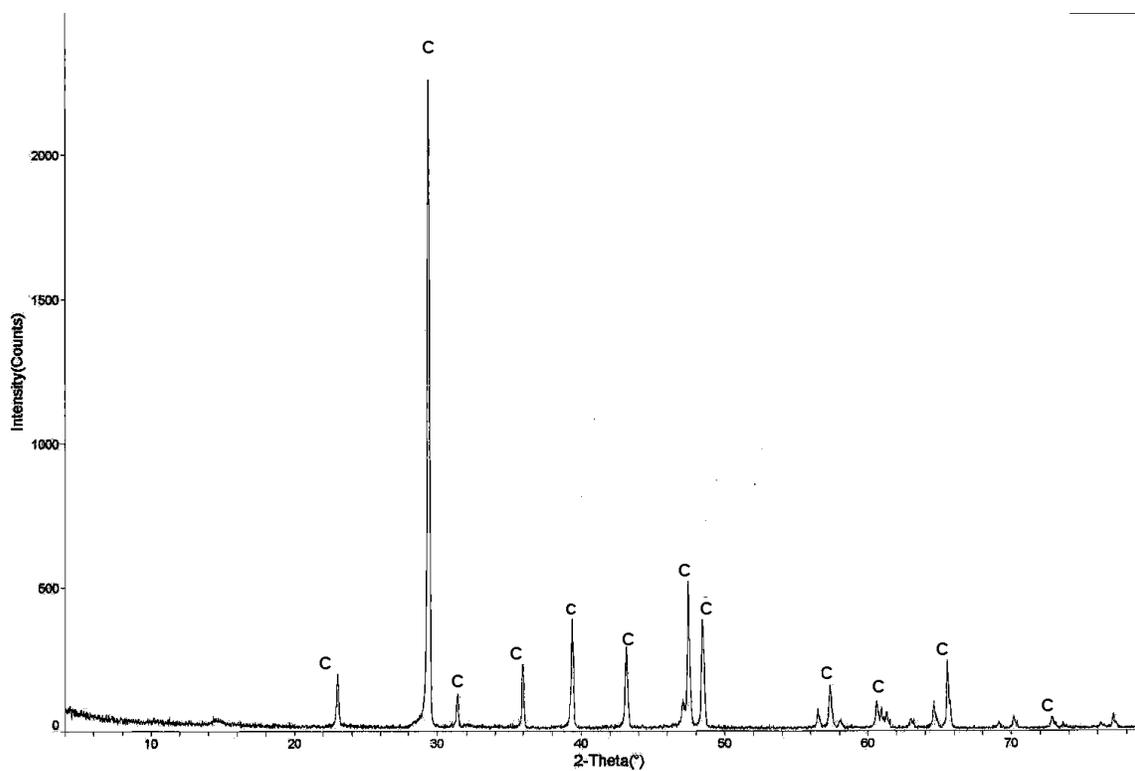


Figura 5-4. Difractograma dos grits.

5.1.1.3 Análises térmicas

As curvas de análise térmica diferencial e gravimétrica (ATD e ATG) dos dregs nos dois diferentes estados (tal qual e lavados) em que foram utilizados no trabalho das argamassas e no trabalho dos materiais betuminosos, encontram-se nas Figuras 5-5 e 5-6.

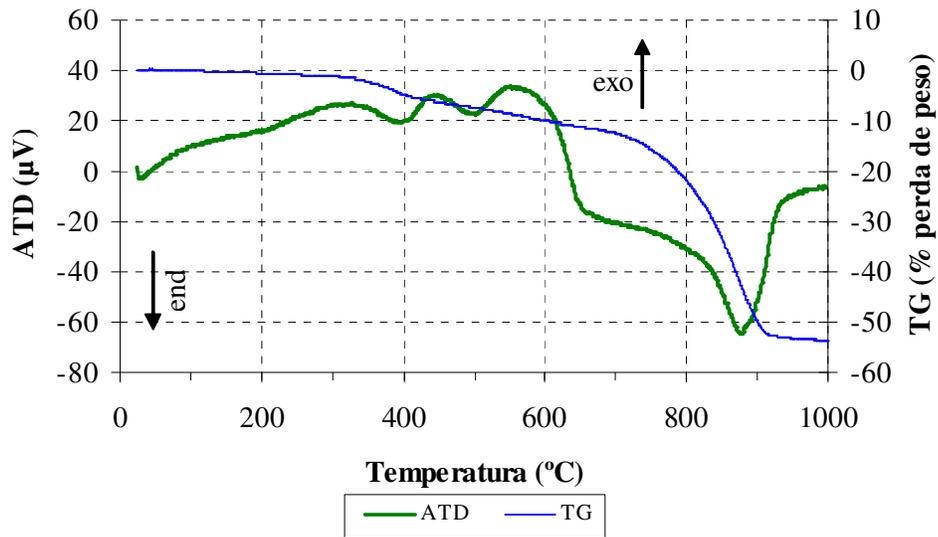


Figura 5-5. Curvas de análise térmica para Dregs tal e qual

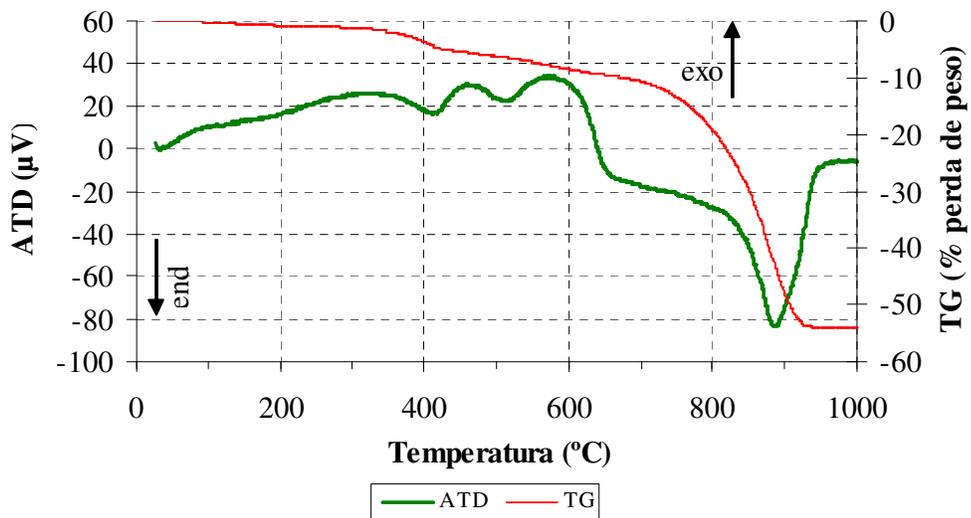


Figura 5-6. Curvas de análise térmica para Dregs Lavados

Para análise das Figuras 5-5 e 5-6, observam-se duas reacções principais durante o aquecimento das amostras e ainda semelhanças entre ambas as curvas de ATG e ATD, assim como os valores globais de perda de massa.

Os dregs nas duas condições apresentaram uma banda exotérmica ampla até atingir os 600°C, devido a decomposição de matéria orgânica, sendo a curva composta de pequenas perdas de peso a 400 e 500°C. A perda de peso mais acentuada sucede aos 900°C em ambos os casos. A reacção entre os 800 e 900°C é de natureza endotérmica, e pode ser explicada pela decomposição de carbonatos (calcite).

5.1.1.4 Distribuição granulométrica

Nas Figuras 5-7, 5-8 e 5-9 apresentam-se as curvas de distribuição granulométrica dos resíduos, previamente secos e moídos de acordo com a metodologia anteriormente referida.

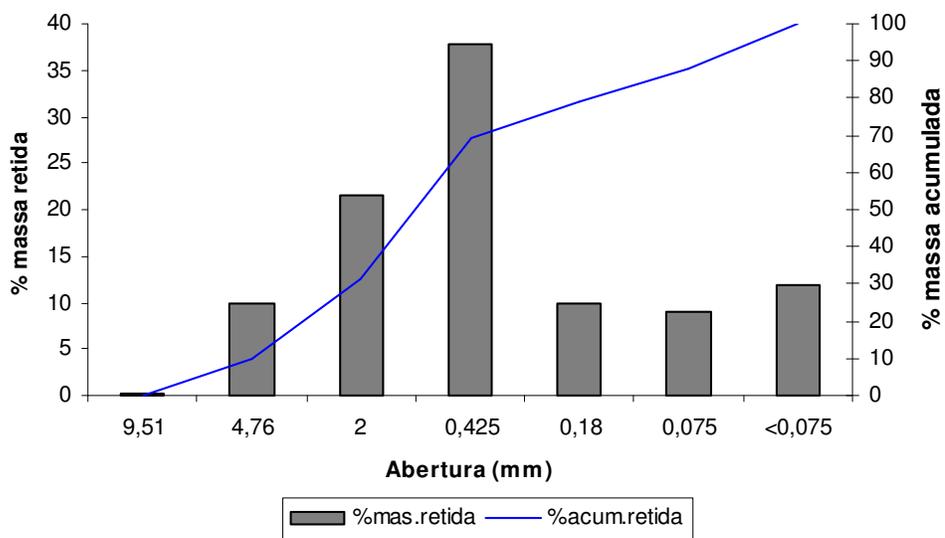


Figura 5-7. Curvas de distribuição granulométrica dos grits.

Nos grits, a maioria das partículas concentra-se nas gamas de 4,76 a 0,430 mm e possuem uma percentagem de finos bastante inferior comparativamente aos dregs.

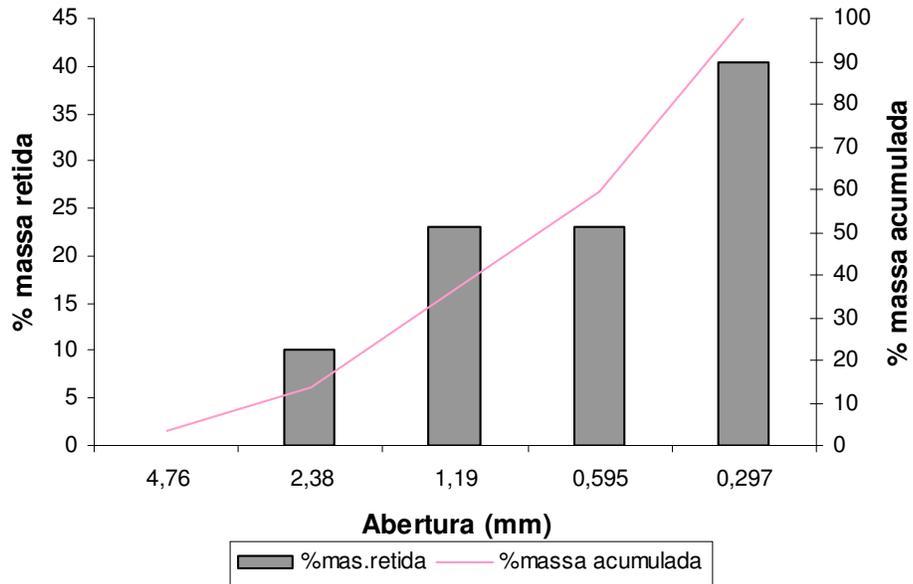


Figura 5-8. Curvas de distribuição granulométrica dos dregs tal e qual.

A maioria das partículas de dregs apresenta um diâmetro inferior a 0,425 mm, podendo ser considerado um material fino.

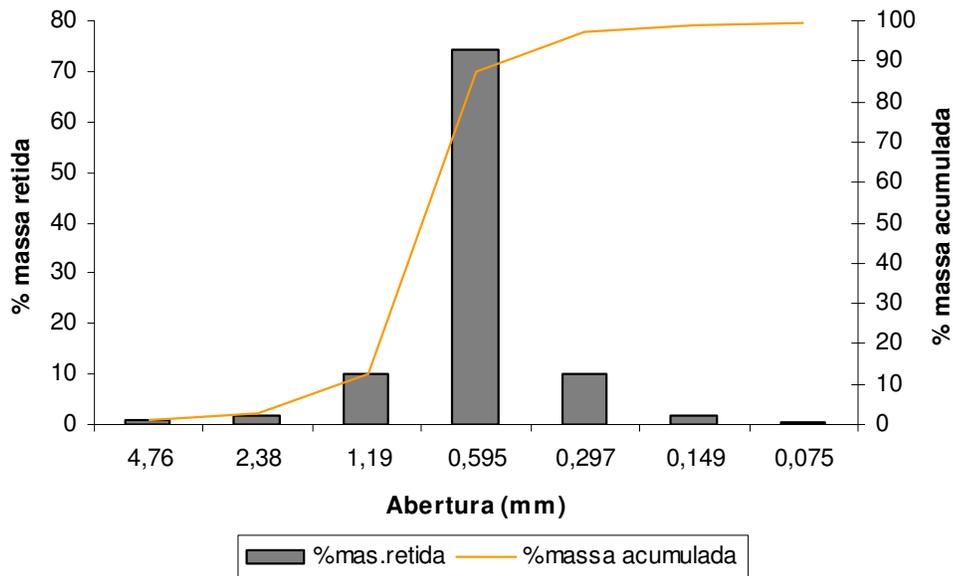


Figura 5-9. Curvas de distribuição granulométrica das areias do leito fluidizado

De acordo com as curvas granulométricas destes resíduos, ambos se enquadram na especificação exigida a este parâmetro para aplicações na área dos pavimentos rodoviários.

As areias de leito fluidizado são muito homogéneas granulometricamente concentrando uma elevada fracção da sua massa na gama de 0,595 a 1,19 mm. Esta característica resulta da manutenção das dimensões da areia original especificada para funcionamento da caldeira. Esta característica permite uma utilização flexível na produção de argamassas podendo ser combinada com outros tipos de areia para obtenção da curva granulométrica pretendida ou através da sua utilização em argamassas com características específicas, em ambos os casos representando uma mais valia relativamente a areias convencionais não classificadas.

5.1.1.5 Massa volúmica

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores obtidos referentes ao ensaio de massa volúmica para os resíduos do sector da pasta e papel.

Tabela 5-2. Resultados de massa volúmica dos resíduos da pasta e papel

<i>Resíduos (peso seco)</i>	<i>Massa volúmica (E 248 – LNEC)</i> <i>g/cm³</i>
Grits	2,660
Dregs	2,645
ALF	2,50

Este parâmetro traduz a relação entre o volume específico (sem vazios) de cada agregado e o respectivo peso. Característica que depende da natureza litológica do agregado e é indirectamente indicativo da sua qualidade. Além disso, este parâmetro é utilizado no cálculo das relações peso/volume nas misturas de agregados com e sem betume.

5.1.1.6 Pureza do material e sensibilidade à água

Os resultados destes parâmetros, que podem ser verificados na Tabela 5.3, são também relevantes para a certificação do enquadramento nos níveis

utilizados pelo sector de vias e pavimentos, no que concerne à classificação para agregados utilizados em misturas betuminosas.

Tabela 5-3. Resultados do ensaio de Azul-de-metileno

<i>Resíduos (g)</i>	<i>Equivalente de areia (EA) %</i>	<i>Azul-de-metileno g/100g do agregado</i>
Grits	62	0.025
Dregs	—	0.225

De acordo com os resultados obtidos, no que se refere a adsorção de azul-de-metileno, os valores encontram-se bem abaixo do limite ($\leq 0,8\text{g}$ de azul/100g de agregado), sendo então enquadrados nas exigências do MACOPAV relativamente a esse parâmetro. Contudo, observa-se que os dregs possuem valores de ordem de grandeza superiores aos grits, reforçando a maior complexidade composicional e presença de impurezas nos primeiros.

O parâmetro EA faz referência ao grau de impureza do material. De acordo com o MACOPAV os grits obedecem as exigências estabelecidas pela indústria para este parâmetro.

5.1.2 Caracterização de materiais da construção civil

5.1.2.1 Distribuição granulométrica

As análises granulométricas dos materiais usados nas vias e pavimentos rodoviários (Figuras 5-10, 5-11, 5-12 e 5-13) tiveram como objectivo a utilização dos resultados para referência dos valores dos resíduos no estudo dos pavimentos rodoviários. Os materiais caracterizados foram o filler, pó-de-calcário, gravilha grande e gravilha pequena.

Estes agregados obedecem ao fuso granulométrico da especificação que vigora nestas aplicações, e a partir das granulometrias foi possível, juntamente com a granulometria dos resíduos do sector de pasta e papel chegar a formulações para as misturas betuminosas.

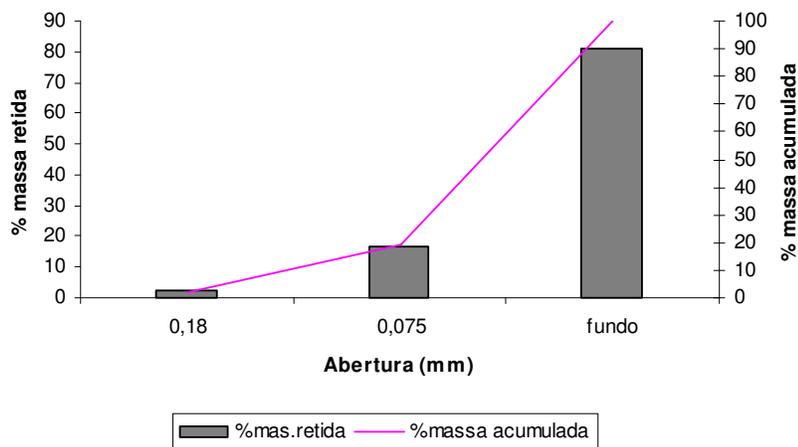


Figura 5-10. Curva de distribuição granulométrica do "filler".

O "filler" tem influência directa na resistência da mistura, deve estar livre de torrões, apresentar-se seco e ter uma distribuição granulométrica dentro das exigências do CEIEP (Caderno de Encargos-IEP). Neste caso, a percentagem acumulada do material fino que passa nos peneiros de abertura igual a 0.180 e 0.075mm deve ser de 95-100% e 75-100%, respectivamente. O que pode ser visto na Figura 5-10.

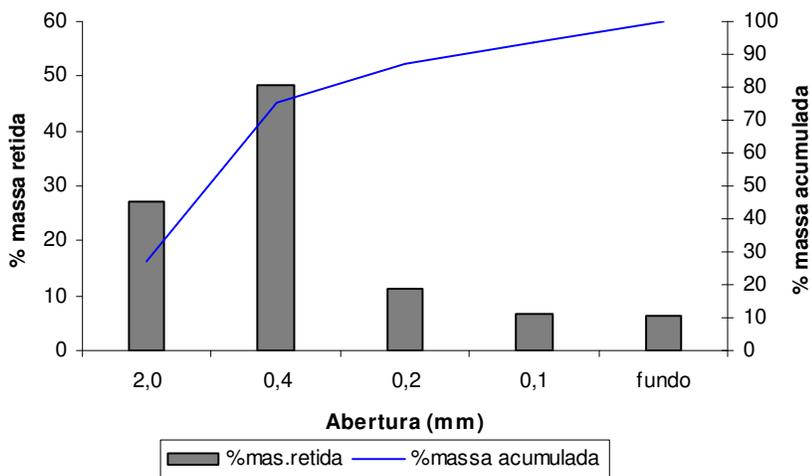


Figura 5-11. Curva de distribuição granulométrica do pó-de-calcário.

As gravilhas apresentam uma distribuição granulométrica muito mais estreita comparadas ao pó-de-calcário. Como o caso da gravilha pequena, cujas

partículas se apresentam quase que em sua totalidade no peneiro de abertura 4.76mm.

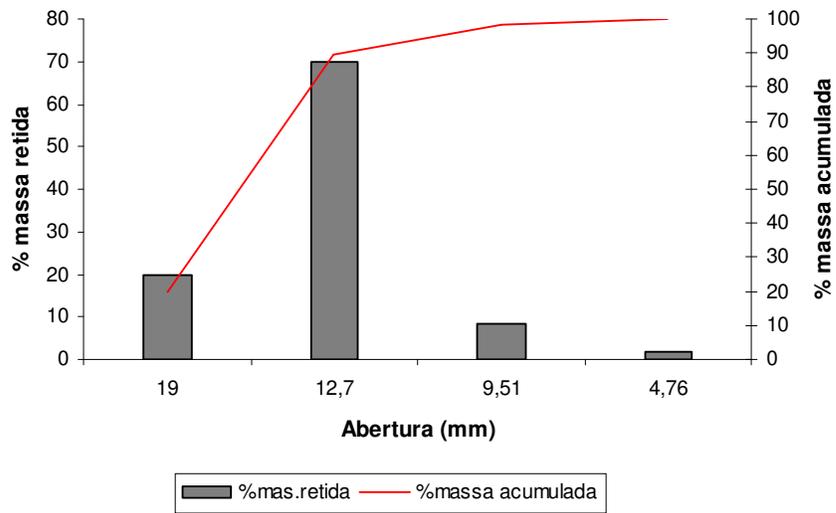


Figura 5-12. Curva de distribuição granulométrica da gravilha grande.

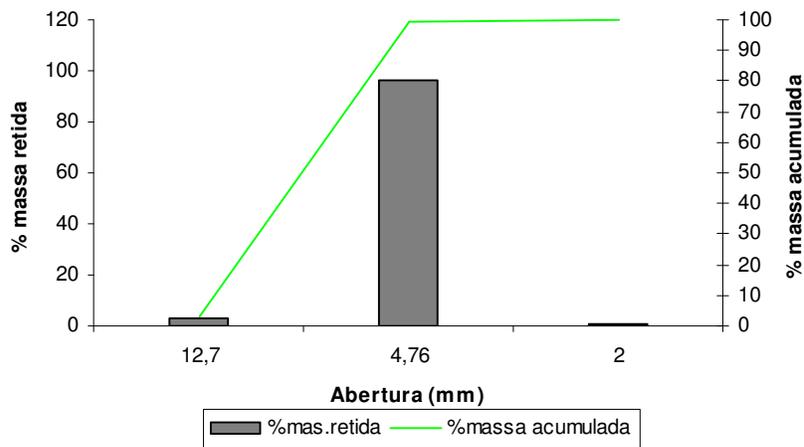


Figura 5-13. Curva de distribuição granulométrica da gravilha pequena.

5.1.2.2 Massa volúmica

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de massa volúmica dos agregados.

Tabela 5-4. Resultados de massa volúmica dos materiais da construção civil.

Agregados (g)	Massa volúmica (E 248 – LNEC) g/cm³
Brita grande	2,559
Brita pequena	2,699
Pó-de-pedra	2,646
Filler	2,628

Este parâmetro foi determinado para utilização nos produtos de origem betuminosa. De acordo com os resultados obtidos foi possível juntamente com os demais valores da massa volúmica dos resíduos do sector de pasta e papel utilizados, calcular a baridade máxima teórica das misturas betuminosas.

Os valores para este parâmetro apresentam-se muito semelhantes devido ao facto de serem de origem siliciosa.

5.1.2.3 Sensibilidade à água

Os resultados deste parâmetro podem ser verificados na Tabela 5.5, tendo como objectivo a certificação do enquadramento nos níveis utilizados no sector de vias e pavimentos no que concerne a classificação para agregados utilizados em misturas betuminosas.

Tabela 5-5. Resultados do ensaio de azul-de-metileno para os agregados.

Agregados (100 g)	Azul-de-metileno g de azul-de-metileno/100 g
Pó-de-pedra	0,125
Filler	0,05

De acordo com os resultados obtidos, os valores encontram-se bem abaixo do limite, sendo então enquadrados as exigências do MACOPAV.

O filler, como é um material mais puro e nada argiloso, tende a apresentar um valor mais baixo que o pó-de-pedra.

5.2 Incorporação em cimento

5.2.1 Máxima incorporação de grits

Foi feita a comparação entre a composição do cimento com incorporação de até 5% de grits tendo em conta a composição dos grits em cimento portland comercial tipo I 42.5 R.

As Figuras 5-14 a 5-16 mostram previsões da concentração de algumas espécies sensíveis no desempenho do cimento (SO_3 , Na_2O , Cl) com a percentagem de incorporação de grits, tendo por base o conhecimento da composição química média de ambos os materiais. Indica-se também os valores limite admissíveis.

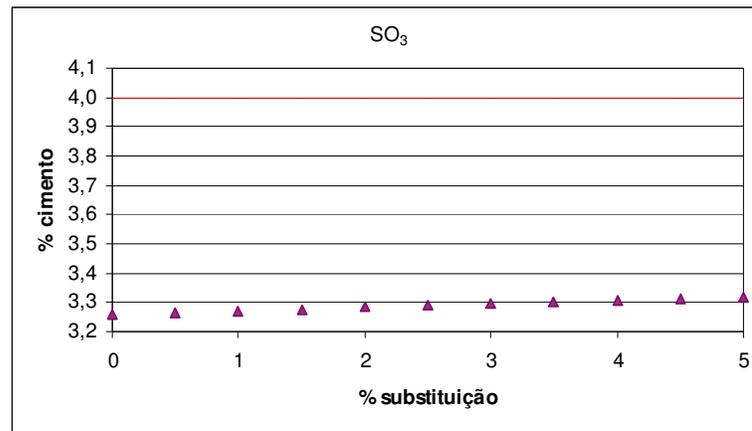


Figura 5-14. Impacto da incorporação de grits na composição do cimento, em termos de SO_3 .

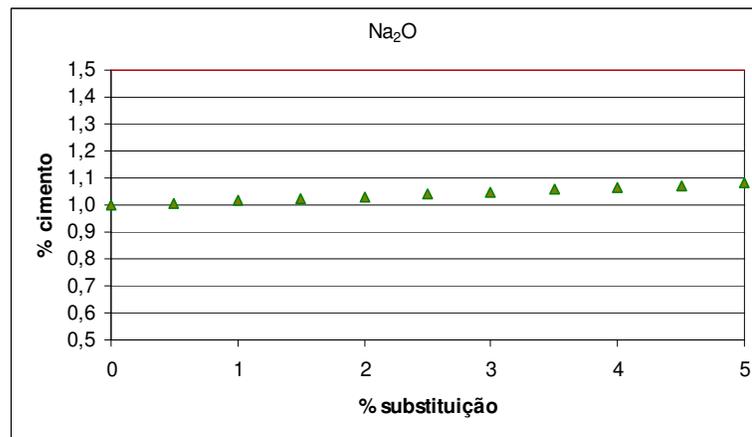


Figura 5-15. Impacto da incorporação de grits na composição do cimento, em termos de Na_2O .

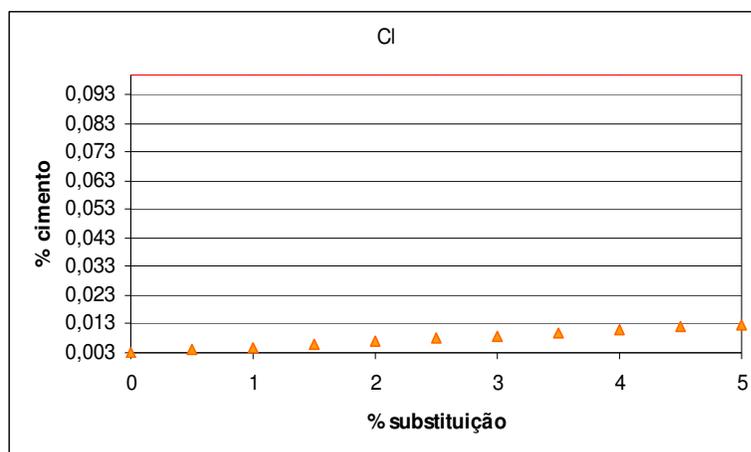


Figura 5-16. Impacto da incorporação de grits na composição do cimento, em termos de Cl.

A estimativa aponta para um acréscimo pouco significativo de qualquer daquelas espécies, pelo menos até teores de incorporação de 5%.

De referir, que a utilização dos grits como aditivo tem o risco de contribuir directamente para o teor de CaO do cimento, caso a sua composição reflecta um mau apagamento da cal. No entanto, a diferença entre o teor médio deste parâmetro no cimento da SECIL e o valor máximo de incorporação é de cerca de 6%, nível muito superior às quantidades disponíveis de grits.

A designada cal livre no cimento (o limite de aceitação é de 0.23% da massa total do material (Lin, 2004)), CaO não ligado aos restantes constituintes, pode causar problemas de expansibilidade, uma vez que esta sofre hidratação depois de ter ocorrido a presa do cimento. A forma amorfa e porosa não causa este tipo de problema pois a sua hidratação com expansão e libertação de calor ocorre imediatamente com o contacto com a água, sendo inclusivamente utilizada na preparação de argamassas (Coutinho, 1997).

A presença de fosfatos impede a formação de silicato tricálcico em benefício do bicálcico o que em teores superiores a 0,25% ou 0,5% conduzem a tensões de rotura muito baixas (Coutinho, 1997). De referir que considerando o teor máximo de fósforo registado nas amostras recolhidas durante o projecto

ECOCEL apenas a partir de uma incorporação de 10% como aditivo seria atingido o nível de 0,25% no cimento.

5.2.2 Resistência mecânica

Os ensaios laboratoriais realizados na SECIL simularam a utilização dos grits como aditivo na produção de cimento em 5 e 10% em peso. Com estas misturas foram preparados provetes de argamassas que permitiram a determinação de resistências mecânicas a 1 e 7 dias (ver 5-6).

Tabela 5-6. Resultados de resistência mecânica à compressão feitos na SECIL

<i>% de incorporação</i>	<i>1 Dia (MPa)</i>	<i>7 Dias (Mpa)</i>
Amostra em branco SECIL	20,0	41.5
5% grits	17.8	36.5
10% grits	15.9	33.2

Verificou-se que com uma incorporação até um nível de 5% não há alteração significativa de resistência mecânica, apesar dos valores serem inferiores aos da amostra sem resíduo. De referir, que este nível de incorporação é muito superior às quantidades disponíveis de grits do grupo Portucel/Soporcel, pelo que é perfeitamente realizável a utilização de grits como aditivo em cimentos. A expectativa para esta utilização está em torno de 1% de incorporação.

5.3 Incorporação em argamassas

5.3.1 Trabalhabilidade

Na Figura 5-17 e 5-18 apresentam-se os resultados do índice de espalhamento para as argamassas com incorporação de ALF e dregs, respectivamente.

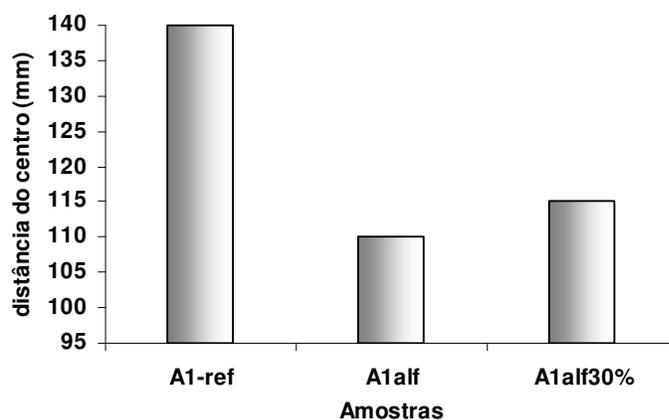


Figura 5-17. Resultados do Índice de espalhamento de argamassas com adição de areias de leito fluidizado.

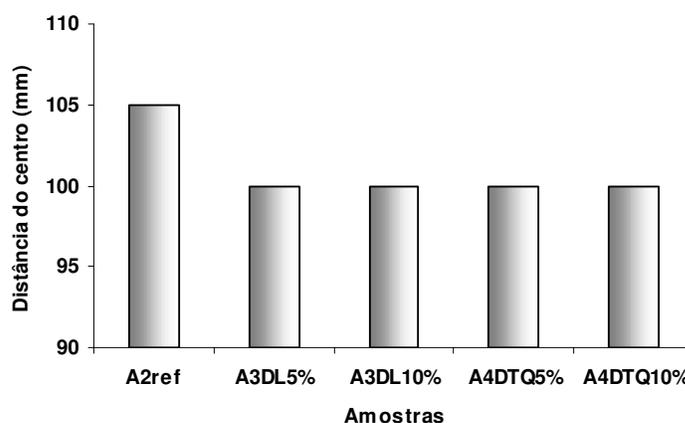


Figura 5-18. Resultados do Índice de espalhamento de argamassas com adição de dregs, lavados e tal qual são recolhidos.

As areias do leito fluidizado apresentaram valores de índice de espalhamento dentro do limite aceitável, mas com uma tendência para o diminuírem. Por outro lado, as amostras que contêm dregs apresentaram níveis inaceitáveis para este parâmetro mesmo com baixos níveis de incorporação. A lavagem dos dregs não apresentou alteração a este parâmetro. Uma possível explicação para este comportamento está relacionada com a água contida nos dregs, contabilizada para manter o objectivo de razão água:cimento, mas que parece não ser transferida imediatamente para a mistura o que se reflectiu numa maior

dificuldade de obtenção de uma mistura homogênea e no baixo índice de espalhamento.

5.3.2 Tempo de início de presa

O tempo de início de presa medido pelo ensaio de Vicat (Figura 5-19 e 5-20) permitiu a avaliação do efeito da introdução de resíduos sobre o início do processo de rigidificação da argamassa.

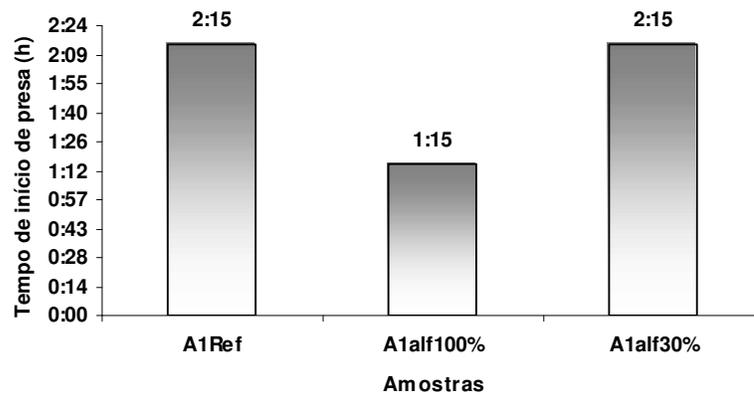


Figura 5-19. Resultados do ensaio de Vicat para argamassas com ALF.

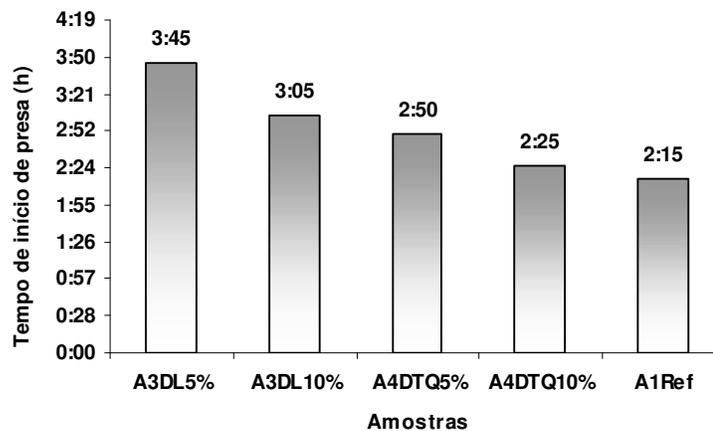


Figura 5-20. Resultados do ensaio de Vicat para argamassas com dregs.

Com areias do leito fluidizado verifica-se uma diminuição no início do tempo de presa que pode ser explicada pela presença significativa de cloretos no resíduo (Coutinho, 1997).

Com a adição de dregs verifica-se um aumento do tempo de início de presa, que pode ser explicado pela maior percentagem de finos em relação à areia normal, ou pela afinidade química dificultando a reacção entre água, ligante e agregado. Mais provável contudo pode ser o efeito dos sais (sulfatos) presentes nos dregs. Os sulfatos quando em quantidades superiores às indicadas, retardam a presa, enquanto que os cloretos, podem acelerar este processo.

5.3.3 Resistência Mecânica

Nas Tabelas 5-7 e 5-8 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio à flexão e compressão para argamassas com incorporação de ALF e dregs. Cada resultado foi obtido a partir da média de três provetes, tanto aos sete como aos vinte e oito dias de cura.

Tabela 5-7. Média correspondente aos valores obtidos no ensaio de resistência à flexão e à compressão aos 7 e 28 dias (areias do leito fluidizado).

<i>Amostras</i>	<i>Média de ruptura (Mpa)</i>		<i>Média de ruptura (Mpa)</i>	
	<i>7 dias</i>		<i>28 dias</i>	
	<i>Flexão</i>	<i>Compressão</i>	<i>Flexão</i>	<i>Compressão</i>
A ₁ Ref	7.06	31.83	8.71	48.475
A ₁ Alf30%	5.90	23.02	6.67	44.73
A ₁ Alf100%	7.07	33.86	8.05	47.73

As argamassas produzidas exclusivamente com areias de leito fluidizado apresentaram valores de resistência mecânica muito próximos dos valores observados para a referência e até superiores, como é o caso da compressão aos 7 dias. Porém quando é feita uma mistura com a areia normal e a areia de leito fluidizado (30%) os valores são inferiores, talvez porque a percentagem de substituição seleccionada não garanta um ajuste à curva de distribuição granulométrica, resultando em um mal agrupamento dos agregados.

Tabela 5-8- Média correspondente aos valores obtidos no ensaio de resistência à flexão e à compressão aos 7 e 28 dias de argamassas formuladas com dregs.

Amostras	Média de ruptura (Mpa)		Média de ruptura (Mpa)	
	7 dias		28 dias	
	Flexão	Compressão	Flexão	Compressão
Ref2	8.66	34.675	9.16	53.38
A3DL5%	8.48	34.12	8.35	52.93
A3DL10%	7.33	36.35	7.55	52.87
A4DTQ5%	8.5	33.64	8.97	51.75
A4DTQ10%	6.67	37.90	7.46	42.85

A adição de dregs origina diminuição das resistências mecânicas, principalmente nas amostras com 10% de incorporação. Isto pode resultar do facto do resíduo, quando em contacto com os outros materiais, dificultar a reacção dos demais componentes (água e areia) com o ligante (cimento), devido a presença de substâncias estranhas, ou ainda, desajuste granulométrico.

5.3.4 Teor em sais

Na Figura 5-21 apresentam-se os valores quantificados para o teor de sulfatos em argamassas com incorporação de ALF.

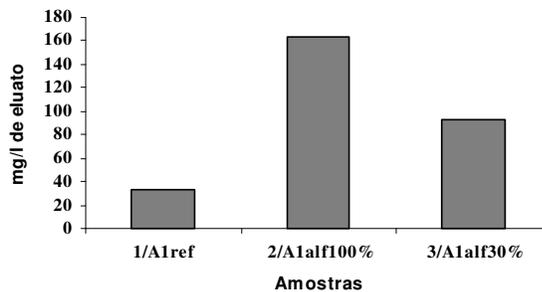


Figura 5-21. Teor de sulfatos em argamassas com ALF.

Mesmo apresentando um acréscimo no teor de sulfatos relativamente à argamassa comum, os valores encontram-se muito abaixo dos limites

preconizados pela norma em vigor que é de 0.15% sobre a massa de cimento (Aggregates, 1993) para argamassas. Concluiu-se que também pode ser adoptado o critério da DIN 4226-100 (< 600 mg de SO_4^{2-} /l de eluato), compatível com a faixa citada. (Aguiar, 2004)

O teor de cloretos no eluato das argamassas foi vestigial, não sendo possível a sua quantificação.

5.3.5 Metais pesados

Na tabela 5-9 são apresentados os resultados de quantificação de metais pesados em argamassas com incorporação de resíduos.

Tabela 5-9. Quantificação dos metais pesados nos eluatos de lixiviação das argamassas.

<i>Amostras</i>	<i>Cd</i> <i>µg/l</i>	<i>Co</i> <i>µg/l</i>	<i>Cr</i> <i>µg/l</i>	<i>Cu</i> <i>µg/l</i>	<i>Pb</i> <i>µg/l</i>	<i>Zn</i> <i>µg/l</i>
A1Ref	<14	13	45	<10	30	185
A1alf100%	<14	<(Lq) 7.4	45	23	79	222
A1alf30%	<14	<(Lq) 7.4	47	18	52	204
A2Ref	<14	14	55	15	36	186
A3DL5%	<14	<(Lq) 7.4	61	<(Lq) 10	15	45
A3DL10%	<14	<(Lq) 7.4	45	<(Lq) 10	43	248
A4DTQ5%	<14	16	92	<(Lq) 10	15	65
A4DTQ10%	<14	8.3	54	<(Lq) 10	35	107
Limites legais de deposição em aterros para resíduos sólidos industriais	50 (mg/kg)	—	2000 (mg/kg)	6000 (mg/kg)	2000 (mg/kg)	8000 (mg/kg)

Os resultados indicam que os resíduos não possuem concentrações significativas de metais pesados, sendo detectados somente vestígios da maioria dos metais. Mesmo o mais abundante (zinco), existe em concentração muito abaixo dos limites das exigências ambientais normalizadas em se tratando de resíduos sólidos industriais. Estes limites foram citados de acordo com o Decreto Lei n.º 152/2002, de deposição em aterros sendo estes valores aplicáveis sobre o resíduo.

5.4 Ensaio pré-industrial com argamassas

5.4.1 Argamassa cola C2

Realizou-se um ensaio de carácter pré-industrial em pequena escala com a empresa WEBER-cimenfix, incorporando 12% de ALF na argamassa cola de referência C2. Os resultados encontram-se na tabela 5-10 e 5-11.

Os ensaios permitem verificar que a utilização de areias de leito fluidizado (12%) produziu uma argamassa de características muito semelhantes ao produto padrão.

Tabela 5-10. Resultados obtidos em ensaio com argamassas *cola* que incorporam 12% de ALF.

Propriedades	Resultados	
	<i>Argamassa com ALF</i>	<i>Argamassa padrão</i>
	Distribuição de partículas (%)	Distribuição de partículas (%)
1250 µm	0.0	0.0
630 µm	12.2	10-15
315 µm	15.2	14-20
160 µm	20.0	20-30
80 µm	5.2	0-5
<80 µm	46.9	40-50
Densidade do material em pó (g/cm ³)	1.20	1.15-1.25
Densidade da pasta (g/cm ³)	1.46	1.42-1.50
Tempo final de presa (min)	360	480

5.4.2 Reboco de projecção

No outro ensaio pré-industrial também de pequena escala, incorporou-se 15% da areia do leito fluidizado em argamassa de reboco de projecção. Os resultados são indicados na tabela seguinte 5-11.

Tabela 5-11. Características relevantes de argamassas de reboco preparadas com 15% de ALF.

Propriedades	Resultados	
	<i>Argamassa com ALF</i>	<i>Argamassa padrão</i>
	Distribuição de partículas (%)	Distribuição de partículas (%)
1250 µm	0.10	0-2
630 µm	15.9	15-20
315 µm	22.8	20-30
160 µm	25.8	20-30
80 µm	10.8	0-10
<80 µm	24.3	20-28
Densidade da pasta (g/cm ³)	1.78	1.70-1.80
Tempo final de presa (min)	250	<360
R _{flexão} (MPa)	2.85	2.5-3.5
R _{compressão} (MPa)	7.5	6.0-9.0
Módulo elasticidade (MPa)	13500	12000-14000

Os ensaios sugerem novamente que a utilização de areias de leite fluidizado origina uma argamassa de características muito idênticas ao produto padrão.

É de referir que o resíduo em estudo apresenta um teor em cloretos acima dos níveis pretendidos para aplicação em argamassas, o que implica na necessidade de uma pré-lavagem antes da sua utilização para as soluções acima identificadas.

5.5 Incorporação em misturas betuminosas

5.5.1 Caracterização de misturas sem betume

5.5.1.1 Sensibilidade à água e grau de impurezas

Para a caracterização das misturas sem adição de betume, foram realizados os ensaios de Azul-de-metileno, para determinação da sensibilidade à água, e Equivalente de areia, para determinação do grau de impurezas, cujos resultados se encontram na Tabela 5-12.

Tabela 5-12. Resultados dos ensaios de caracterização das misturas sem betume preparadas com grits (G) e dregs (D)

<i>Código da amostra</i>	<i>Azul-de-metileno (mg/l)</i>	<i>Equivalente de areia (%)</i>
MSBRef	0.35	51.88
MSBG5%	0.27	49.03
MSBD5%	0.25	46.41

Estas análises permitiram identificar valores aceitáveis para as misturas, de acordo com o MACOPAV, mas a amostra com dregs apresenta um valor de EA um pouco abaixo do estabelecido (50%). Recorde-se que este parâmetro indica a quantidade de material fino presente na amostra. Ainda assim, optou-se por dar continuidade ao trabalho, passando-se então à segunda etapa, de caracterização das misturas com betume.

5.5.2 Caracterização de misturas com betume

Na Tabela 5-13 mostram-se os resultados de caracterização de misturas betuminosas, obtidos através da média de quatro provetes para cada formulação/amostra.

O teor em betume utilizado para todas as misturas foi de 5,4%.

Tabela 5-13. Propriedades relevantes das misturas betuminosas com dregs (D) e grits (G); Baridade Máxima Teórica (BMT), Baridade Média (BM), Teor volumétrico em betume (TVB), Volume de vazios na mistura de agregados (VMA), Saturação em betume (Sb), Força de rotura (Fr), Deformação (Def) e Razão Força-Deformação (Fr/Def).

<i>Mistura</i>	<i>BMT g/cm³</i>	<i>BM g/cm³</i>	<i>N %</i>	<i>TVB %</i>	<i>VMA %</i>	<i>Sb %</i>	<i>Fr kN</i>	<i>Def mm</i>	<i>Fr/Def kN/mm</i>
MBRef	2.431	2.335	3.9	12.24	16.2	75.6	10.7	3.9	2.8
MBG5%	2.432	2.343	3.7	12.28	15.9	77.0	12.0	2.9	4.2
MBG10%	2.433	2.340	3.8	12.27	16.1	76.3	13.8	2.8	4.9
MBD5%	2.431	2.318	4.6	12.15	16.8	72.4	11.2	2.5	4.6
MBD10%	2.430	2.264	6.8	11.87	18.7	63.5	9.4	2.5	3.8

5.5.2.1 Baridade Média e Baridade Máxima Teórica

Relativamente às amostras com incorporação de grits, os valores da baridade média ou densidade aparente da mistura (figura 5-22) foram ligeiramente

superiores aos da amostra referência o que indica que estes resíduos apresentam massas volúmicas superiores à dos agregados que substituíram. Já a amostra MBD10% apresentou valor inferior, o que pode ser explicado devido ao facto dos dregs possuírem uma massa volúmica mais baixa, sendo considerados mais leves, o que acarreta uma menor BMT da mistura.

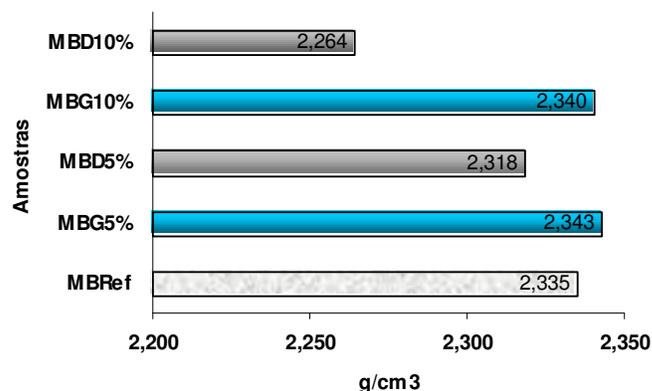


Figura 5-22. Baridade média das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).

Este parâmetro pode afectar significativamente a baridade máxima teórica dos provetes cujos resultados são apresentados na figura 5-23.

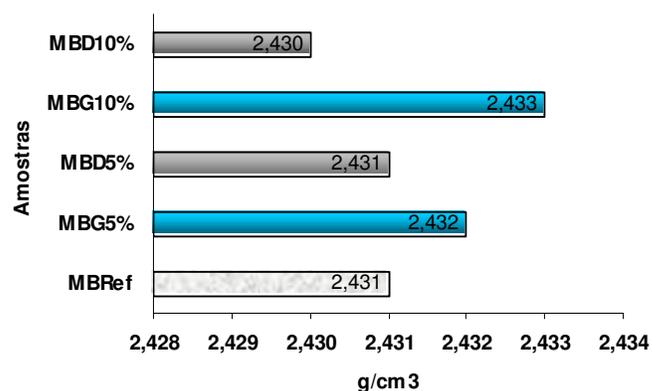


Figura 5-23. Baridade máxima teórica das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).

5.5.2.2 Porosidade (N)

As misturas com incorporação de grits, estes não apresentam alterações significativas em relação à referência, podendo concluir-se que os grits trabalham bem na mistura e garantem um bom empacotamento/compactação

juntamente com os demais componentes. Relativamente aos dregs, tendem a conferir um pior empacotamento mesmo se usados em baixa percentagem, aumentando consideravelmente a porosidade. Com 10% de incorporação, o é ultrapassado. (figura 5-24)

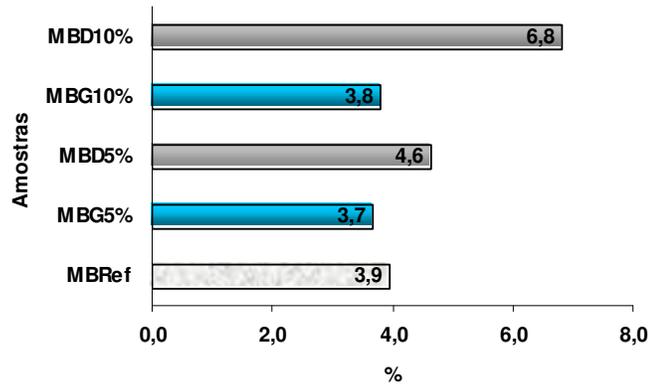


Figura 5-24. Porosidade das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).

5.5.2.3 Grau de Saturação em betume e Volume de Vazios na Mistura de Agregados (VMA)

Em relação ao volume de vazios na mistura de agregados, verificou-se que tende a aumentar a medida que se acresce a percentagem de incorporação de dregs. Este facto pode ser explicado devido ao reduzido tamanho das partículas deste resíduo e da sua interacção com os demais agregados. Os grits, como garantem um melhor empacotamento, a mistura tende a sofrer uma ligeira diminuição do percentual de VMA em relação a referência. Os resultados do VMA dos provetes são apresentados na figura 5-25.

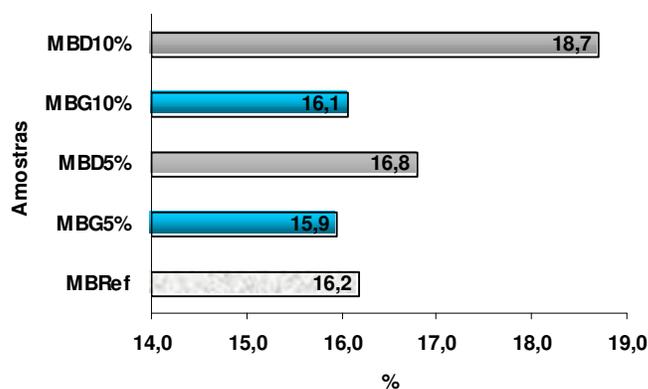


Figura 5-25. VMA das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).

Este parâmetro indica a percentagem volumétrica de vazios que está preenchida por betume.

Com a adição de dregs e fixando o teor de betume, a percentagem de vazios preenchida por betume tende a ser menor, o que sugere que o teor ótimo de betume tenha que ser superior ao das misturas sem resíduo e misturas com grits. (Figura 5-26)

O TVB representa o grau de saturação em betume da mistura. As misturas com incorporação de dregs apresentaram maior volume de vazios, conseqüentemente a razão TVB/VMA é inferior às demais. Os dregs, por serem constituídos por partículas muito finas, absorvem o betume, deixando um maior número de espaços vazios na mistura.

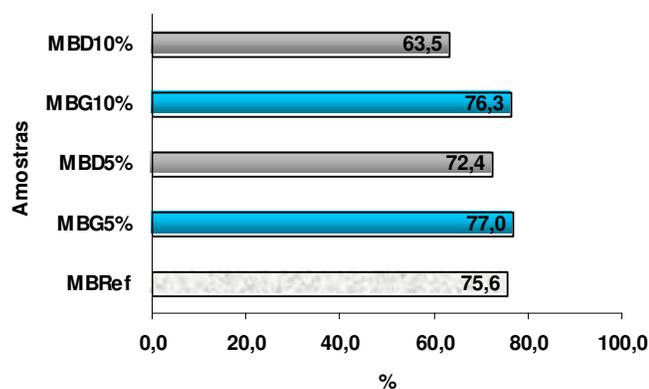


Figura 5-26. Grau de saturação em betume das misturas betuminosas preparadas com grits (G) e dregs (D).

Para uma melhor percepção do grau de saturação em betume foram tiradas fotografias das misturas betuminosas, nas quais se pode verificar a diferença entre a quantidade de betume à superfície das partículas de agregados saturadas e a carência nas não-saturadas.

As Figuras 5-27 e 5-28 apresentam imagens de misturas betuminosas sem incorporação de resíduo.

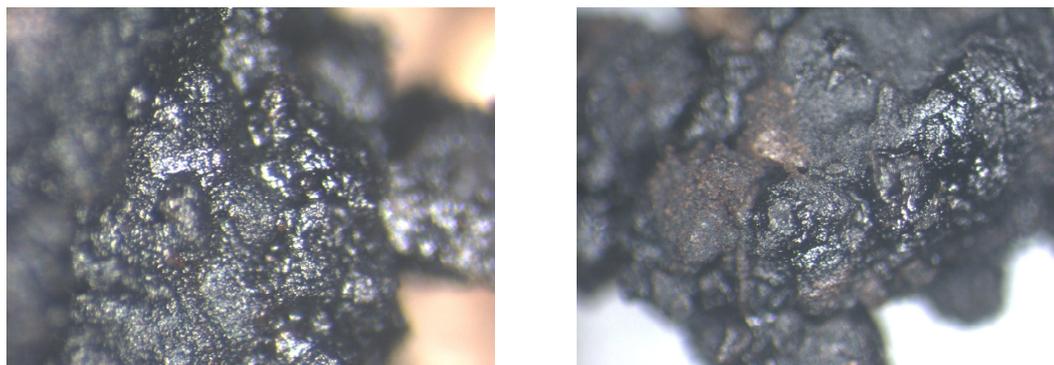


Figura 5-27. Mistura betuminosa sem resíduos (fotografia tirada na lupa com ampliação de 10 vezes)

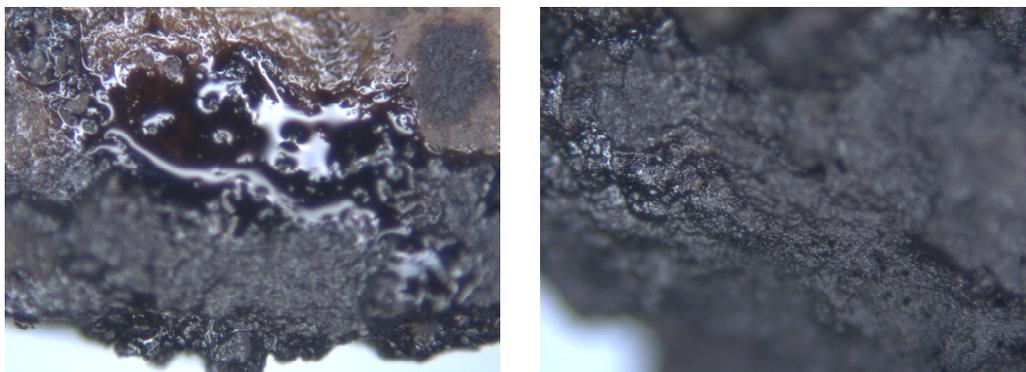


Figura 5-28. Mistura betuminosa sem resíduos (fotografia tirada em microscópio com ampliação de 50 vezes)

O betume cobre por completo a superfície dos agregados, conferindo homogeneidade à mistura. Na figura 5-28, vê-se uma ligeira exsudação de betume, o que confere um grau de saturação iminente.

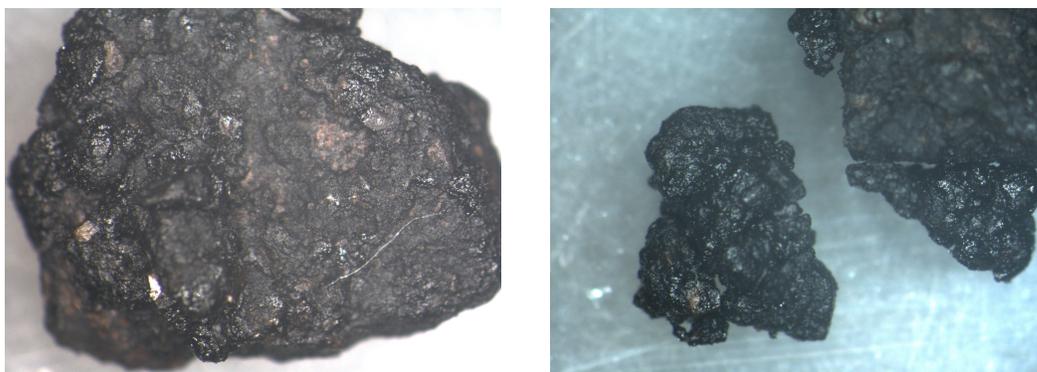


Figura 5-29. Mistura betuminosa com grits (fotografia tirada na lupa com ampliação de 10 vezes)

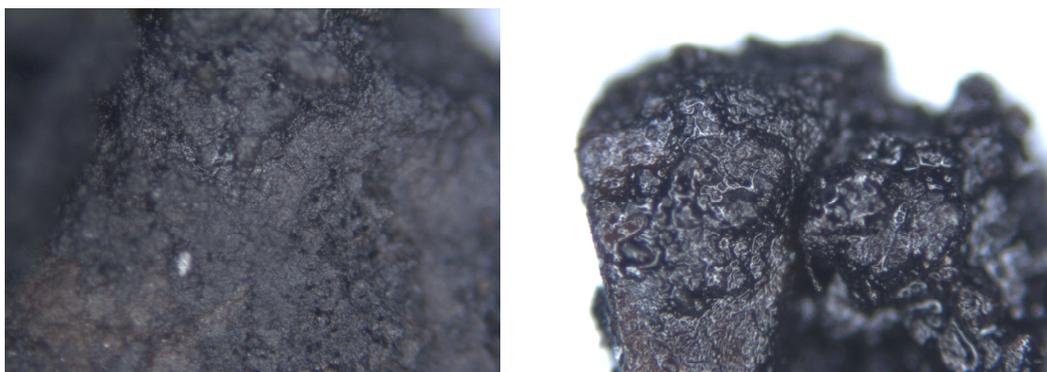


Figura 5-30. Mistura betuminosa com grits (fotografia tirada em microscópio com ampliação de 50 vezes)

As misturas betuminosas com incorporação de grits têm aspecto muito semelhante às sem incorporação de resíduos, porém não se notou exsudação em betume e verifica-se a cobertura de toda a superfície. (Figuras 5-29 e 5-30)

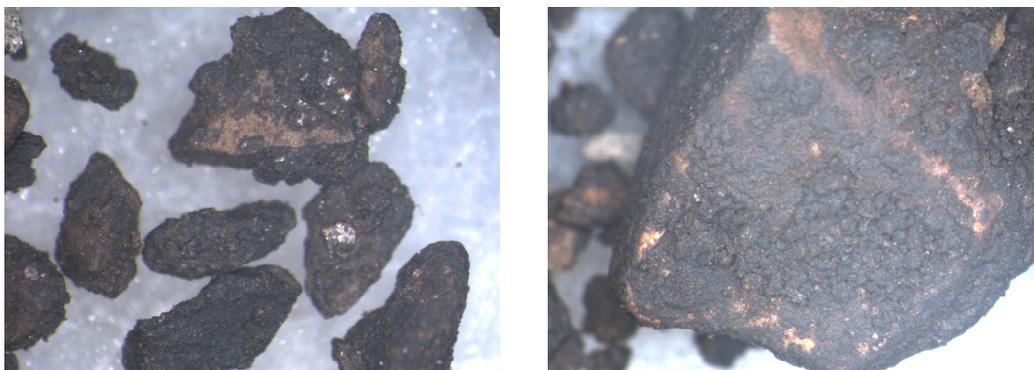


Figura 5-31. Mistura betuminosa com dregs (fotografia tirada na lupa com ampliação de 10 vezes)

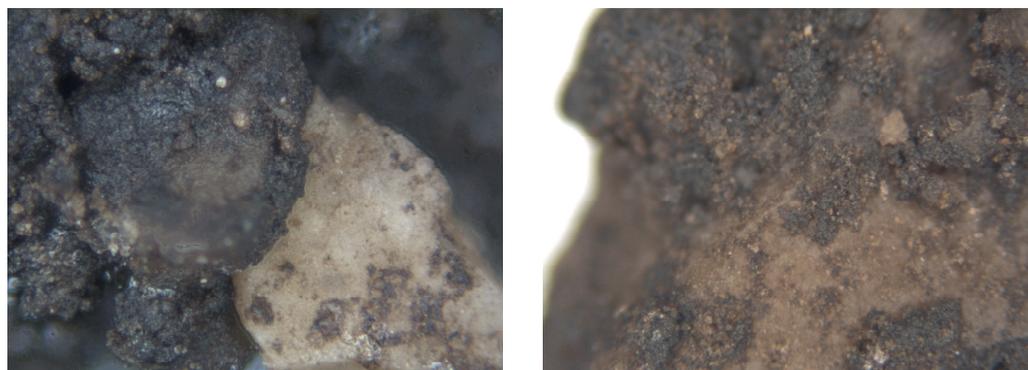


Figura 5-32. Mistura betuminosa com dregs (fotografia tirada em microscópio com ampliação de 50 vezes)

Nas misturas com incorporação de dregs (Figuras 5-31 e 5-32), nota-se a presença de agregados sem total cobertura por betume, o que confirma o baixo grau de saturação.

5.5.2.4 Força de rotura

A figura 5-33 apresenta os valores da a força de rotura para das misturas betuminosas. As misturas com incorporação de grits, são mais fortes que as de referência e as misturas com dregs, enquanto as misturas com dregs tendem a ser mais frágeis. Este efeito pode resultar de uma melhor trabalhabilidade induzida pelos grits na mistura.

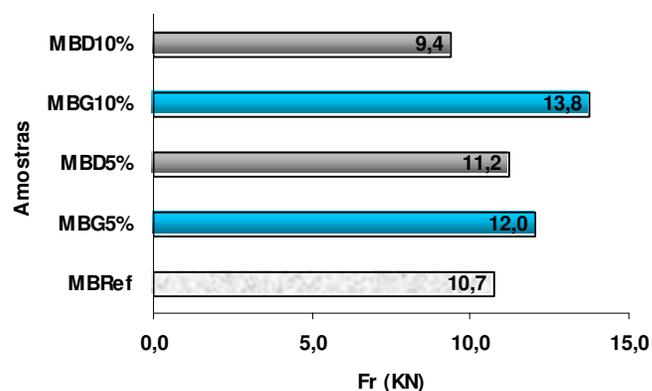


Figura 5-33. Resultado da força de rotura

5.5.2.5 Deformação

A Deformação é um parâmetro que corresponde ao encurtamento diametral do provete ocorrido desde o início do ensaio Marshall até o momento da rotura. De acordo com o MACOPAV, este valor deve se igual ou inferior a 4.

A figura 5-34 mostra a deformação das misturas betuminosas. As misturas com dregs deformam menos que as misturas com grits e razoavelmente menos que a referência. Isto significa menor resistência à deformação, ou seja, as amostras com resíduos, em especial com dregs, são mais rígidas e fracturam com mais facilidade.

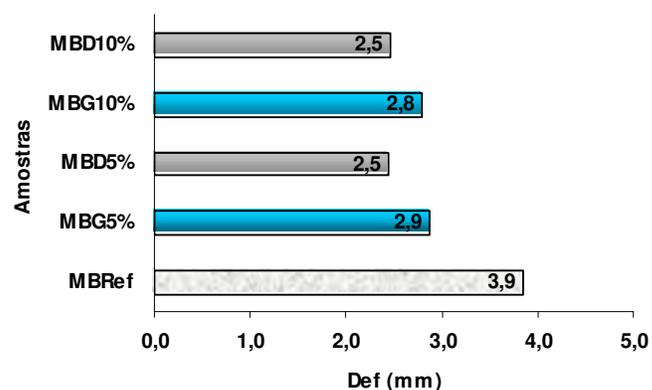


Figura 5-34. Deformação das misturas betuminosas com dregs (D) e grits (G).

6 Conclusões

As principais conclusões são apresentadas de acordo com as áreas de aplicação.

Cimento

- A crivagem e moagem dos grits permitiram a sua incorporação em cimento como aditivo na produção de cimento à escala laboratorial;
- A incorporação até 5 % não alterou significativamente os valores de resistência mecânica;
- O impacto previsto na composição do cimento é inferior aos valores admissíveis de certos constituintes (Cl, sulfatos, Na₂O) podendo ser incorporados em baixas percentagens;
- A SECIL encontra-se disponível para realização de ensaios industriais aguardando apenas a conclusão do ensaio laboratorial e pela conclusão da instalação de um silo para recepção de materiais deste tipo.

Argamassas

- As areias de leito fluidizado são muito homogéneas granulometricamente concentrando uma elevada fracção da sua massa na gama de 0,595 a 1,19 mm. Esta característica permite uma utilização flexível na produção de argamassas podendo ser combinada com outros tipos de areia para obtenção da curva granulométrica pretendida ou usada em argamassas com características específicas, em ambos os casos representando uma mais valia relativamente a areias convencionais não classificadas;
- Utilização com sucesso das areias do leito fluidizado em dois tipos de argamassa de valor acrescentado (argamassa cola C2 e reboco de projecção) em parceria com a WEBER-cimenfix:
 - Observa-se coloração induzida pelo resíduo, que restringe a sua utilização a produtos cinza.

- As argamassas apresentaram um tempo de início de presa menor que o do produto convencional, o que é explicado pela presença de cloretos.
- Ensaio industriais estão em curso.
 - Os dregs, alteraram significativamente as propriedades das argamassas concluindo-se que nas condições em que foram utilizados (tal e qual e lavados) não são adequados a esta aplicação.

Misturas Betuminosas

De uma forma geral, pode concluir-se que os grits são mais adequados para esta aplicação:

- Possuem distribuição granulométrica enquadrável nos limites pretendidos como agregado, em substituição do pó-de-pedra calcária, na produção de misturas betuminosas para vias e pavimentos.
- Asseguram melhor trabalhabilidade à mistura, o que garante um bom empacotamento e, conseqüentemente, maior resistência ao produto.

Ao invés, os dregs são menos adequados:

- Apresentam maior teor de material fino (Fracção arenosa ($> 63 \mu\text{m}$) – 1.0%; Fracção siltosa (2 - $63\mu\text{m}$) – 85.6%; Fracção argilosa ($<2\mu\text{m}$) – 13.4%) enquadrável nas especificações dimensionais do “filler” para misturas betuminosas, e só garantem resultados admissíveis quando incorporados em baixas percentagens. Neste caso menores que 5%.
- O teor óptimo de betume deve ser maior que 5,4, para manter os valores de VMA e, dessa forma, assegurar a resistência mecânica desejável.

Propostas e sugestões de trabalho

Este trabalho tende a servir de base para um estudo mais aprofundado tanto no sector dos produtos de origem cimentícea como no das vias e pavimentos rodoviários, ambos na linha de investigação voltada para a valorização de resíduos da indústria de pasta e papel com incorporação em produtos da construção civil.

Fica assim explícita a intenção de dar continuidade no trabalho desenvolvido, e para o qual seguem descritas algumas sugestões:

- Incorporação de areias do leito fluidizado em outras gamas de argamassas de aplicação específica;
- Incorporação de lamas do tratamento primário de efluentes em substituição a fibra utilizada na produção de telhas e outros produtos dos quais se utilizam fibras de celulose;
- Variação do teor em betume das misturas betuminosas com incorporação de dregs e grits em baixas percentagens;
- Incorporação de dregs e grits misturados para produção de misturas betuminosas.

7 Bibliografia

“Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes”, Edited by Smith, M.R.; Collis, L.; Geological Society, England, 1993.

AI, 1983. *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*. Asphalt Institute (AI), Manual series n.º 17 (MS-17), Maryland.

Albuquerque, P., *Mecânica dos solos*, Granulometria; FACENS, Sorocaba, São Paulo, 2004.

Ângulo, Sérgio Cirelli; Zordan, Sérgio Edurado; John, Vanderley Moacyr, “*Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil*”, PCC – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, disponível *on line* no URL: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>.

ASPDIN, J. L. S. (2004). *Fabricação do Cimento*. www.cimento.com.br. (16 de Junho de 2005).

Asphalt Institute, 1983. *Asphalt technology and construction practices*. Asphalt Institute, ES – 1, Maryland.

Aguiar, Gerusa de.; *Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2004.

AWMA – Air and Waste Management Association. (1992). *Air Pollution Engineering Manual*. Van Nostrand Reinhold. New York.

Azevedo, M.; 1993. *Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos*. LNEC, Dissertação submetida à Universidade Técnica de Lisboa para obtenção do grau de Doutor, Lisboa.

Battagin, A. F. (2004). Uma breve história do cimento Portland. www.abcp.org.br, 2005

Bayer, R.; Lutz, H.; “*Dry Mortars* – Ullmann’s Encyclopaedia of Industrial Chemistry” Wiley – VCH, Germany, 2003.

Caderno de Encargos, *Pavimentação – Características dos Materiais*, Volume V: 03, Capítulo 14, Março, 1998.

Caltrans; *Feasibility of recycling rubber-modified paving materials*, State of California Department of Transportation, 2005.

CCI. (2004). *Co-incineração em cimenteiras*. In: 1.º Relatório de Parecer Relativo ao Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos.

Coutinho, A. de S.; Gonçalves, A., *Fabrico e Propriedades do Betão*, vol. III, 2ª edição, Lisboa, 1997.

Domingos, S. (2003). *Alternativas para a construção civil – Boletim educativo do núcleo de Comunicação do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina*, 2005.

EPA 833-F-98-002, “*How Wastewater Treatment WORKS...The Basics*”, Office of water (4204), May 1998.

Freire, A. C.; “*Agregados para misturas betuminosas*”, Universidade Nova de Lisboa/Faculdade de Ciência e Tecnologia, Palestra, LNEC, Junho, 2004.

Hester R. E., Harrison R. M., “*Waste treatment and disposal – Issues in Environmental Science and Technology*”, The Royal Society of Chemistry, 1995.

Kett, Irving. *Asphalt materials and mix design manual*, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1998.

Lanas, J.; Pérez-Bernal, J.L.; Belo, A. M.; Alvarez Galindo, J. I.; “*Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*”, Cement and Concrete Research 34 (2004), p 2191-2201.

Lin, K. L.; Chiang, K. Y. e Lin, C. Y.; *Hydration characteristics of waste sludge ash that is reused in eco-cement clinkers*. Cement and Concrete Research. Elsevier. Taiwan.

LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Documentação Normativa, Solos- *Ensaio de Equivalente de Areia*, CDU, 624.131.37:620.163.(083.74), Outubro, 1967.

Lombardi, B., 1993. *Du Pétrole Brut au Bitume: La Longue Marche*. Revue Général des Routes et des Aérodrômes, n.º 707, pp. 25-70.

Machado, L. M. M.; *Valorização de Resíduos de Natureza Fibrosa do Processo Kraft de Produção de Pastas de Eucalipto*, Universidade da Beira Alta, Covilhã, 2002.

Mannan M.A., Ganapathy C., “Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS)”, *Building and Environment* 39 (2004): 441-448.

Marzo, J. A.; “Evolucion en la fabricacion de mortero para la construccion”, *Revista Hormigon*, 2002.

Mateus, João Mascarenhas; “Técnicas tradicionais de construção de alvenarias”, *Livros Horizonte*, Lisboa, 2002.

Moropolou, A.; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S.; *Composite Materials in ancient structures*, *Cement and Concrete Composites* 27, p 295-300, 2005.

Pereira, P.; Miranda, C., *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho, Braga, 1999.

Pereira, P.; Santos, L. P., *Pavimentos Rodoviários*, 2002

Pinto, S. de J. F.; *Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves*, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, 2005.

PöYRY, J.; “Solid waste minimisation in the pulp and paper industry”, JAAKKO PöYRY Consulting AB, Lindigö AB (1997)

Real, F.; “Portugal das Origens à Época Romana, Museu Nacional de Arqueologia e Etnologia”, Instituto Português do Património Cultural, 2001.

REDING, J. T.; MUEHLBERG, P. E. e SHEPHERD, B. P. *Industrial Process Profiles for Environmental Use – The Cement Industry*, 1977.

Relatório final projecto ECOCEL, Projecto ECOCEL PMDT PEDIP II, 2000.

Sabioni, C.; Bonazza, A.; Zappia, G.; “Damage on Hydraulic mortars: the Venice Arsenal”, *Journal of Cultural Heritage* 3, 2002, p 83-88, 2002.

Technical Dictionary; EMO European Mortar Industry Organization, 2001.

Toraya, J. de las C., *Un siglo de Cemento en Latinoamérica*, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto – IMCYC, TORAYA, México, 1999.

Virtuoso, J. C.; *Desenvolvimento, Gestão Ambiental e Sustentabilidade: Compreendendo o Novo Paradigma*; Revista Espaço Académico – n.º 38 – Santa Catarina, Julho, 2004.

Warren, John; “*Conservation of Brick*”, Cap. 12 – Mortars, Renderings and Plasters, Butterworth Heinemann, England, 1999.

Normas utilizadas

- NP EN 13043 “Agregados para misturas betuminosas”.
- NP EN 933-1: 2000 “Análise granulométrica para britas e areias”.
- NP EN 933-2: 1999 “Análise granulométrica para agregado fino (<2mm)”.
- NP EN 933-8: 2002 “Ensaio de Equivalente de areia”.
- NP EN 1097-6: 2003 “Massa volúmica ou baridade aparente”
- LNEC E 35: 1956: “Determinação da densidade com o picnómetro”.
- LNEC E 267: 1973: “Determinação da densidade aparente para misturas betuminosas”.
- NP EN 1097-3: “ Massa volúmica e Volume de vazios na mistura de agregados”.
- NP EN 196-3/1990 – Determinação do índice de consistência da argamassa normal”.
- ASTM D 2041. Determinação da baridade máxima teórica pelo método do picnómetro de vácuo.
- NP 142:1968: “Ensaio Marshall”
- LNEC E 226-227/1968 “Resistência mecânica”
- NP EN 196-1, Métodos de ensaios de cimento, 1996.
- NP EN 933-9, Análise de finos - Ensaio de Azul de Metileno, 2002.
- DIN 38414 - “Sludge and sediments (group S) - Determination of leachability by water (S4)”.
- STANDARD METHODS, Gravimetric method with drying of residue, 4500D-SO₄²⁻, 4-177.
- STANDARD METHODS, Potenciometric method, 4500D-Cl⁻, 4-69.
- EN 1015-6. Métodos de ensaio de argamassas. Determinação da massa volúmica aparente.
- EN 1015-1. Determinação da repartição granulométrica (por peneiração).
- Cahiers de CSTB (2669-4) Modalités déssais. A 3.2: Module d elasticite dynamique.

Sites consultados

<http://www.confagri.pt/Ambiente/AreasTematicas/residuos/documentos/doc97.htm>

<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php?title=Porosidade>

<http://www.energyproducts.com/benflu.htm>

<https://paginas.fe.up.pt>

www.abcp.org.br

<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>

<http://www.portucelsoporcel.com>