



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

Ano 2012

**Vitor Daniel
Martins Dias**

**APLICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**



**Vitor Daniel
Martins Dias**

APLICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

O presente trabalho de investigação enquadra-se no Programa Operacional Fatores de Competitividade, através da Fundação para a Ciência e Tecnologia:
– PTDC/AAC-AMB/098112/2008: (Bias-to-soil) - Cinzas de biomassa: Características em relação à sua origem, tratamento e aplicação no solo.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira (Orientador)
Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão (Arguente)
Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Agradecimentos

Ao apresentar este trabalho desejo expressar o meu reconhecimento e sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que me apoiaram na sua realização.

Ao Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira devo a orientação, os esclarecimentos prestados e o incentivo na seleção do tema do trabalho. Quero ainda expressar a minha gratidão, pelo apoio e esforço despendido na concretização deste trabalho e pela leitura atenta e crítica do texto original.

À Regina Modolo por toda a disponibilidade, paciência e dedicação que sempre manifestou, bem como pelo apoio fundamental cedido durante a elaboração e preparação da presente dissertação.

Aos Técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pelo apoio e dedicação demonstrados durante a execução dos trabalhos laboratoriais.

A todos os colaboradores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pois a concretização deste trabalho só foi possível com as condições e meios postos à disposição pelo mesmo.

À empresa Vitor Almeida & Filhos, S.A., pelo fornecimento de materiais para a realização do trabalho experimental.

Por fim, agradeço especialmente à minha família, que sempre manifestou o seu apoio, compreensão e encorajamento durante a realização deste trabalho.

Palavras-chave

Resíduos sólidos, agregados naturais, valorização, incorporação, misturas betuminosas, pavimentos rodoviários, sustentabilidade.

Resumo

A dificuldade em encontrar o destino adequado para os resíduos gerados, constitui-se atualmente como uma das mais graves preocupações das sociedades dos países desenvolvidos.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação surge assim enquadrado no objetivo geral de valorização de resíduos sólidos industriais, centrando-se no estudo da sua potencialidade como agregados para a pavimentação rodoviária, evitando a sua deposição em aterro e ao mesmo tempo contribuindo para a minimização da exploração de recursos naturais não-renováveis.

Os resíduos testados neste estudo foram escórias provenientes da queima de biomassa em central termoelétrica, cinzas de fundo (denominadas areias de leito fluidizado – ALF) e lamas de carbonato de cálcio (LCC) resultantes do processo de produção de pasta de papel.

A metodologia experimental adotada incluiu a caracterização física, química e geométrica das matérias-primas convencionais e resíduos, como também foram testadas formulações de misturas betuminosas segundo a metodologia Marshall com e sem incorporação dos resíduos.

As formulações betuminosas foram elaboradas segundo as características exigidas e onde os resíduos substituíram parcialmente o pó-de-pedra no caso das escórias e ALF e o fíler calcário no caso das LCC.

A incorporação de resíduos foi efetuada individualmente e de forma conjugada e os resultados obtidos foram sempre alvo de comparação com uma mistura referência, totalmente desprovida de resíduos. A incorporação dos resíduos estudados revelou um potencial de aplicação elevado, visto que em relação a parâmetros estudados como estabilidade, deformação, porosidade, entre outros, apresentou bons resultados e por vezes até melhores que a mistura de referência. A exceção ao referido foram as formulações totalmente desprovidas de fíler, ou seja, formulações onde as LCC substituíram o fíler a 100%, que evidenciaram total inaplicabilidade, uma vez que apresentaram uma elevada desagregação.

Keywords

Solid wastes, natural aggregates, valorization, incorporation, bituminous mixes, road pavements, sustainability.

Abstract

Nowadays, solid wastes represent one of the most serious concerns in developed countries mainly when it is related to the final disposal.

The work in this thesis present the general purpose of recycling of solid industrial wastes, focusing on the study of its potential as aggregates for road pavements, avoiding landfilling while helping to minimize the nonrenewable natural resources exploration.

The tested wastes were slags from biomass combustion power plant, and bottom ash (waste generated in fluidized bed combustors) mainly composed by sand, denominated as ALF in this study. A calcium carbonate sludge (LCC) resulting from the pulp and paper mill was also studied.

The adopted experimental methodology includes physical, chemical and geometric characterization of conventional raw materials and wastes, and bituminous mixes formulations tested according to Marshall methodology with and without wastes incorporation.

Bituminous mixes formulations were prepared according to the required characteristics for Bituminous Macadam, where the slags and ALF wastes were partially incorporated replacing the crushed powder stone, while the LCC waste was incorporated by replacing the limestone filler in the case of LCC.

The wastes incorporation was carried out individually and combined, and a mixture without wastes was used as reference. The incorporation of studied wastes showed potential for this application according to the results of parameters like stability, deformation, porosity, amongst others. They showed good results and sometimes even better than the reference mixture. Formulations without conventional filler showed total inapplicability due to the high disaggregation level revealed.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	VII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	1
1.2. ENQUADRAMENTO	1
1.2.1. Gestão ambiental e valorização de resíduos sólidos	3
1.2.2. Combustão de biomassa florestal e resíduos sólidos gerados.....	4
1.2.2.1. Centrais termoelétricas de biomassa	5
1.2.2.2. Processos de combustão de biomassa florestal e sua influência nas caraterísticas dos resíduos	8
1.2.2.2.1. Combustão em grelha vibratória	9
1.2.2.2.2. Cinzas de fundo / Escórias	11
1.2.3. Setor da pasta e do papel.....	13
1.2.3.1. Processo de produção de pastas <i>Kraft</i> e resíduos gerados	14
1.2.3.2. Lamas de carbonato de cálcio	16
1.2.3.3. Combustão em leito fluidizado	17
1.2.3.4. Areias de leito fluidizado	17
1.2.4. Setor das vias e pavimentos rodoviários.....	18
1.2.4.1. Misturas betuminosas	20
1.2.4.3. Incorporação de resíduos no setor	23
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	27
2.1. RECOLHA DOS MATERIAIS UTILIZADOS	27
2.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E TÉCNICAS UTILIZADAS.....	28

2.2.1. Análise granulométrica.....	29
2.2.2. Grau de impurezas	31
2.2.3. Massa volúmica	34
2.2.4. Análise mineralógica	35
2.2.5. Análise química	36
2.2.6. Análise do comportamento térmico dos resíduos.....	36
2.3. FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS	36
2.3.1. Preparação das misturas formuladas.....	44
2.3.2. Ensaio de caracterização e determinação de parâmetros respetivos às misturas formuladas	45
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	49
3.1. CARATERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E AGREGADOS NATURAIS.....	49
3.1.1. Caraterização física.....	49
3.1.2. Caraterização composicional	54
3.2. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM MISTURAS BETUMINOSAS	59
3.2.1. Efeito da incorporação de Escórias	63
3.2.2. Efeito da incorporação de ALF	67
3.2.3. Efeito da incorporação de LCC	71
3.2.4. Efeito da incorporação conjugada de resíduos	77
4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	81
5. BIBLIOGRAFIA	85
5.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
5.2. Webgrafia	88
ANEXOS	89

Anexo I – Densidade pelo método do picnómetro dos agregados e resíduos utilizados no fabrico das misturas betuminosas	90
Anexo II – Limites considerados para o valor de azul-de-metileno (VBS).....	92
Anexo III – Formulação das misturas de agregados para a elaboração dos provetes betuminosos	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Hierarquização dos processos de gestão de resíduos sólidos [Fonte: (Modolo, 2006)]	3
Fig.2 – Central Termoelétrica de Mortágua [Fonte: [3]].....	5
Fig.3 – Esquema de funcionamento genérico de uma central termoelétrica [Fonte: [4]]	6
Fig.4 – Esquema de funcionamento de uma central termoelétrica [Fonte: (Tecninvest, 2008)]	8
Fig. 5 – Principais tecnologias de combustão de biomassa [Fonte: (Loo e Koppejan, 2007)]	9
Fig.6 – Exemplo de grelha vibratória [Fonte: (Loo e Koppejan, 2007)].....	9
Fig.7 – (a) Sistema de combustão de biomassa em grelha vibratória; (b) Esquema representativo do fornecimento de ar à caldeira de combustão [Fonte: (Yin et al., 2008)]	11
Fig.8 – Vista aérea: Fábrica de pasta de papel em Cacia [Fonte: [6]].....	13
Fig.9 – Produção de pasta de papel no processo <i>Kraft</i> (Fonte: [7])	15
Fig.10 – Destino dos resíduos sólidos gerados na indústria papelreira [Fonte: (Celpa, 2010)]	16
Fig.11 – (a) Esquema de colocação em obra de uma mistura betuminosa [Fonte: (Branco et al., 2008)]; (b) Esquema tipo de pavimento rodoviário flexível	19
Fig.12 – Série de peneiros utilizada em mesa de agitação para análise granulométrica	29

Fig.13 – Fuso granulométrico para Macadame Betuminoso Fuso A com incorporação da série de peneiros disponível	31
Fig.14 – Ensaio de determinação do teor equivalente de areia (EA)	32
Fig.15 – Medição de h1 e h2 na determinação do valor de equivalente de areia (EA).....	32
Fig.16 – Ensaio de determinação do valor de azul-de-metileno (VBS) com respetiva apresentação da mancha de suspensão em papel de filtro com a presença de auréola azul, indicadora da presença de azul-de-metileno em excesso	33
Fig.17 – Determinação da massa volúmica pelo método do picnómetro.....	35
Fig.18 – Obtenção das amostras de resíduos para determinação de fases cristalinas	35
Fig.19 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de Escórias.....	40
Fig.20 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de Areis de Leito Fluidizado	41
Fig.21 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de Lamas de Carbonato de Cálcio	42
Fig.22 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados.....	43
Fig.23 – Processos para produção de provetes betuminosos; (a) - Mistura dos agregados com o betume; (b) - Compactação Marshall e obtenção de provete; (c) - Exemplo de provetes a ensaiar	45
Fig.24 – Pesagem dos provetes secos e imersos em água com recurso a cesto de rede.....	45
Fig.25 – Preparação dos provetes em banho-maria à temperatura de 60°C.....	46
Fig.26 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão Marshall	46
Fig.27 – Determinação da baridade máxima teórica através do método do picnómetro de vácuo	47
Fig.28 – Distribuição granulométrica das Escórias.....	49
Fig.29 – Distribuição granulométrica das ALF.....	50

Fig.30 – Distribuição granulométrica das LCC.....	50
Fig.31 – Distribuição granulométrica da Brita 1	51
Fig.32 – Distribuição granulométrica da Brita 2	51
Fig.33 – Distribuição granulométrica do Pó-de-Pedra Calcária.....	52
Fig.34 – Distribuição granulométrica do Fíler Calcário.....	52
Fig.35 – Difratoograma de raios X das LCC (Abreviaturas: C = Calcite (CaCO_3).).....	55
Fig.36 – Difratoograma de raios X das ALF (Abreviaturas: S = Quartzo e Cristobalite (SiO_2), L = Óxido de Cálcio (CaO), K = Microclina (KAlSi_3O_8), M = Muscovite-3T ($(\text{K,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.).....	55
Fig.37 – Difratoograma de raios X das Escórias (Abreviaturas: S = Quartzo (SiO_2), M = Muscovite-3T ($(\text{K,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, O = Ortoclase ($\text{K}_4\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}$).) ...	56
Fig.38 – Análise térmica das LCC	57
Fig.39 – Análise térmica das ALF.....	58
Fig.40 – Análise térmica das Escórias.....	58
Fig.41 – Análise entre curvas granulométricas de resíduos e agregados naturais.....	60
Fig.42 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias	64
Fig.43 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias ...	64
Fig.44 – Provetes de MB Fuso A com adição de escórias	65
Fig.45 – Estabilidade e Deformação de provetes de Macadame Fuso A com incorporação de Escórias.....	66
Fig.46 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias ..	66
Fig.47 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias.....	67
Fig.48 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF	68
Fig.49 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF.....	69

Fig.50 – Estabilidade e Deformação de provetes de Macadame Fuso A com incorporação de ALF.....	70
Fig.51 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF.....	70
Fig.52 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF.....	71
Fig.53 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC	73
Fig.54 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC	73
Fig.55 – Estabilidade e Deformação de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC	74
Fig.56 – Esq.: MB Fuso A Referência (sem resíduos); Dir.: MB Fuso A com incorporação de 5% LCC	75
Fig.57 – Desagregação de provetes de MB Fuso A com incorporação de 5% LCC	75
Fig.58 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC.....	76
Fig.59 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC	76
Fig.60 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados	77
Fig.61 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados.....	78
Fig.62 – Estabilidade e Deformação de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados	79
Fig.63 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados.....	79
Fig.64 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados.....	80
Fig.65 – Esq.: MB Fuso A Referência (sem resíduos); Dir.: MB Fuso A com incorporação de 10% de Escórias, 10% de LCC e 5% LCC.....	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Fuso granulométrico para Macadame Betuminoso Fuso A ou AC 20 (MB)	23
Tabela 2 – Fuso granulométrico para Macadame Betuminoso Fuso A com incorporação de peneiros respetivos à série de peneiros disponível	30
Tabela 3 – Formulação de misturas betuminosas	39
Tabela 4 – Massa volúmica dos resíduos	53
Tabela 5 – Massa volúmica dos agregados naturais.....	53
Tabela 6 – Teor equivalente de areia dos resíduos.....	53
Tabela 7 – Valores de azul-de-metileno obtidos para os agregados naturais.....	54
Tabela 8 – Composição química dos resíduos, em percentagem ponderal de óxidos, determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X.....	57
Tabela 9 – Código de identificação das misturas	61
Tabela 10 – Resultados da caracterização das misturas betuminosas	62
Tabela 11 – Comparação granulométrica entre o agregado natural (Fíler Calcário) e o resíduo (Lamas de Carbonato de Cálcio)	72
Tabela A.I – Densidade dos agregados e resíduos	91
Tabela A.II – Limites considerados para o valor de azul-de-metileno (VBS) [Fonte: (SETRA/LCPC, 1992)]	93
Tabela A.III – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (Referência).....	95
Tabela A.IV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (5% Escórias).....	95
Tabela A.V – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% Escórias).....	96

Tabela A.VI – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (20% Escórias).....	96
Tabela A.VII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (5% ALF).....	97
Tabela A.VIII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% ALF)	97
Tabela A.IX – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (20% ALF).....	98
Tabela A.X – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (1% LCC)	98
Tabela A.XI – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (3% LCC)	99
Tabela A.XII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (5% LCC)	99
Tabela A.XIII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% Escórias + 1% LCC)	100
Tabela A.XIV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% ALF + 1% LCC)	100
Tabela A.XV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10%Escórias + 10% ALF + 1% LCC	101
Tabela A.XVI – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10%Escórias + 10% ALF + 3% LCC	101
Tabela A.XVII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10%Escórias + 10% ALF + 5% LCC	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVO

O objetivo desta dissertação centra-se no estudo da viabilidade de aplicação de resíduos sólidos industriais em camadas estruturais de pavimentos rodoviários. Os resíduos a valorizar são escórias resultantes da queima de biomassa geradas em central termoelétrica, lamas de carbonato de cálcio e areias de leito fluidizado resultantes do processo de produção de pasta de papel.

O estudo a ser desenvolvido permitirá conhecer as propriedades químicas, físicas e mecânicas dos resíduos a testar, objetivando a posterior comparação com a substituição parcial dos agregados ou outros componentes da formulação. Estes resíduos serão incorporados, em determinados teores, em misturas tipo de camadas estruturais de pavimentos rodoviários. Essas misturas serão então testadas e avaliadas no sentido de garantirem a mesma qualidade das obras onde serão aplicadas, sem prejuízo do meio ambiente.

A viabilidade deste estudo implicará a redução da quantidade de resíduos a encaminhar para deposição em aterros e uma conseqüente diminuição do uso de recursos naturais não renováveis, ou seja, extração de agregados naturais como, por exemplo, pó-de-pedra ou fíler calcário.

1.2. ENQUADRAMENTO

Os países desenvolvidos deparam-se atualmente com a dificuldade crescente de encontrar o destino correto para os resíduos industriais, constituindo-se este como um dos mais graves problemas ambientais (Ribeiro et al., 2007). Paralelamente a esta problemática está o surgimento de depósitos ilegais, que são sempre prejudiciais à saúde pública e provocam deterioração da paisagem, pois há uma grande falta de informação e sensibilização por

parte dos produtores dos resíduos, tornando cada vez mais pertinente a adoção de medidas que contrariem esta tendência.

Os resíduos sólidos em estudo têm normalmente como destino final a deposição em aterro sanitário. Verifica-se, porém, que o aparecimento de constrangimentos ambientais impostos pela maioria dos países europeus, tem vindo a dificultar esta atividade, tornando-a cada vez mais limitada e dispendiosa. Tal facto deve-se, essencialmente, à reduzida vida útil dos aterros sanitários e às crescentes exigências de segurança ambiental (Reis-de-Barros e Lopes, 2002; Reis-de-Barros et al., 2006).

A construção de vias rodoviárias revela um consumo extraordinário de agregados naturais, estimando-se que só na Europa sejam necessários mais de 2,5 milhões de toneladas, anualmente (Reis-de-Barros et al., 2006). Tal facto, associado à crescente pressão ambiental no sentido de dificultar cada vez mais a exploração de novas pedreiras e extração de agregados aluvionares, demonstra que uma solução de valorização destes resíduos como materiais a utilizar em obras rodoviárias, seria uma solução alternativa com vantagens assinaláveis. Se, por um lado, a viabilidade de utilização dos resíduos reduziria a quantidade de agregados naturais a serem empregues, por outro, implicaria que este material alternativo não fosse enviado para aterro sanitário, tratando-se até de uma aparente vantagem económica (Reis-de-Barros e Lopes, 2002; Reis-de-Barros et al., 2006).

A perceção de tratar-se de materiais de natureza adversa, tratando-se de resíduos, e preocupações relacionadas com o comportamento quer mecânico quer ambiental destes materiais, leva a que o uso de materiais alternativos não seja ainda significativo. Isto apesar da imposição de taxas para a deposição em aterro e exploração de agregados naturais praticada pelos governos na maioria dos países europeus (Arm, 2003; Reis-de-Barros e Lopes, 2002; Reis-de-Barros et al., 2006).

Ainda de referir que o transporte e eventuais tratamentos necessários, devido às exigências técnicas adicionais, implicam o dispêndio de energia adicional e emissões, muitas vezes suscetíveis de elevar o custo de valorização dos resíduos, tornando este investimento mais dispendioso que a exploração de agregados naturais (Huang et al., 2007).

Segundo (Huang et al., 2007), superar as muitas barreiras técnicas bem como não-técnicas, exige o compromisso de todas as partes e agir em conformidade, onde os esforços governamentais se revelam, na maioria dos casos, como essenciais para fornecer a pesquisa e serviço de informação livre de restrição comercial e aumentar a rentabilidade da reciclagem por meio de legislação ou incentivos financeiros.

1.2.1. Gestão ambiental e valorização de resíduos sólidos

O setor da construção civil é, reconhecidamente, um setor onde o consumo de energias não renováveis e matéria-prima retiradas da natureza, sempre foi feita em larga escala e de uma forma desmesurada. Este passivo da degradação ambiental que se tem acumulado ao longo das últimas décadas deve ser revertido e compensado (Silva, 2009).

Estando na ordem do dia a problemática da sustentabilidade ambiental, tem ganho importância crescente todas as políticas, estratégias e práticas que permitam inserir parâmetros ecológicos e de inclusão social em cada fase da cadeia produtiva da Construção Civil, garantindo assim que as atividades humanas não interferem nos ciclos naturais, satisfazendo as suas necessidades ao mesmo tempo que não empobrecem o capital natural que será transmitido às gerações vindouras (Silva, 2009).

A Gestão Ambiental assume, assim, um papel preponderante na alteração do cenário atual, implicando mudanças a nível comportamental com o objetivo de garantir a sustentabilidade dos processos produtivos (Modolo, 2006).



Fig.1 – Hierarquização dos processos de gestão de resíduos sólidos [Fonte: (Modolo, 2006)]

Em Portugal, a gestão de resíduos é definida pela norma NP EN ISO 14001, onde estão estabelecidos os sistemas de gestão ambiental. É fundamental a prevenção de geração de resíduos, uma vez que se constituem como poluição ao mesmo tempo que contribuem para uma significativa perda de recursos. Torna-se, portanto, imperativo que seja estabelecido uma hierarquia de destino preferencial para estes resíduos (Figura 1), na qual se seguem à prevenção, a reutilização e a reciclagem, a recuperação energética e, por último, a deposição adequada (normalmente em aterro sanitário) (Machado, 2002; Modolo, 2006).

Atualmente, a reciclagem, a reutilização e a redução na exploração de recursos naturais fazem parte das estratégias para assegurar um crescimento sustentável de uma sociedade. O facto da disponibilidade de recursos ser limitada e cada vez mais escassa, exige propostas que apontem para a valorização de resíduos, em vez do recurso sistemático à utilização de novos materiais e evitando a conseqüente colocação em depósito dos materiais não reutilizáveis. Este objetivo deve estar presente na construção de uma via rodoviária, procurando-se em todos os projetos adequar uma determinada solução de pavimento com incorporação de resíduos, em função do resultado pretendido (Fonseca, 2002).

1.2.2. Combustão de biomassa florestal e resíduos sólidos gerados

Desde os primórdios da humanidade que a floresta fornece lenha para o Homem se aquecer e cozinhar os seus alimentos. Esta fonte de energia que provém das florestas (biomassa) representa 15% da energia primária consumida em todo o mundo [1].

Estima-se que o território nacional disponha de uma capacidade de produção de 6,5 milhões de toneladas/ano de biomassa florestal, sendo que destes, 2,2 milhões constituem-se como potencial disponível para valorização [2].

Tratando-se Portugal de um país importador de combustíveis de origem fóssil, a produção de energia elétrica através da combustão de biomassa florestal constitui uma alternativa assinalável. O facto de utilizar um recurso renovável implica a diminuição da dependência de combustíveis fósseis (dependência energética externa).

A combustão de biomassa florestal ao mesmo tempo que contribui para a crescente utilização das energias renováveis em Portugal, permite a valorização dos resíduos florestais deveras abundantes nas sedes destas instalações, criando condições para a limpeza das matas e florestas por parte dos seus proprietários e assim para a redução dos riscos de incêndios florestais.



Fig.2 – Central Termoelétrica de Mortágua [Fonte: [3]]

Em Portugal, existem centrais termoelétricas que funcionam exclusivamente com recurso a biomassa florestal para produção de energia elétrica, como a Central Termoelétrica de Mortágua (Figura 2) e a Centroliva em Vila Velha de Ródão. As instalações em causa utilizam ramos e bicadas, árvores sem valor comercial, aparas de abate, pinhas secas, cascas e frutos, caruma e folhagem e material lenhoso abandonado, permitindo assim o escoamento destes resíduos florestais.

No âmbito desta dissertação, serão testados resíduos sólidos provenientes de uma central termoelétrica, concretamente cinzas de fundo ou escórias conforme designação adotada nesta dissertação, resultantes do processo de combustão de biomassa florestal em caldeira de leito fixo (grelha vibratória arrefecida a água).

1.2.2.1. Centrais termoelétricas de biomassa

De uma forma genérica, tal como ilustra a Figura 3, uma central é constituída por um sistema de receção e armazenagem de biomassa florestal (parque de biomassa), uma caldeira (gerador de vapor de alta pressão), electrofiltros para tratamento dos gases de

combustão e chaminé, e o turbogerador, com condensador de vapor com extração para produção de energia elétrica no respetivo gerador (Tecninvest, 2008).

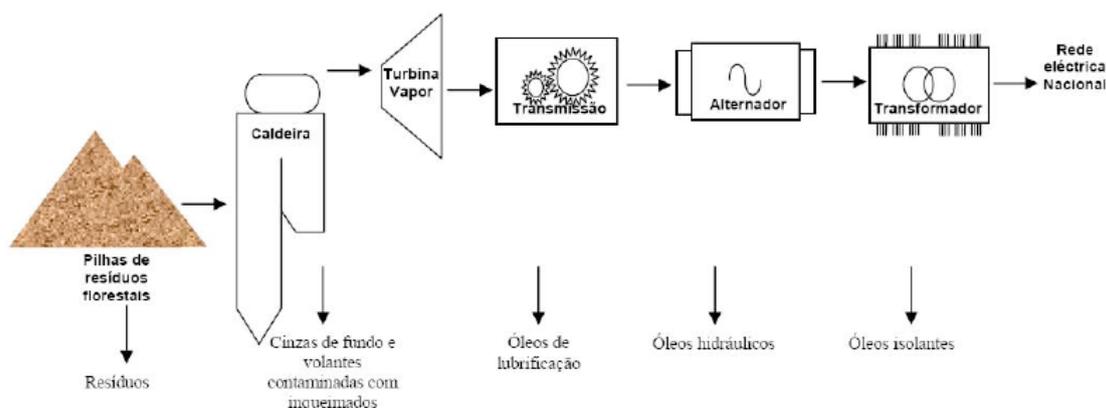


Fig.3 – Esquema de funcionamento genérico de uma central termoelétrica [Fonte: [4]]

São apresentados de seguida e de uma forma detalhada, os processos e respetivos componentes respeitantes ao processo de funcionamento do tipo de instalação em causa, demonstrado em esquema detalhado na Figura 4.

▪ **Receção, preparação, armazenagem e transferência da biomassa**

A biomassa florestal é transportada para a central em camião e depositada numa área de armazenagem destinada a esse fim. Uma instalação encontra-se equipada com meios de pesagem, medição de humidade e de destroçamento de resíduos. Após pesagem, os resíduos florestais são depositados em fossas de receção, sendo, de seguida, encaminhados através de tapetes rolantes até ao silo de biomassa para armazenagem. Neste percurso, existe um separador de metais e outro de pedras.

A descarga de biomassa é efetuada pelo topo através de um transportador de tapete, e a extração realizada pelo fundo através de dois sistemas de parafuso (sem fim). A biomassa segue, depois, em tapetes transportadores até aos silos diários da caldeira, onde ocorre mais uma deteção de metais intermédia.

Um sistema de garra mecânica permite manejar a biomassa dentro do fosso e do silo anexo, de forma a alimentar a tremonha estrategicamente colocada na extremidade frontal da caldeira (Tecninvest, 2008).

- **Caldeira (gerador de vapor de alta pressão)**

Na caldeira (gerador de vapor) é utilizada a tecnologia de combustão em grelha (leito fixo), tecnologia perfeitamente adequada para queima de materiais heterogêneos e de elevada humidade, garantindo ao mesmo tempo baixas emissões de poluentes atmosféricos. Aqui o combustível é parcialmente queimado em suspensão, completando-se a combustão numa grelha vibratória arrefecida a água. É nesta fase do processo que é gerado o resíduo em estudo, nomeadamente as escórias.

Em situações transitórias de paragem e arranque e quando o teor de humidade da biomassa é muito elevado, são acionados queimadores auxiliares a gás natural.

A recuperação do calor resultante da combustão da biomassa permite a produção de vapor de alta pressão, enquanto os gases de exaustão passam por electrofiltros de elevada eficiência para remoção de partículas, antes da respetiva descarga para a atmosfera (Tecninvest, 2008).

- **Turbogerador e subestação**

O vapor gerado na caldeira é admitido numa turbina a vapor de condensação com extrações de vapor, à qual está ligado um gerador de electricidade (alternador), do tipo trifásico. Após expansão na turbina, o vapor vai ao condensador que consiste num permutador de calor onde o vapor é condensado indiretamente com água de arrefecimento, o condensado é enviado, após pré-aquecimento com vapor, para o tanque de água de alimentação à caldeira. É utilizado, um sistema de água de refrigeração em circuito fechado para arrefecimento, com uma torre de refrigeração constituída por células com ventilação mecânica.

O escoamento da energia produzida pelo grupo será realizado pela ligação do transformador principal de grupo, através de um posto de corte e linha aérea a uma subestação (Tecninvest, 2008).

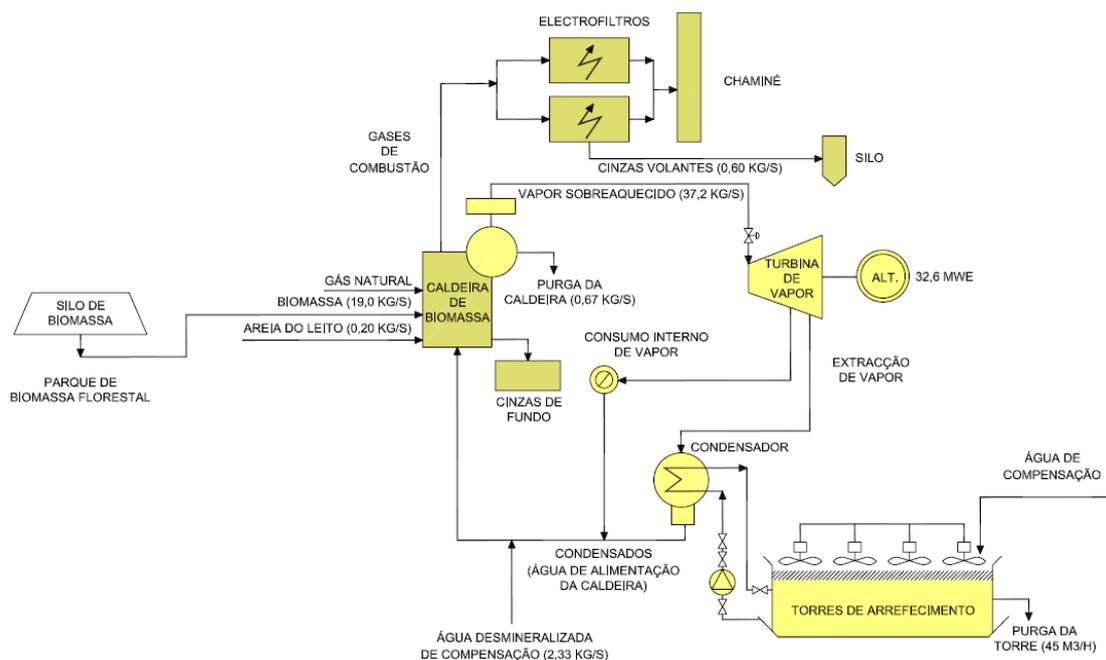


Fig.4 – Esquema de funcionamento de uma central termoelétrica [Fonte: (Tecininvest, 2008)]

Os resíduos gerados neste processo, são alvo de recolha seletiva e armazenamento temporário, para destino final adequado no exterior.

1.2.2.2. Processos de combustão de biomassa florestal e sua influência nas características dos resíduos

Existe uma vasta gama de tecnologias para conversão termoquímica e aproveitamento de biomassa (calor/energia), que se processam de formas distintas, tal como ilustrado na Figura 5. Dentro dos vários processos de produção de energia elétrica via combustão direta evidenciam-se (Gulyurtlu, 2007):

- Leito Fixo: Sistema grelha e Grelha com alimentação abaixo da grelha;
- Leito Fluidizado: Borbulhante (BFB) e Circulante (CFB);
- Sólidos Pulverizados.

De salientar o facto de os diferentes processos influenciarem as características dos resíduos resultantes. A relevância deste facto prende-se com o facto de os resíduos alvo de estudo nesta dissertação terem origem em diferentes sistemas de combustão de biomassa, sendo que as escórias resultam de um processo de combustão em leito fixo, concretamente um

sistema de grelha vibratória e as areias de leito fluidizado oriundos de um processo de combustão em leito fluidizado, conforme se verificará adiante.

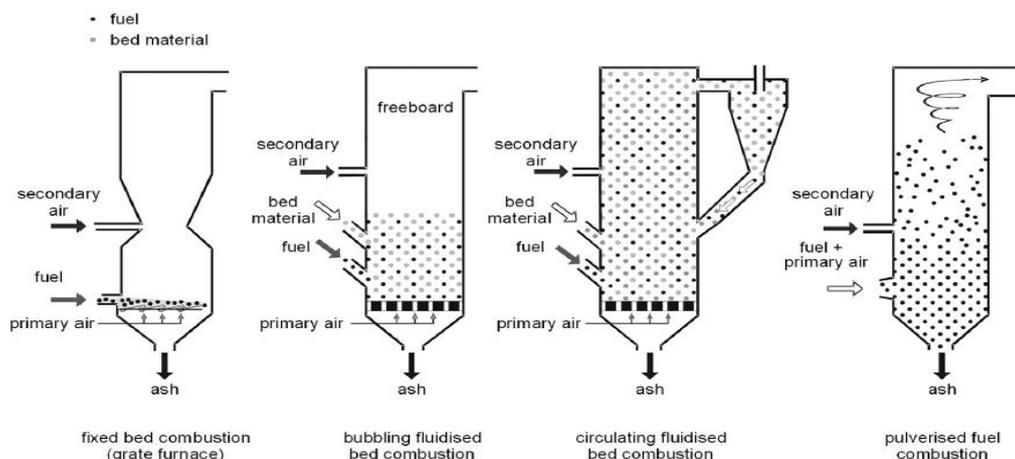


Fig. 5 – Principais tecnologias de combustão de biomassa [Fonte: (Loo e Koppejan, 2007)]

1.2.2.2.1. Combustão em grelha vibratória

Esta tecnologia permite a operação com materiais heterogéneos, com partículas de dimensões elevadas e variados teores de humidade, revelando grande potencial para a combustão de biomassa florestal (Coelho, 2010; Werther et al., 2000).

A combustão sobre grelha vibratória representa uma vantagem assinalável em relação aos outros sistemas de combustão, que consiste na vibração da grelha por curtos períodos de tempo, formando-se pequenas partículas de escória, facilmente removidas por efeito gravítico (Loo e Koppejan, 2007; Sousa, 2009).

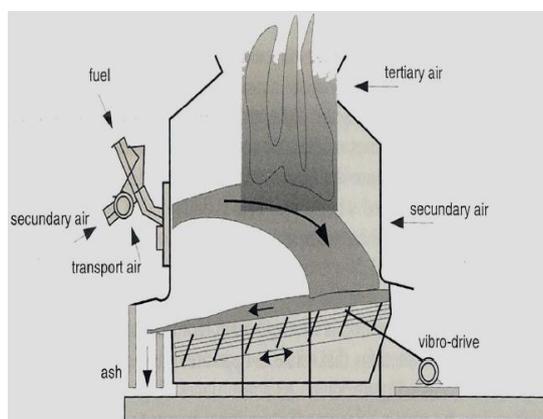


Fig.6 – Exemplo de grelha vibratória [Fonte: (Loo e Koppejan, 2007)]

Este sistema de combustão é composto, basicamente, por quatro elementos fundamentais: o sistema de alimentação do combustível, a câmara de grelhas, o sistema de ar primário e secundário e o sistema de descarga de cinza (Yin et al., 2008), tal como ilustra a Figura 6.

O sistema de alimentação do combustível é realizado por alimentadores mecânicos em processo automático, tomando partido do fator gravidade. Na parte inferior da câmara de combustão localiza-se a grelha, que através do seu movimento horizontal garante o transporte do combustível na grelha permitindo, ao mesmo tempo, o contacto entre partículas incandescentes e outras ainda por queimar, homogeneizando a mistura. Além do referido, contribui para que o ar primário injetado por baixo da grelha seja distribuído de forma homogênea possibilitando uma melhor eficiência do processo de queima. Este movimento da grelha implica que, inicialmente, o combustível sofra uma redução do teor de humidade, antes de entrar em ignição e conseqüente queima do combustível, arrefecendo posteriormente enquanto cinza remanescente da combustão. De referir que o ajuste da frequência de movimento das grelhas é particularmente complexo, uma vez que frequências demasiado baixas implicam um aumento da deposição de material sobre a grelha, bloqueando a passagem de ar primário e, assim, abafar a combustão. Ao contrário, frequências elevadas resultam em maiores concentrações de matéria não queimada nas cinzas de fundo.

O sistema de fornecimento de ar de combustão é constituído pela injeção de ar primário e ar secundário (Figura 7). O ar primário fornecido por baixo da grelha trata-se do principal promotor da combustão, sendo que é a regulação da sua admissão à caldeira que determina o maior ou menor consumo de combustível (biomassa florestal). O sistema de ar secundário localiza-se no topo da caldeira e tem como principal função, promover a mistura do combustível com os gases provenientes do leito de combustão, contribuindo para o aumento de eficiência e ao mesmo tempo, redução de emissões de compostos nocivos para o meio ambiente.

As cinzas remanescentes da combustão caem através dos orifícios da grelha e depositam-se num tanque de recolha de cinzas com água. Daí são retiradas, armazenadas e, posteriormente, transportadas para aterro sanitário. A dimensão das partículas face às características da grelha assume particular importância, uma vez que as partículas

demasiado pequenas caem antes de serem queimadas, contribuindo para o aumento da fração de inqueimados nas cinzas de fundo (escórias).

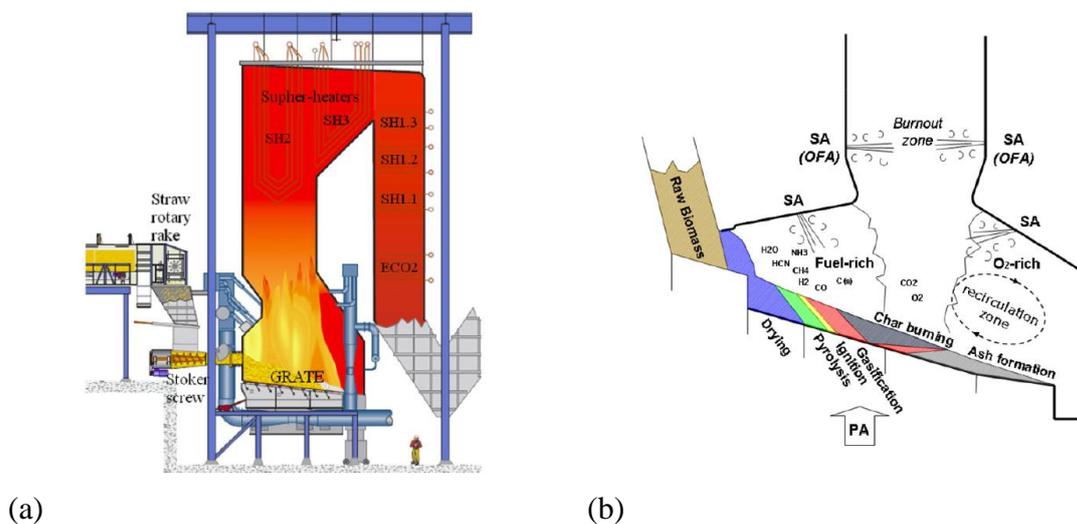


Fig.7 – (a) Sistema de combustão de biomassa em grelha vibratória; (b) Esquema representativo do fornecimento de ar à caldeira de combustão [Fonte: (Yin et al., 2008)]

1.2.2.2. Cinzas de fundo / Escórias

Da conversão termoquímica de biomassa florestal por combustão em caldeira de leito fixo (grelha vibratória), resultam gases de combustão nefastos para o ambiente, cinzas volantes e de fundo (escórias) e energia elétrica.

As escórias traduzem-se no remanescente da combustão de biomassa que penetra a grelha, depositando-se num tanque de cinzas. Correspondem então, à fração de partículas grosseira, recolhida na grelha ou na câmara de combustão primária, apresentando-se normalmente misturadas com areias, pedras, e outras impurezas que acompanham a biomassa (Wildbacher, 2007).

As escórias constituem-se como a fração inorgânica que resulta da combustão de biomassa e que contém a maior parte dos minerais da biomassa original, numa variedade de formas, tais como cátions ligados a compostos orgânicos, sais inorgânicos e minerais [19], sendo que a maioria dos componentes encontrados trata-se de Silício (Si), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Enxofre (S), Fósforo (P),

Cloro (Cl) na forma de óxidos, hidróxidos, cloretos e sulfatos e carbonatos (Teixeira, 2010). Obviamente, a composição das escórias variam de acordo com o tipo de biomassa utilizada.

Vários fatores determinam a dimensão das partículas de escória, tais como o tamanho das partículas do combustível, o teor de cinzas e sua composição química na biomassa, a composição química das cinzas e a quantidade de impurezas minerais no combustível (Loo e Koppejan, 2007).

As concentrações de metais pesados altamente voláteis e ecologicamente relevantes, como o Zinco (Zn), o Cádmio (Cd) e o Chumbo (Cb), são praticamente irrisórias neste tipo de cinzas, muito devido a serem convertidos em vapor durante a combustão. Apresenta de igual modo, concentrações relativamente baixas de carbono orgânico e contaminantes orgânicos (Coelho, 2010).

O aumento previsto na produção de escórias de biomassa produzidas em centrais termoelétricas ou de cogeração em Portugal no futuro, transmite a necessidade urgente de criar alternativas de viabilidade e valorização destes resíduos. Além do mais, os resíduos produzidos acarretam um problema para o detentor, uma vez que é ele o responsável pela gestão adequada dos mesmos. O Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Outubro que estabelece o Regime Geral da Gestão de Resíduos, define as prioridades de gestão de resíduos. O mesmo estabelece que a eliminação definitiva é a última opção, só possível quando não existem soluções técnicas ou economicamente viáveis de prevenção, reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização. Atualmente, grande parte das escórias são depositadas em aterro ou recicladas na agricultura, a maioria das vezes sem qualquer tipo de controlo (Coelho, 2010).

Apesar da carência de estudos realizados sobre a viabilidade destes resíduos na construção de pavimentos rodoviários, algumas centrais canalizam as escórias para a construção de vias rodoviárias (Coelho, 2010).

1.2.3. Setor da pasta e do papel

O setor da pasta e do papel (SPP) tem vindo a evidenciar um forte contributo para o crescimento da economia portuguesa, tratando-se de um setor em que as exportações excedem as importações, contribuindo positivamente para a Balança de Pagamentos.

Responsável por 0,8% do PIB nacional, por 4,5% do PIB industrial e por 4,6% de todas as exportações portuguesas de mercadorias [5;(Modolo, 2006)], este setor assume-se como o 4º ramo exportador líquido na economia nacional, depois da indústria dos têxteis, indústria do couro e indústria das madeiras [5].

Segundo o Boletim Estatístico de 2010 da CELPA (Associação da Indústria Papeleira), Portugal com 6,6% assume-se como o 4º maior produtor europeu de pasta e o 3º maior produtor de pastas químicas com 8,6%, considerando apenas estas, uma vez que Portugal não produz pastas mecânicas. Isto de um total de 39,2 milhões de toneladas produzidas nesse ano, evidenciando a importância deste setor para a economia nacional (Celpa, 2010).

Do processo de produção de pasta são gerados resíduos, dos quais as lamas de carbonato de cálcio e as areias de leito fluidizado, geradas respetivamente no processo de caustificação e no processo de queima de biomassa em fornalha de caldeira de leito fluidizado, serão alvo de estudo no âmbito desta dissertação. A Fábrica de Cacia (Figura 8) constitui-se como um exemplo de fábrica produtora de pasta de papel, onde os resíduos têm normalmente como destino final, a deposição em aterro controlado.



Fig.8 – Vista aérea: Fábrica de pasta de papel em Cacia [Fonte: [6]]

A indústria da pasta e do papel gera um grande volume de resíduos dependendo da tecnologia de produção, estimando-se que em 550 toneladas de produção de pastas se geram 100 toneladas de resíduos (Celpa, 2010; Modolo et al., 2010). Em termos Europeus este setor gera anualmente 11 milhões de toneladas de resíduos (Monte et al., 2009). Estes são gerados em todos os estágios de produção, sendo que os mesmos apresentam-se com composições e teores de humidade distintos (Modolo et al., 2010).

Apesar de muitos esforços já levados a cabo, quer no âmbito técnico como financeiro, no sentido da gestão sustentável da floresta, no tratamento de efluentes e emissões gasosas, na redução de água e energia, Portugal carece ainda neste setor de soluções de viabilidade e valorização para uma série de resíduos, tais como os resíduos sólidos resultantes do processo de produção de pasta de papel (Modolo, 2006; Pinto, 2005).

Uma vez que a geração de resíduos deste tipo assume proporções elevadas, vislumbra-se que a indústria da construção civil poderá tratar-se de um excelente meio de escoamento destes resíduos, evidenciando-se nesse sentido o setor das vias e pavimentos rodoviários, devido à sua grande necessidade de recursos (Modolo, 2006).

1.2.3.1. Processo de produção de pastas *Kraft* e resíduos gerados

Este processo de produção de pastas químicas, denominado *Kraft* (pastas de grande resistência), é composto por diversas etapas, tal como demonstra o esquema apresentado na Figura 9, das quais se destacam [7;(Modolo, 2006)]:

- Preparação da madeira: A árvore é cortada, transportada, lavada e é efetuada a separação da casca, sendo posteriormente efetuado o destroçamento dos troncos em aparas ou cavacos;
- Cozimento das aparas ou cavacos para obtenção da pasta crua: O cozimento constitui a principal operação de fabrico e o seu fundamento químico assenta na ação sobre a madeira, de uma solução, onde predomina a soda cáustica e o sulfato de sódio;
- Branqueamento: A pasta é branqueada por oxidação (dióxido de cloro);

- Lavagem: A pasta é lavada com remoção de nós da madeira e dos pedaços mal digeridos em crivos centrífugos pressurizados. Saída da pasta espessa e adensada;
- Secagem: A pasta branqueada é seca e enfardada para transporte caso a fábrica não possua máquina de papel.

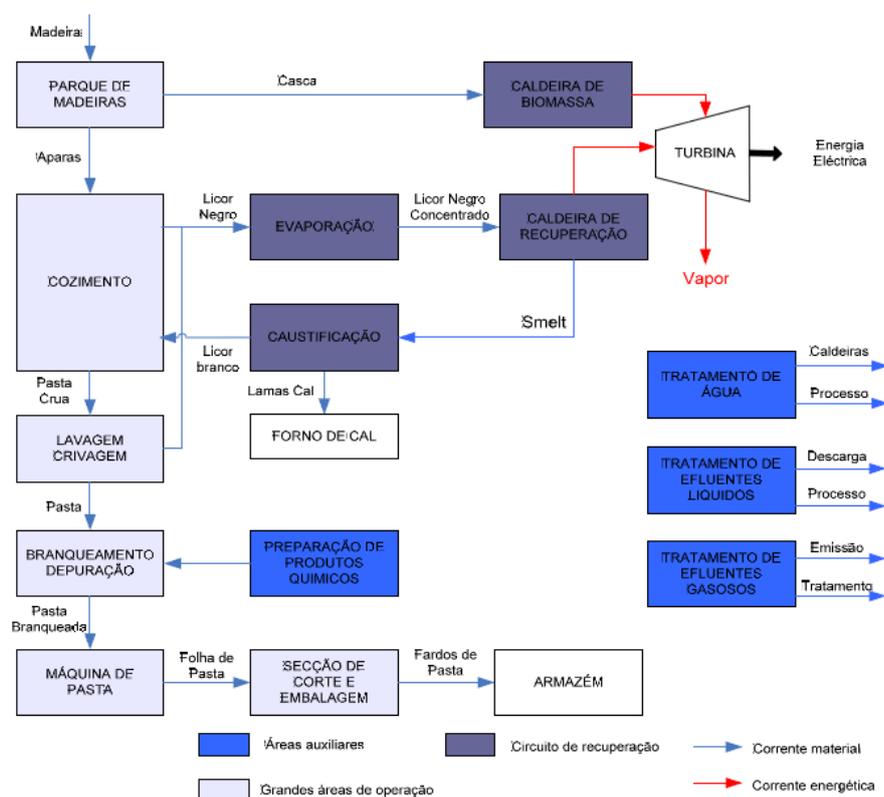


Fig.9 – Produção de pasta de papel no processo *Kraft* (Fonte: [7])

As várias etapas que compreendem este processo são responsáveis pela geração de resíduos sólidos diferenciados. De referir que é na etapa da caustificação, que resulta um resíduo que também será alvo de estudo no âmbito desta dissertação, nomeadamente as lamas de carbonato de cálcio. As mesmas são normalmente encaminhadas para um aterro controlado que estas unidades possuem, sendo que têm vindo a ser procuradas soluções com vista à sua valorização (Portucel, 2006).

Os resíduos do setor, tal como referido anteriormente, variam de acordo com as etapas do processo, destacando-se os seguintes:

- Grits: gerados no processo de apagamento da cal para produção de licor branco (soda caustica);

- Dregs: gerados na clarificação do licor verde (carbonato de sódio + sulfeto de sódio);
- Lamas de cal: geradas nos filtros de lama de cal;
- Cinzas: provenientes dos precipitadores das caldeiras de biomassa e forno de cal;
- Areias de leito fluidizado: resultam da substituição das areias que constituem o leito fluidizado das caldeiras auxiliares;
- Cascas de eucalipto: resultam da preparação da madeira;
- Lodo da estação de tratamento de efluentes, etc.

Segundo dados da CELPA, em 2010, destacam-se como destino dos resíduos sólidos, a aplicação de lamas e cinzas resultantes da queima de biomassa na agricultura e compostagem (Figura 10), correspondente a 20% do total de resíduos, e a valorização energética, que representou 43% dos resíduos. A deposição em aterro absorveu 16% dos resíduos produzidos (Celpa, 2010).

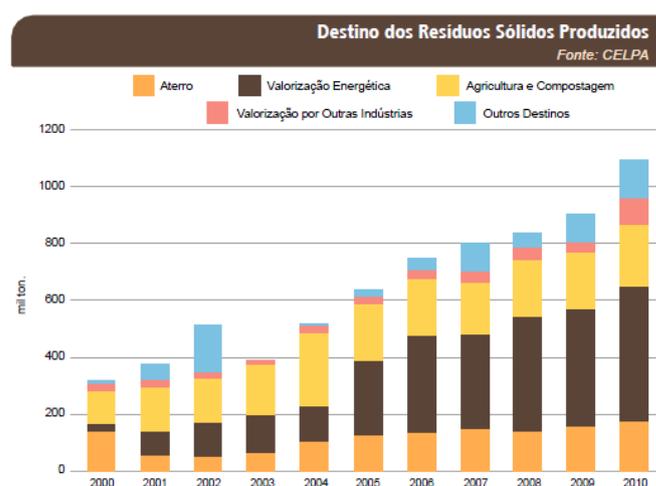


Fig.10 – Destino dos resíduos sólidos gerados na indústria papelreira [Fonte: (Celpa, 2010)]

1.2.3.2. Lamas de carbonato de cálcio

O processo de caustificação é o responsável pela obtenção de hidróxido de sódio (Soda Cáustica), principal produto químico utilizado no cozimento da madeira (*Kraft*).

Da dissolução do fundido da caldeira de recuperação química, resulta um licor verde (mistura de sulfeto de sódio e carbonato de sódio). O mesmo passa por um processo de

remoção de impurezas e, de seguida, é adicionada uma suspensão concentrada de hidróxido de cálcio, para caustificar o carbonato de sódio em hidróxido de sódio, produzindo um licor branco, segundo as reações seguintes [8]:

- Apagamento (Hidratação da cal): $CaO_{(s)} + H_2O \rightarrow Ca(OH)_{2(s)}$
- Caustificação: $Ca(OH)_{2(s)} + Na_2CO_{3(aq)} \rightarrow 2NaOH_{(aq)} + CaCO_{3(s)}$

A precipitação do cálcio em forma de carbonato de cálcio é denominada lama de carbonato de cálcio ($CaCO_{3(s)}$). Esta lama ao precipitar arrasta licor branco que é recuperado após lavagem. A lama de carbonato de cálcio é filtrada (origem do resíduo alvo de estudo) e conduzida ao processo de calcinação que ocorre em forno rotativo, denominado forno de cal.

1.2.3.3. Combustão em leito fluidizado

Associado ao processo de produção de pastas de papel, existem as caldeiras auxiliares, que utilizam normalmente a tecnologia de combustão em leito fluidizado. Este sistema resulta dum sistema de combustão em fornalha que contém um leito quente em suspensão de um material inerte, normalmente areia siliciosa. O ar primário, proveniente do fundo perfurado da câmara de combustão, entra na câmara em sentido ascendente ao leito de biomassa, sustentando as partículas e convertendo-o numa massa de partículas e bolhas. As condições necessárias a uma combustão completa estão assim asseguradas, através desta intensa transferência de calor e homogeneização do material, dentro da fornalha (Coelho, 2010; Loo e Koppejan, 2007).

1.2.3.4. Areias de leito fluidizado

O resíduo areias de leito fluidizado, igualmente alvo de estudo no âmbito desta dissertação, resulta tal como o nome indica, do sistema de combustão de biomassa em fornalhas de caldeiras de leito fluidizado. Este resíduo sendo constituído essencialmente por areias, é

também composto por produtos de combustão de dimensões superiores e cinzas e resulta da renovação de areias que constituem o processo.

1.2.4. Setor das vias e pavimentos rodoviários

A construção de vias de comunicação, particularmente as vias rodoviárias vem representando nos últimos anos, um dos principais domínios de investimento público do país. A rede rodoviária nacional representa a principal infraestrutura de transporte de pessoas e mercadorias, tratando-se por isso fundamental para o desenvolvimento sócio-económico do país (Branco et al., 2008).

A crescente quantidade de resíduos gerados e a prioridade de preocupações de carácter ambiental, tem vindo a potencializar estudos de viabilidade de aplicação destes resíduos no setor da construção civil (Modolo et al., 2010).

O setor das vias e pavimentos rodoviários assume assim particular destaque no sentido de canalização de resíduos, visto tratar-se de uma área onde as quantidades de agregados naturais necessários são elevadas e a possibilidade de substituição destes por resíduos está patente. Ao mesmo tempo, coloca-se a questão da utilização de materiais pétreos considerados nobres, com um custo de aquisição elevado, quando os mesmos podem ser substituídos por agregados alternativos que possibilitam características suficientes para atender aos requisitos exigidos (Silva, 2009).

Os pavimentos rodoviários traduzem-se em estruturas de materiais mais resistentes que o terreno natural depois de nivelado, capazes de suportar durante períodos significativos as ações dos agentes atmosféricos e as cargas do tráfego e de transmitir essas cargas degradadas ao terreno. Ao mesmo tempo, devem garantir uma superfície de rolamento que permita a circulação de veículos de uma forma cómoda e segura. Para tal, é fundamental que os materiais empregues na conceção do pavimento, ofereçam garantias de desempenho compatíveis com as condições para o qual foi concebido (Branco et al., 2008).

No dimensionamento de um pavimento são tidos em conta fundamentalmente, os seguintes parâmetros: intensidade de tráfego, tipo de tráfego (veículos ligeiros, pesados ou ambos),

velocidade máxima pretendida, materiais e clima predominante (Branco et al., 2008; Modolo, 2006). Mediante tais fatores é determinada a sua constituição, ou seja, número e espessura de camadas, materiais e suas características a empregar e as características da fundação a exigir (Branco et al., 2008).

Os pavimentos podem ser classificados em função dos materiais constituintes e da deformabilidade em pavimentos flexíveis (Figura 11-(b)), rígidos e semi-rígidos. Sendo que, o que fundamentalmente os diferencia é o facto de um pavimento flexível ser composto nas camadas superiores por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados (geralmente betume asfáltico), enquanto num pavimento rígido essas camadas são estabilizadas com ligantes hidráulicos (geralmente cimento Portland). Tanto num caso como no outro, sob as camadas supracitadas encontram-se uma ou duas camadas granulares (Branco et al., 2008). Na Figura 11-(a) apresenta-se um esquema de colocação em obra de misturas betuminosas.

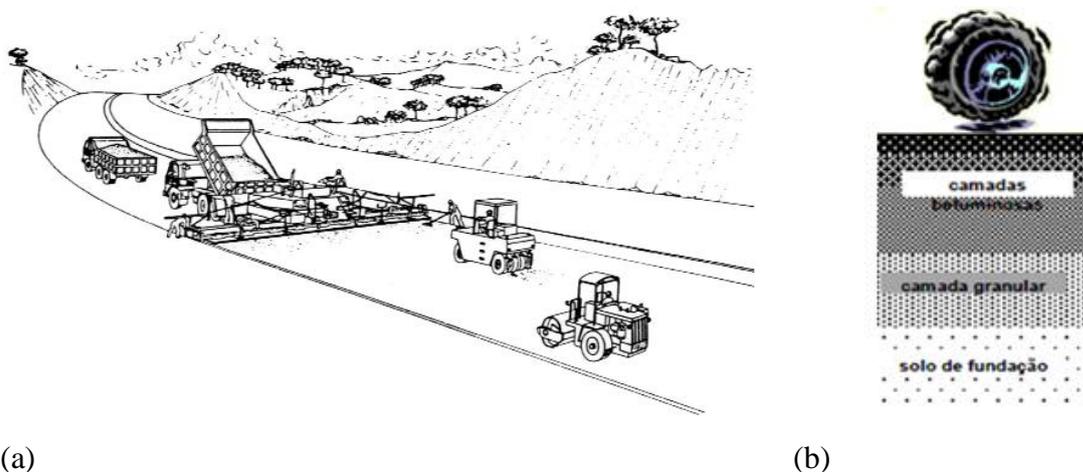


Fig.11 – (a) Esquema de colocação em obra de uma mistura betuminosa [Fonte: (Branco et al., 2008)]; (b) Esquema tipo de pavimento rodoviário flexível

Quanto aos pavimentos semi-rígidos, os mesmos apresentam características comuns aos dois anteriores, sendo então as camadas superiores constituídas por exemplo por duas camadas betuminosas e sob as mesmas, uma de betão (Branco et al., 2008).

De referir que a grande parte da rede rodoviária nacional, assim como praticamente em todo o mundo, é constituída essencialmente por pavimentos flexíveis, e tudo aponta para que esta tendência prevaleça no futuro (Branco et al., 2008).

1.2.4.1. Misturas betuminosas

As misturas betuminosas são, normalmente, produzidas a quente em central (contínua ou descontínua) e resultam da mistura de materiais granulares doseados de forma ponderal ou volumétrica e uma quantidade de ligante previamente determinada. Esta mistura betuminosa é transportada, espalhada e compactada constituindo uma camada de pavimento (Branco et al., 2008).

As misturas betuminosas apresentam as seguintes características gerais:

- Estabilidade: Consiste em obter uma mistura com a capacidade adequada para resistir às deformações produzidas pelas cargas a que fica sujeita em serviço. Depende, essencialmente, da fricção interna dos materiais e da sua coesão;
- Durabilidade: Pretende caracterizar a resistência à desintegração causada pelas solicitações climáticas e pelo tráfego. O betume pode sofrer oxidações ou perda de componentes por volatilização, enquanto o agregado pode sofrer danos devidos a ciclos de gelo/degelo;
- Flexibilidade: Capacidade para se adaptar gradualmente aos movimentos do seu suporte. Ocasionalmente, ocorrem assentamentos diferenciais dos aterros. Além disso, algumas zonas tendem a comprimir-se sob a ação do tráfego. Esses fenómenos devem ocorrer sem que haja fendilhamento do pavimento;
- Resistência à fadiga: Fenómeno originado pela passagem repetida de veículos que induzem nos materiais ligados extensões de tração constituídas por duas componentes: uma reversível (ou elástica) e outra irreversível. Uma mistura betuminosa resiste à fadiga tanto melhor quanto maior for a durabilidade (e, portanto, a percentagem em betume);
- Aderência: As superfícies dos pavimentos devem apresentar boas características de aderência. Para tal, é conveniente não utilizar betume em excesso, para que este não exsude. É também importante escolher agregados com textura superficial rugosa e que tenham boa resistência ao desgaste, de modo a manterem essa rugosidade;
- Impermeabilidade: Deve existir uma boa resistência à passagem da água e do ar através das camadas do pavimento. Normalmente, a quantidade de vazios é uma boa indicação da impermeabilidade embora a interligação dos vazios e o seu contacto com a superfície do pavimento tenham maior importância na sua aferição;

- **Trabalhabilidade:** É fundamental que as misturas betuminosas possam ser colocadas e compactadas com facilidade. Tal facto está normalmente assegurado garantindo o respeito pelas regras de operação dos equipamentos e a correta formulação da mistura.

As misturas betuminosas são constituídas essencialmente por agregados, ligante e ar. Uma vez que os resíduos serão testados em misturas betuminosas em substituição de agregados, os mesmos serão alvo de estudo, no sentido de melhor perceber qual dos diferentes agregados que constituem uma mistura betuminosa deverá ser substituído, mediante o resíduo em estudo (escórias, areias de leito fluidizado ou lamas de carbonato de cálcio).

Os agregados formam o esqueleto pétreo das misturas betuminosas, correspondendo geralmente a valores entre 90 a 95% do seu peso ou 75% a 85% do seu volume e têm como principal função resistir às ações do tráfego. A sua resistência advém do imbricamento dos grãos entre si. Os agregados podem classificar-se em naturais (materiais sedimentares de origem aluvionar) e britados obtidos por fratura mecânica de rochas (Branco et al., 2008).

Os vários tipos de agregados utilizados nas misturas betuminosas são: brita quando o diâmetro equivalente está compreendido entre 30 e 150 mm, murraça para diâmetros de 15 a 30 mm, gravilha quando material granular cujas partículas apresentam um diâmetro equivalente de 5 a 15 mm, agregado fino ou pó-de-pedra (em Portugal geralmente de origem calcária) cujo diâmetro equivalente é igual ou inferior a 5 mm. Partículas com diâmetro equivalente, inferior a 0,063 mm são denominadas fíler (Branco et al., 2008).

Os agregados supracitados são aglutinados com recurso à adição de um ligante betuminoso, sendo que atualmente em trabalhos de pavimentação rodoviária, praticamente apenas se usam produtos derivados da destilação do petróleo bruto, os betumes asfálticos (Branco et al., 2008).

O betume é um aglutinante betuminoso obtido a partir da destilação do petróleo bruto (mistura de hidrocarbonetos). O betume asfáltico encontra-se em solução no petróleo e é obtido após a eliminação dos óleos que servem de solventes (Branco et al., 2008).

Devido à estrutura e dimensão do fíler, quando misturado com o ligante betuminoso confunde-se com este, formando um meio contínuo viscoso, denominado por mastique

betuminoso. Esta mistura envolve e aglutina os agregados mais grossos das misturas betuminosas, preenchendo além disso os vazios existentes no esqueleto mineral de modo a garantir compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas betuminosas (Silva, 2005). A ligação agregado-mastique depende fundamentalmente da natureza dos agregados. No entanto, os principais fatores que influenciam a ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas em serviço são o envelhecimento e a presença de água (Silva, 2005).

As camadas superiores que constituem um pavimento flexível distinguem-se entre si, principalmente, pelas proporções dos componentes misturados e respectivas propriedades, sendo exemplos vulgares destes tipos de misturas betuminosas produzidas a quente, as seguintes (Branco et al., 2008):

- Macadame por Penetração e Semi-Penetração Betuminosa para Camada de Regularização/Base;
- Macadame Betuminoso para Camada de Base e Regularização;
- Mistura Betuminosa de Alto Módulo para Camada de Base;
- Mistura Betuminosa Densa para Camada de Regularização;
- Argamassa Betuminosa para Camada de Regularização;
- Betão Betuminoso com Características de Regularização, subjacente a Camada de Betão Betuminoso Drenante ou Camada Delgada de Desgaste;
- Betão Betuminoso com Características de Desgaste, na Faixa de Rodagem;
- Betão Betuminoso Drenante com Características de Desgaste, na Faixa de Rodagem;
- Micro-Betão Betuminoso Rugoso para Camadas de Desgaste Delgadas.

Neste trabalho, optou-se por estudar a viabilidade de incorporação dos resíduos numa mistura betuminosa referente à camada de base, ligação ou regularização, tendo em vista as vantagens da sua localização estrutural. A mesma não se encontrará portanto, sujeita às ações climáticas, nem às exigências específicas da camada superior, uma vez que se encontrará entre a camada de desgaste e as camadas de base granular. Usada tanto em camada de base como ligação ou regularização, o Macadame Betuminoso Fuso A ou AC 20 (MB), devido à sua posição estrutural e características dos seus agregados, assume-se como favorável à aplicação dos resíduos alvo de estudo.

O Caderno de Encargos Tipo Obras 2009 da (EP - Estradas de Portugal, 2009), evidencia como características principais desta mistura, recomendada para espessuras entre 5 e 9 mm, uma granulometria do tipo 0/20 (20mm é a máxima dimensão do agregado), o fuso granulométrico apresentado na Tabela 1, Quociente Marshall superior a 2 (razão entre força de rotura e deformação), relação ponderal Fíler/Betume entre 1,1 e 1,5 e percentagem de ligante mínima de 3,5% sendo que geralmente esta percentagem se situa entre 4,0% e 4,5%.

Tabela 1 – Fuso granulométrico para Macadame Betuminoso Fuso A ou AC 20 (MB)

Dimensão nominal da abertura das malhas dos peneiros (mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)
31,5	100
20	90 - 100
12,5	57 - 86
4 (peneiro extra - opcional)	34 - 49
2	26 - 41
0,500	12 - 26
0,125 (peneiro extra - opcional)	4 - 14
0,063	2 - 7

1.2.4.3. Incorporação de resíduos no setor

Tendo em conta a conjuntura atual de estagnação ou reduzido investimento público neste setor, perfilam-se todas as medidas que resultarem em minimização de custos, como prioritárias. Este panorama justifica o estudo de soluções de pavimentação de menor custo e que ao mesmo tempo garantam as exigências de desempenho às ações solicitadas pelos agentes atmosféricos e pelo tráfego.

A reutilização de resíduos é importante na medida em que é evitada a exploração de recursos do meio ambiente, assim como evita a poluição do mesmo. Além disso, os aterros sanitários, locais de deposição de resíduos, são cada vez mais escassos ao mesmo tempo

que legislação apertada e imposição de taxas, levam a que a deposição nestes locais seja cada vez menos desejável. Assim, a possibilidade de substituição de agregados naturais por resíduos, é cada vez mais uma solução de valorização económica e ambiental.

Vários estudos foram já publicados sobre o uso de resíduos em pavimentos, sendo que muitos já atingiram resultados bastante satisfatórios, tanto no aspeto económico, como técnico, além de se tratar de um destino alternativo para esse material, evitando a sua deposição em aterros e ao mesmo tempo preservando fontes naturais. Exemplos destes estudos são: escórias provenientes da incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (Lopes, 2010), cinzas de combustíveis sólidos resultantes do sistema de combustão em Leito Fluidizado Circulante (CFB) (Jackson et al., 2009), resíduos de pedra-pomes (Saltan e Selcan Findik, 2008), de vidro, resíduos resultantes da produção de aço, pneus e plásticos (Huang et al., 2007), resíduos de pedra de mármore (Akbulut e Güreer, 2007), resíduos da produção de pasta de papel (Modolo, 2006; Modolo et al., 2010), agregados rochosos constituídos por quartzo e grauvaque (resíduos de minas) (Almeida et al.), fibras de polipropileno (Serkan, 2008), escórias provenientes da incineração de R.S.U. (Lopes, 2010; Reis-de-Barros e Lopes, 2002), sendo que também em cimento e argamassas já foram inseridos resíduos (Coutinho e Garcia, 2008; Rajama et al., 2008).

Lopes (Lopes, 2010) estudou a viabilidade de aplicação de escórias resultantes da incineração de R.S.U., provenientes de uma unidade industrial da Região Autónoma da Madeira, em camadas betuminosas de baixa exigência. Neste estudo, as escórias não substituem um tipo de agregado em particular, mas sim várias frações granulométricas dos diferentes agregados que constituem a mistura betuminosa, de modo a que o fuso granulométrico seja respeitado. Esta aplicação demonstrou um desempenho satisfatório dos provetes, melhorando significativamente a estabilidade e diminuindo a porosidade. Ainda de referir, o facto das escórias em estudo não sofrerem qualquer tipo de transformação, evitando assim custos adicionais com a preparação da matéria-prima.

Jackson et al. (Jackson et al., 2009) avaliaram a viabilidade de aplicação de cinzas volantes e de fundo, resultantes da combustão de sólidos em caldeira de leito fluidizado circulante em pavimentos. Foram efetuados ensaios de laboratório e de campo em Jacksonville (Florida), que demonstraram o uso benéfico destes resíduos na estabilização de leitos de pavimento e camadas de base.

Outros autores (Saltan e Selcan Findik, 2008) estudaram a viabilidade de utilização de pedra-pomes resultante de erupções vulcânicas do tipo explosivas na Turquia, como material para a camada de sub-base de pavimentos flexíveis. Esta pesquisa testemunha que este material reúne as condições exigidas para ser empregue na camada em causa, para qualquer tipo de via rodoviária.

Huang et al. (Huang et al., 2007) efetuaram estudos de viabilidade de aplicação de resíduos sólidos remanescentes de processos industriais no Reino Unido, tais como: resíduos de vidro, escória resultantes da produção de aço, pneus e plásticos em camadas superficiais de pavimentos flexíveis, concretamente em camada de regularização. Este estudo permitiu verificar que geralmente a utilização de borracha de pneus e plásticos em misturas betuminosas, resulta no aumento da resistência à fadiga, desempenho, durabilidade e comportamento acústico de um pavimento flexível. A elevada densidade das escórias remanescentes da produção de aço, implica um elevado custo de transporte, o que poderá inviabilizar a valorização destes resíduos na incorporação de misturas betuminosas. Os resíduos de vidro revelaram-se não aplicáveis na camada de regularização.

Akbulut e Gurer (Akbulut e Gürer, 2007) estudaram a viabilidade de aplicação de resíduos de mármore provenientes de pedreiras de mármore em Afyonkarahisar (Turquia), em misturas betuminosas de pavimentos flexíveis. Os ensaios efetuados indicaram que as características dos agregados estão dentro dos limites especificados e que os mesmos podem ser usados em pavimentos para tráfegos leves a médios em camadas de regularização.

Serkan (Serkan, 2008) estudou o efeito de fibras de polipropileno no desempenho de misturas betuminosas. Para tal, foram concebidas diferentes misturas betuminosas no seu teor ótimo de betume, às quais foram adicionadas estas fibras. Este estudo determinou que a incorporação de fibras de polipropileno melhora o comportamento à fadiga, reduzindo a suscetibilidade a fissuras, aumentando assim o tempo de vida do pavimento. Face aos resultados obtidos, conclui-se que a aplicação de fibras de polipropileno altera as características da mistura betuminosa, de forma benéfica.

Modolo et al. (Modolo, 2006; Modolo et al., 2010) estudaram a viabilidade de aplicação de resíduos inorgânicos resultantes da produção de pasta e papel, concretamente Grits e Dregs, em misturas betuminosas. Para tal, estes resíduos foram caracterizados química e

fisicamente e testados segundo os requisitos para agregados convencionais em pavimentos rodoviários. Posteriormente, foram efetuadas formulações substituindo os agregados por resíduos em diferentes proporções. As propriedades mecânicas dessas misturas contendo resíduos, foram comparadas com amostras base por métodos normalizados. Os resultados dos ensaios determinaram que os Grits apresentam um bom desempenho e podem ser testados industrialmente como um agregado na construção de estradas, em substituição do pó-de-pedra calcária. Por outro lado, os Dregs apresentam sais solúveis, logo necessitam de tratamento prévio antes da sua incorporação, no sentido de garantir a estabilidade da mistura em termos de sensibilidade à água. Este tratamento torna o resíduo mais fino e mais compatível com o convencional Fíler. Além deste facto, apenas garantem resultados admissíveis quando incorporados em baixas percentagens.

Outros autores (Almeida et al.) estudaram o desenvolvimento de uma mistura betuminosa produzida com emulsão e utilizando apenas resíduos das minas da Panasqueira (agregados rochosos que se produzem durante a extração de volfrâmio, constituídos, essencialmente, por quartzo e grauvaque), em pavimentos de tráfego leve. O facto de existirem arruamentos, estradas e caminhos municipais por pavimentar, devido principalmente à falta de recursos financeiros, resulta numa problemática verificada no município da Covilhã e que se reproduz em muitas outras regiões do país. Tratam-se, essencialmente, de acessibilidades com tráfego reduzido e que normalmente servem pequenos núcleos populacionais. Este panorama justifica o estudo de soluções de pavimentação de menor custo e que ao mesmo tempo garantam as exigências do tráfego reduzido. A utilização combinada de resíduos das minas em substituição dos agregados e da tecnologia a frio, torna ainda a mistura mais atrativa do ponto de vista de economia energética e ambiental. Tratando-se de uma mistura aberta (drenante), revela-se adequada para zonas rurais e florestais além de apresentar um custo, por tonelada, muito inferior ao de uma mistura produzida com agregados naturais ou a quente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após efetuada a recolha das matérias-primas e resíduos, o trabalho experimental incidiu sobre a determinação dos parâmetros mais importantes, tendo em vista a caracterização dos mesmos. Esta caracterização é fundamental na elaboração das formulações de misturas betuminosas com incorporação de resíduos, a desenvolver no âmbito desta dissertação.

Posteriormente procedeu-se ao fabrico de provetes respetivos às formulações estabelecidas, que viriam a ser testados e confrontados com uma mistura referência, constituída exclusivamente por agregados naturais, ou seja, desprovida de resíduos.

Os ensaios foram realizados com base em procedimentos normalizados, de acordo com as normas em vigor.

2.1. RECOLHA DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os resíduos utilizados são provenientes de uma central termoelétrica no caso das cinzas de fundo (Escórias) e de uma fábrica de pasta e papel, no caso das lamas de carbonato de cálcio (LCC) e areias de leito fluidizado (ALF). A recolha dos mesmos foi realizada nos locais respetivos à sua origem, sendo de seguida armazenados em sacos plásticos até à sua utilização.

O pó-de-pedra calcária, o fíler e o betume, utilizados na preparação dos provetes de misturas betuminosas, foram cedidos pela empresa Vitor Almeida & Filhos, S.A., cuja atividade está ligada ao setor das obras públicas, atuando em diferentes áreas, nomeadamente obras de terraplenagens, pavimentação e urbanização.

O fíler usado resulta em processo de fabrico de misturas betuminosas, por recuperação dos finos por meio de sistemas adequados, tratando-se de um fíler recuperado. A natureza petrográfica do fíler em causa, é a mesma que a dos agregados utilizados no fabrico das misturas betuminosas que lhe deram origem, tratando-se neste caso de um fíler calcário.

O tipo de betume (aglutinante betuminoso obtido a partir da destilação de petróleo bruto) usado corresponde a um 50/70. Esta designação baseia-se no valor da penetração à temperatura de 25°C (Branco et al., 2008).

Por último as Britas 1 e 2, fornecidas pela empresa “A. Ângelo Seixas & Filhos, Lda. – Materiais de Construção”, sediada na Zona Industrial de Taboeira, distrito de Aveiro, encontravam-se devidamente armazenadas em contentores destinados a esse fim, no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

2.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E TÉCNICAS UTILIZADAS

A determinação de parâmetros de caracterização respetivos às matérias-primas (incluindo resíduos) revela-se fundamental, uma vez que o conhecimento das características físicas, químicas e geométricas influencia a gestão dos processos para conceber misturas betuminosas com incorporação de resíduos. Para tal, procedeu-se à caracterização física (análise granulométrica, grau de impurezas, massa volúmica) e composicional (análise mineralógica, química e comportamento térmico) dos resíduos, enquanto para os agregados naturais apenas se procedeu à caracterização física, uma vez que as características composicionais dos agregados convencionais não são significativamente variáveis.

Alguns ensaios de caracterização física não foram realizados devido à composição e morfologia dos resíduos, tais como índice de forma e achatamento, resistência à fragmentação – coeficiente de Los Angeles e resistência ao desgaste – coeficiente micro-Deval.

Para a formulação de misturas betuminosas, foram definidos os ensaios de caracterização mais apropriados, em função do tipo de mistura pretendida e das condições específicas em que a mistura betuminosa iria funcionar em serviço.

2.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica visa a determinação da percentagem em peso, relativa a cada fração que fica retida para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanhos de grãos, em relação à massa total da amostra em análise, ou seja, a massa total retida em cada peneiro numa sucessão decrescente de peneiros, é expressa em percentagem da massa total.

A importância da análise granulométrica está diretamente relacionada com o facto do comportamento das matérias-primas, ser altamente dependente da forma e das dimensões das partículas. A curva granulométrica relaciona então, a percentagem do material passado em cada peneiro, com o logaritmo da abertura do peneiro.

Previamente à análise granulométrica, procedeu-se à secagem das matérias-primas em estufa a 105°C, no sentido de eliminar a humidade, evitando assim a agregação das partículas finas. As LCC são obtidas com aproximadamente 35% de humidade, logo a sua perda de massa após secagem é significativa, devendo este facto ser tido em conta. Em relação às ALF, este resíduo teve como tratamento prévio a eliminação do material retido acima do peneiro de 19mm, de modo a cumprir a imposição da maior dimensão do agregado a incorporar na mistura pretendida. Todos os outros resíduos e agregados naturais foram incorporados com as dimensões com que são obtidos.

A análise granulométrica foi então efetuada por peneiração, segundo as normas NP EN 933-1, NP EN 933-2 e NP EN 13043 e recorrendo à seguinte série de peneiros de malha quadrada em milímetros: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; e 31,5 (Figura 12).

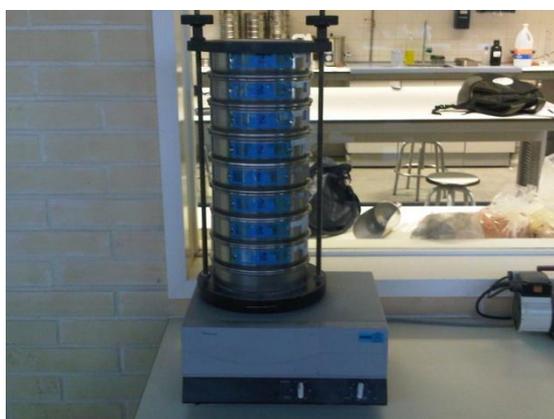


Fig.12 – Série de peneiros utilizada em mesa de agitação para análise granulométrica

Devido ao facto de não existirem no laboratório da Universidade de Aveiro os peneiros 20 e 12,5 mm, indicados pelo Caderno de Encargos Tipo Obras 2009 da (EP - Estradas de Portugal, 2009) para fabrico da mistura betuminosa pretendida (Macadame Betuminoso Fuso A) e atendendo a que a série de peneiros disponível, dispunha de peneiros com aberturas intermédias entre os peneiros recomendados para a mistura mencionada, optou-se pelo recurso a um processo de interpolação, de modo a obter as percentagens de material passado para os peneiros de aberturas 16, 8, 1 e 0,250 mm, conforme indicado a negrito na Tabela 2. Este processo permitiu a incorporação da série de peneiros disponíveis em laboratório, garantindo ao mesmo tempo que as misturas a fabricar respeitassem o fuso granulométrico preconizado pelo Caderno de Encargos Tipo Obras 2009 para a mistura pretendida (Figura 13).

Tabela 2 – Fuso granulométrico para Macadame Betuminoso Fuso A com incorporação de peneiros respetivos à série de peneiros disponível

Dimensão nominal das aberturas dos peneiros (mm)	Fuso Adotado	
	Fuso Inferior	Fuso Superior
31.5	100 %	100 %
20.0	90 %	100 %
16.0	72 %	93 %
12.5	57 %	86 %
8.0	45 %	66 %
4.0	34 %	49 %
2.0	26 %	41 %
1.0	17 %	31 %
0.500	12 %	26 %
0.250	7 %	18 %
0.125	4 %	14 %
0.063	2 %	7 %

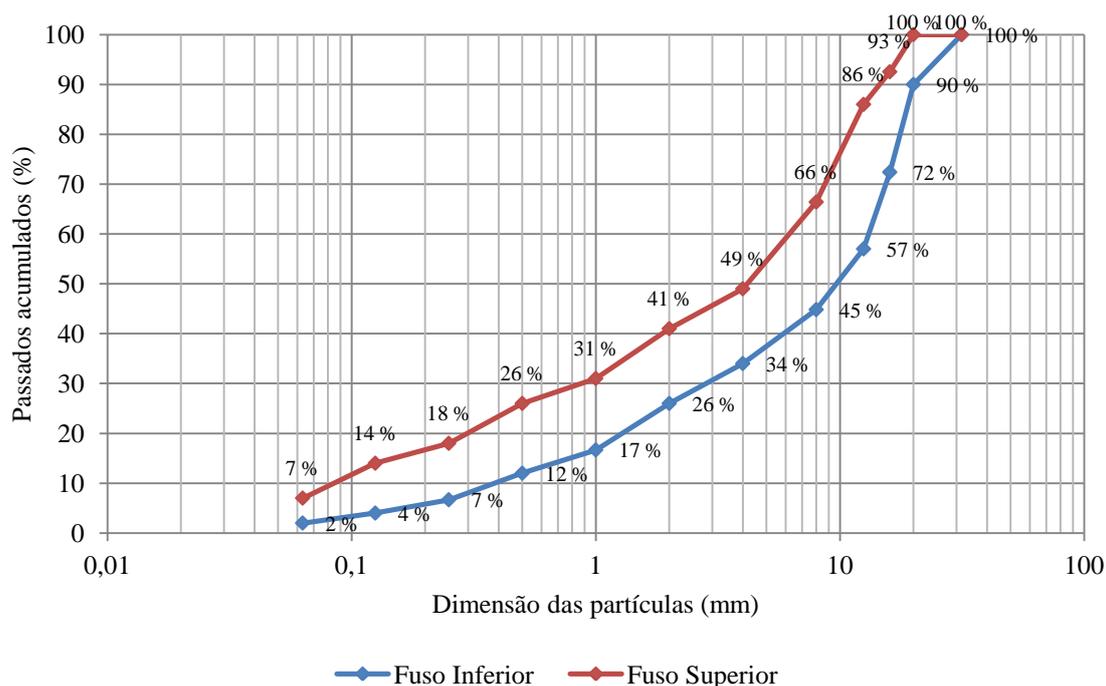


Fig.13 – Fusão granulométrica para Macadame Betuminoso Fusão A com incorporação da série de peneiros disponível

O cálculo efetuado para a obtenção da percentagem cumulativa do material passado, é dado por:

$$\% \text{ Material Retido} = 100 - \left(\frac{R_i}{M_i} \times 100 \right) \quad (1)$$

em que:

R_i é a massa do material retido em cada peneiro de ensaio;

M_i é a massa seca total da amostra.

2.2.2. Grau de impurezas

Segundo as diretrizes das normas NP EN 933-9/2002 e NP EN 933-8 de 2002 recorrendo ao ensaio de azul-de-metileno e ao ensaio de equivalente de areia respetivamente, determinou-se o grau de impurezas das matérias-primas, de modo a verificar se as mesmas apresentam sensibilidade à água.

O ensaio de determinação do teor equivalente de areia (EA) consiste em avaliar a quantidade de matéria muito fina associada a materiais mais grosseiros permitindo assim definir com rapidez se um agregado está ou não limpo.

O mesmo consiste em colocar numa proveta cilíndrica 120 g de uma amostra de granulometria 0/2 mm, juntamente com solução flocculante. Após agitação da mistura, é adicionada mais solução flocculante deixando-se de seguida a proveta cilíndrica em repouso durante 20 minutos. O material mais grosso deposita-se rapidamente, enquanto o material fino fica em suspensão durante muito tempo (Figura 14).



Fig.14 – Ensaio de determinação do teor equivalente de areia (EA)

O teor equivalente de areia é determinado pela altura do material grosseiro depositado (h_2) expresso como percentagem da altura total do material flocculado (h_1) na proveta cilíndrica, conforme a Figura 15 e segundo a equação seguinte:

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (2)$$

O ensaio é realizado sobre duas amostras do mesmo material em simultâneo, sendo que o valor final resulta da média dos resultados obtidos em cada proveta.

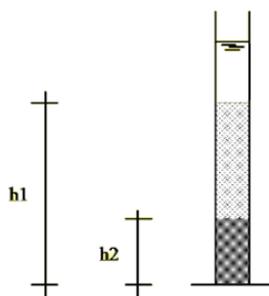


Fig.15 – Medição de h_1 e h_2 na determinação do valor de equivalente de areia (EA)

O valor de adsorção de azul-de-metileno (VBS) de um agregado, consiste num ensaio de adsorção de azul-de-metileno pelo método da mancha, em partículas passadas no peneiro 0,075 mm (Figura 16). O mesmo traduz-se num valor que define de forma eficaz, a maior ou menor sensibilidade à água (grau de limpeza ou existência de materiais sensíveis à água no agregado). Trata-se portanto, de um ensaio importante na determinação da percentagem de material fino ou orgânico em determinado material. Este valor é determinado pela introdução de quantidades crescentes de solução de azul-de-metileno, numa preparação com o agregado a ensaiar, em doses sucessivas até que esteja coberta a superfície das partículas desse material com capacidade de adsorção.

O ensaio de azul-de-metileno mede então a superfície da fração argilosa ativa que depende da natureza do argilo-mineral presente no material. A quantidade total de azul-de-metileno adsorvida pela mistura corresponde assim, à soma das quantidades de azul-de-metileno consumidas.

A adsorção da solução corante pelo provete, após a adição de cada porção de azul-de-metileno, é verificada pela existência de manchas num papel de filtro, onde a presença de corante livre é detetada na forma de auréola azul clara (Figura 16). O significado da presença da auréola traduz-se na existência de azul-de-metileno livre na preparação, ou seja, todas as partículas suscetíveis de adsorverem azul-de-metileno estão cobertas.



Fig.16 – Ensaio de determinação do valor de azul-de-metileno (VBS) com respetiva apresentação da mancha de suspensão em papel de filtro com a presença de auréola azul, indicadora da presença de azul-de-metileno em excesso

Após verificada a presença de corante livre, o VBS é calculado através da equação seguinte:

$$VBS = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (3)$$

em que:

M_1 é a massa do provete (200 g de fração 0/2 mm);

V_1 é o volume total de solução corante adicionado, em mililitros (ml).

Segundo o regulamento francês para construção de aterros e leito de pavimento (SETRA/LCPC, 1992), o VBS exprime-se em gramas de azul-de-metileno por 100 gramas de solo e apresenta os limites considerados na Tabela A.II do Anexo II, que permitem distinguir a plasticidade de solos argilosos e siltosos, considerando a sua sensibilidade à água.

2.2.3. Massa volúmica

O presente ensaio foi realizado com base nas diretrizes dispostas na norma NP EN 1097-6 de 2003, pretendendo-se com o mesmo determinar a massa volúmica dos agregados e resíduos, ou seja, o quociente da massa do agregado pelo volume por este ocupado.

A massa é determinada pela pesagem do provete após secagem em estufa, enquanto o volume é determinado a partir do peso de volume de água deslocado pelas partículas secas num picnómetro de volume conhecido (Figura 17). A massa volúmica (ρ) é calculada pela equação seguinte:

$$\rho = \frac{(M_2 - M_1)}{[V - (M_3 - M_2)]/\rho_w} \quad (4)$$

em que:

M_1 é a massa do picnómetro e funil, em (g);

M_2 é a massa do picnómetro, funil e provete elementar, em (g);

M_3 é a massa do picnómetro, funil, provete elementar e água, em (g);

V é o volume do picnómetro, em (mL);

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em megagramas por metro cúbico (Mg/m^3).



Fig.17 – Determinação da massa volúmica pelo método do picnómetro

2.2.4. Análise mineralógica

As fases cristalinas presentes nas Escórias, ALF e LCC foram determinadas por difração de raios-X (DRX), recorrendo a um difractómetro *Rigaku* “Geigerflex” *D/max-Série C*, em ensaios realizados com recurso a radiação $K\alpha$ de um eléctrodo de cobre (Cu) monocromatizada por filtro de níquel (Ni). Os ensaios foram efetuados com amostras em pó, resultantes de moagem manual com almofariz e pilão (Figura 18).



Fig.18 – Obtenção das amostras de resíduos para determinação de fases cristalinas

2.2.5. Análise química

Os resíduos em estudo foram sujeitos a caracterização química por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), uma técnica considerada indicada para a determinação de óxidos e elementos metálicos em amostras sólidas.

Os ensaios foram efetuados com amostras em pó, resultantes de moagem manual com almofariz e pilão e posterior moagem com moinho de discos, sendo preparada uma amostra de aproximadamente 5 g de cada resíduo, que foi prensada a frio na forma de pastilhas. Posteriormente, utilizou-se um espectrómetro (Panalytical Axios Spectrometer) por radiação Rh K α , cujos resultados obtidos são expressos em percentagem de óxidos.

2.2.6. Análise do comportamento térmico dos resíduos

O comportamento térmico dos resíduos foi caracterizado através de análise térmica gravimétrica (ATG) e análise térmica diferencial (ATD). A termogravimetria consiste na medição de variações de massa da amostra em função da temperatura, quando esta é sujeita a um ciclo de aquecimento ou arrefecimento controlado. A análise térmica diferencial mede a variação de energia do sistema quando ocorrem mudanças de fase, durante o processo térmico.

Para tal, utilizou-se um equipamento SETARAM LabsysTM TG-DSC16, ao ar, com uma velocidade de aquecimento de 10°C/min até 1200°C, objetivando a avaliação das transformações que ocorrem durante o tratamento térmico dos resíduos.

2.3. FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

A formulação das misturas betuminosas a quente produzidas no âmbito desta dissertação seguiu os trâmites do método empírico de Marshall (Norma portuguesa NP-142).

Previamente a qualquer estudo de composição, é imperioso que se misturem várias frações de agregado, finos e grossos, produzindo um material granular cuja curva granulométrica

se encontre dentro do fuso especificado pelo Caderno de Encargos Tipo Obras 2009 da (EP - Estradas de Portugal, 2009) para a mistura betuminosa pretendida, designadamente Macadame Betuminoso Fuso A ou AC 20 (MB).

Para tal, proporções adequadas de cada fração de agregado ou resíduo, foram misturadas de modo a encontrar uma combinação que resultasse num ajuste, tão bom quanto possível, da curva de estudo ao fuso imposto pela mistura betuminosa a fabricar. Utilizou-se um processo por tentativas para o estudo da composição dos agregados, cujo somatório das proporções correspondesse a 100% respeitando tanto quanto possível que a parte grossa e a parte fina se aproximem de 50%.

Após definida a curva granulométrica da mistura iniciou-se o estudo Marshall. O método em causa, apesar de apenas permitir avaliar, genericamente, o comportamento da mistura betuminosa, trata-se ainda hoje do método mais usado, tanto em Portugal como no mundo, para a formulação de misturas betuminosas (Silva, 2005).

Estabelecido por Bruce Marshall durante a II Guerra Mundial, o método de formulação Marshall foi sujeito a melhoramentos em 1948 pelo U.S. Army Corps of Engineers, dando origem à norma portuguesa NP-142 (Branco et al., 2008; Silva, 2005).

Segundo a NP-142, o método aplica-se a misturas betuminosas a quente, densas ou abertas, utilizadas em qualquer tipo de camada, desde que a dimensão máxima do agregado não seja superior a 25,4 mm (Branco et al., 2008).

Com base no fuso granulométrico respetivo à mistura betuminosa AC 20 (MB), efetuaram-se várias formulações de misturas betuminosas incluindo incorporação de resíduos, quer fazendo variar diferentes percentagens de um resíduo isoladamente, quer de forma conjugada, incorporando percentagens de dois ou três dos resíduos em estudo, à exceção de uma formulação referência, composta unicamente por agregados naturais, conforme demonstrado na Tabela 3. Para cada uma das formulações, foram produzidos 4 provetes com uma massa de 1200g incluindo betume, ou seja, mais uma unidade que o mínimo exigido segundo as diretrizes da norma NP-142. Esta opção vai de acordo com o exigido em alguns cadernos de encargos e ainda permitiria a rejeição de um dos provetes que revelasse validade dúbia.

Após alguns ensaios produzindo provetes de AC 20 (MB) sem resíduos, com 5,0%, 4,5% e 4,0% de betume, verificou-se que a última percentagem referida (4%) era a que melhor se adaptava às formulações. A decisão resultou da perceção visual de exsudação de betume nos provetes produzidos com percentagem de betume superior a 4,0%. De referir que a adoção de 4,0% de betume respeita a relação ponderal Fíler/Betume, que se deve estabelecer entre 1,1 e 1,5 e os 3,5% de percentagem mínima de betume para a mistura betuminosa AC 20 (MB).

As Figuras 19, 20 e 21 apresentadas de seguida, apresentam respetivamente a distribuição granulométrica das formulações betuminosas das Escórias, ALF e LCC como resíduos incorporados de forma isolada mas em diferentes percentagens. A Figura 22 apresenta a distribuição granulométrica das formulações betuminosas que incluem resíduos de forma conjugada.

Em todos os gráficos apresentados e tal como é demonstrado, as misturas betuminosas respeitam os limites inferior e superior do fuso granulométrico imposto para a mistura betuminosa pretendida e em todos eles, de igual modo, é apresentada a curva da mistura betuminosa de referência, mistura essa que, tal como já referido, apenas é constituída por agregados naturais.

Tabela 3 – Formulação de misturas betuminosas

Amostra	Massa (g)							
	Betume	Brita 2	Brita 1	Pó-de-Pedra Calcária	Fíler	Escórias	ALF	LCC
Referência (sem resíduos)	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	495 (43%)	58 (5%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
5% Escórias	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	438 (38%)	58 (5%)	58 (5%)	0 (0%)	0 (0%)
10% Escórias	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	380 (33%)	58 (5%)	115 (10%)	0 (0%)	0 (0%)
20% Escórias	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	265 (23%)	58 (5%)	230 (20%)	0 (0%)	0 (0%)
5% ALF	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	438 (38%)	58 (5%)	0 (0%)	58 (5%)	0 (0%)
10% ALF	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	380 (33%)	58 (5%)	0 (0%)	115 (10%)	0 (0%)
20% ALF	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	265 (23%)	58 (5%)	0 (0%)	230 (20%)	0 (0%)
1% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	495 (43%)	46 (4%)	0 (0%)	0 (0%)	12 (1%)
3% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	495 (43%)	23 (2%)	0 (0%)	0 (0%)	35 (3%)
5% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	495 (43%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	58 (5%)
10% Escórias + 1% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	380 (33%)	46 (4%)	115 (10%)	0 (0%)	12 (1%)
10% ALF + 1% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	380 (33%)	46 (4%)	0 (0%)	115 (10%)	12 (1%)
10% E + 10% ALF + 1% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	265 (33%)	46 (4%)	115 (10%)	115 (10%)	12 (1%)
10% E + 10% ALF + 3% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	265 (33%)	23 (2%)	115 (10%)	115 (10%)	35 (3%)
10% E + 10% ALF + 5% LCC	48 (4%)	311 (27%)	288 (25%)	265 (33%)	0 (0%)	115 (10%)	115 (10%)	58 (5%)

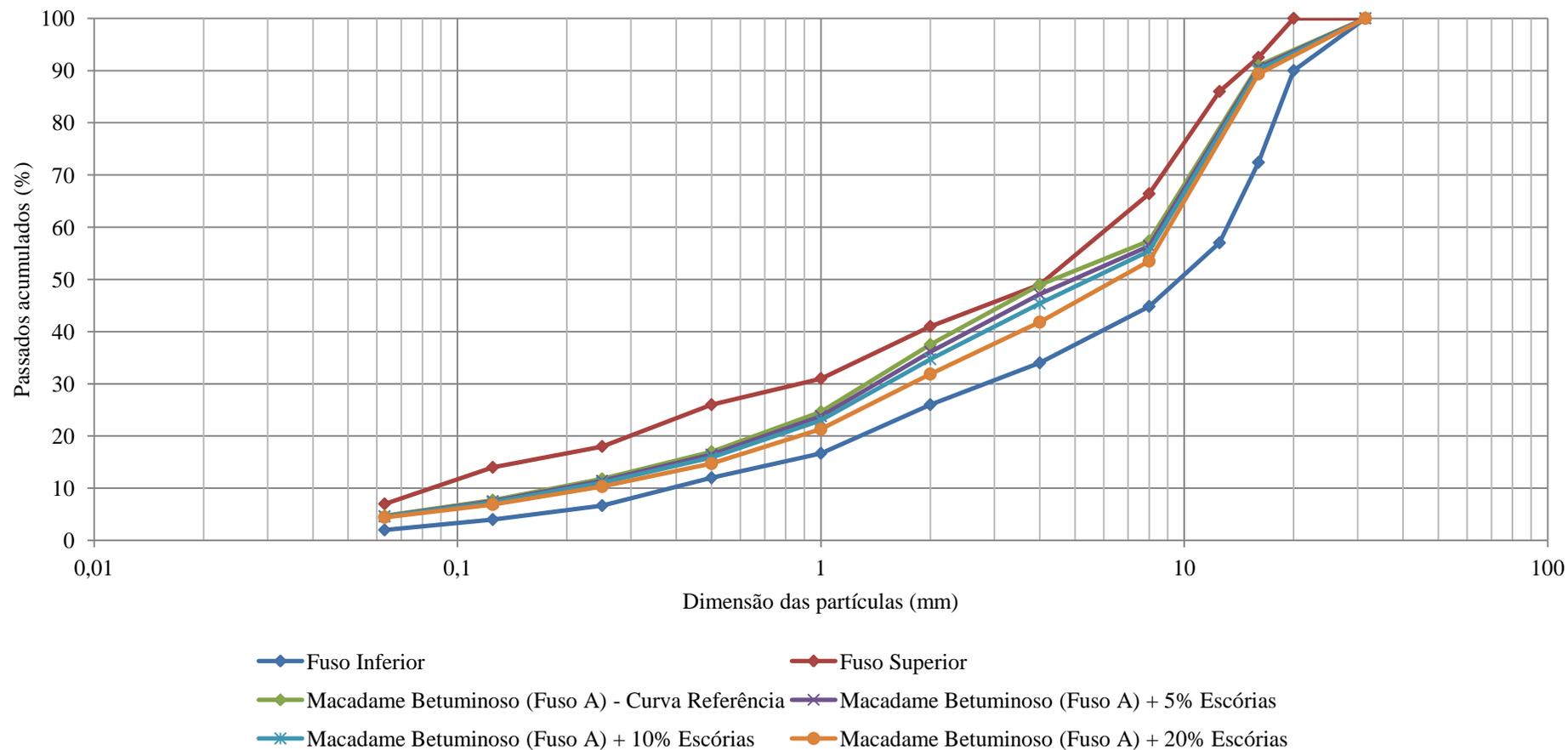


Fig.19 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de Escórias

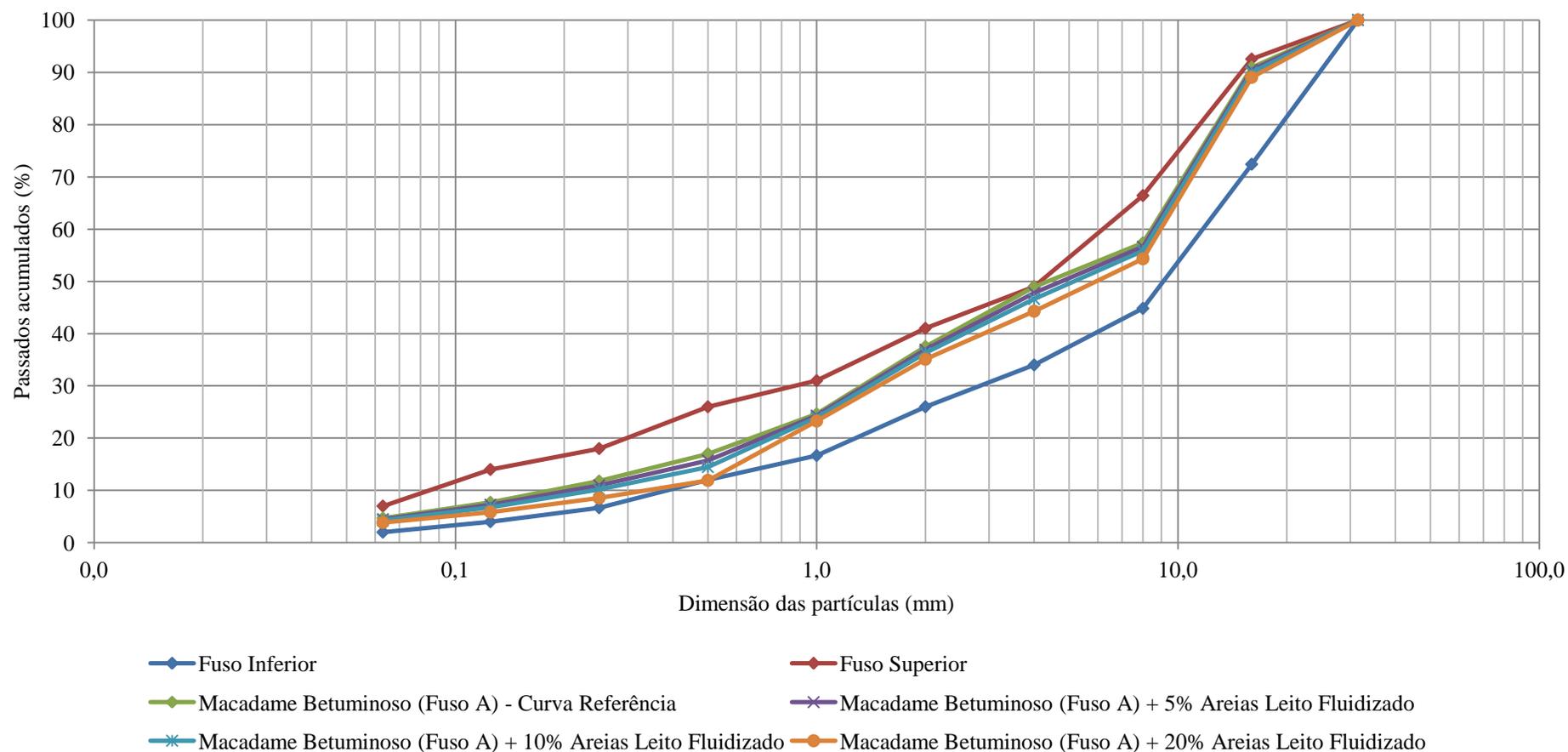


Fig.20 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de Areias de Leito Fluidizado

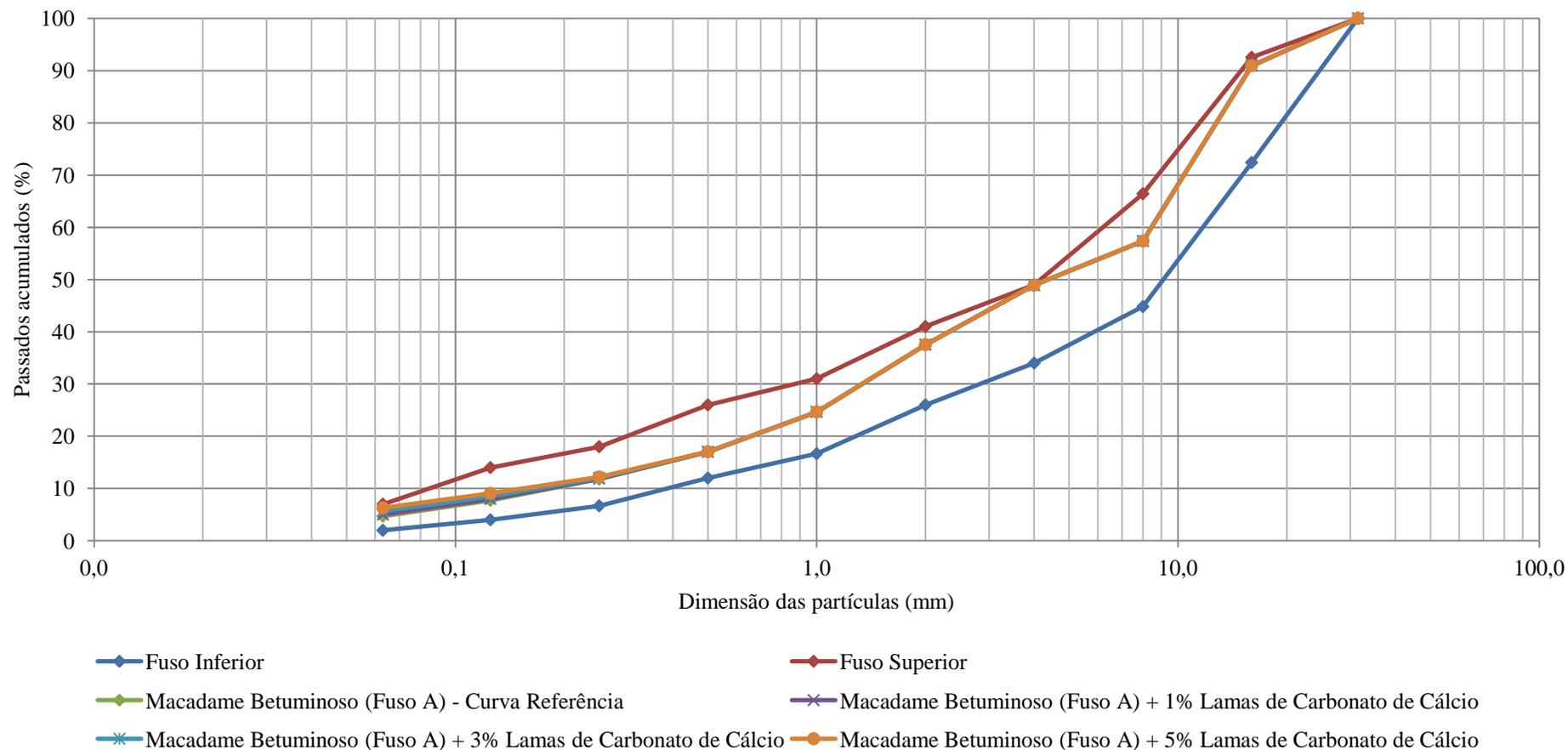


Fig.21 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de Lamas de Carbonato de Cálcio

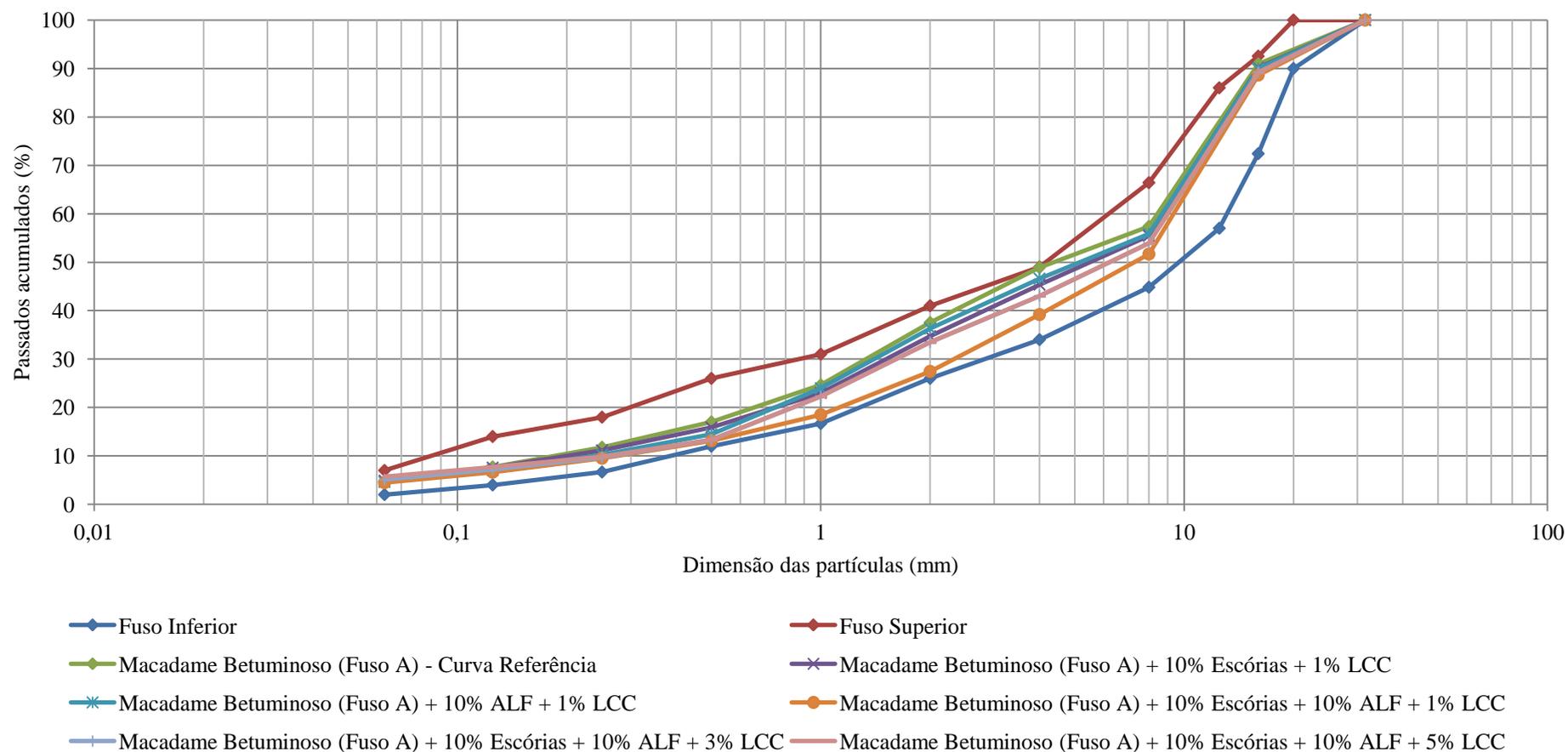


Fig.22 – Representação gráfica das curvas das formulações betuminosas de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados

2.3.1. Preparação das misturas formuladas

Em relação ao procedimento de fabrico dos provetes, o método implica que os agregados sejam secos em estufa até peso constante e posteriormente aquecidos entre 140°C e 160°C, sendo por fim adicionado o betume e misturados, perfazendo um total de 1200 g de amostra. A produção de provetes resultou de vários processos executados de forma célere e com recurso a uma manta de aquecimento conforme (Figura 23 – a), precavendo assim perdas de temperatura que poderiam pôr em causa a viscosidade do betume e consequente homogeneização e compactação eficiente da mistura.

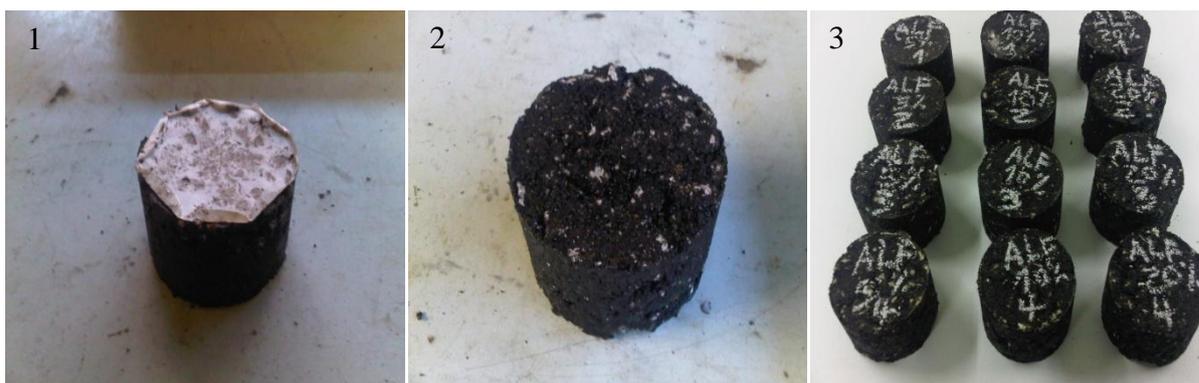
A mistura betuminosa resultante da junção dos agregados com betume em misturadora apropriada é inserida num molde, sujeitando o mesmo a 50 pancadas em cada face do provete com martelo de compactação automático, de acordo com a norma EN 12697-34 de 2004 (Figura 23 – b). Uma vez finalizada a compactação dos provetes, os mesmos são desmoldados e arrefecidos à temperatura ambiente (Figura 23 – c).



(a)



(b)



(c)

Fig.23 – Processos para produção de provetes betuminosos; (a) - Mistura dos agregados com o betume; (b) - Compactação Marshall e obtenção de provete; (c) - Exemplo de provetes a ensaiar

2.3.2. Ensaio de caracterização e determinação de parâmetros respetivos às misturas formuladas

Previamente e devido ao efeito destrutivo do ensaio Marshall, é determinada a baridade aparente de todos os provetes pelo método hidrostático, conforme norma EN 12697-6.



Fig.24 – Pesagem dos provetes secos e imersos em água com recurso a cesto de rede

Para tal, cada provete é pesado dentro e fora de água conforme Figura 24 e através da equação seguinte é determinada a baridade aparente:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (5)$$

em que:

ρ é a baridade aparente em (g/cm^3);

m_1 é a massa do provete seco em (g);

m_2 é a massa do provete imerso em água em (g);

ρ_w é a massa volúmica da água em (Mg/m^3).



Fig.25 – Preparação dos provetes em banho-maria à temperatura de 60°C

Após determinada a baridade aparente, os provetes são colocados em banho-maria durante cerca de 20 minutos a uma temperatura de 60°C (Figura 25), sendo posteriormente testados utilizando o ensaio de Marshall.



Fig.26 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão Marshall

O método de Marshall consiste na imposição de uma deformação vertical ao provete, após colocação do mesmo no estabilómetro de Marshall, a uma velocidade de 50mm/min, através dum carregamento de compressão, até ocorrer a rotura (Figura 26). Este ensaio permite assim, a medição da estabilidade ou resistência mecânica, dum provete submetido

a um aumento de deformação constante (resistência à deformação ou força de rotura) e o valor de deformação para a qual ocorre a rotura (Branco et al., 2008; Silva, 2005).



Fig.27 – Determinação da baridade máxima teórica através do método do picnómetro de vácuo

Após a realização do ensaio descrito, um provete representativo de cada tipo de mistura betuminosa, foi colocado em estufa a 140°C e posteriormente desagregado. Através do método do picnómetro de vácuo (norma ASTM D 2041) foi determinada a baridade máxima teórica (BMT) conforme Figura 27.

A BMT pode ser calculada teoricamente através da aplicação direta da seguinte equação:

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\frac{p_b}{100 \cdot \rho_b} + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100 \cdot \rho_i}} \quad (6)$$

em que:

ρ_{max} é a baridade máxima teórica em (g/cm³);

p_b é a percentagem de betume;

p_i é a percentagem do agregado i (em relação ao peso total da mistura);

ρ_b é a densidade do betume (1,03 g/cm³);

ρ_i é a densidade do agregado i em (g/cm³).

O valor da BMT representa o valor máximo teórico de massa volúmica, para as proporções de materiais usadas (considerando que a mistura não contém quaisquer vazios entre as partículas).

Por sua vez, a obtenção deste valor de BMT, permitirá obter a percentagem de vazios da mistura (porosidade), segundo a seguinte equação:

$$n = \frac{\rho_{max} - \rho}{\rho_{max}} \times 100 \quad (7)$$

em que:

n é a porosidade em (%);

ρ_{max} é a baridade máxima teórica em (g/cm³);

ρ é a baridade aparente em (g/cm³).

Além dos parâmetros já mencionados, foram ainda determinados para cada tipo de mistura betuminosa, o valor do TVB (teor volumétrico em betume), o valor de VMA (volume de vazios no esqueleto de agregado), o valor de VFB (percentagem de vazio preenchidos com betume) ou S_{bt} (grau de saturação em betume) e o Quociente Marshall (razão entre força de rotura e deformação), segundo as seguintes equações, respetivamente:

$$TVB = \frac{p_b \times \rho}{\rho_b} \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

$$VMA = n + TVB \quad (\%) \quad (9)$$

$$VFB \text{ ou } S_{bt} = \frac{TVB}{VMA} \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

$$Quoc. \text{ Marshall} = \frac{F_{rot}}{Def} \quad (kN/mm) \quad (11)$$

em que:

F_{rot} é a força de rotura em (kN);

Def é a deformação (mm).

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. CARATERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E AGREGADOS NATURAIS

3.1.1. Caraterização física

As Figuras 28, 29 e 30 apresentadas, referem-se às curvas granulométricas dos resíduos a incorporar nas misturas betuminosas realizadas no âmbito desta dissertação.

Na Figura 28, apresenta-se a distribuição granulométrica das Escórias. Pelo mesmo é possível classificar a sua granulometria como contínua, com uma distribuição uniforme dos grãos, que favorece o melhor preenchimento dos vazios quando incorporadas nas misturas, ou seja, o melhor empacotamento dos agregados.

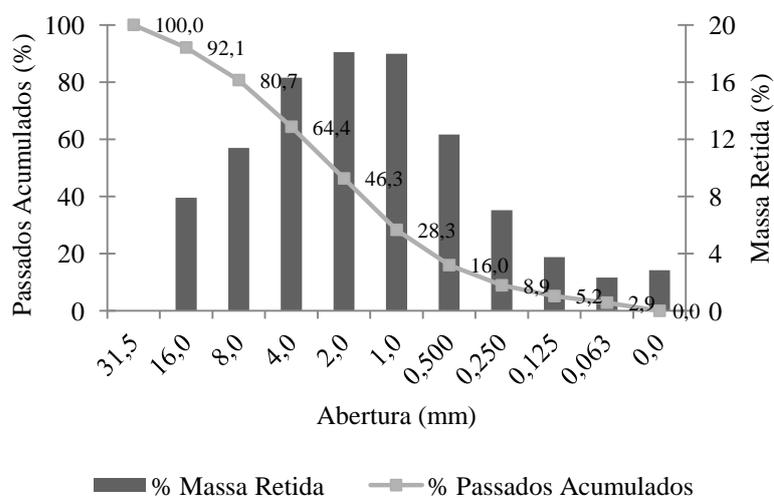


Fig.28 – Distribuição granulométrica das Escórias

A Figura 29 representa a distribuição granulométrica das ALF. Através da análise da mesma, é perceptível a concentração de uma elevada fração da sua massa entre 0,5 e 1,0 mm de dimensão de agregados. Tal facto é revelador da homogeneidade do material, traduzindo-se numa graduação descontínua deste resíduo.

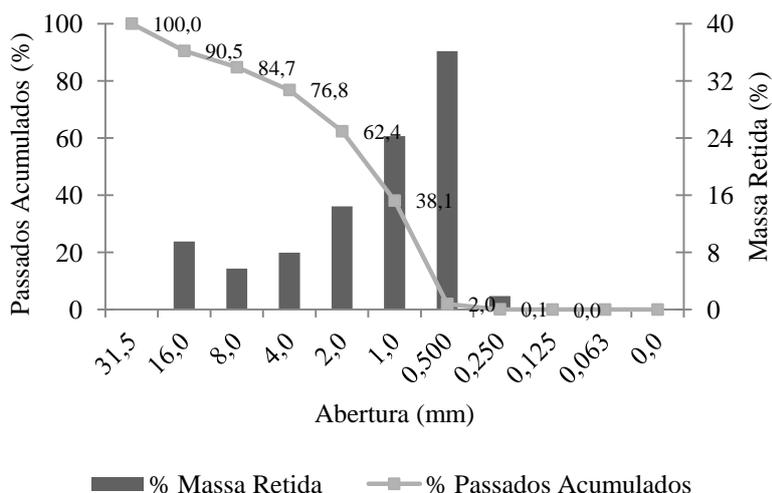


Fig.29 – Distribuição granulométrica das ALF

A Figura 30 representa a distribuição granulométrica das LCC. Da análise da mesma conclui-se que este resíduo é constituído essencialmente por material retido no fundo, ou seja, material inferior a 0,063 mm. O mesmo permite concluir que estamos perante um material extremamente fino e com elevada superfície específica. Este facto permite associar, do ponto de vista físico, o resíduo a um fíler em potencial.

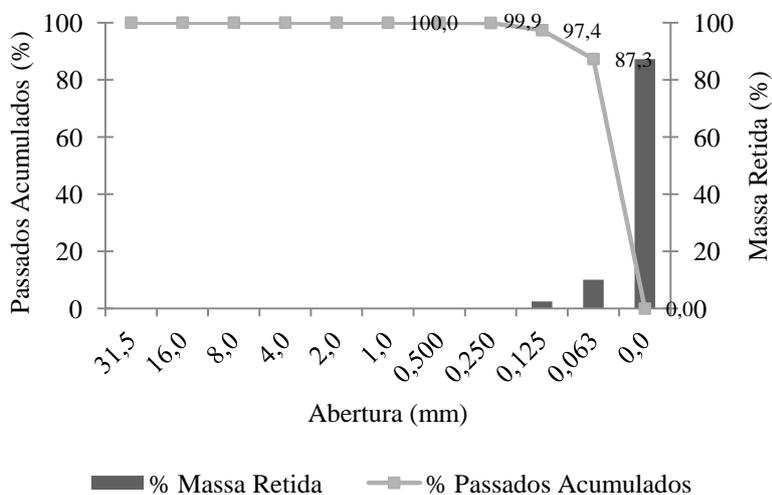


Fig.30 – Distribuição granulométrica das LCC

As Figuras 31, 32, 33 e 34 apresentadas de seguida, referem-se às curvas granulométricas dos agregados naturais, incorporados nas misturas betuminosas realizadas.

As Figuras 31 e 32 representam a distribuição granulométrica das britas 1 e 2, respetivamente. Verifica-se que tanto na brita 1 como na brita 2, existe uma grande

concentração de massa retida no peneiro de abertura 8 mm, cujo valor se estabelece próximo dos 60%. Assim, a grande diferença que se verifica entre ambas, corresponde a aproximadamente 30% da sua massa, que no caso da brita 1 fica retida no peneiro 4 mm e no caso da brita 2 fica retida ao peneiro de 16 mm.

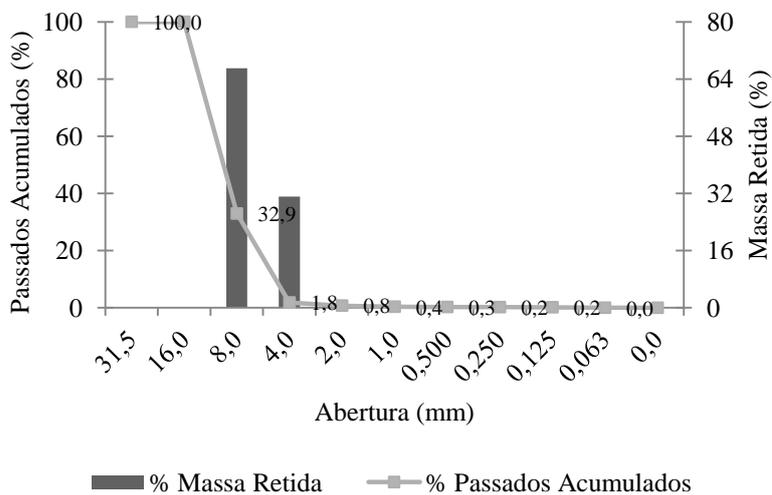


Fig.31 – Distribuição granulométrica da Brita 1

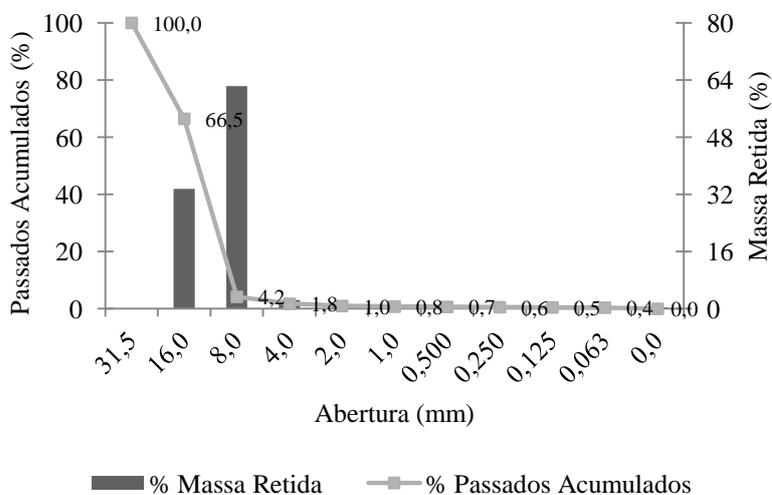


Fig.32 – Distribuição granulométrica da Brita 2

A Figura 33 representa a distribuição granulométrica do pó-de-pedra calcária. Os resultados permitem verificar a concentração de aproximadamente 50% da sua massa entre 1,0 e 2,0 mm de dimensão. Verifica-se ainda que se trata de um material com distribuição contínua até aos 1,0 mm de dimensão de agregado. Tal facto traduz-se numa distribuição uniforme dos grãos que favorece o empacotamento entre eles e melhor preenchimento dos vazios.

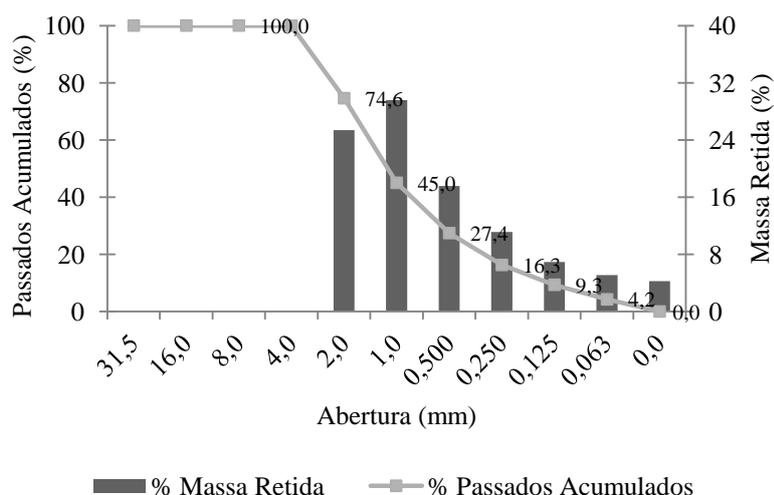


Fig.33 – Distribuição granulométrica do Pó-de-Pedra Calcária

Na Figura 34 apresenta-se a distribuição granulométrica do fíler calcário. Verifica-se que este resíduo é constituído por pouco mais de 50% de material retido no fundo, ou seja, material inferior a 0,063 mm. Atendendo a que este agregado natural, será alvo de substituição por LCC, no fabrico das misturas betuminosas a realizar no âmbito desta dissertação, é desde já evidente o facto de o resíduo evidenciar tratar-se de um material consideravelmente mais fino, e conseqüentemente, apresentar maior superfície específica.

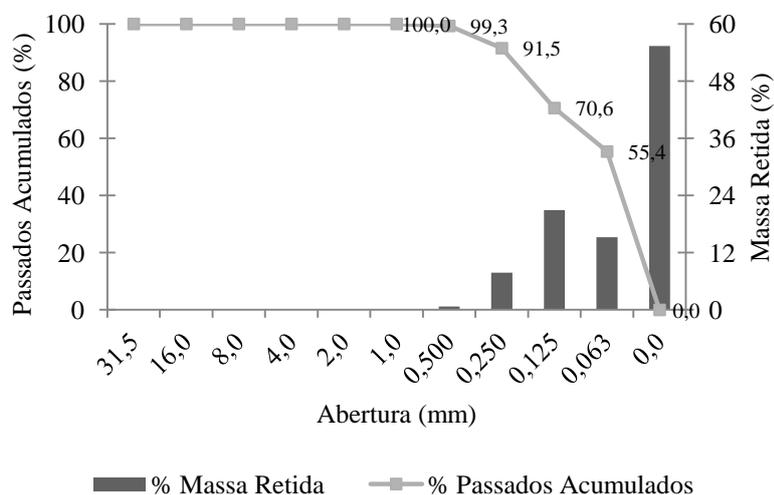


Fig.34 – Distribuição granulométrica do Fíler Calcário

Na Tabela 4 são indicados os valores obtidos para a massa volúmica dos resíduos, com base nos cálculos apresentados em Anexo I, na Tabela A.I. De referir a baixa densidade das Escórias, devido à presença de cinzas, comparativamente às ALF ou às LCC.

Tabela 4 – Massa volúmica dos resíduos

Resíduo:	(g/cm ³)
Escórias	2,110
Areias de Leito Fluidizado	2,597
Lamas de Carbonato de Cálcio	2,640

Na Tabela 5 são indicados os valores obtidos para a massa volúmica dos agregados naturais, com base nos cálculos apresentados em Anexo I, na Tabela A.I.

Tabela 5 – Massa volúmica dos agregados naturais

Agregado Natural:	(g/cm ³)
Brita 1	2,684
Brita 2	2,675
Pó-de-Pedra Calcária	2,623
Fíler Calcário	2,596

Segundo a Tabela A.II apresentada no Anexo II, os resíduos em estudo revelam insensibilidade à água, uma vez que apresentam um VBS inferior a 0,1.

Na Tabela 6, apresentam-se os resultados obtidos do ensaio de determinação do teor equivalente de areia dos resíduos.

Tabela 6 – Teor equivalente de areia dos resíduos

Resíduo:	(%)
Escórias	80,4
Areias de Leito Fluidizado	99,5
Lamas de Carbonato de Cálcio	-

À exceção do resíduo LCC para o qual não se considerou necessária a execução deste ensaio tal era a pureza evidenciada e finura do material, todos os outros revelaram um teor equivalente de areia muito elevado, sendo que as ALF atingem praticamente os 100%. Tal

facto é revelador da reduzida quantidade de impurezas que os resíduos possuem, comprovado de igual modo pelo valor VBS, que demonstra a insensibilidade à água dos resíduos. Estes valores elevados de EA são indicadores da ausência de plasticidade do material, normalmente conferida pela fração argilosa.

Na Tabela 7 apresenta-se os valores de VBS respetivos ao pó-de-pedra calcária e ao fíler calcário, sendo que, segundo a Tabela A.II apresentada no Anexo II, os mesmos revelam alguma sensibilidade à água.

Tabela 7 – Valores de azul-de-metileno obtidos para os agregados naturais

Agregado Natural:	(g/100g de material)
Pó-de-Pedra Calcária	0,23
Fíler Calcário	0,21

A determinação do teor equivalente de areia foi apenas efetuada para o pó-de-pedra calcária, sendo que o valor obtido corresponde a 49,1%. Normalmente o valor esperado para este tipo de agregado é ligeiramente superior ao obtido, traduzindo-se tal facto no elevado teor de impurezas também demonstrado pelo VBS, para este agregado.

3.1.2. Caraterização composicional

Nas Figuras 35, 36 e 37 apresenta-se a caraterização mineralógica efetuada a cada um dos resíduos por difração de Raios-X (DRX).

O difratograma de raios X abaixo apresentado, demonstra que a fase mineralógica dominante no resíduo LCC é a Calcite (CaCO_3).

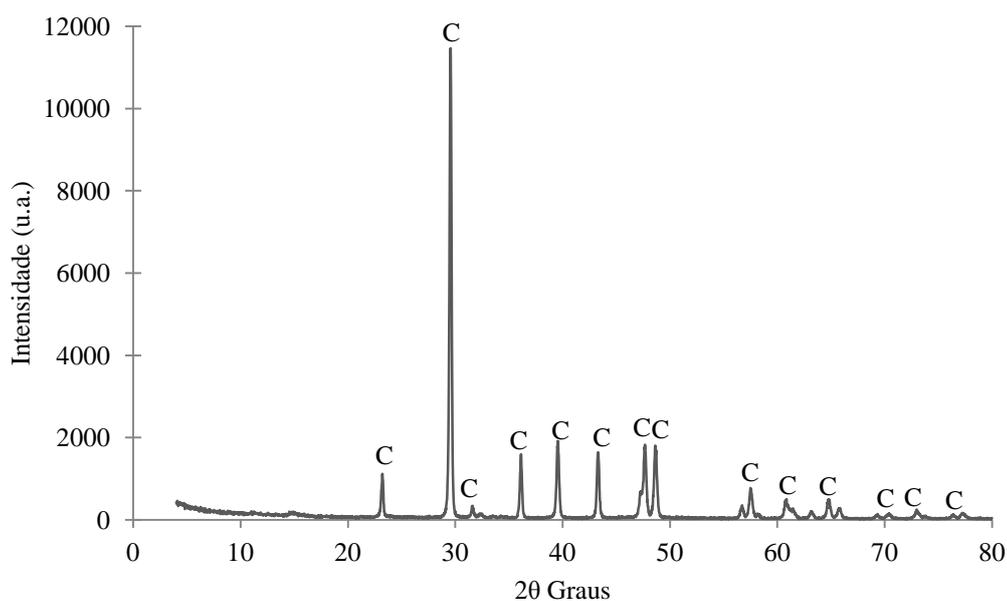


Fig.35 – Difratoograma de raios X das LCC (Abreviaturas: C = Calcite (CaCO_3)).

O difratograma de raios X abaixo apresentado, demonstra que as fases mineralógicas encontradas no resíduo ALF foram: Quartzo (SiO_2), Óxido de Cálcio (CaO), Microclina (KAlSi_3O_8) e Muscovite-3T ($(\text{K},\text{Na})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), sendo o Quartzo a fase que predomina.

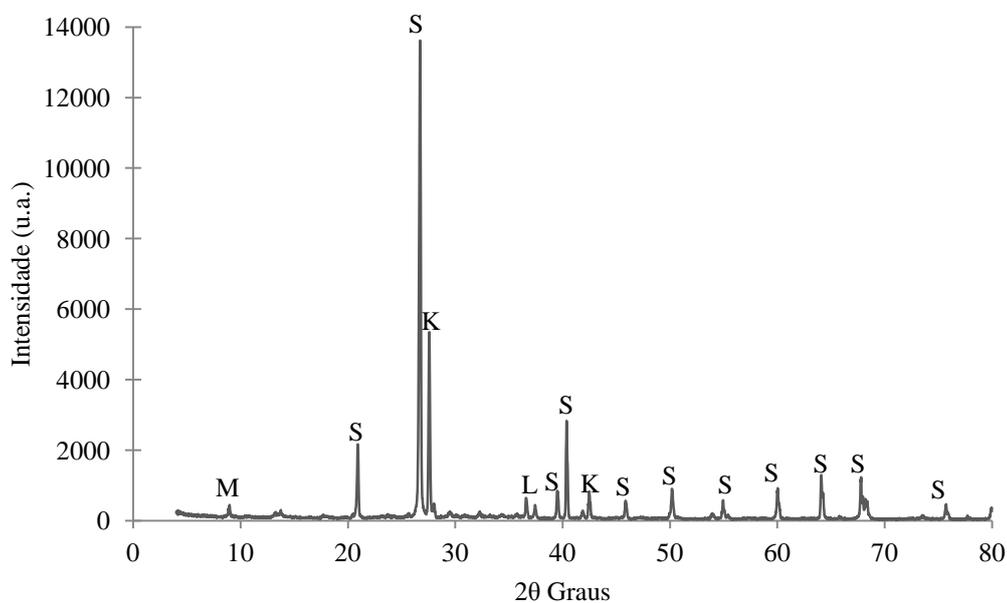


Fig.36 – Difratoograma de raios X das ALF (Abreviaturas: S = Quartzo e Cristobalite (SiO_2), L = Óxido de Cálcio (CaO), K = Microclina (KAlSi_3O_8), M = Muscovite-3T ($(\text{K},\text{Na})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)).

O difratograma de raios X abaixo apresentado, refere-se às Escórias e apresenta as seguintes fases mineralógicas: Quartzo (SiO_2), Muscovite-3T $(\text{K,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, Ortoclase $(\text{K}_4\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32})$ e Cristobalite (SiO_2).

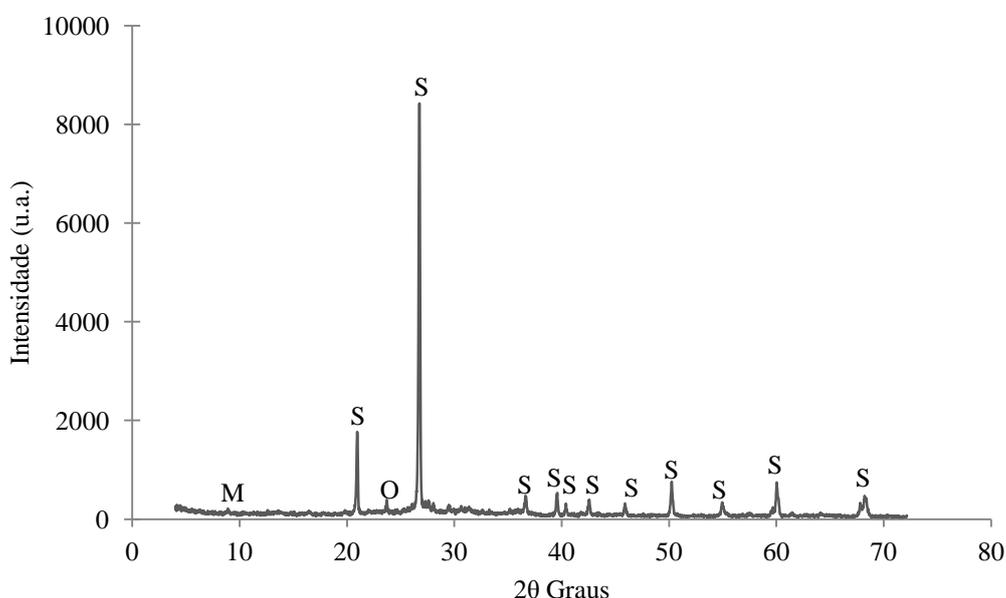


Fig.37 – Difratograma de raios X das Escórias (Abreviaturas: S = Quartzo (SiO_2), M = Muscovite-3T $(\text{K,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, O = Ortoclase $(\text{K}_4\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32})$.)

A composição química dos resíduos é apresentada na Tabela 8, onde o teor de LOI (Loss on Ignition – perda ao rubro) se refere à percentagem de material que se volatiliza a 550°C .

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8, é possível verificar que as Escórias são constituídas predominantemente por sílica (dióxido de silício ou SiO_2) e ainda uma percentagem relevante de alumina (Al_2O_3). Apresentam uma perda de LOI cerca de três vezes superior às ALF, apesar de qualquer destas percentagens ser reduzida. Verifica-se porém, que para as LCC a perda de LOI é quase metade da sua massa, facto este, devido à forte e quase total presença de calcite (CaCO_3).

As Escórias, em relação às ALF, apresentam de igual modo uma elevada quantidade de quartzo, embora em menor quantidade e ainda o dobro da quantidade de alumina (Al_2O_3). Como era de esperar as ALF revelaram uma composição essencialmente constituída por quartzo (SiO_2), devido à sua origem em leito fluidizado, composto essencialmente por areia siliciosa.

Em relação às LCC, refira-se um resíduo totalmente distinto dos outros, é essencialmente constituído por calcite ou carbonato de cálcio (CaCO_3), que ao ser submetido a elevadas temperaturas ($\approx 800^\circ\text{C}$) se transforma em óxido de cálcio (CaO) devido à volatilização do dióxido de carbono (CO_2).

Tabela 8 – Composição química dos resíduos, em percentagem ponderal de óxidos, determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X

Composto:	ALF (%)	Escórias (%)	LCC (%)
LOI	1.36	4.01	42.61
Na_2O	0.84	0.60	1.12
MgO	0.73	1.41	0.48
Al_2O_3	6.36	12.54	0.16
SiO_2	79.74	67.32	0.30
P_2O_5	0.43	0.57	1.19
SO_3	0.04	0.08	0.05
Cl	0.04	0.02	0.01
K_2O	2.32	3.56	0.01
CaO	6.26	4.80	53.98
TiO_2	0.21	0.53	0.02
Fe_2O_3	1.56	4.19	0.04

Da interpretação do gráfico respetivo à Figura 38 respeitante à análise térmica das LCC, ressalta o fenómeno endotérmico ocorrido aproximadamente aos 800°C . O mesmo refere-se à perda de dióxido de carbono (CO_2), proveniente da quebra da molécula de carbonato de cálcio (CaCO_3), principal constituinte das LCC.

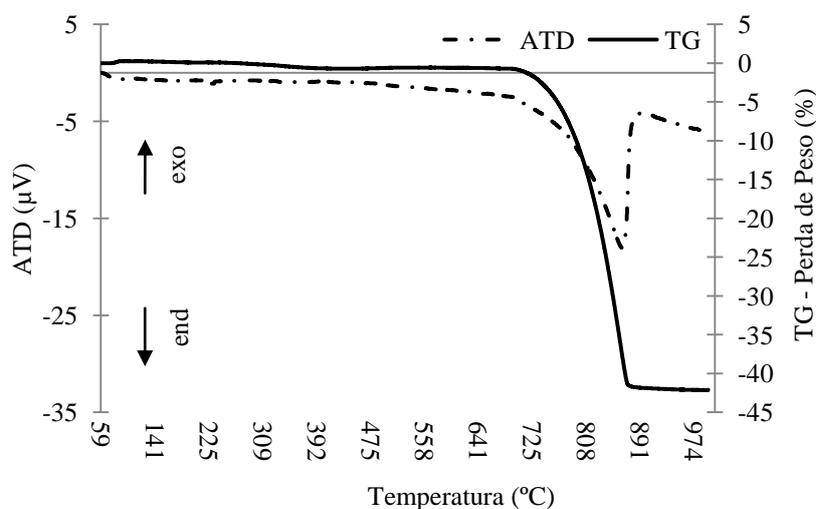


Fig.38 – Análise térmica das LCC

A Figura 39 refere-se à análise térmica das ALF, destacando-se o carácter relativamente inerte deste resíduo dada a ausência significativa de reações. As variações observadas resumem-se a desvios na linha de base durante o ensaio.

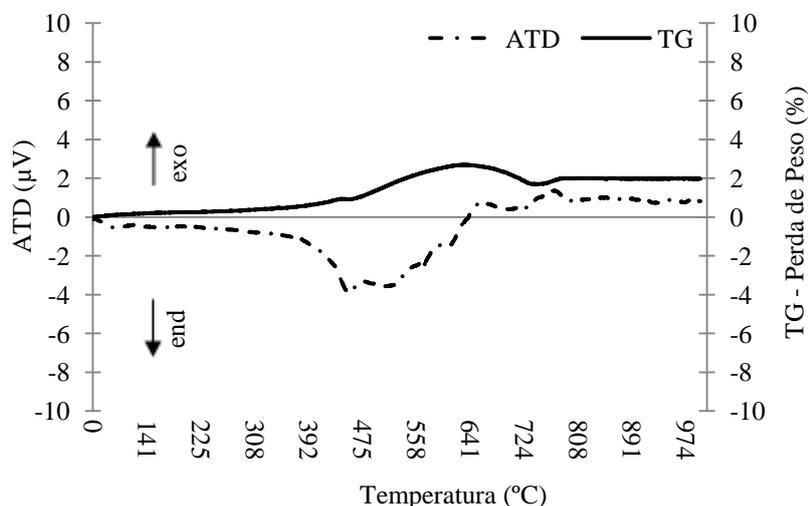


Fig.39 – Análise térmica das ALF

A Figura 40 refere-se à análise térmica das Escórias, destacando-se a perda de aproximadamente 5% de matéria orgânica de forma constante até aos 600°C (reação exotérmica).

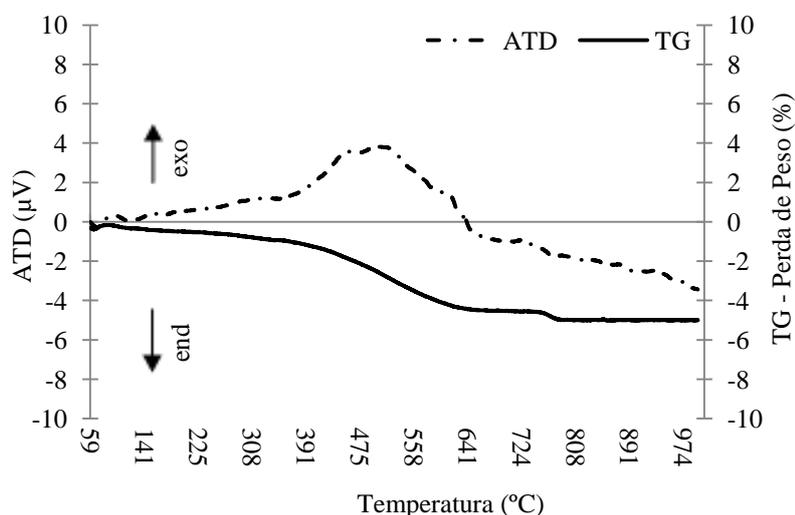


Fig.40 – Análise térmica das Escórias

3.2. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM MISTURAS BETUMINOSAS

A incorporação de resíduos nas misturas betuminosas para aplicação em pavimentos rodoviários, resultou da análise das curvas granulométricas dos resíduos e dos agregados naturais a substituir, permitindo através desta análise, uma adequada substituição do agregado natural pelo resíduo referente a uma curva granulométrica semelhante, de modo a garantir o cumprimento do fuso granulométrico pretendido. Desta análise resultou a substituição do fíler calcário unicamente por LCC e do pó-de-pedra calcária tanto pelas Escórias como pelas ALF, sem interferir na percentagem de britas. Os resultados são apresentados na Figura 41, onde é demonstrada a semelhança entre as curvas granulométricas respetivas ao fíler e às LCC. Da mesma forma, a curva do agregado natural que melhor se assemelha às curvas respetivas das Escórias e das ALF, é a do pó-de-pedra. Esta análise permite obter a vantagem de que todos os resultados obtidos pela substituição destes resíduos, seriam exclusivamente confrontados com as características de um único agregado natural.

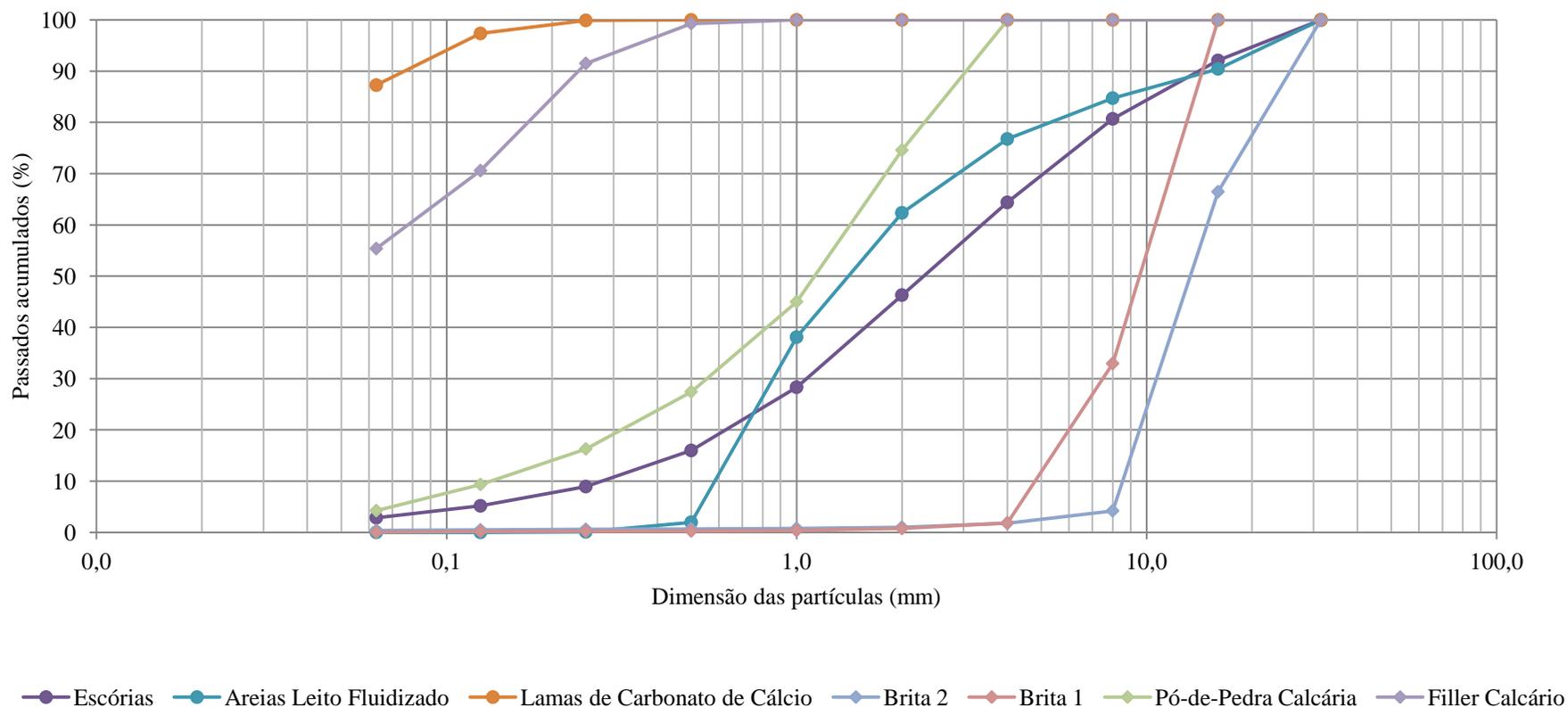


Fig.41 – Análise entre curvas granulométricas de resíduos e agregados naturais

De modo a facilitar a identificação das diferentes misturas betuminosas fabricadas no decurso desta análise de resultados, é apresentado o seguinte código de identificação das misturas estudadas (Tabela 9).

Tabela 9 – Código de identificação das misturas

Código de Identificação das Misturas (ID):	Detalhes:
Ref.	Mistura Betuminosa Referência (Sem Resíduos)
5%E	Incorporação de 5% de Escórias
10%E	Incorporação de 10% de Escórias
20%E	Incorporação de 20% de Escórias
5%ALF	Incorporação de 5% de Areias Leito Fluidizado
10%ALF	Incorporação de 10% de Areias Leito Fluidizado
20%ALF	Incorporação de 20% de Areias Leito Fluidizado
1%LCC	Incorporação de 1% de Lamas Carbonato Cálcio
3%LCC	Incorporação de 3% de Lamas Carbonato Cálcio
5%LCC	Incorporação de 5% de Lamas Carbonato Cálcio
10%E+1%LCC	Incorporação de 10% Escórias + 1% LCC
10%ALF+1%LCC	Incorporação de 10% de ALF + 1% de LCC
10%E+10%ALF+1%LCC	Incorporação de 10% de Escórias + 10% de ALF + 1% de LCC
10%E+10%ALF+3%LCC	Incorporação de 10% de Escórias + 10% de ALF + 3% de LCC
10%E+10%ALF+5%LCC	Incorporação de 10% de Escórias + 10% de ALF + 5% de LCC

A caracterização das misturas betuminosas resultou da média de resultados obtidos para os quatro provetes relativos a cada formulação de mistura betuminosa, conforme apresentado na Tabela 10. De salientar mais uma vez o facto de todas as formulações serem resultado da incorporação de 4% de betume 50/70.

Ainda de referir que a interpretação dos resultados da BMT de cada amostra, obtidos quer pelo método do picnómetro de vácuo, quer pela equação, revelou uma discrepância elevada entre resultados que se esperavam muito próximos. A obtenção de resultados anormalmente elevados, segundo o método do picnómetro de vácuo e tendo em conta o fator erro humano implícito neste ensaio, levou a que estes valores fossem considerados de menor fiabilidade e assim descartados em detrimento dos obtidos pela equação, estando assim de acordo com muitos cadernos de encargos que indicam que a aplicação da equação deve ser o único meio a seguir para obtenção deste parâmetro. Posto isto, os resultados da BMT apresentados na Tabela 10, correspondem aos valores obtidos segundo a equação 6.

Tabela 10 – Resultados da caracterização das misturas betuminosas

Código de Identificação das Amostras	Pb	ρ Máx. Teórica, Bt	ρ Aparente Média, Bm	Estabilidade, Frot.	Deformação, Def.	n	TVB	VMA	Sb	Frot./Def.
						(Bt-Bm)/Bt	(BmxPb)/pb	n+TVB	TVB/VMA	
ID	%	g/cm ³	g/cm ³	kN	mm	%	%	%	%	kN/mm
Ref.	4%	2.494	2.339	11.3	4.0	6.2	9.1	15.3	59.4	2.8
5%E	4%	2.466	2.288	9.7	5.6	7.2	8.9	16.1	55.2	1.7
10%E	4%	2.439	2.245	13.3	5.1	8.0	8.7	16.7	52.2	2.6
20%E	4%	2.388	2.130	12.4	4.4	10.8	8.3	19.1	43.4	2.8
5%ALF	4%	2.492	2.343	11.7	3.6	6.0	9.1	15.1	60.3	3.2
10%ALF	4%	2.491	2.338	11.9	5.5	6.2	9.1	15.2	59.6	2.2
20%ALF	4%	2.489	2.309	10.3	5.9	7.2	9.0	16.2	55.4	1.7
1%LCC	4%	2.494	2.347	10.9	4.2	5.9	9.1	15.0	60.8	2.6
3%LCC	4%	2.495	2.319	9.7	3.8	7.0	9.0	16.0	56.1	2.5
5%LCC	4%	2.496	2.288	5.5	3.0	8.3	8.9	17.2	51.6	1.8
10%E+1%LCC	4%	2.429	2.204	11.7	4.7	9.2	8.6	17.8	48.1	2.5
10%ALF+1%LCC	4%	2.482	2.338	11.0	4.7	5.8	9.1	14.9	60.9	2.4
10%E+10%ALF+1%LCC	4%	2.438	2.224	13.9	4.3	8.8	8.6	17.4	49.7	3.3
10%E+10%ALF+3%LCC	4%	2.438	2.199	11.7	4.0	9.8	8.5	18.4	46.5	2.9
10%E+10%ALF+5%LCC	4%	2.439	2.151	4.1	3.3	11.8	8.4	20.2	41.4	1.2

A interpretação dos resultados apresentados na Tabela 10, resulta na discussão e análise seguinte. A mesma será efetuada analisando a incorporação de resíduos de uma forma individual mas em diferentes percentagens, e de forma conjunta quando se trata de resíduos conjugados. Neste sentido, são apresentados graficamente, os resultados obtidos para cada parâmetro analisado e que ao mesmo tempo permitem conhecer as alterações produzidas pela incorporação de resíduos, sempre em relação à mistura referência (sem incorporação de resíduos).

3.2.1. Efeito da incorporação de Escórias

Neste subcapítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos com os provetes de misturas betuminosas de Macadame Fuso A com incorporação de 5%, 10% e 20% de Escórias. As formulações das misturas de agregados para elaboração dos provetes referidos, são apresentadas nas Tabelas A.IV, A.V e A.VI do Anexo III.

Os provetes de misturas betuminosas contendo incorporação de Escórias apresentam um decréscimo nos valores de Bm e Bt conforme o aumento da percentagem de incorporação deste resíduo (Figura 42). Tal facto deve-se à densidade das Escórias ser inferior à densidade do pó-de-pedra, agregado natural substituído. De acordo com os resultados apresentados na Figura 42, as formulações com 10 e 20% de substituição, conferem uma diminuição linear tanto da Bm como da Bt, à medida que se aumenta a percentagem de substituição do agregado pelo resíduo.

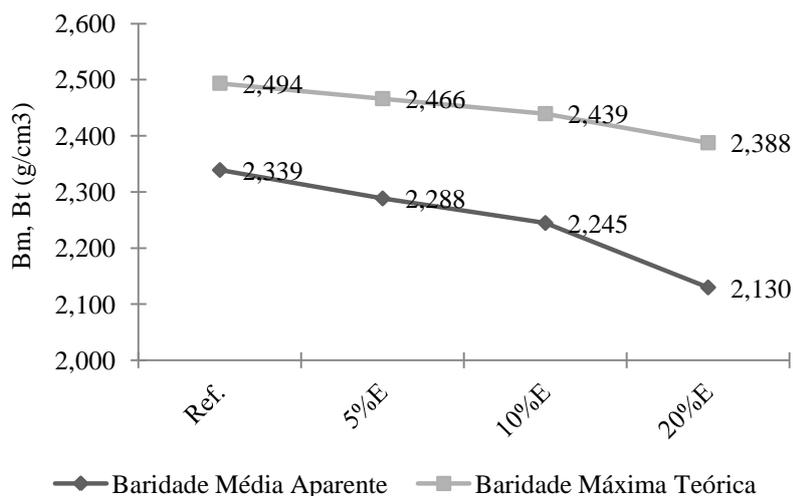


Fig.42 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias

Ao contrário da Bm e Bt, a Porosidade e o VMA (volume de vazios no esqueleto de agregado) aumentam com a incorporação de Escórias, evidenciando que a sua variação se efetua inversamente às baridades (Bm e Bt) (Figura 43). Este facto deve-se ao menor empacotamento da mistura conferido pela incorporação de Escórias em detrimento de pó-de-pedra. A substituição do pó-de-pedra pelas Escórias propicia a descontinuidade da curva granulométrica da mistura, tornando-a mais aberta.

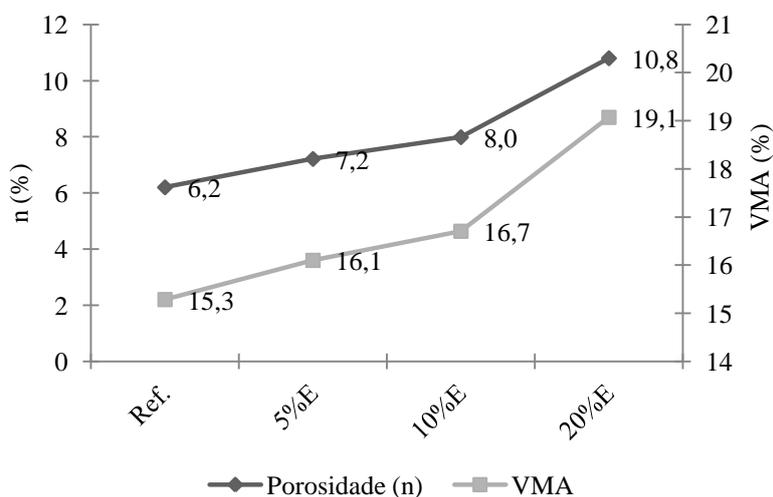


Fig.43 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias

A Figura 44 evidencia o menor empacotamento conferido pela adição de Escórias à mistura, uma vez que o aumento da percentagem de incorporação de resíduo resulta no aumento da altura dos provetes.

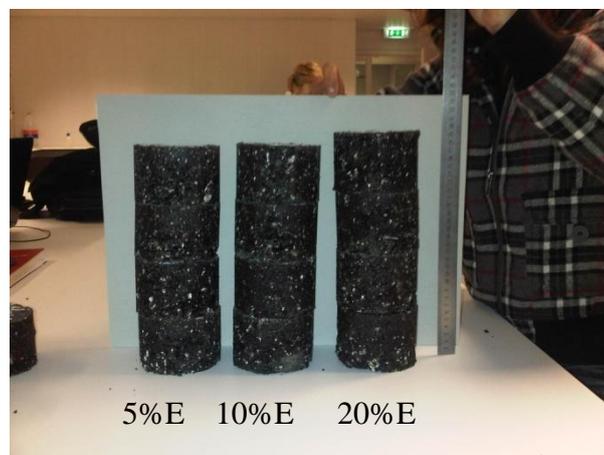


Fig.44 – Provetes de MB Fuso A com adição de escórias

Relativamente aos valores de Estabilidade (força de rotura) e Deformação obtidos pelo ensaio de compressão Marshall podem ser retiradas as seguintes conclusões: em relação à estabilidade, uma mistura com apenas 5% de incorporação de Escórias revela uma redução em relação ao valor da mistura referência. Verifica-se porém, que aos 10% de incorporação a estabilidade aumenta superando a própria mistura referência, voltando a diminuir para 20% de incorporação, ainda que sem comprometer o bom desempenho da mistura quanto a este parâmetro (Figura 45).

À medida que se aumenta a percentagem de incorporação de Escórias nas misturas betuminosas, verifica-se uma diminuição/redução da deformação. Este facto pode estar associado ao aumento de rigidez ou perda de elasticidade da mistura de agregados, resultante da maior absorção de betume pelas Escórias.

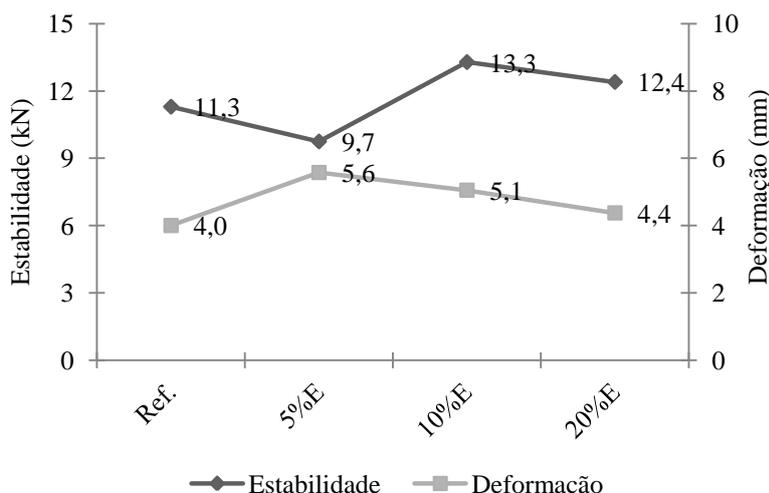


Fig.45 – Estabilidade e Deformação de provetes de Macadame Fuso A com incorporação de Escórias

Com base nos resultados da estabilidade e deformação obtidos no ensaio Marshall, calcula-se o Quociente Marshall. Segundo o Caderno de Encargos Tipo Obras 2009 (EP - Estradas de Portugal, 2009) o valor mínimo para este parâmetro deve ser igual a 2, ou seja, o valor de estabilidade deve ser no mínimo duas vezes superior ao valor de deformação. De acordo com os resultados apresentados na Figura 46 verifica-se que para uma incorporação de 5%, este parâmetro não cumpre com as exigências, no entanto, com o aumento da incorporação deste resíduo a razão entre a força de rotura/estabilidade e a deformação, aumenta consideravelmente, evidenciando que para percentagens de incorporação de Escórias superiores a 5%, a mistura apresenta boas características para aplicação.

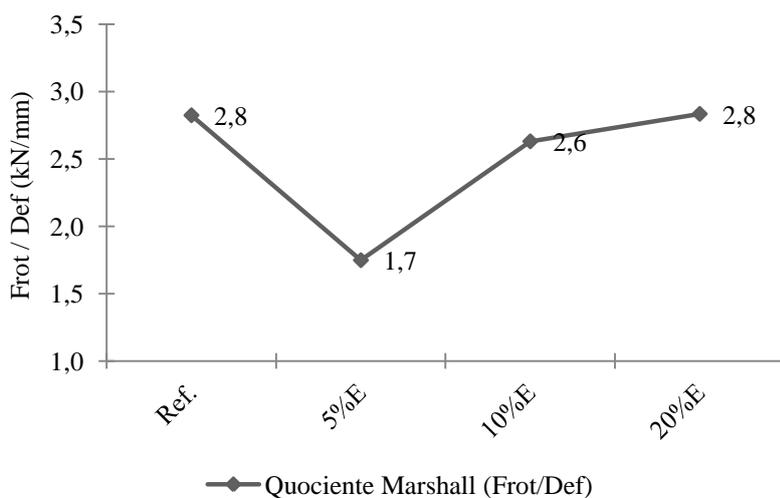


Fig.46 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias

Em relação ao Grau de Saturação em Betume (Sb), de acordo com os resultados apresentados na Figura 47, verifica-se que a incorporação de Escórias promove a redução da saturação em betume, evidenciando a menor eficácia de empacotamento das misturas resultantes.

Este facto pode estar a influenciar o aumento do VMA, tornando a mistura mais frágil à medida que se aumenta a percentagem de incorporação de Escórias.

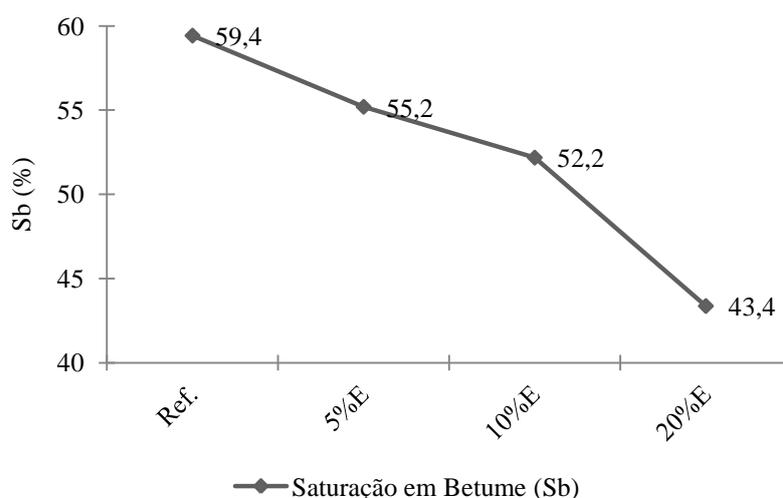


Fig.47 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de Escórias

3.2.2. Efeito da incorporação de ALF

Neste subcapítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos com os provetes de misturas betuminosas de Macadame Fuso A com incorporação de 5%, 10% e 20% de Areias de Leito Fluidizado (ALF). As formulações das misturas de agregados para elaboração dos provetes referidos, são apresentadas nas Tabelas A.VII, A.VIII e A.IX do Anexo III.

O facto de as ALF apresentarem uma densidade muito semelhante à do pó-de-pedra, explica o resultado obtido em relação aos valores de Bm e Bt para os provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF. Assim e como demonstra a Figura 48, a incorporação de ALF não implica alterações consideráveis sobre estes parâmetros até aos 10% de incorporação. Apenas para uma incorporação elevada, como por exemplo 20% de ALF, se

verifica uma ligeira redução da Bm, resultado da ligeira diferença entre a densidade mais baixa deste resíduo em relação ao agregado que substitui.

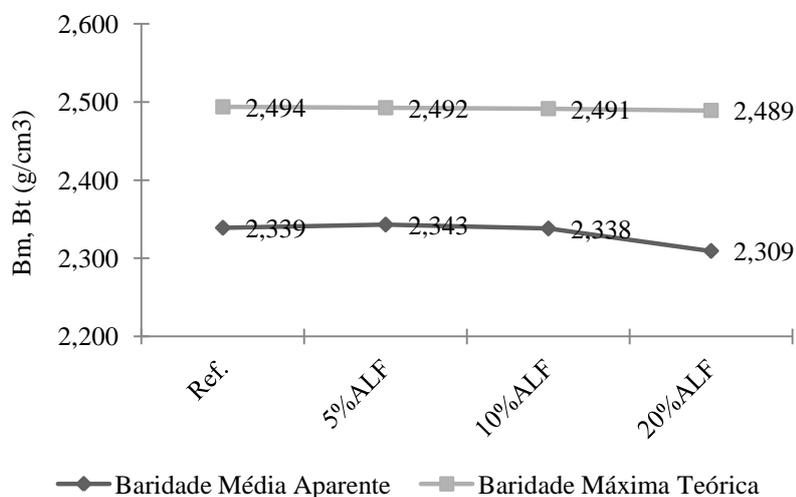


Fig.48 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF

Tal como para as Bm e Bt, a Porosidade e VMA, só apresentam variações significativas para uma elevada percentagem de incorporação de ALF. Para uma incorporação de 20% de ALF a mistura revela um aumento destes parâmetros, sinónimo de que o aumento significativo de incorporação de ALF resulta num empacotamento menos eficiente da mistura (Figura 49). Conforme se pode verificar através da Figura 41 apresentada anteriormente, as ALF evidenciam uma curva granulométrica descontínua. Tal facto não se revela condicionante até aos 10% de incorporação de ALF, em que o resíduo não compromete o facto de a mistura estar bem graduada, verificando-se porém que para percentagens de incorporação superiores, a mistura revela índices de Porosidade e VMA, ligeiramente superiores, evidenciando a influência do fator enunciado.

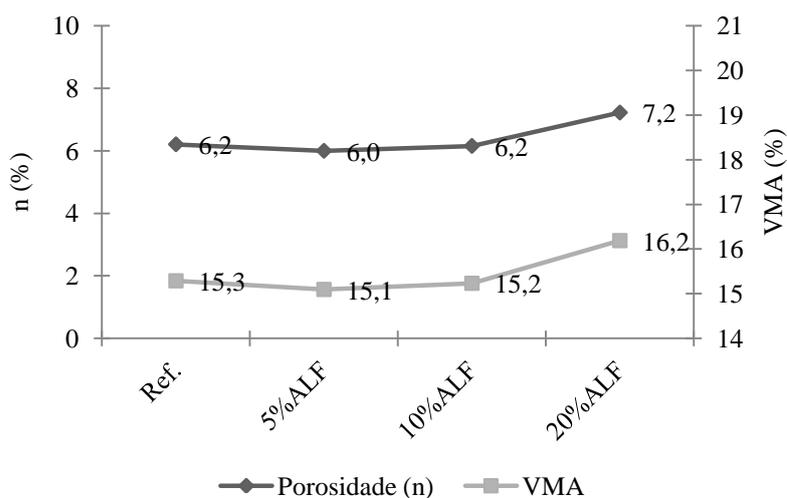


Fig.49 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF

Em relação aos valores de Estabilidade e Deformação obtidos pelo ensaio de compressão Marshall e de acordo com o gráfico respetivo à Figura 50, a incorporação de ALF revela um aumento da Estabilidade até aos 10%, superior ao resultado da mistura referência. No entanto, para 20% de incorporação de ALF, a mistura revela uma redução assinalável, apesar do mesmo não ser comprometedor quanto à eficiência desta mistura em relação ao parâmetro em causa. Esta diminuição da força necessária para a rotura do provete, pode estar relacionado com o menor empacotamento da mistura conferido pela substituição de 20% de pó-de-pedra por ALF.

O aumento da percentagem de incorporação de ALF resulta num conseqüente aumento do valor de Deformação. Este facto pode estar associado à descontinuidade implícita à curva granulométrica das ALF, uma vez que o aumento da percentagem de incorporação de ALF é proporcional ao aumento de vazios na mistura, propiciando a deformação dos provetes sujeitos a compressão. Por outro lado, pode estar relacionado com parâmetros de natureza química, uma vez que a substituição do pó-de-pedra por ALF trata-se da substituição de um material calcário por um material silicioso, cujo comportamento em relação ao betume deve ser melhor explorado.

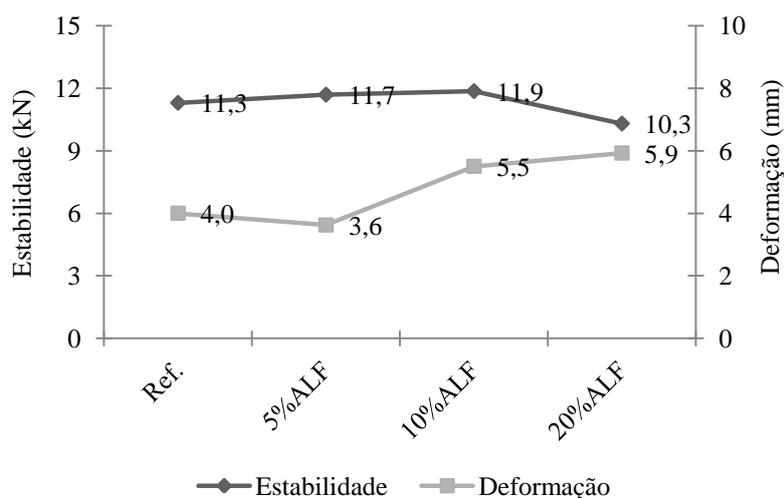


Fig.50 – Estabilidade e Deformação de provetes de Macadame Fuso A com incorporação de ALF

O aumento da percentagem de incorporação de ALF reduz a razão entre a força de rotura e a deformação até valores inferiores a 2 (não recomendáveis), para 20% de incorporação conforme Figura 51.

De salientar os bons resultados para uma incorporação de 5% de ALF, visto que esta apresenta um valor de Quociente Marshall superior à mistura referência.

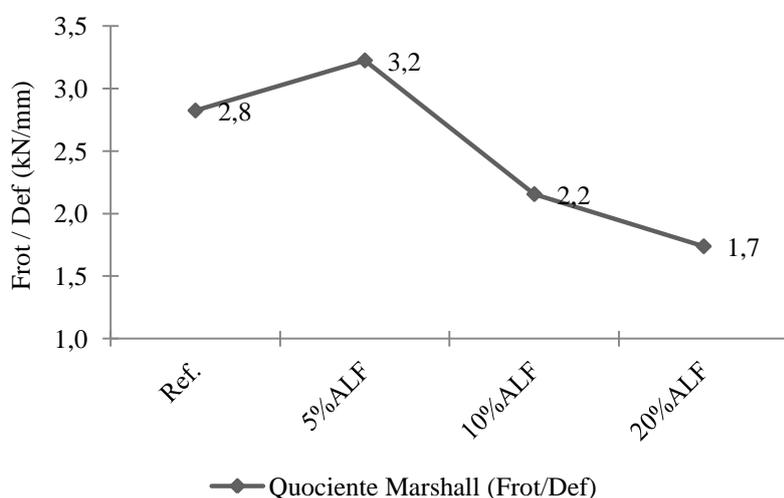


Fig.51 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF

Em relação ao Grau de Saturação em Betume (Sb), verifica-se através dos resultados apresentados na Figura 52 que até aos 10% de incorporação de ALF, este parâmetro não apresenta variações significativas. No entanto, para 20% de incorporação de ALF, verifica-

se uma ligeira redução no valor deste parâmetro, resultado do aumento do volume de vazios na mistura de agregados.

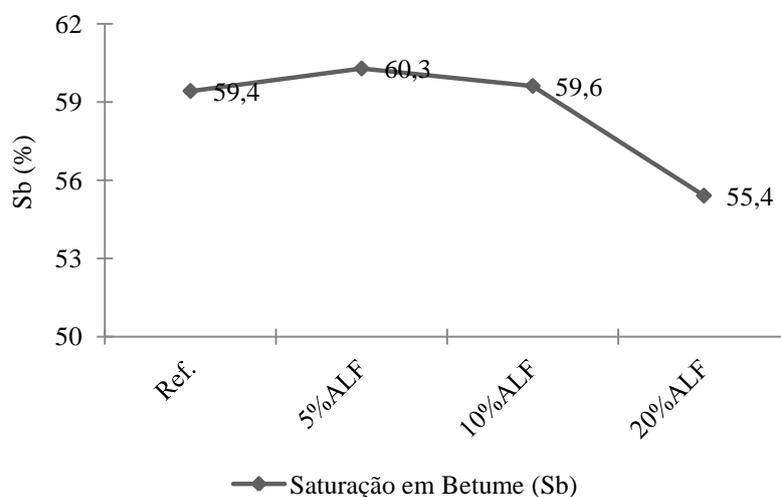


Fig.52 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF

3.2.3. Efeito da incorporação de LCC

Neste subcapítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos com os provetes de misturas betuminosas de Macadame Fuso A com incorporação de 1%, 3% e 5% de Lamas de Carbonato de Cálcio (LCC).

Ao contrário dos outros resíduos em estudo e tal como já tinha sido referido anteriormente, a incorporação de LCC é efetuada em detrimento do fíler calcário, uma vez que este agregado natural é constituído por uma curva granulométrica semelhante à do resíduo LCC. Posto isto, interessa referir que para uma percentagem de incorporação de LCC de 5%, resulta uma mistura completamente desprovida de fíler, ou seja, a produção de mastique está totalmente dependente da ligação LCC-Betume. As formulações das misturas de agregados para elaboração dos provetes referidos, são apresentadas nas Tabelas A.X, A.XI e A.XII do Anexo III.

O facto de as LCC apresentarem uma densidade muito semelhante à do fíler calcário, explica o resultado obtido em relação aos valores Bt obtidos para os provetes de MB Fuso A com incorporação de ALF. Deste modo, e tal como demonstra o gráfico respetivo à

Figura 53, a incorporação de LCC não implica uma alteração assinalável deste parâmetro. Em relação à Bm, verifica-se a redução dos valores quando há incorporação de LCC, ficando tal facto a dever-se à maior superfície específica das LCC comparativamente ao agregado natural que substitui, conforme demonstrado na Tabela 11 onde é apresentada a percentagem de material passado consoante a abertura do peneiro, evidenciando o facto do resíduo LCC conter mais de 30% de material passado no peneiro de 0,063 mm de abertura, em relação ao fíler calcário.

Tabela 11 – Comparação granulométrica entre o agregado natural (Fíler Calcário) e o resíduo (Lamas de Carbonato de Cálcio)

Peneiros		Fíler Calcário	Lamas de Carbonato de Cálcio
nº	Abertura (mm)	Gran. (%)	Gran. (%)
1 1/4	31.5	100.0	100.0
5/8	16.0	100.0	100.0
5/16	8.0	100.0	100.0
5	4.0	100.0	100.0
10	2.0	100.0	100.0
18	1.0	100.0	100.0
35	0.500	99.3	100.0
60	0.250	91.5	99.9
120	0.125	70.6	97.4
230	0.063	55.4	87.3

De referir que a superfície específica é inversamente proporcional ao diâmetro do agregado, querendo isto dizer, que quanto mais fino o material, maior será a superfície específica, logo maior consumo de ligante asfáltico para garantir a cobertura total da mistura de agregados, fundamental para o envolvimento e aglutinação dos agregados. Para o caso da mistura em que a substituição do fíler pelas LCC é total, o fenómeno descrito, traduz-se na impossibilidade de formação de mastique em quantidade necessária. Apesar de não haver tempo para produzir provetes tendo em vista a obtenção do teor ótimo de betume para esta mistura, a possibilidade do aumento da percentagem de betume debelar este problema é evidente.

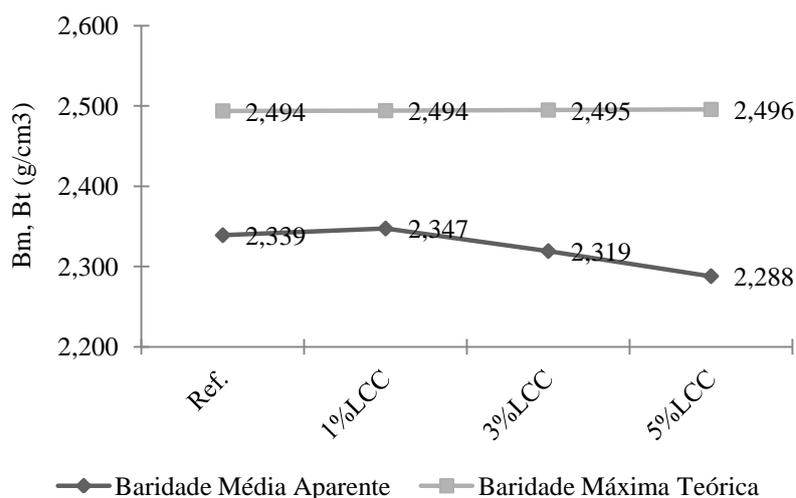


Fig.53 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC

O facto de as LCC apresentarem uma área de superfície específica superior ao agregado que substituem, associado à incorporação de 4% de betume em qualquer mistura independentemente de esta incluir uma substituição total ou parcial do fíler pelas LCC, influencia diretamente na produção insuficiente de mastique. Assim, uma vez que a incorporação de betume está fixada em 4%, quanto maior a percentagem de incorporação de LCC, menor será o envolvimento e aglutinação dos agregados da mistura, promovendo o conseqüente aumento de vazios na mistura, conforme demonstra a Figura 54.

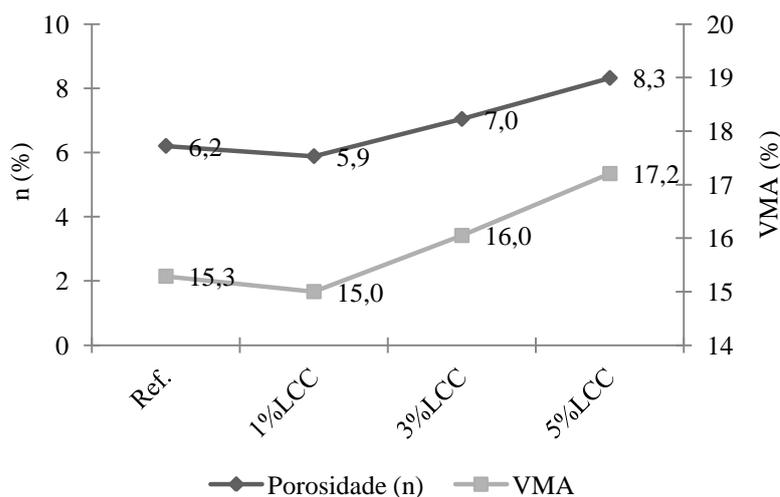


Fig.54 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC

Em relação aos valores de Estabilidade e Deformação obtidos pelo ensaio de compressão Marshall, de acordo com a Figura 55, o aumento de percentagem de incorporação de LCC confere à mistura uma redução destes dois parâmetros.

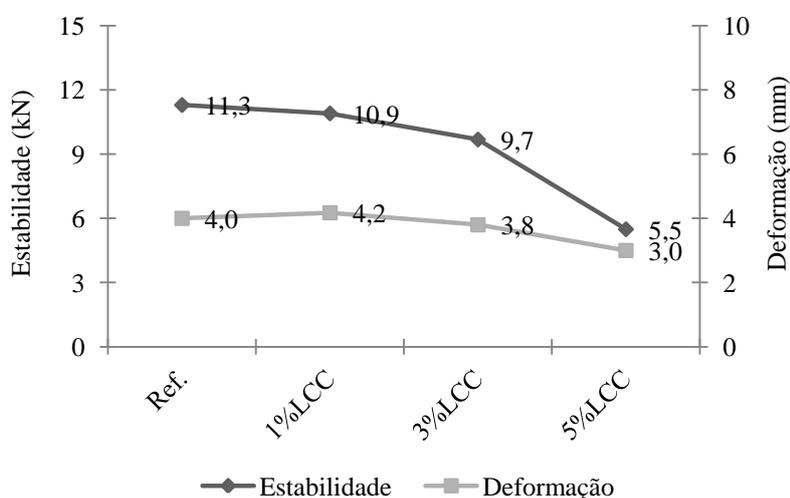


Fig.55 – Estabilidade e Deformação de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC

Esta diminuição é acentuada a partir dos 3% de incorporação, evidenciando a inaplicabilidade da total substituição do fíler calcário por LCC. Este facto deve-se à carência de betume destas misturas, uma vez que devido à maior superfície específica do resíduo em relação ao fíler, estas misturas deveriam conter uma percentagem de betume superior, de modo a formar masticque em proporções adequadas. Este facto é demonstrado na Figura 56, onde são apresentadas fotografias obtidas com recurso a lupa de ampliação de uma mistura referênciada (sem resíduos) à esquerda, e uma mistura com total substituição do fíler por LCC à direita. Na mesma é evidente o contraste entre uma mistura em que há exsudação de betume (MB Fuso A Referênciada (sem resíduos)), e outra em que é notória a carência de betume (MB Fuso A com incorporação de 5% LCC).

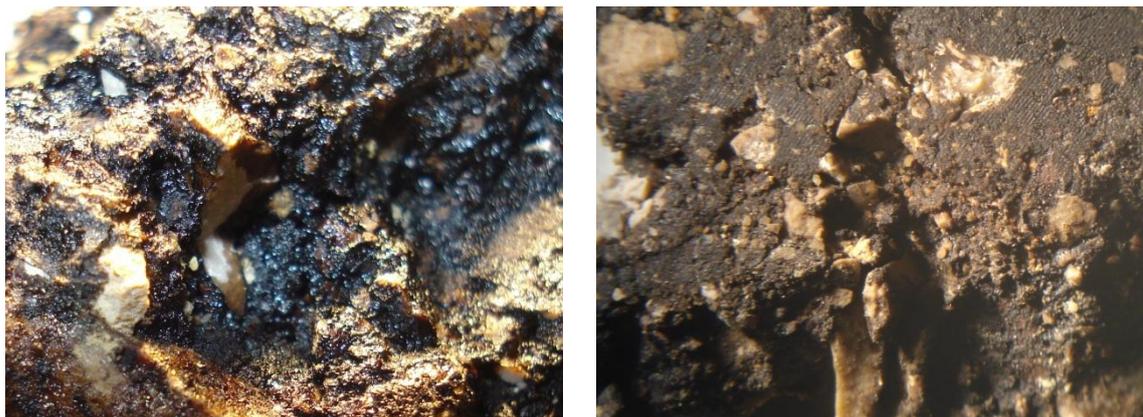


Fig.56 – Esq.: MB Fuso A Referência (sem resíduos); Dir.: MB Fuso A com incorporação de 5% LCC

Não obstante o facto da incorporação de LCC se revelar viável e com bons resultados até aos 3% de incorporação, a necessidade de existência de fíler para formar o mastique parece ser fundamental. Inclusivamente e conforme evidencia a Figura 57, é notória a desagregação dos provetes em que a substituição do fíler é total.



Fig.57 – Desagregação de provetes de MB Fuso A com incorporação de 5% LCC

A razão entre a força de rotura e a deformação, traduz exactamente o já referido quanto à aplicabilidade deste resíduo (Figura 58). Não obstante o facto da incorporação de LCC resultar num bom comportamento da mistura até aos 3% de substituição do fíler, quando a substituição do fíler pelas LCC é total, apresenta elevada desagregação e um Quociente Marshall abaixo do limite mínimo recomendado.

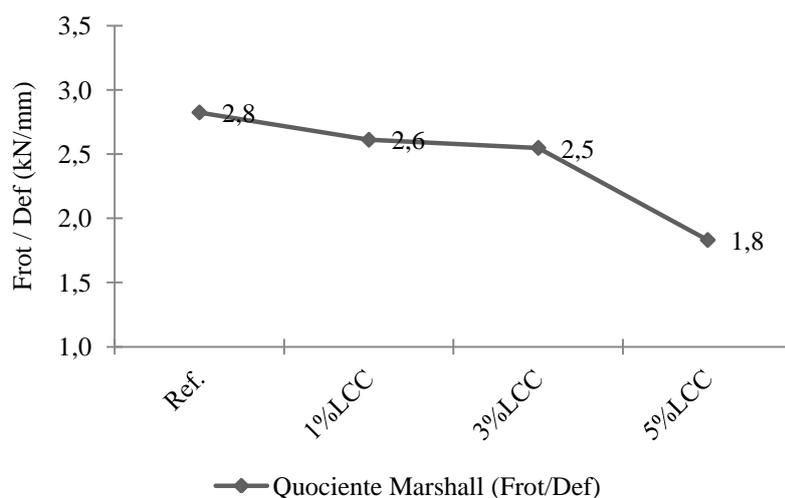


Fig.58 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC

Em relação ao Grau de Saturação em Betume (Sb), verifica-se na Figura 59 que a incorporação de LCC promove a redução da saturação em betume, evidenciando o facto de as LCC apresentarem uma superfície específica superior ao fíler, resultando na carência em betume para formar mastique em condições adequadas ao envolvimento e aglutinação dos agregados, tal como demonstra a Figura 56.

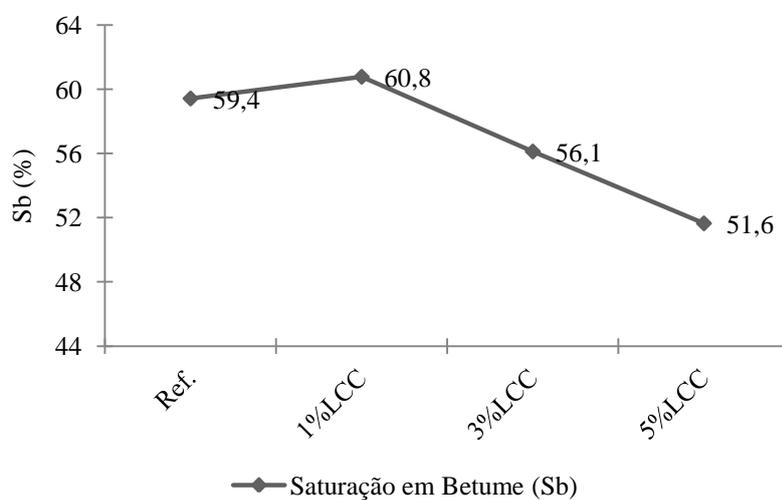


Fig.59 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de LCC

3.2.4. Efeito da incorporação conjugada de resíduos

Neste subcapítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos com os provetes de misturas betuminosas de MB Fuso A com incorporação resíduos de forma conjugada. Além da incorporação de resíduos de forma individual até aqui discutida, a incorporação de resíduos foi também efetuada de forma conjugada, onde dois ou mesmo os três resíduos em estudo foram incorporados no sentido de procurar soluções de viabilidade de aplicação dos resíduos de forma conjunta. Assim sendo, e nos mesmos moldes que foi efetuada a incorporação de resíduos de forma individual, as Escórias e as ALF substituiriam o pó-de-pedra calcário e as LCC o fíler calcário, conforme as formulações das misturas de agregados apresentadas nas Tabelas A.XIII, A.XIV, A.XV, A.XVI e A.XVII do Anexo III.

Em relação às Bm e Bt dos provetes com incorporação de resíduos conjugados, é de referir que o seu comportamento segue a mesma tendência das misturas onde a incorporação foi efetuada de forma individual. Assim sendo e analisando o gráfico respetivo à Figura 60, verifica-se que as misturas que contêm Escórias apresentam uma baridade inferior devido à baixa densidade desse resíduo.

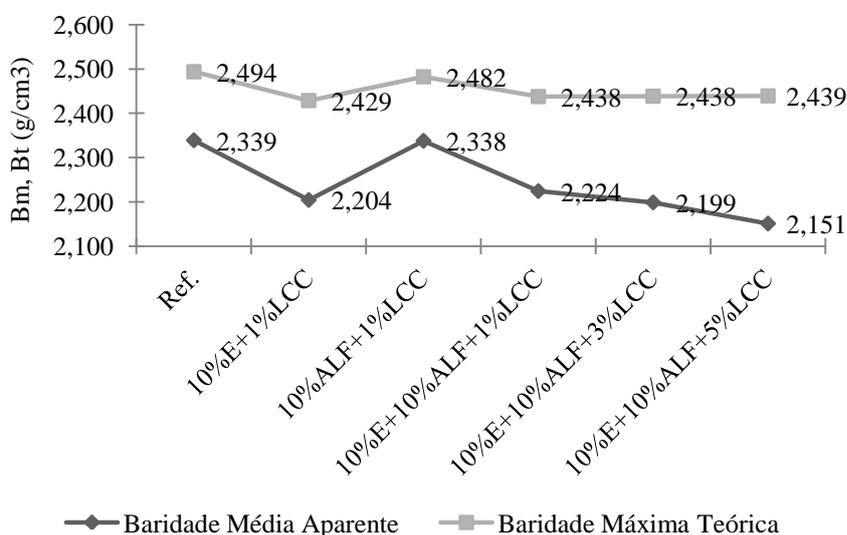


Fig.60 – Baridade média aparente (Bm) e baridade máxima teórica (Bt) de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados

Ao contrário da Bm, a Porosidade e o VMA apresentam valores elevados para misturas que contenham Escórias (Figura 61). Tal facto deve-se à menor eficácia quanto ao empacotamento da mistura conferido pela adição deste resíduo, além do aumento de vazios

proporcionado pela crescente incorporação de LCC, que como referido anteriormente, necessitam de uma maior quantidade de betume comparativamente ao fíler, devido à sua maior superfície específica.

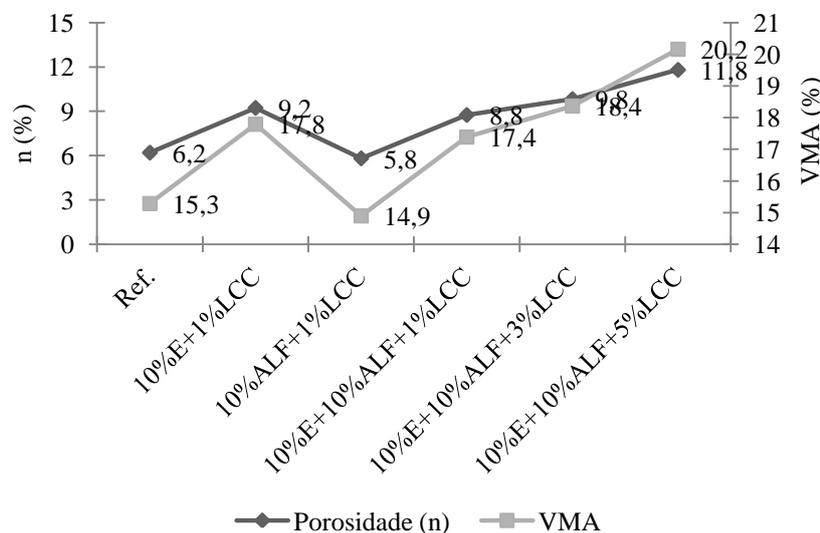


Fig.61 – Porosidade e VMA de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados

Em relação aos valores de Estabilidade e Deformação obtidos pelo ensaio de compressão Marshall, de referir que os provetes com incorporação de dois resíduos, quer com 10% de Escórias, quer com 10% de ALF, ambos conjugados com 1% de LCC, apresentam quanto a estes parâmetros, resultados muito próximos da mistura referência. Em relação aos provetes com incorporação dos três resíduos onde a única percentagem que varia corresponde à incorporação de LCC, é de salientar o bom resultado quanto à estabilidade até aos 3% de incorporação. Mais uma vez evidencia-se a inaplicabilidade da total substituição do fíler por LCC, onde está comprometido o bom comportamento desta mistura (Figura 62).

Em relação à Deformação e tal como demonstra a Figura 62, este parâmetro não revela variações significativas. Exceção ao referido é a mistura em que a totalidade do fíler é substituída por LCC, revelando-se uma mistura excessivamente rígida, onde se verifica a carência em betume, ou seja, betume na quantidade suficiente que garanta flexibilidade à mistura.

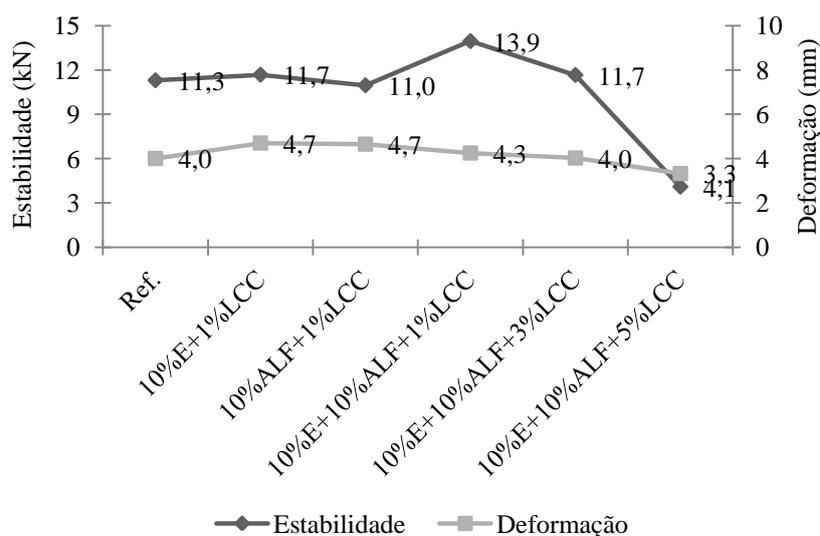


Fig.62 – Estabilidade e Deformação de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados

O valor do Quociente Marshall revela, que à exceção da mistura totalmente desprovida de fíler calcário, todas as outras misturas com incorporação de resíduos de forma conjugada, apresentam uma estabilidade no mínimo duas vezes superior à deformação, revelando a aplicabilidade inerente a estas misturas. Ainda de referir os bons resultados quanto a estes parâmetros das misturas com incorporação dos três resíduos até aos 3% de incorporação de LCC e ainda o facto das misturas 10%E+1%LCC e 10%ALF+1%LCC apresentarem valores similares à mistura referência (Figura 63).

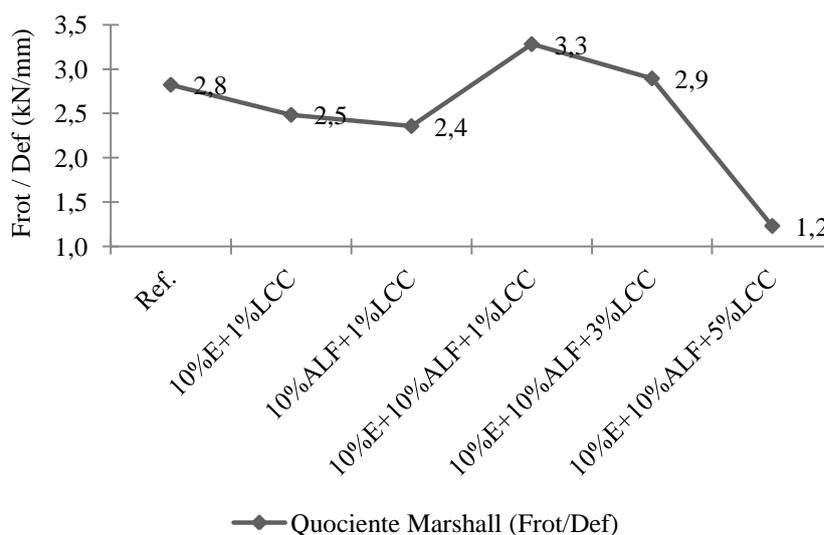


Fig.63 – Quociente Marshall de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados

De acordo com a Figura 64, verifica-se que a substituição do fíler calcário por LCC, conduz a uma redução da saturação em betume nas misturas estudadas. Este efeito pode estar relacionado com o facto de as LCC apresentarem uma superfície específica superior ao fíler, resultando da carência em betume para formar mastique em quantidades adequadas ao envolvimento e aglutinação dos agregados. O fenómeno descrito é demonstrado na Figura 65, onde são confrontadas fotografias obtidas com recurso a lupa de ampliação de uma mistura referência (sem resíduos) e de uma mistura com incorporação dos três resíduos e totalmente desprovida de fíler.

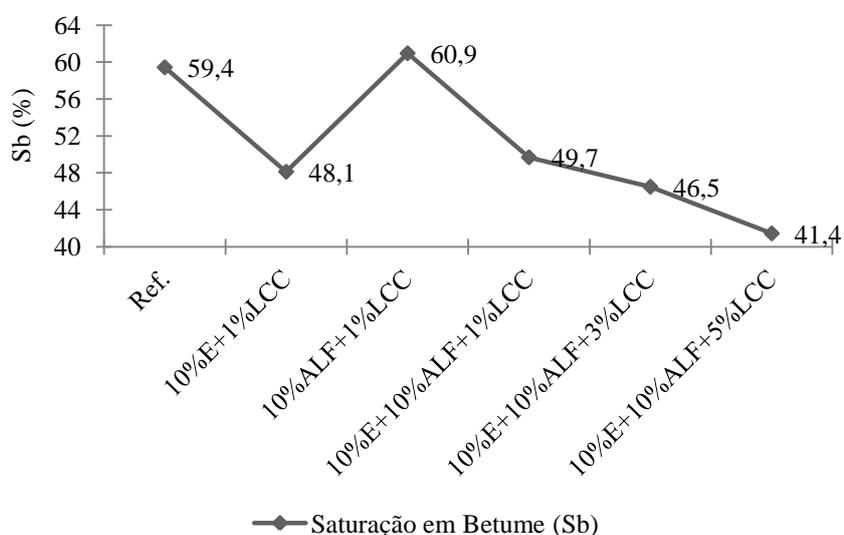


Fig.64 – Grau de saturação em betume (Sb) de provetes de MB Fuso A com incorporação de resíduos conjugados

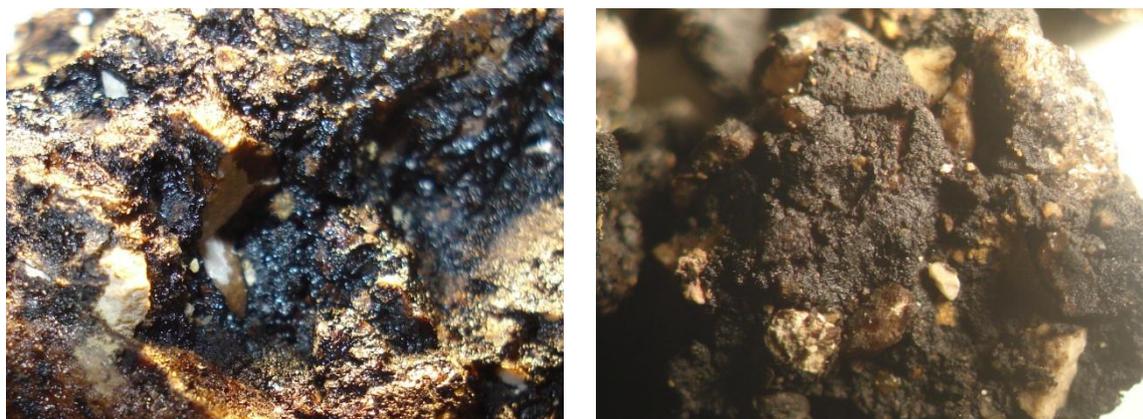


Fig.65 – Esq.: MB Fuso A Referência (sem resíduos); Dir.: MB Fuso A com incorporação de 10% de Escórias, 10% de LCC e 5% LCC

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu concluir que os resíduos em estudo revelam potencial de aplicação como agregados na construção de camadas de pavimentos rodoviários. A viabilidade de utilização destes resíduos resulta em impactos positivos ao nível social e sobretudo ambiental. Efetivamente, a valorização de resíduos traduz-se na minimização dos impactes ambientais associados à deposição dos mesmos em aterro, ao mesmo tempo que se promove a minimização da exploração de agregados naturais não renováveis.

Os resíduos denominados como Escórias e ALF foram incorporados nas misturas em substituição do pó-de-pedra calcária, devendo-se tal facto à semelhança evidenciada pelas curvas granulométricas respeitantes a ambos. Quanto ao resíduo denominado LCC, a sua incorporação efetuou-se seguindo o mesmo princípio mas em substituição do fíler calcário. O facto de os resíduos em estudo apresentarem curvas granulométricas semelhantes aos agregados naturais que substituem, são reveladoras do seu potencial para os substituir.

As escórias constituídas predominantemente por sílica e alguma percentagem de alumina, trata-se de um resíduo de baixa densidade comparativamente ao agregado natural que substitui, apresenta uma granulometria contínua e de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de EA e VBS reduzida quantidade de impurezas que se traduz num material insensível à água.

As ALF são constituídas essencialmente por sílica, devido à sua origem estar relacionada com as areias siliciosas usadas em leito fluidizado de caldeiras. Este resíduo apresenta uma densidade semelhante ao agregado natural que substituiu, uma granulometria descontínua, fruto da concentração de uma elevada fração da sua massa entre 0,5 e 1,0mm de dimensão de agregado, fator revelador da homogeneidade do material e, também uma sensibilidade à água praticamente nula, devido à inexistência relevante de impurezas ou material fino.

A LCC trata-se de um resíduo totalmente distinto de todos os resíduos em estudo. Este resíduo é constituído, praticamente de forma total, por calcite (carbonato de cálcio), apresenta uma densidade e uma curva granulométrica semelhante ao agregado natural que substitui, tratando-se portanto de um material muito fino, logo de elevada superfície

específica. Devido à pureza evidenciada não se considerou necessária a determinação do grau de impurezas deste resíduo. Ainda de referir, o facto de este resíduo, revelar perda de praticamente metade da sua massa, quando sujeito a temperaturas próximas dos 800°C. Este fenómeno decorre da quebra da molécula de CaCO_3 (principal constituinte), resultando na libertação de CO_2 .

Ao longo do capítulo respetivo à análise e discussão de resultados, foram indicadas as conclusões relativas aos estudos efetuados às misturas betuminosas com incorporação individual e conjugada de resíduos, pelo que neste capítulo apenas se vai referir resumidamente as conclusões mais relevantes.

A incorporação de Escórias, devido à baixa densidade das mesmas em relação ao agregado que substitui, conferiu o decréscimo da baridade das misturas betuminosas. O aumento da percentagem de incorporação resultou no aumento proporcional do volume de vazios, resultado do menor empacotamento da mistura, conferido pela adição de escórias. Este facto parece estar relacionado com a capacidade absorvente do resíduo, uma vez que o grau de saturação em betume baixa consideravelmente com a crescente incorporação de escórias. O Quociente Marshall (razão entre força de rotura e deformação), como já referido, preconiza, segundo o Caderno de Encargos Tipo Obras 2009 (EP - Estradas de Portugal, 2009), que o valor mínimo para este parâmetro deve ser igual a 2, ou seja, a força de rotura deverá ser sempre duas vezes superior à deformação. Posto isto, verificou-se que até aos 5% de incorporação de Escórias, este valor não era atingido, revelando que esta mistura não daria garantias de aplicação. No entanto, verificou-se que o aumento da percentagem de incorporação para 10 e 20%, resultou num conseqüente aumento deste Quociente para valores que garantem a aplicabilidade desta mistura. Ainda de referir, que tanto para 10 como para 20% de incorporação de Escórias, as misturas resultantes apresentam resultados semelhantes à mistura referência, evidenciando tratar-se de soluções com garantias de aplicabilidade.

As ALF apresentam uma baridade semelhante ao resíduo que substituem, logo as misturas betuminosas com adição de ALF não sofreram oscilações de maior quanto a este parâmetro, sendo apenas verificada uma ligeira quebra para valores elevados de incorporação como 20%. Em relação ao volume de vazios, os efeitos produzidos pela incorporação do resíduo, são apenas verificados igualmente para 20% de incorporação,

revelando-se estas misturas como mais porosas, sendo que o mesmo se pode dever ao facto de as ALF apresentarem uma granulometria descontínua. Em relação ao Quociente Marshall, verifica-se que as misturas com 5 e 10% de incorporação de ALF, apresentam condições de aplicabilidade, ao contrário da mistura com 20% de incorporação, onde esta razão entre força de rotura e deformação é inferior a 2, verificando-se que a elevada deformação desta mistura associada a um ligeiro decréscimo da estabilidade, resultou numa mistura que não garante condições de aplicação. De salientar os bons resultados para uma incorporação de 5% de ALF, visto que esta mistura apresenta um valor de Quociente Marshall superior à mistura referência, evidenciando-se como a mistura que melhor comportamento oferece, quanto à adição de ALF de forma individual.

O facto das LCC se tratarem de um material substancialmente mais fino que o fíler calcário e por esse facto apresentarem uma área de superfície específica superior, repercutiu-se severamente nos resultados obtidos. Assim, o aumento da percentagem de incorporação deste resíduo, resultou num conseqüente aumento do consumo de betume pelos finos, traduzindo-se no decréscimo da saturação em betume até níveis de carência, demonstrados pela desagregação verificada nos provetes com incorporação de 5% de LCC, ou seja, quando a totalidade do fíler é substituída pelo resíduo. Conseqüentemente à diminuição de betume, proporcionou-se o aumento de vazios das misturas, resultado da menor quantidade de betume disponível para envolvimento dos agregados. Verificou-se no entanto que para percentagens de incorporação de 1 e 3% os resultados são perfeitamente satisfatórios e mesmo semelhantes aos da mistura referência. A mistura com 1% de incorporação de LCC evidenciou-se como a que melhores condições de aplicação oferece. Apesar de não haver tempo para produzir provetes tendo em vista a obtenção do teor ótimo de betume, a possibilidade do aumento da percentagem de betume debelar este problema é evidente.

Em relação à incorporação conjugada de resíduos, importa salientar que o comportamento das misturas foi quase sempre ao encontro dos comportamentos verificados para as misturas onde a incorporação de resíduos foi efetuada de forma individual. As misturas de resíduos conjugados, que melhor se perfilam com viabilidade de aplicação, foram as misturas com incorporação de 10% de Escórias e 10% de ALF simultaneamente e com 1 e 3% de LCC, evidenciando melhor comportamento que a própria mistura referência. Ainda de referir, que apenas a mistura que inclui os três resíduos mas onde a totalidade do fíler é

substituído por LCC (5%), se revela como inaplicável. A mesma apresenta elevada desagregação e um Quociente Marshall não desejável (inferior a 2).

Em termos de linhas futuras de investigação a desenvolver neste campo sugerem-se as seguintes:

- Realizar estudos que avaliem a ocorrência de lixiviação nas misturas betuminosas com os resíduos ensaiados;
- Estudo de viabilidade económica da aplicação destes resíduos (análise custo/benefício);
- Estudo da viabilidade de aplicação destes resíduos em misturas respetivas a camadas mais superficiais, logo mais exigentes;
- Estudo comportamental das mesmas formulações betuminosas mas fazendo variar a percentagem de betume;
- Aplicação *in situ* das formulações betuminosas estudadas, através de trechos experimentais e acompanhamento do seu desempenho.

5. BIBLIOGRAFIA

5.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akbulut, H.; Güreer, G. (2007); "*Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*". Building and Environment. Vol. 42, p. 1921–1930.

Almeida, M. D.; Gomes, J. P. C.; Oliveira, L. A. P. "*Valorização de resíduos de minas em Pavimentos de baixo custo: Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura*": Universidade da Beira Interior. Disponível em WWW:<URL:http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CDgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cmade.ubi.pt%2Fpdf%2Fnational_journal%2Fartigo_cvresiduos.pdf&ei=F1vOTvSDIYLb8gOluogH&usg=AFQjCNEo9WgzjI_scJdmqXanwGMJzO8e3w&sig2=MyezwlJrmWKO6HatJZjjw>.

Arm, M. (2003); "*Mechanical properties of residues as unbound road materials*", Doctoral Thesis, KTH Vetenskap Och Konst, Stockholm, Sweden.

Branco, F.; Picado Santos, L.; Pereira, P. (2008); "*Pavimentos Rodoviários*". Edições Almedina.

Celpa (2010); "*Boletim Estatístico 2010 – Indústria Papeleira Portuguesa*". Disponível em WWW:<URL:<http://www.celpa.pt/index.php?article=240&visual=22&layout=3>>.

Coelho, A. M. (2010); "*Gestão de cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa*", Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.

Coutinho, J. S.; Garcia, M. L. (2008); "*Investigação inicial de resíduos da indústria de pasta de papel*". Inovação na Construção Sustentável. Vol. 1 - Plataforma para a Construção Sustentável, p. 173–184.

EP - Estradas de Portugal, S. A. (2009); "*Caderno de Encargos Tipo Obras (CETO) - Versão Preliminar de Fev. 2009*". Disponível em WWW:<URL:<http://www.estradasdeportugal.pt/index.php/pt/areas-de-actuacao/empreendimentos>>.

Fonseca, P. (2002); "*Reciclagem de pavimentos rodoviários: 6ª Semana das Engenharias*", Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança.

Gulyurtlu, I. (2007); "*Estado da arte da gasificação e combustão de biomassa: Seminário - Culturas energéticas, biomassa e biocombustíveis*", Universidade de Évora.

Huang, Y.; Bird, R. N.; Heidrich, O. (2007); *"A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements"*. Resources, Conservation and Recycling. ISSN 0921-3449. Vol. 52, n.º 1, p. 58-73.

Jackson, N. M.; Schultz, S.; Sander, P.; Schopp, L. (2009); *"Beneficial use of CFB ash in pavement construction applications"*. Fuel. ISSN 0016-2361. Vol. 88, n.º 7, p. 1210-1215.

Loo, S. V.; Koppejan, J. (2007); *"The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing"*. Earthscan Publications Ltd.

Lopes, M. G. (2010); *"Reciclagem de escórias de incineração de rsu como agregados para a construção"*, Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade de Aveiro.

Machado, L. M. M. (2002); *"Valorização de resíduos de natureza fibrosa do processo kraft de produção de pastas de eucalipto"*: Universidade da Beira Alta, Covilhã.

Modolo, R. (2006); *"Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil"*, Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos, Universidade de Aveiro.

Modolo, R.; Benta, A.; Ferreira, V. M.; Machado, L. M. (2010); *"Pulp and paper plant wastes valorisation in bituminous mixes"*. Waste Management. ISSN 0956-053X. Vol. 30, n.º 4, p. 685-696.

Monte, M. C.; Fuente, E.; Blanco, A.; Negro, C. (2009); *"Waste management from pulp and paper production in the European Union"*. Waste Management. ISSN 0956-053X. Vol. 29, n.º 1, p. 293-308.

Pinto, S. J. F. (2005); *"Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves"*, Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental Materiais e Valorização de Resíduos, Universidade de Aveiro.

Portucel (2006); *"Prospecto de Admissão à Negociação ao Eurolist by Euronext da Euronext Lisbon – Sociedade Gestora de Mercados Regulamentados, S.A."*.

Rajama, R.; Tarelho, L.; Ball, R. J., L.; Labrincha, J. A.; Allen, G. C.; Ferreira, V. M. (2008); *"Characterisation and use of biomass fly ash incorporation in cement-based materials"*. Inovação na Construção Sustentável. Vol. 1 - Plataforma para a Construção Sustentável, p. 205–215.

Reis-de-Barros, J.; Lopes, M. G. (2002); *"Estudo da utilização de escórias de R.S.U. na construção de pavimentos: Conferência científica e tecnológica em engenharia"*.

Reis-de-Barros, J.; Lopes, M. G.; Correia, A. G. (2006); *"Escórias de R.S.U.: Caracterização mecânica para fins rodoviários: 10º Congresso Nacional de Geotecnia"*, Lisboa.

Ribeiro, A.; Davim, E.; Monteiro, R.; Fernandes, M. (2007); "*Valorização das Escórias da Celulose do Caima por Técnicas de Vitriificação*". Revista Ciência e Tecnologia dos Materiais. Vol. 19, n.º 3/4.

Saltan, M.; Selcan Findik, F. (2008); "*Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement*". Building and Environment. ISSN 0360-1323. Vol. 43, n.º 4, p. 415-421.

Serkan, T. (2008); "*The effect of polypropylene fibers on asphalt performance*". Building and Environment. ISSN 0360-1323. Vol. 43, n.º 6, p. 1065-1071.

SETRA/LCPC (1992); "*Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule 1 et 2*".

Silva, C. A. R. (2009); "*Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas*", Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto.

Silva, H. (2005); "*Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique*", Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.

Sousa, P. (2009); "*Desenvolvimento tecnológico do aproveitamento energético da biomassa a nível industrial*", Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Instituto Superior Técnico.

Tecninvest (2008); "*Ampliação da central de biomassa de mortágua - Estudo de Impacte Ambiental: Tecninvest 2 - Estudos de Desenvolvimento, Tecnologia e Inovação, Lda.*". Disponível em WWW:<URL:http://aiacirca.apambiente.pt/Public/irc/aia/aiapublico/library?l=/aia1859_florestal/eia_mortaguapdf/_PT_1.0_&a=d>.

Teixeira, E. R. (2010); "*Propriedades de leitos usados na combustão de biomassa em leito fluidizado*", Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.

Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E.-U.; Ogada, T.; Siagi, Z. (2000); "*Combustion of agricultural residues*". Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 26, p. 1-27.

Wildbacher, N. (2007); "*Biomass energy for heating and hot water supply in Belarus: Fact sheet ash utilisation*": BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Austria.

Yin, C.; Rosendahl, L. A.; Kær, S. (2008); "*Grate-firing of biomass for heat and power production*". Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 34, p. 725-754.

5.2. Webgrafia

- [1] Biomassa florestal; Disponível em:
http://www.cienciaviva.pt/veraocv/engenharia/eng2004/index.asp?acao=showactividade&id_actividade=5&id_entidade=179, consultado em 02/11/2011.
- [2] Portal das Energias Renováveis – Biomassa; Disponível em:
http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=5&ID_area=2&ID_sub_area=3, consultado em 02/11/2011.
- [3] Fotos da Central Termoelétrica de Mortágua; Disponível em:
http://www.mortagua.com/paginas/fotos_outras.html, consultado em 02/11/2011.
- [4] Mendes, G., Reis, F., Ventura, I., Silva, V. (2006); “Transporte e produção de energia em Portugal” Trabalho para a disciplina Física da Energia, Instituto Superior Técnico, 26 de Outubro de 2006. Disponível em:
http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CFQQFjAA&url=https%3A%2F%2Fdspace.ist.utl.pt%2Fbitstream%2F2295%2F73792%2F1%2Fapresenta%25C3%25A7%25C3%25A3o%2520final-r.pdf&ei=JpvRTomyEsG08QPZnrn5Aw&usg=AFQjCNEMtR8F6xbZ2ksBOzv5W5yVVpmt-g&sig2=vwA3KRqUH1PY3Wwyg0YA_Q, consultado em 02/11/2011.
- [5] Celpa, (2010); Celpa – Associação da Indústria Papeleira; Disponível em:
<http://www.celpa.pt/index.php>, consultado em 29/10/2011.
- [6] Fábrica Portucel (Cacia); Disponível em:
<http://www.panoramio.com/photo/2507138>, consultado em 02/11/2011.
- [7] Processo Kraft ; “Estudo Preliminar de uma Unidade de Produção de Pasta Branca Para Papel – Processo Kraft”; Disponível em:
http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fanteprojectogrupo4.no.sapo.pt%2Fpreliminar.pdf&ei=GV6xTo_wBMWP8gO03tjDAQ&usg=AFQjCNGQaUVJxmTqnCyxqiSerxmlq_wmTg&sig2=9Lp8nP9tmD0XYNtOGxUwTA, consultado em 29/10/2011.
- [8] Caustificação; Disponível em:
<http://pt.scribd.com/doc/55946288/Apostila-Caustifica%C2%9D%C2%9D>, consultado em 02/11/2011.

Anexos

**ANEXO I – Densidade pelo método do picnómetro dos agregados e
resíduos utilizados no fabrico das misturas betuminosas**

A Tabela A.I apresenta a densidade dos resíduos e agregados naturais, obtida segundo o método do picnômetro de vácuo, com base nas diretrizes dispostas na norma NP EN 1097-6 de 2003. Os valores densidade adotados foram obtidos efetuando a média entre duas amostras de cada agregado ou resíduo.

Tabela A.I – Densidade dos agregados e resíduos

Amostra	Pic.	Pic + H ₂ O	Pic. + Amostra Seca	Amostra Seca	Pic. + Amostra Saturada	Amostra Saturada	ρ	$\rho_{\text{adot.}}$
	(g)							
	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	g/cm ³	g/cm ³
Brita 2	220.1	894.6	746.9	526.8	1224.4	329.9	2.675	2.675
Brita 2	219.6	893.9	632.5	413.0	1152.5	258.5	2.674	
Brita 1	220.1	894.6	623.2	403.1	1147.5	253.0	2.684	2.684
Brita 1	219.6	893.9	576.1	356.6	1117.7	223.7	2.684	
Lamas de Carbonato de Cálcio	41.7	148.4	60.1	18.4	159.8	11.4	2.642	2.640
Lamas de Carbonato de Cálcio	42.6	143.1	63.9	21.3	156.3	13.2	2.637	
Pó-de-Pedra Calcário	41.7	148.4	100.8	59.0	185.0	36.5	2.622	2.623
Pó-de-Pedra Calcário	53.6	159.3	100.7	47.1	188.4	29.1	2.624	
Fíler Calcário	42.2	142.9	59.8	17.6	153.7	10.8	2.598	2.596
Fíler Calcário	44.6	151.7	63.9	19.3	163.5	11.9	2.595	
Escórias	220.1	894.6	359.6	139.5	968.3	73.7	2.121	2.110
Escórias	219.6	893.9	386.2	166.7	981.2	87.3	2.099	
Areias de Leito Fluidizado	220.1	894.6	580.6	360.5	1116.9	222.4	2.611	2.597
Areias de Leito Fluidizado	219.6	893.9	569.7	350.1	1108.5	214.5	2.583	

**ANEXO II – Limites considerados para o valor de azul-de-metileno
(VBS)**

Tabela A.II – Limites considerados para o valor de azul-de-metileno (VBS) [Fonte: (SETRA/LCPC, 1992)]

VBS (g/100g de material)	Descrição:
$VBS \leq 0,1$	Solos insensíveis à água
$0,1 < VBS \leq 0,2$	Solos muito pouco sensíveis à água
$0,2 < VBS < 1,5$	Solos com sensibilidade à água
$VBS = 1,5$	Valor que distingue os solos areno-siltosos dos areno-argilosos
$VBS = 2,5$	Valor que distingue os solos siltosos pouco plásticos dos medianamente plásticos
$VBS = 6,0$	Valor que distingue os solos siltosos dos argilosos
$VBS = 8,0$	Valor que distingue os solos argilosos dos solos muito argilosos

**ANEXO III – Formulação das misturas de agregados para a
elaboração dos provetes betuminosos**

Tabela A.III – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (Referência)

Peneiros		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
n°	Abert. (mm)	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	43%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	5.0	91 %	72% - 93%
5/16	8.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	43.0	100.0	5.0	57 %	45% - 66%
5	4.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	43.0	100.0	5.0	49 %	34% - 49%
10	2.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	32.1	100.0	5.0	38 %	26% - 41%
18	1.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	19.4	100.0	5.0	25 %	17% - 31%
35	0.500	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	11.8	99.3	5.0	17 %	12% - 26%
60	0.250	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	7.0	91.5	4.6	12 %	7% - 18%
120	0.125	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	4.0	70.6	3.5	8 %	4% - 14%
230	0.063	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.8	55.4	2.8	5 %	2% - 7%

Tabela A.IV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (5% Escórias)

Peneiros		Escórias		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
n°	Abert. (mm)	Granu.	5%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	38%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	5.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	38.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	4.6	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	38.0	100.0	5.0	91 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	4.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	38.0	100.0	5.0	56 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	3.2	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	38.0	100.0	5.0	47 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	2.3	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	28.3	100.0	5.0	36 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	1.4	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	17.1	100.0	5.0	24 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	0.8	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	10.4	99.3	5.0	16 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	0.4	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	6.2	91.5	4.6	11 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	0.3	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	3.6	70.6	3.5	8 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.6	55.4	2.8	5 %	2% - 7%

Tabela A.V – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% Escórias)

Peneiros		Escórias		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Filer		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	10%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	33%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	9.2	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	5.0	90 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	8.1	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	33.0	100.0	5.0	55 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	6.4	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	33.0	100.0	5.0	45 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	4.6	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	24.6	100.0	5.0	35 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	2.8	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	14.9	100.0	5.0	23 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	1.6	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	9.1	99.3	5.0	16 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	0.9	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	5.4	91.5	4.6	11 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	0.5	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	3.1	70.6	3.5	7 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.3	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.4	55.4	2.8	5 %	2% - 7%

Tabela A.VI – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (20% Escórias)

Peneiros		Escórias		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Filer		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	20%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	23%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	20.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	18.4	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	5.0	89 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	16.1	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	23.0	100.0	5.0	54 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	12.9	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	23.0	100.0	5.0	42 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	9.3	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	17.2	100.0	5.0	32 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	5.7	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	10.4	100.0	5.0	21 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	3.2	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	6.3	99.3	5.0	15 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	1.8	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	3.7	91.5	4.6	10 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	1.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	2.1	70.6	3.5	7 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.6	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.0	55.4	2.8	4 %	2% - 7%

Tabela A.VII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (5% ALF)

Peneiros		ALF		Brita 1		Brita 2		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	5%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	38%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	5.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	38.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	90.5	4.5	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	38.0	100.0	5.0	90 %	72% - 93%
5/16	8.0	84.7	4.2	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	38.0	100.0	5.0	57 %	45% - 66%
5	4.0	76.8	3.8	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	38.0	100.0	5.0	48 %	34% - 49%
10	2.0	62.4	3.1	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	28.3	100.0	5.0	37 %	26% - 41%
18	1.0	38.1	1.9	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	17.1	100.0	5.0	24 %	17% - 31%
35	0.500	2.0	0.1	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	10.4	99.3	5.0	16 %	12% - 26%
60	0.250	0.1	0.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	6.2	91.5	4.6	11 %	7% - 18%
120	0.125	0.0	0.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	3.6	70.6	3.5	7 %	4% - 14%
230	0.063	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.6	55.4	2.8	4 %	2% - 7%

Tabela A.VIII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% ALF)

Peneiros		ALF		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	10%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	33%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	90.5	9.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	5.0	90 %	72% - 93%
5/16	8.0	84.7	8.5	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	33.0	100.0	5.0	56 %	45% - 66%
5	4.0	76.8	7.7	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	33.0	100.0	5.0	47 %	34% - 49%
10	2.0	62.4	6.2	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	24.6	100.0	5.0	36 %	26% - 41%
18	1.0	38.1	3.8	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	14.9	100.0	5.0	24 %	17% - 31%
35	0.500	2.0	0.2	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	9.1	99.3	5.0	14 %	12% - 26%
60	0.250	0.1	0.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	5.4	91.5	4.6	10 %	7% - 18%
120	0.125	0.0	0.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	3.1	70.6	3.5	7 %	4% - 14%
230	0.063	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.4	55.4	2.8	4 %	2% - 7%

Tabela A.IX – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (20% ALF)

Peneiros		ALF		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	20%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	23%	Granu.	5%		
1 1/4	31.5	100.0	20.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	5.0	100 %	100%
5/8	16.0	90.5	18.1	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	5.0	89 %	72% - 93%
5/16	8.0	84.7	16.9	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	23.0	100.0	5.0	54 %	45% - 66%
5	4.0	76.8	15.4	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	23.0	100.0	5.0	44 %	34% - 49%
10	2.0	62.4	12.5	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	17.2	100.0	5.0	35 %	26% - 41%
18	1.0	38.1	7.6	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	10.4	100.0	5.0	23 %	17% - 31%
35	0.500	2.0	0.4	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	6.3	99.3	5.0	12 %	12% - 26%
60	0.250	0.1	0.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	3.7	91.5	4.6	9 %	7% - 18%
120	0.125	0.0	0.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	2.1	70.6	3.5	6 %	4% - 14%
230	0.063	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.0	55.4	2.8	4 %	2% - 7%

Tabela A.X – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (1% LCC)

Peneiros		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	1%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	43%	Granu.	4%		
1 1/4	31.5	100.0	1.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	4.0	100 %	100%
5/8	16.0	100.0	1.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	4.0	91 %	72% - 93%
5/16	8.0	100.0	1.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	43.0	100.0	4.0	57 %	45% - 66%
5	4.0	100.0	1.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	43.0	100.0	4.0	49 %	34% - 49%
10	2.0	100.0	1.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	32.1	100.0	4.0	38 %	26% - 41%
18	1.0	100.0	1.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	19.4	100.0	4.0	25 %	17% - 31%
35	0.500	100.0	1.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	11.8	99.3	4.0	17 %	12% - 26%
60	0.250	99.9	1.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	7.0	91.5	3.7	12 %	7% - 18%
120	0.125	97.4	1.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	4.0	70.6	2.8	8 %	4% - 14%
230	0.063	87.3	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.8	55.4	2.2	5 %	2% - 7%

Tabela A.XI – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (3% LCC)

Peneiros		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	3%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	43%	Granu.	2%		
1 1/4	31.5	100.0	3.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	2.0	100 %	100%
5/8	16.0	100.0	3.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	2.0	91 %	72% - 93%
5/16	8.0	100.0	3.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	43.0	100.0	2.0	57 %	45% - 66%
5	4.0	100.0	3.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	43.0	100.0	2.0	49 %	34% - 49%
10	2.0	100.0	3.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	32.1	100.0	2.0	38 %	26% - 41%
18	1.0	100.0	3.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	19.4	100.0	2.0	25 %	17% - 31%
35	0.500	100.0	3.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	11.8	99.3	2.0	17 %	12% - 26%
60	0.250	99.9	3.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	7.0	91.5	1.8	12 %	7% - 18%
120	0.125	97.4	2.9	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	4.0	70.6	1.4	9 %	4% - 14%
230	0.063	87.3	2.6	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.8	55.4	1.1	6 %	2% - 7%

Tabela A.XII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (5% LCC)

Peneiros		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
nº	Abert. (mm)	Granu.	5%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	43%	Granu.	0%		
1 1/4	31.5	100.0	5.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	0.0	100 %	100%
5/8	16.0	100.0	5.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	43.0	100.0	0.0	91 %	72% - 93%
5/16	8.0	100.0	5.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	43.0	100.0	0.0	57 %	45% - 66%
5	4.0	100.0	5.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	43.0	100.0	0.0	49 %	34% - 49%
10	2.0	100.0	5.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	32.1	100.0	0.0	38 %	26% - 41%
18	1.0	100.0	5.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	19.4	100.0	0.0	25 %	17% - 31%
35	0.500	100.0	5.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	11.8	99.3	0.0	17 %	12% - 26%
60	0.250	99.9	5.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	7.0	91.5	0.0	12 %	7% - 18%
120	0.125	97.4	4.9	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	4.0	70.6	0.0	9 %	4% - 14%
230	0.063	87.3	4.4	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.8	55.4	0.0	6 %	2% - 7%

Tabela A.XIII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% Escórias + 1% LCC)

Peneiros nº	Abert. (mm)	Escórias		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
		Granu.	10%	Granu.	1%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	33%	Granu.	4%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	1.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	4.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	9.2	100.0	1.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	4.0	90 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	8.1	100.0	1.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	33.0	100.0	4.0	55 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	6.4	100.0	1.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	33.0	100.0	4.0	45 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	4.6	100.0	1.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	24.6	100.0	4.0	35 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	2.8	100.0	1.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	14.9	100.0	4.0	23 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	1.6	100.0	1.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	9.1	99.3	4.0	16 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	0.9	99.9	1.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	5.4	91.5	3.7	11 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	0.5	97.4	1.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	3.1	70.6	2.8	8 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.3	87.3	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.4	55.4	2.2	5 %	2% - 7%

Tabela A.XIV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10% ALF + 1% LCC)

Peneiros nº	Abert. (mm)	ALF		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
		Granu.	10%	Granu.	1%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	33%	Granu.	4%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	1.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	4.0	100 %	100%
5/8	16.0	90.5	9.0	100.0	1.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	33.0	100.0	4.0	90 %	72% - 93%
5/16	8.0	84.7	8.5	100.0	1.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	33.0	100.0	4.0	56 %	45% - 66%
5	4.0	76.8	7.7	100.0	1.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	33.0	100.0	4.0	47 %	34% - 49%
10	2.0	62.4	6.2	100.0	1.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	24.6	100.0	4.0	36 %	26% - 41%
18	1.0	38.1	3.8	100.0	1.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	14.9	100.0	4.0	24 %	17% - 31%
35	0.500	2.0	0.2	100.0	1.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	9.1	99.3	4.0	14 %	12% - 26%
60	0.250	0.1	0.0	99.9	1.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	5.4	91.5	3.7	10 %	7% - 18%
120	0.125	0.0	0.0	97.4	1.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	3.1	70.6	2.8	7 %	4% - 14%
230	0.063	0.0	0.0	87.3	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.4	55.4	2.2	5 %	2% - 7%

Tabela A.XV – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10%Escórias + 10% ALF + 1% LCC)

Peneiros n°	Abert. (mm)	Escórias		ALF		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Filer		Curva da mistura	Fuso adotado
		Granu.	10%	Granu.	10%	Granu.	1%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	23%	Granu.	4%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	10.0	100.0	1.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	4.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	9.2	90.5	8.5	100.0	1.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	4.0	89 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	8.1	84.7	6.2	100.0	1.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	23.0	100.0	4.0	52 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	6.4	76.8	3.8	100.0	1.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	23.0	100.0	4.0	39 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	4.6	62.4	0.2	100.0	1.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	17.2	100.0	4.0	27 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	2.8	38.1	0.0	100.0	1.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	10.4	100.0	4.0	18 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	1.6	2.0	0.0	100.0	1.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	6.3	99.3	4.0	13 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	0.9	0.1	0.0	99.9	1.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	3.7	91.5	3.7	10 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	0.5	0.0	0.0	97.4	1.0	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	2.1	70.6	2.8	7 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.3	0.0	0.0	87.3	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.0	55.4	2.2	4 %	2% - 7%

Tabela A.XVI – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10%Escórias + 10% ALF + 3% LCC)

Peneiros n°	Abert. (mm)	Escórias		ALF		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Filer		Curva da mistura	Fuso adotado
		Granu.	10%	Granu.	10%	Granu.	3%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	23%	Granu.	2%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	10.0	100.0	3.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	2.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	9.2	90.5	9.0	100.0	3.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	2.0	89 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	8.1	84.7	8.5	100.0	3.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	23.0	100.0	2.0	54 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	6.4	76.8	7.7	100.0	3.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	23.0	100.0	2.0	43 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	4.6	62.4	6.2	100.0	3.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	17.2	100.0	2.0	33 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	2.8	38.1	3.8	100.0	3.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	10.4	100.0	2.0	22 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	1.6	2.0	0.2	100.0	3.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	6.3	99.3	2.0	13 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	0.9	0.1	0.0	99.9	3.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	3.7	91.5	1.8	10 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	0.5	0.0	0.0	97.4	2.9	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	2.1	70.6	1.4	7 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.3	0.0	0.0	87.3	2.6	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.0	55.4	1.1	5 %	2% - 7%

Tabela A.XVII – Formulação da mistura de agregados para a elaboração dos provetes de MB Fuso A (10%Escórias + 10% ALF + 5% LCC

Peneiros n°	Abert. (mm)	Escórias		ALF		LCC		Brita 2		Brita 1		Pó-de-Pedra		Fíler		Curva da mistura	Fuso adotado
		Granu.	10%	Granu.	10%	Granu.	5%	Granu.	27%	Granu.	25%	Granu.	23%	Granu.	0%		
1 1/4	31.5	100.0	10.0	100.0	10.0	100.0	5.0	100.0	27.0	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	0.0	100 %	100%
5/8	16.0	92.1	9.2	90.5	9.0	100.0	5.0	66.5	17.9	100.0	25.0	100.0	23.0	100.0	0.0	89 %	72% - 93%
5/16	8.0	80.7	8.1	84.7	8.5	100.0	5.0	4.2	1.1	32.9	8.2	100.0	23.0	100.0	0.0	54 %	45% - 66%
5	4.0	64.4	6.4	76.8	7.7	100.0	5.0	1.8	0.5	1.8	0.5	100.0	23.0	100.0	0.0	43 %	34% - 49%
10	2.0	46.3	4.6	62.4	6.2	100.0	5.0	1.0	0.3	0.8	0.2	74.6	17.2	100.0	0.0	33 %	26% - 41%
18	1.0	28.3	2.8	38.1	3.8	100.0	5.0	0.8	0.2	0.4	0.1	45.0	10.4	100.0	0.0	22 %	17% - 31%
35	0.500	16.0	1.6	2.0	0.2	100.0	5.0	0.7	0.2	0.3	0.1	27.4	6.3	99.3	0.0	13 %	12% - 26%
60	0.250	8.9	0.9	0.1	0.0	99.9	5.0	0.6	0.2	0.2	0.1	16.3	3.7	91.5	0.0	10 %	7% - 18%
120	0.125	5.2	0.5	0.0	0.0	97.4	4.9	0.5	0.1	0.2	0.0	9.3	2.1	70.6	0.0	8 %	4% - 14%
230	0.063	2.9	0.3	0.0	0.0	87.3	4.4	0.4	0.1	0.0	0.0	4.2	1.0	55.4	0.0	6 %	2% - 7%