

Mayara Sarisariyama Siverio Lima

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE LAMA VERMELHA NO
DESEMPENHO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE
MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof^ª. Dr.^a. Liseane Padilha Thives.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lima, Mayara Sarisariyama Siverio

Avaliação do emprego de lama vermelha no desempenho à
deformação permanente de misturas asfálticas a quente /
Mayara Sarisariyama Siverio Lima ; orientadora, Liseane
Padilha Thives - Florianópolis, SC, 2015.

158 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Lama vermelha. 3. Mistura
asfáltica. 4. Deformação permanente. 5. Dano por umidade
induzida. I. Thives, Liseane Padilha . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Regina e Juan, por terem me ensinado a nunca desistir dos meus sonhos, ao meu irmão, Juan, pela amizade e a Pojucan e Pérola por terem me acompanhado e iluminado nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Gratidão é o que sinto por aqueles que me acompanharam nesta caminhada, que de alguma forma contribuíram e me incentivaram a persistir.

A Deus somente pedi sabedoria e a Ele sou grata por me abençoar com muito mais.

Aos meus pais e irmão, que me inspiram todos os dias, por serem meus exemplos e meus guias. Por terem me ensinado que o céu é o limite e que a realização de todos os nossos sonhos depende apenas de nós mesmos.

A Pojucan e Pérola por iluminarem minha vida, serem minhas fontes diárias de motivação e alegria.

Por ter sido mais que uma orientadora, sempre dedicada e preocupada, por ter me acolhido e aceitado o desafio de trabalhar com a lama vermelha, minha eterna gratidão à Liseane.

Aos professores, sempre disponíveis e dispostos a ajudar, que contribuíram não somente para a melhoria do trabalho, como também para meu crescimento pessoal e profissional.

À Banca, pela participação, disponibilidade e contribuições realizadas.

Ao professor Glicério pela simpatia diária, sempre solícito em todos os momentos.

Ao professor Enedir e seus alunos, por terem auxiliado e fornecido equipamentos necessários para avaliação da qualidade da água.

Ao Quintero, pela ajuda e amizade.

Ao grupo de pesquisa Rodovias Verdes por terem tornado os dias de trabalho em laboratório mais estimulantes e interessantes.

Aos Laboratórios de Microscopia Eletrônica (LCME), ValoRes e NANOTEC pelo suporte na realização de ensaios.

Ao professor Alcebíades, José Antônio e Universidade Federal do Pará por terem fornecido a lama vermelha necessária para a realização do trabalho.

Às empresas CBB Asfaltos e Mineração Santa Bárbara por terem fornecido o ligante e agregados necessários. A empreiteira Fortunato Ltda por fornecer DOPE.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo auxílio financeiro, através da Bolsa de Mestrado.

À Rede Temática de Tecnologia do Asfalto/Petrobrás pela capacitação da infraestrutura do laboratório de pavimentação da UFSC.

À “Família Floripa”, amigos que tornaram a ilha da magia um lugar mais acolhedor e agradável de viver, por terem permitido que meus dias nesta nova morada fossem mais felizes.

Em especial, Diego, Nagi, Thai, Vag, Paula, Bia, Leili, Fabi, Carol, Fred, Levi, Tihiro, Pri, Cris e Moisés, meu ‘muito obrigada’ por toda ajuda e amizade.

À Florianópolis, cidade maravilhosa, que me acolheu e me fez sentir em casa.

Ao professor Benedito Coutinho Neto que permitiu que eu me apaixonasse pelas áreas de sustentabilidade e pavimentação.

Agradeço também a você, querido leitor, por dedicar seu tempo à leitura desta Dissertação. Eu espero que lhe seja útil e edificante.

*“Waste is waste if you waste it. Otherwise it's
a resource”*
(Autor desconhecido)

RESUMO

A grande quantidade de lama vermelha gerada pela indústria do alumínio tem motivado pesquisadores a desenvolver métodos de reinserção do resíduo no ciclo produtivo. Estudos comprovam a possibilidade de utilização da lama vermelha na constituição de materiais cerâmicos. Entretanto, há uma carência de pesquisas em outros enfoques, como por exemplo, na aplicação de pavimentos. Neste contexto, esta pesquisa, avaliou a introdução de lama vermelha em misturas asfálticas usinadas à quente. Estabeleceu-se um teor de 7% de filer a ser utilizado. Dessa forma, fabricaram-se misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha complementadas por 7%, 4%, 2% e 0% de filer de pó de pedra. Utilizaram-se agregados de origem granítica e uma curva granulométrica teórica correspondente à média da “Faixa C” do DNIT. Utilizou-se CAP 50/70 e o teor de projeto estabelecido com auxílio de compactador giratório. Avaliaram-se os agregados quanto a aspectos de granulometria, índice de forma, massa específica, abrasão Los Angeles, adesividade e durabilidade. O ligante asfáltico foi caracterizado por ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade. A fim de avaliar os efeitos de adição da lama vermelha no ligante, realizaram-se ensaios de ponto de amolecimento e penetração adicionando 3%, 5% e 7% de lama vermelha em peso de ligante. Com ensaios de fluorescência, massa específica, granulometria a laser, a caracterização da lama vermelha é efetuada de forma a fornecer subsídios para posterior classificação ambiental. Foram realizadas ainda, análise de pH e microscopia. As misturas asfálticas foram avaliadas quanto à deformação permanente e dano por umidade induzida (DUI). Com o objetivo de avaliar a percolação de lama vermelha e possíveis contaminações, realizou-se a análise da qualidade da água proveniente do condicionamento de corpos de prova asfálticos a 60°C do ensaio de DUI. Além do pH, analisaram-se as concentrações de ferro e alumínio presentes na água do ensaio. Os resultados foram comparados à água proveniente de abastecimento público. As misturas asfálticas constituídas por lama vermelha apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando bons indicativos na viabilidade de aplicação do resíduo, apesar dos ensaios ambientais mostrarem um vazamento de lama vermelha da mistura.

Palavras-chave: Lama vermelha. Mistura asfáltica. Deformação permanente.

ABSTRACT

The large quantity of red mud generated by aluminium industry has motivated researchers to develop methods to insert this residue in the production cycle. Some studies have proved the possibility for using red mud on ceramic materials; however, there is a lack of researches on other approaches, such as paving application. In this context, this research aims to evaluate the introduction of red mud in hot mix asphalt. Knowing the influence that amount filler has on permanent deformation resistance of asphalt mixtures, it was established a content of 7% to be used. Therefore, mixtures were made with 0%, 3%, 5% and 7% of red mud complemented by 7%, 4%, 2% and 0% stone dust filler. In this work, it is used granitic aggregates and a theoretical grading curve relative from average DNIT's "Faixa C". The binder used was the CAP 50/70 and the project content was established with the gyratory compactor. The aggregates are evaluated for particle size aspects, shape index, density, Los Angeles abrasion, adhesiveness and durability (sanity). The asphalt binder is characterized by a softening point test, penetration and viscosity. In order to evaluate the effects of red mud addition on asphalt binder, softening point and penetration tests were carried out by adding 3%, 5% and 7% red mud by weight of binder. Through x-ray diffraction tests, fluorescence, density, laser granulometry, the characterization of red mud is carried out in order to provide basis for further environmental rating. Were also measured, pH analysis with the aid of pH meter and microscopy by scanning electron microscopy. The asphalt mixtures are evaluated for performance to permanent deformation and moisture induced damage. In order to assess the red mud seepage and possible contamination that residue can cause, analysis of water quality from the conditioning moisture-induced damage test at 60 ° C was made. In addition to pH, it was analyzed the concentrations of Iron and Aluminum present in the tested water. The results were compared to water from public supply. The asphalt mixtures with red mud showed satisfactory results for resistance to permanent deformation and moisture induced damage, showing good indicators of the waste application viability.

Key words: Red mud. Asphalt concret. Permanent deformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma geral do trabalho.....	30
Figura 2 - Produção brasileira de bauxita, alumina e alumínio.....	38
Figura 3 - Evolução esquemática de processos hidrometalúrgicos.....	39
Figura 4 - Processo Bayer.....	41
Figura 5 - Métodos de disposição da lama vermelha (1965 – 2007).....	45
Figura 6 - Estocagem de lama vermelha em Barcarena/PA.....	46
Figura 7 - Empilhamento a seco em refinaria irlandesa.....	47
Figura 8 - Número de acidentes ambientais (2006 – 2012).....	49
Figura 9 - Vazamento de lama vermelha na Hungria.....	50
Figura 10 - Deformações permanentes no pavimento flexível.....	73
Figura 11 - Simulador de tráfego <i>Orniéreur</i> do LCPC (IFSTTAR).....	78
Figura 12 - Fluxograma referente às etapas de trabalho.....	88
Figura 13 - Lama vermelha destorroada.....	89
Figura 14 - Compactador giratório SUPERPAVE.....	95
Figura 15 - Corpo de prova com lama vermelha aglomerada.....	97
Figura 16 - Mesa compactadora utilizada para moldagem das placas... 98	
Figura 17 - Placas moldadas para ensaio de DP.....	99
Figura 18 - Pontos de leitura do ensaio de DP.....	99
Figura 19 - Medições realizadas no ensaio de DP.....	100
Figura 20 - Corpos de prova para ensaio de DUI.....	101
Figura 21 - Corpos de prova saturados em temperatura de -18°C.....	101
Figura 22 - Resistência à tração realizado no ensaio de DUI.....	102
Figura 23 - Representação esquemática do ensaio de DUI.....	102
Figura 24 - Esquema de equipamento utilizado no condicionamento de corpos de prova a 60°C.....	104
Figura 25 - Fotocolorímetro utilizado para realizar análise da água... 104	
Figura 26 - Análise do pH em água sem ensaio utilizando sistema de comparação visual com cartela de cores.....	105
Figura 27 - Distribuição granulométrica da lama vermelha.....	109
Figura 28 - Micrografias da lama vermelha com aproximações de 1000× (a) e 5000× (b).....	110
Figura 29 - Distribuição granulométrica dos agregados.....	112
Figura 30 - Descolamento de ligante no ensaio de adesividade.....	113
Figura 31 - Agregados recobertos por ligante e DOPE antes do ensaio de adesividade.....	114
Figura 32 - Agregados recobertos por ligante e DOPE depois do ensaio de adesividade.....	114
Figura 33 - Curva viscosidade aparente <i>versus</i> temperatura do CAP 50/70.....	117

Figura 34 - Curva granulométrica das misturas	118
Figura 35 - Corpos de prova de 150 mm constituídos por 0% e 7% de lama vermelha obtidos na compactação giratória	119
Figura 36 - Curva de compactação das misturas ($N_{projeto}$).....	121
Figura 37 - Curva de compactação das misturas ($N_{máximo}$)	122
Figura 38 - Desempenho à DP de misturas compactadas	126
Figura 39 - Corpos de prova ensaiados quanto à DP referentes às misturas de 0% e 3% de lama vermelha (esquerda pra direita), respectivamente.....	127
Figura 40 - Corpos de prova ensaiados quanto à DP referentes às misturas de 5% e 7% de lama vermelha (esquerda pra direita), respectivamente.....	127
Figura 41 - Representação gráfica da resistência à tração e volume de vazios de corpos de prova submetidos ao ensaio de DUI	130
Figura 42 - Representação gráfica da relação entre resistências à tração de corpos de prova condicionados e não condicionados.....	130
Figura 43 - Corpo de prova condicionados submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da bauxita de acordo com seus constituintes..	37
Tabela 2 - Composição química da lama vermelha (%).....	44
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens das técnicas de disposição de lama vermelha (continua).....	47
Tabela 4 - Aplicações da lama vermelha.....	54
Tabela 5 - Proporção de agregados e ligante utilizados na fabricação de misturas asfálticas	57
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados por Bezerra, Macêco e Souza (2010).....	57
Tabela 7 - Propriedades avaliadas por Bezerra, Macêco e Souza (2010).....	58
Tabela 8 - Especificação brasileira do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	60
Tabela 9 - Parâmetros avaliativos da metodologia SUPERPAVE	65
Tabela 10 - Número de giros especificados em função do tráfego.....	67
Tabela 11 - Parâmetros volumétricos de misturas asfálticas	67
Tabela 12 - Granulometria do filer.....	68
Tabela 13 - Granulometria e massa específica dos diferentes tipos de filer usados	70
Tabela 14 - Parâmetros volumétricos de dosagem obtidos por Cavalcante e Soares (2001).....	71
Tabela 15 - Resultados de resistência à tração (MPa) obtidos por Cavalcante e Soares (2001).....	71
Tabela 16 - Ensaios de caracterização da resistência à deformação permanente	75
Tabela 17 - Comparativo entre simuladores de tráfego.....	79
Tabela 18 - Resultados de deformação permanente obtidos por Nascimento (2008).....	80
Tabela 19 - Resultados de deformação permanente obtidos por Melo (2014).....	82
Tabela 20 - Fator de correção utilizado no cálculo de superfície específica.....	91
Tabela 21 - Constituição da lama vermelha	107
Tabela 22 - Granulometria dos agregados.....	111
Tabela 23 - Massa específica dos agregados.....	112
Tabela 24 - Resultados do ensaio de penetração	115
Tabela 25 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento.....	116
Tabela 26 - Resultados obtidos no ensaio de viscosidade	117
Tabela 27 - Composição granulométrica utilizada.....	118

Tabela 28 - Composições granulométricas corrigidas	119
Tabela 29 - Teores testados na dosagem das misturas	120
Tabela 30 - Grau de compactação das misturas para Nprojeto	121
Tabela 31 - Grau de compactação das misturas para Nmáximo	122
Tabela 32 - Parâmetros volumétricos das misturas no teor de projeto	123
Tabela 33 - Volume de vazios médio das placas	125
Tabela 34 - Valores de afundamento de misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha	125
Tabela 35 - Resistência à tração de corpos de prova condicionados e não condicionados	129
Tabela 36 - Análise da água proveniente de abastecimento público e após ensaio de DUI à 60°C	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABAL – Associação Brasileira do Alumínio
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP – Agência Nacional do Petróleo
APA – *Asphalt Pavement Analyser*
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNT – Confederação Nacional do Transporte
COD – *Crystallography Open Database*
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSH – Silicato de cálcio hidratado
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DP – Deformação permanente
DRX – Difração de raios-x
DUI – Dano por umidade induzida
EDX – Espectrometria de energia dispersiva de raios-x
EPA – *Environmental Protection Agency*
Gmb – Massa específica aparente
Gmm – massa específica máxima medida
Gsa – Massa específica real da combinação dos agregados
Gsb – Massa específica aparente seca da combinação dos agregados
Gse – Massa específica efetiva da combinação dos agregados
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBM – Instituto Brasileiro de Mineração
ICDD – *International Center for Diffraction Data*
IFSTTAR – Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de L'amenagement et des Reseaux
IIA – Instituto Internacional do Alumínio
LCME – Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
LV – Lama vermelha
Mag – Massa do agregado
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

NNA – Nanoargila
NANOTEC – Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em
Construção Civil
NTC – Nanotubo de carbono
P/A – Relação pó/asfalto
PDF – *Powder Diffraction File*
pH – Potencial Hidrogeniônico
Pli – Teor de ligante inicial
PP – Filer de pó de pedra
RBV – Relação Betume/Vazios
REGAP- Refinaria Gabriel Passos
REVAP- Refinaria Henrique Lage
RSST-CH – *Repeated Simple Shear Test at Constant Height*
RT – Resistência à tração de corpos de prova não condicionados
RTT – Razão de resistência à tração retida
Rtu – Resistência à tração de corpos de prova condicionados
SHRP – *Strategic Highway Research Program*
SUPERPAVE – *Superior Performing Asphalt Pavement*
TMN – Tamanho Máximo Nominal dos agregados
UFPA – Universidade Federal do Pará
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
USDA – *United States Department of Agriculture*
ValoRes – Laboratório Valorização de Resíduos
VAM – Vazios no Agregado Mineral
Vla – Volume de ligante asfáltico absorvido
Vle – Volume de ligante efetivo
Vv – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	27
1.2	OBJETIVO	28
1.2.1	Objetivo Geral.....	28
1.2.2	Objetivos Específicos	28
1.3	MÉTODO	28
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	INTRODUÇÃO	33
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS	35
2.3	BAUXITA, ALUMINA E ALUMÍNIO	36
2.3.1	Processo produtivo do alumínio	38
2.4	LAMA VERMELHA	42
2.4.1	Classificação ambiental.....	42
2.4.2	Armazenamento e estocagem.....	44
2.4.3	Acidentes ambientais	48
2.4.4	Métodos de neutralização do resíduo	50
2.4.4.1	Neutralização com água do mar.....	51
2.4.4.2	Neutralização com ácidos	52
2.4.4.3	Neutralização por sinterização	52
2.4.4.4	Neutralização por carbonatação	53
2.4.5	Estudos de reaproveitamento da lama vermelha	54
2.5	MISTURAS ASFÁTICAS	58
2.5.1	Ligantes asfálticos	59
2.5.2	Misturas asfálticas com adição de resíduos	61
2.5.2.1	Areias de fundição	61
2.5.2.2	Escória de aciaria	62
2.5.2.3	Resíduo de manganês.....	63
2.5.3	Dosagem SUPERPAVE	64
2.5.4	Influência da adição do filer em misturas asfálticas.....	67
2.6	ENSAIOS DE DESEMPENHO	72
2.6.1	Deformação permanente (DP).....	72
2.6.2	Dano por umidade induzida (DUI).....	82
3	MATERIAIS E MÉTODOS	85
3.1	INTRODUÇÃO	85
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	86
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	89
3.3.1	Lama Vermelha.....	89
3.3.1.1	Fluorescência	90

3.3.1.2	Massa específica.....	90
3.3.1.3	Granulometria a laser.....	90
3.3.1.4	Superfície específica.....	90
3.3.1.5	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	91
3.3.1.6	Avaliação ambiental.....	91
3.3.2	Agregados.....	92
3.3.2.1	Granulometria.....	92
3.3.2.2	Índice de Forma.....	92
3.3.2.3	Massa específica.....	92
3.3.2.4	Superfície específica.....	92
3.3.2.5	Abrasão Los Angeles.....	93
3.3.2.6	Adesividade.....	93
3.3.2.7	Durabilidade.....	93
3.3.3	Ligante.....	93
3.3.3.1	Penetração.....	94
3.3.3.2	Ponto de Amolecimento.....	94
3.3.3.3	Viscosidade.....	94
3.4	DOSAGEM SUPERPAVE.....	94
3.5	ENSAIOS DE DESEMPENHO.....	97
3.5.1	Deformação permanente (DP).....	98
3.5.2	Dano por umidade induzida (DUI).....	100
3.5.3	Análise da qualidade da água.....	103
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	107
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	107
4.1.1	Lama vermelha.....	107
4.1.1.1	Fluorescência.....	107
4.1.1.2	Massa específica.....	108
4.1.1.3	Granulometria a laser.....	108
4.1.1.4	Superfície específica.....	110
4.1.1.5	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	110
4.1.1.6	Avaliação ambiental.....	110
4.1.2	Agregados.....	111
4.1.2.1	Granulometria.....	111
4.1.2.2	Índice de Forma.....	112
4.1.2.3	Massa específica.....	112
4.1.2.4	Superfície específica.....	112
4.1.2.5	Abrasão Los Angeles.....	113
4.1.2.6	Adesividade.....	113
4.1.2.7	Durabilidade.....	114
4.1.3	Ligante.....	115
4.1.3.1	Penetração.....	115

4.1.3.2	Ponto de amolecimento.....	115
4.1.3.3	Viscosidade.....	116
4.2	DOSAGEM SUPERPAVE.....	117
4.3	ENSAIOS DE DESEMPENHO	124
4.3.1	Deformação permanente (DP).....	124
4.3.2	Dano por umidade induzida (DUI).....	129
4.4	AVALIAÇÃO AMBIENTAL	132
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	135
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	138
	REFERÊNCIAS.....	139

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, questões de carácter ambiental vêm ganhando importância em discussões internacionais e assim são estabelecidas medidas de conduta padrão, principalmente no que se refere à geração e disposição de resíduos sólidos industriais.

Nas atividades de mineração, dois tipos de resíduos sólidos são gerados em maiores quantidades, os estéreis e os rejeitos. Os estéreis originam-se de atividades relacionadas à extração ou lavra no decapeamento de minas e rejeitos são resíduos resultantes do processo de beneficiamento (BRASIL, 2011 A).

A lama vermelha é um rejeito originado no processo de beneficiamento da bauxita em alumínio. Para cada tonelada de alumínio produzido são gerados entre 0,3 a 1,5 toneladas de lama vermelha (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012; HILDEBRANDO, *et al.*, 2013; HYDRO, 2013 B).

Os valores referentes ao descarte da lama vermelha variam de acordo com os métodos produtivos e componentes da bauxita. Assim, aquelas com baixo teor de alumínio são capazes de originar até 2,5 toneladas de lama vermelha (KOMNITSAS; BARTZAS; PASPALIARIS, 2004).

No norte do Brasil, são produzidos entre 4,40 milhões e 6,26 milhões de toneladas por ano de lama vermelha (HILDEBRANDO, *et al.*, 2013). Estima-se que cerca de 10,6 milhões de toneladas do resíduo sejam anualmente descartados no país, enquanto que no mundo, este valor atinge mais de 117 milhões de toneladas/ano (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012).

Algumas pesquisas classificam a lama vermelha como um resíduo não-inerte (EPA, 2014; NUNN, 1998; LIMA, 2006). Entretanto, as propriedades de elevada alcalinidade (COLLAZO, *et al.*, 2005; ANTUNES; CONCEIÇÃO; NAVARRO, 2011) conferem certa periculosidade a este resíduo.

Ainda que armazenados de maneira eficiente, resíduos industriais como a lama vermelha representam uma ameaça à fauna e flora, sendo passíveis de causar sérios danos ambientais, como contaminação de efluentes superficiais e subterrâneos, afetando assim, a saúde de populações mais próximas (ANTUNES; CONCEIÇÃO; NAVARRO, 2011).

A solução mais coerente conforme as premissas da sustentabilidade é a emissão zero de resíduos, incomum nos atuais

padrões de produção. Assim, uma vez produzidos, é conveniente tentar reinseri-los no ciclo produtivo.

Dessa forma, pesquisas têm sido desenvolvidas visando à utilização da lama vermelha na constituição de materiais cerâmicos (KAVAS, 2006; YANG; XIAO, 2008), compondo tijolos, telhas e cimento (MANFROI, 2009; MACÊDO, *et al.*, 2011; ANTUNES; CONCEIÇÃO; NAVARRO, 2011). Entretanto, são raras as referências que avaliam a utilização do resíduo aplicado em outros contextos.

Este trabalho tem o objetivo de analisar a viabilidade de utilização de lama vermelha como filer em misturas asfálticas usinadas à quente. Para tanto, fabricaram-se misturas com três diferentes porcentagens de lama vermelha (3%, 5% e 7%).

Considerando-se a influência da porcentagem de finos na resistência à deformação permanente, estabeleceu-se que todas as misturas realizadas possuíssem 7% de filer. Assim, aquelas com 3% e 5% de lama vermelha foram complementadas com 4% e 2% de filer de pó de pedra, respectivamente. De maneira que houvesse uma referência, fabricou-se ainda, uma mistura asfáltica com 7% de filer de pó de pedra.

Previamente à fabricação das misturas, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados. A lama vermelha foi avaliada quanto aos aspectos de granulometria, microestrutura, pH¹, massa específica e composição química. Os agregados de origem granítica foram avaliados quanto à massa específica, sanidade, abrasão, índice de forma e adesividade. O ligante CAP 50/70 foi ensaiado por meio de ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

O desempenho das misturas asfálticas foi avaliado por meio de ensaios de deformação permanente e de dano por umidade induzida. A água proveniente do condicionamento a 60° C de corpos de prova constituídos por lama vermelha (proveniente do ensaio de dano por umidade induzida) foi recolhida e avaliada quanto ao pH e concentrações de ferro e alumínio. Os resultados foram comparados à água de abastecimento público, de tal modo que fosse possível estimar contaminações ocasionadas pela lama vermelha.

Dessa forma, esta pesquisa visa ampliar as possibilidades de reaproveitamento da lama vermelha, fornecendo subsídios para mitigação de problemas relacionados ao seu descarte e passivos ambientais ocasionados por ela.

¹ Símbolo de medida físico-química denominada potencial Hidrogeniônico, que indica a acidez (pH < 7), neutralidade (pH = 7) ou alcalinidade (pH > 7) de uma solução aquosa.

1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

No Estado do Pará estão situadas as maiores jazidas de bauxita do Brasil, com uma produção de, aproximadamente, 30 milhões de toneladas no ano de 2013, o que torna o maior gerador de lama vermelha da América Latina (ABAL, 2013 B; ABAL, 2015). Somente no município de Barcarena (Pará), a geração do resíduo é da ordem de 4,5 milhões de toneladas/ano, ocupando uma área de cerca de 4 km² para seu armazenamento (BEZERRA; MACÊCO; SOUZA, 2010).

A lama vermelha é produzida em grandes quantidades e, apesar de estudos que comprovem a viabilidade de utilização do resíduo na constituição de materiais cerâmicos (KAVAS, 2006; YANG; XIAO, 2008; ANTUNES; CONCEIÇÃO; NAVARRO, 2011), e ainda, tecnologias passíveis de neutralizá-la (PALMER, *et al.*, 2010; COOLING, 2007), no Brasil, ainda não são adotadas políticas de reaproveitamento ou qualquer perspectiva de fazê-lo em larga escala. Dessa forma, a lama vermelha é cumulativamente estocada, ocupando áreas cada vez maiores.

O armazenamento da lama vermelha, sem qualquer perspectiva de utilização, representa um risco de poluição iminente, passível de contaminação de mananciais e inclusive de populações adjacentes ao local de estocagem. Não obstante, os passivos ambientais ocasionados pela lama vermelha afetam não somente o meio ambiente, como também, as empresas responsáveis pelo resíduo, que ficam sujeitas ao pagamento de multas e ao comprometimento de sua imagem perante o mercado.

No Brasil, existem locais em que a carência de agregados minerais exige a busca por materiais em locais mais distantes, o que eleva os custos de construção. Reutilizar a lama vermelha na indústria da construção significa, portanto, reduzir custos relacionados ao manejo e disposição do resíduo, ampliar as opções de materiais alternativos e contribuir para a melhoria da malha rodoviária nacional, especialmente a paraense, visto que seriam reduzidos os custos de implantação e manutenção de rodovias, pela proximidade e disponibilidade do resíduo no Estado.

Aproximadamente 80% das rodovias paraenses avaliadas pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2014 é classificada como regular, ruim ou péssima, conforme as condições de trafegabilidade existentes, o que prejudica o conforto e segurança do usuário. Um defeito muito comum encontrado nas rodovias do Estado é

a deformação permanente, ocasionada não somente pelo alto volume de tráfego, como também pelas altas temperaturas da região (CNT, 2014).

Este trabalho visa ampliar o acervo técnico bibliográfico referente ao conteúdo proposto, avaliando misturas asfálticas constituídas de lama vermelha. A introdução deste resíduo no ciclo produtivo possibilita a redução de contaminação da natureza, e ainda, há perspectiva de melhorar a resistência à deformação permanente do pavimento.

Deste modo, por meio deste trabalho espera-se contribuir na valorização da lama vermelha como um material alternativo na constituição de pavimentos, capaz de conferir propriedades mecânicas satisfatórias ao tráfego, sem contaminação do meio ambiente.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 **Objetivo Geral**

Analisar o desempenho de misturas asfálticas compostas por filer de lama vermelha na resistência à deformação permanente e dano por umidade induzida.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

- Avaliar se as misturas asfálticas constituídas por lama vermelha obtêm resultados de desempenho compatíveis com uma mistura de referência, em termos de deformação permanente e dano por umidade induzida;
- Analisar o melhor desempenho, dentre as misturas compostas por lama vermelha;
- Analisar a influência da porcentagem de lama vermelha no comportamento das misturas asfálticas;
- Avaliar a qualidade da água no ensaio de dano por umidade induzida e verificar possível liberação do resíduo;
- Fornecer subsídios para a classificação ambiental da lama vermelha.

1.3 MÉTODO

Para se atingir o objetivo alencado apresenta-se na sequência, apresenta-se um resumo do método utilizado.

A lama vermelha, proveniente do Estado do Pará, foi caracterizada por ensaios de fluorescência, massa específica, granulometria a laser e pH (potencial Hidrogeniônico). A análise microestrutural do resíduo foi feita com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Dessa forma, ao fim do trabalho foi possível determinar a classificação ambiental do resíduo.

O ligante asfáltico (CAP 50/70) foi caracterizado por ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade. A fim de verificar as implicações da adição de lama vermelha no ligante, foram realizados testes de ponto de amolecimento e penetração em CAP 50/70 misturado a três diferentes porcentagens (3%, 5% e 7%) de lama vermelha, dosados em relação ao peso total de ligante.

Os agregados de origem granítica foram submetidos a ensaios de granulometria, índice de forma, massa específica, abrasão Los Angeles, adesividade e durabilidade (sanidade).

Foram preparadas misturas asfálticas de graduação densa contínua, dosadas em compactador giratório. A granulometria utilizada para as misturas asfálticas foi a “Faixa C”, conforme especificações estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (BRASIL, 2006 A).

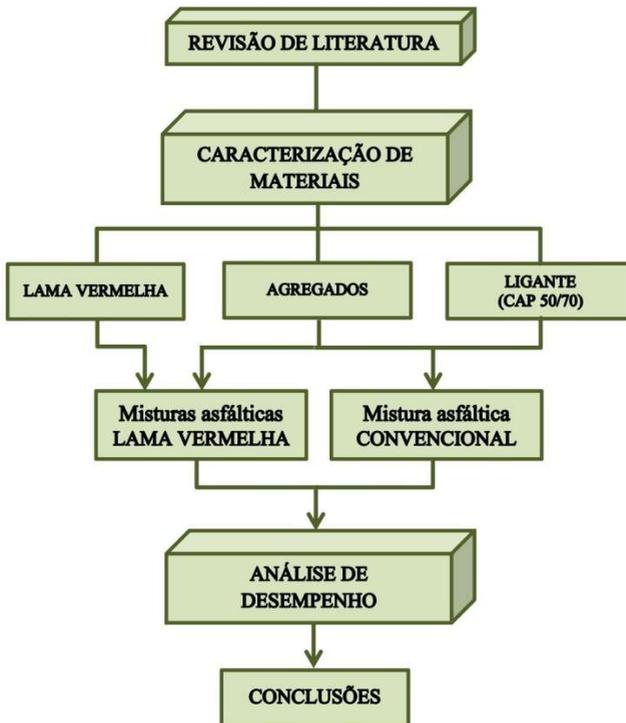
Produziram-se quatro misturas asfálticas constituídas por 7% de filer. A mistura convencional é composta por 7% de filer de pó de pedra. As outras três misturas foram produzidas com 3%, 5% e 7% de lama vermelha. De forma que somassem 7% de filer, as misturas com 3% e 5% de lama vermelha foram complementadas com 4% e 2% de pó de pedra, respectivamente.

O desempenho das misturas foi avaliado por meio de ensaios de deformação permanente e do ensaio de dano por umidade induzida (DUI).

A água utilizada no condicionamento do ensaio de DUI de corpos de prova com 5% e 7% de lama vermelha a 60°C foi coletada e avaliada quanto ao pH e concentrações de ferro e alumínio. Os resultados foram comparados à água utilizada no abastecimento público, a fim de verificar possíveis liberação do resíduo.

A Figura 1 apresenta o fluxograma geral do trabalho.

Figura 1 - Fluxograma geral do trabalho



Fonte: Autora

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1, **Introdução**, é feita uma abordagem ao contexto em que está inserido o trabalho, apresentando-se o estudo, justificativas e objetivos do mesmo.

No Capítulo 2, **Revisão Bibliográfica**, é apresentada a revisão de literatura, abrangendo temas relacionados ao processo produtivo do alumínio, bem como o descarte da lama vermelha e métodos de neutralização do mesmo. São abordados estudos realizados com a lama vermelha e outros resíduos industriais aplicados ao setor da construção civil, e ainda alguns ensaios abordados nesta pesquisa.

No Capítulo 3, **Materiais e Métodos**, são apresentados os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para a realização da pesquisa. São descritos métodos de caracterização da lama vermelha,

ligante e agregados utilizados, bem como, ensaios de desempenho submetidos às misturas.

No Capítulo 4, **Resultados e Discussões**, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de desempenho, tais como deformação permanente e dano por umidade induzida, interpretados conforme a decorrência dos dados. Descrevem-se ainda, os dados relacionados à qualidade da água proveniente do ensaio de dano por umidade induzida.

No Capítulo 5, **Conclusões e Recomendações**, são ponderados os objetivos compreendidos pela pesquisa e concretização dos mesmos, bem como, sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Toda e qualquer atividade produtiva é geradora de resíduos, sejam eles inertes ou não inertes. Os resíduos produzidos, mesmo que depositados adequadamente, são considerados um passivo ambiental e social (COUTINHO NETO, 2004).

Passivo ambiental é definido como um processo de geração de resíduos ou lixos industriais, de difícil eliminação, que provoca danos ao meio ambiente ou a terceiros de forma voluntária ou involuntária (KRAEMER, 2001; GALDINO, *et al.*, 2002). Passivo ambiental refere-se também às obrigações atribuídas às empresas autoras de prejuízo ambiental, por meio de investimentos, multas, ou outro tipo de penalidade, de forma a preservar a natureza ou reverter os prejuízos causados à mesma (ITOZ; CASTRO NETO; KOWALSKI, 2006; ASSIS; BRAZ; SANTOS, 2011).

Existem passivos ambientais normais e anormais. Os normais são previstos e mensuráveis, tais como obras de engenharia que, normalmente, antecipam os efeitos de suas construções, prevenindo suas ações e adotando medidas compensatórias. Os anormais são acidentais, imprevisíveis. Como exemplo, têm-se os eventuais vazamentos de navios petroleiros, que contaminam áreas incalculáveis (SPERANDIO; TRINDADE; FAVERO, 2005).

A percepção de mudanças climáticas no mundo intensificou a conscientização ambiental populacional. Avena (2011) acrescenta que a “luta” pela sustentabilidade iniciou-se entre as décadas de 1970 e 1980, com os acidentes em Chernobyl, Ucrânia (1986) e com o navio petroleiro da ExxonMobil no Alasca (1989). Protocolos, como os de Quioto e acordos internacionais, como o Rio 92, foram firmados a fim de atenuar impactos ocasionados pelo desenvolvimento industrial. Essas iniciativas decretaram a necessidade de uma gestão ambiental proativa, recuperando passivos ambientais instalados por meio de medidas compensatórias ou mitigadoras (AVENA, 2011).

Ainda que haja um entendimento global a respeito da preservação ambiental, eventualmente são noticiadas ocorrências referentes a passivos ambientais anormais.

Em março de 2011 ocorreu em Fukushima (Japão) um dos maiores acidentes nucleares da história, declarado como nível 7 na escala internacional de eventos nucleares (*International Nuclear Event Scale*). O nível 7 representa a mais alta escala em que um evento pode

ser classificado no que diz respeito ao nível de degradação ambiental e três anos depois ainda podem ser sentidos seus efeitos (NDJ, 2012).

A melhor forma de instrumentalizar a gestão de passivos ambientais é por meio da criação de normas, resoluções e leis, que ajudem a administrar prejuízos sociais, econômicos e ambientais por meio de punições direcionadas as entidades causadoras dos problemas.

“Na questão da geração de passivos ambientais, a Lei de Crimes Ambientais veio criar uma nova ordem jurídica que afeta diretamente ao empreendedor e à administração pública, inibindo um pouco as práticas ambientais criminosas. (...) A mera iniciação de atividades potencialmente poluidoras sem a licença ambiental caracteriza crime. Crime para o empreendedor e crime também para o agente da administração pública ambiental. Antes de entrar em vigor a nova lei, esse ato gerador era considerado infração administrativa. Agora, constitui infração e crime ao mesmo tempo.” (AVENA, 2011).

A Lei Federal 9.605/98 estabelece penalidade restritiva de direitos e/ou privativa de liberdade. Ambas são passíveis de serem impostas a infratores ambientais, sejam estes pessoas físicas ou jurídicas. Nas penas restritivas de direitos estão inclusas prestação de serviço à comunidade, interdição temporária de direitos, suspensão parcial ou total de atividades, multa e recolhimento domiciliar (BRASIL, 1998 C).

Assim como a Lei de Crimes Ambientais, a resolução do CONAMA n° 237 de 19 de Dezembro de 1997, que estabelece as diretrizes para o licenciamento ambiental, é uma normativa determinística no combate aos passivos ambientais. Ainda, instituiu-se que empreendimentos e atividades consideradas efetiva ou potencialmente causadoras de significativa degradação do meio dependem de prévio estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto sobre o meio ambiente (CONAMA, 1997).

As mudanças de paradigma no âmbito da sustentabilidade têm sido construídas principalmente por intermédio das normativas ambientais. As empresas estão cada vez mais cientes de que a negligência em relação às questões ambientais pode prejudicar a imagem da empresa e colocar em risco o retorno dos investimentos (ELIAS; OLIVEIRA, 2013).

A disposição de passivos ambientais em desacordo com normas vigentes prejudica a situação organizacional, culminando em escândalos corporativos que comprometem os níveis de confiança de seus investidores, acionistas e consumidores (YOUNG; LUSTOSA, 2001; ELIAS; OLIVEIRA, 2013).

Avena (2011) cita três formas de examinar a ocorrência de passivos ambientais: abstenção, correção e prevenção. Abster-se é considerada a maneira mais negligente, irresponsável e incoerente de lidar com a situação, uma vez que depreciar um bem comum é considerado crime, passivo de multa e prisão, e não corrigi-lo agrava a situação (BRASIL, 1998 C). Atitudes corretivas baseiam-se na tentativa de reparo do dano ambiental causado, entretanto as proporções do passivo poderão provocar danos irreparáveis, o que tornam este método obsoleto. Atitudes precavidas são aquelas que promovem o monitoramento dos resíduos, desde a estocagem até o descarte, de forma que sejam obedecidas as devidas normativas (SOUZA, 2010; AVENA, 2011).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Os resíduos sólidos resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, estando nos estados sólido e semi-sólido (CONAMA, 2002; ABNT, 2004 A).

De acordo com a NBR 10.004/2004 e a Resolução nº 313/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estão ainda inclusos na definição de resíduos sólidos, lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o lançamento em rede pública de esgotos ou corpos de água.

Resíduos industriais são aqueles gerados em processos produtivos e instalações industriais (BRASIL, 2010 D), incluindo materiais que representem um risco ao ambiente e à sociedade, que necessitam de tratamento especial (BRASIL, 2011 A).

O Art.10 da Lei nº 12.305/2010 determina que a gestão dos resíduos seja de responsabilidade do gerador e que os mesmos sejam tratados e depositados em destinação adequada e segura (BRASIL, 2011 A).

A Resolução nº 313/2002 do CONAMA, determina que as empresas apresentem informações a respeito da geração, características, armazenamento, transporte e destinação de resíduos sólidos produzidos,

com objetivo de promover um Inventário Nacional de Resíduos Sólidos. Contudo, não houve uma padronização ou atualização de dados por parte do governo.

Atualmente os valores relativos à geração de resíduos sólidos industriais no país não permitem a realização de um diagnóstico completo e atualizado, uma vez que a principal fonte de dados para essa análise são os inventários estaduais e apenas alguns Estados cumpriram a resolução (BRASIL, 2011 A; BRASIL, 2010 C).

2.3 BAUXITA, ALUMINA E ALUMÍNIO

Propriedades de leveza, alta condutividade elétrica, resistência à corrosão e baixo ponto de fusão fazem do alumínio um dos metais mais consumidos do mundo (CETEM, 2008).

O alumínio resultante dos processos de beneficiamento e metalurgia é designado como primário, entretanto, caso sejam incorporados materiais descartados no processo de fundição, este recebe a denominação de alumínio secundário (MARTIRES, 2001; XAVIER, 2012).

Para chegar à forma metálica, a qual é comercializada, são necessárias uma série de transformações e reações químicas, iniciadas a partir da extração de sua principal matéria-prima, a bauxita (CETEM, 2008).

O processo de produção do alumínio primário é composto pelas etapas de mineração, na qual a bauxita é retirada e tratada, beneficiamento, da qual resulta a alumina, e redução, referente ao processo eletrolítico que dá origem ao alumínio metálico (SAMPAIO; ANDRADE; DUTRA, 2005; MARTIRES, 2001).

A bauxita é classificada como metalúrgica e não metalúrgica (refratária), conforme as porcentagens de alumina (Al_2O_3), dióxido de silício (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3) presentes (MARTIRES, 2001; SAMPAIO; ANDRADE; DUTRA, 2005), conforme apresentado na Tabela 1. A bauxita metalúrgica é destinada, basicamente, à produção de alumina, e a bauxita refratária é utilizada na indústria química, na produção de abrasivos e cimento (XAVIER, 2012). Aproximadamente 98% da bauxita produzida no Brasil são empregadas na fabricação de alumina (BRASIL, 2011 B).

Tabela 1 - Classificação da bauxita de acordo com seus constituintes

Constituintes	Bauxita refratária (%)	Bauxita metalúrgica (%)
Al ₂ O ₃	50	> 48
SiO ₂	5 – 7	< 4,0
Fe ₂ O ₃	2,5 (máx)	11 - 12

Fonte: Sampaio *et al.* (2005)

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2013 A), a extração da bauxita é economicamente viável na produção de alumínio, somente para minérios constituídos de no mínimo 30% de alumina.

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (BRASIL, 2011 D) e Instituto Brasileiro de Mineração (IBM) (BRASIL, 2011 B), o Brasil possui a quinta maior reserva e é o terceiro maior produtor de minério de bauxita no mundo.

Os principais Estados produtores de bauxita são o Pará e Minas Gerais, responsáveis por 85% e 14% da produção nacional, respectivamente. No contexto mundial, o Brasil é o sexto maior produtor de alumínio, sendo os seguintes maiores produtores: China, Rússia, Canadá, Estados Unidos e Austrália (BRASIL, 2011 D).

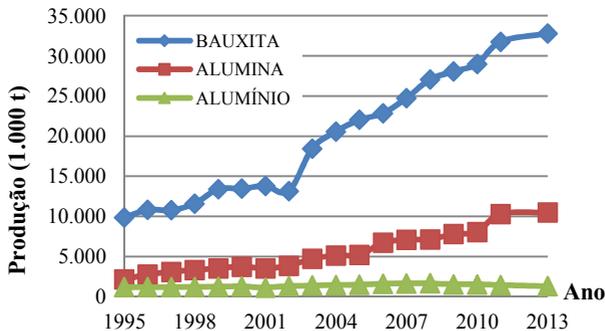
Em 2013, a produção nacional de bauxita apresentou uma queda de 1,8%, resultando em 32,8 milhões de toneladas produzidas. O Estado do Pará responsável por mais de 29 milhões de toneladas de bauxita produzidas, manteve o percentual de 90% da produção brasileira (DNPM, 2014).

A Figura 2 mostra a evolução brasileira na produção de bauxita, alumina e alumínio primário no decorrer de dezoito anos.

De acordo com a Figura 2, observa-se que houve um crescimento substancial no que diz respeito à extração da bauxita, entretanto, não se pode dizer o mesmo para aspectos de beneficiamento, ou seja, maior parte da bauxita brasileira é exportada, não havendo ênfase na verticalização da produção (DNPM, 2014; BRASIL, 2011 D).

O Instituto Brasileiro de Mineração prevê uma produção de 38 milhões de toneladas de bauxita até 2016 (BRASIL, 2012 A). Todavia, no que diz respeito à produção do alumínio primário, o Brasil sofreu redução nos anos de 2009 a 2013, produzindo aproximadamente 1,5 milhões de toneladas, sem previsões de crescimento (MASSARENTE, *et al.*, 2013).

Figura 2 - Produção brasileira de bauxita, alumina e alumínio



Fonte: Adaptado de Mártires (2011), DNPM (2011) e DNPM (2014)

2.3.1 Processo produtivo do alumínio

A mineração da bauxita visa modificar a granulometria, forma ou concentração relativa dos minerais presentes, sem contudo, modificar propriedades químicas e físicas dos minerais. Para tanto são utilizados métodos de cominuição, peneiramento e classificação do material. Posteriormente ao tratamento do minério, a bauxita é submetida ao processo hidrometalúrgico, conhecido como método Bayer (LUZ; LINS, 2004).

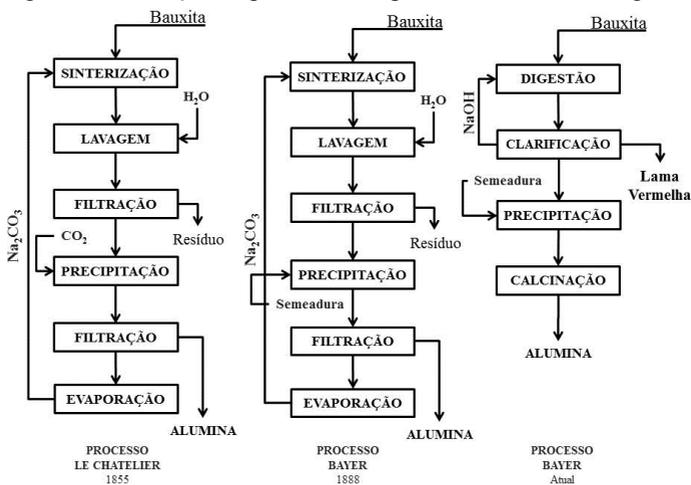
O método Bayer, desenvolvido em 1888 por Karl Josef Bayer, representa um marco na história da metalurgia (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999), uma vez que anteriormente, o beneficiamento da bauxita era realizado por meio de um custoso e demorado processo denominado Le Chatelier (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

O método Le Chatelier consiste no aquecimento da bauxita com carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 1200°C , remoção dos aluminatos formados com auxílio de água, precipitação do hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) através da ação do dióxido de carbono (CO_2) e, por fim, filtragem, secagem e limpeza da alumina (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; HABASHI, 2005).

Bayer descobriu que a alumina precipitada em meio alcalino é de natureza cristalina, o que facilita a filtragem e a remoção de impurezas. Dessa forma, a principal diferença entre os métodos de beneficiamento da bauxita é o potencial Hidrogeniônico adotado no processo. O método Le Chatelier realiza-se em meio ácido ou neutro, o que gera um precipitado gelatinoso de difícil segregação (HABASHI, 2005).

O processo Bayer foi aprimorado e atualmente é composto por quatro etapas: digestão, clarificação, precipitação e calcinação (HABASHI, 2005). A Figura 3 apresenta a evolução dos métodos de produção de alumina, a partir do método Le Chatelier, à metodologia Bayer adotada atualmente.

Figura 3 - Evolução esquemática de processos hidrometalúrgicos



Fonte: Adaptado de Habashi (2005) e Silva Filho, Alves e Motta (2007)

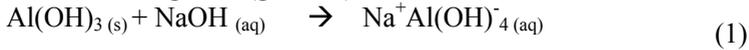
Neste processo, ao invés de utilizar o dióxido de carbono como no processo Le Chatelier, Bayer introduziu cristais de alumina (semeadura) de forma a incentivar a precipitação da alumina. Apesar de não terem sido realizadas muitas modificações, o método Bayer foi aperfeiçoado, sendo abandonada a utilização de carbonato de sódio (Na_2CO_3) pelo uso de hidróxido de sódio (NaOH) (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

Atingidas as especificações granulométricas (diâmetros entre 0,80 mm e 0,06 mm), a bauxita é imersa em solução concentrada de hidróxido de sódio (NaOH) e cal a temperaturas de até 270°C , é a chamada etapa de digestão (HABASHI, 2005; MCCORMICK; PÍCARO; SMITH, 2000; SOUZA, 2010).

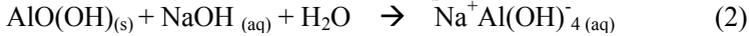
Os principais minerais de alumínio que compõem a bauxita são gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$) e diásporo ($\text{AlO}(\text{OH})$), e dependendo da constituição, são alteradas as reações químicas ocorridas no processo de digestão (SAMPAIO; ANDRADE; DUTRA, 2005),

conforme as Equações 1 e 2 (MANFROI, 2009; HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

Processo de digestão (gibbsita):



Processo de digestão (boehmita e diásporo):



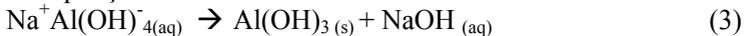
A solubilidade dos minerais de alumínio está diretamente ligada às condições de concentração, temperatura e pressão utilizadas durante o processo de digestão, logo, a gibbsita, por ser a mais solúvel, exige menores investimentos. Para casos em que o minério é constituído por mais de um mineral de alumínio são adotadas condições de digestão considerando o componente menos solúvel (QUARESMA, 2012; MCCORMICK; PÍCARO; SMITH, 2000).

Dessa forma, o material originado do processo de digestão é transferido a espessadores nos quais, com auxílio de agentes floculantes, os resíduos são separados por sedimentação (MANFROI, 2009). Esta etapa é denominada clarificação.

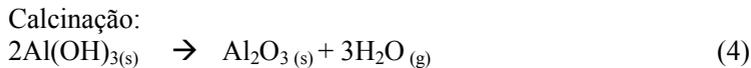
A lama vermelha é o resíduo decorrente da etapa de clarificação. Separada de um licor rico em hidróxido de alumínio (sobrenadante) por meio das técnicas de espessamento e filtração, a lama vermelha passa por um processo de lavagem, para então ser armazenada (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; QUARESMA, 2012).

O licor resultante da etapa de clarificação é então resfriado e transferido para os precipitadores, nos quais serão adicionados cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação, conforme Equação 3 (MANFROI, 2009; SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; GARCIA, 2012).

Precipitação:



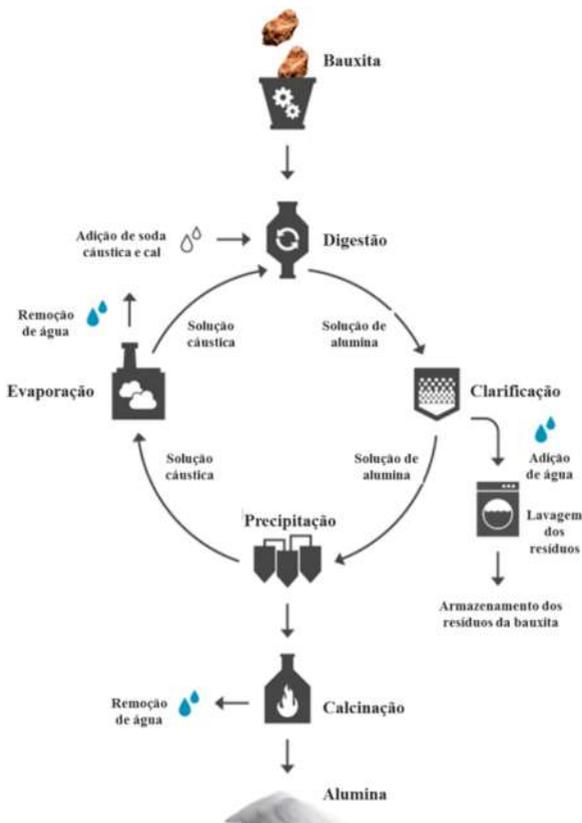
O material precipitado é filtrado e lavado para remover a solução cáustica (HYDRO, 2013 B), em seguida calcinado a temperaturas superiores a 960°C, conforme Equação 4 (QUARESMA, 2012; MANFROI, 2009). O material resultante é conhecido como alumina (Al_2O_3), um óxido de alumínio de elevada pureza, de aspecto arenoso e branco, utilizado como matéria prima na produção do alumínio primário (GARCIA, 2012; MARTIRES, 2001).



A solução cáustica é submetida à retirada de água (evaporação), a fim de que o máximo de hidróxido de sódio possível possa ser reaproveitado no processo (HYDRO, 2013 B).

O processo de beneficiamento da bauxita em alumina pode ser entendido com melhor detalhamento na Figura 4. Ressalta-se que algumas etapas podem ser realizadas de maneiras diferentes, de acordo com a empresa produtora.

Figura 4 - Processo Bayer



Fonte: HYDRO (2013 B)

A produção de alumínio metálico consiste em submeter alumina fundida ao procedimento de eletrólise, denominado como Hall-Hérout (SAMPAIO; ANDRADE; DUTRA, 2005). Como o ponto de fusão da alumina é de aproximadamente 2.000°C utilizam-se substâncias químicas denominadas fundentes, que reduzem a temperatura do processo (CISCATO, 1988).

O polo positivo do eletrólito é constituído de grafite, de modo que o carbono une-se ao oxigênio presente na alumina formando dióxido de carbono e alumínio metálico, conforme Equação 5. O alumínio produzido funde-se a 660°C, acumulando-se na parte inferior do recipiente (CISCATO, 1988).

Eletrólise:



O alumínio é então processado e ajustado conforme definido pela empresa que o produz (HYDRO, 2013 A).

2.4 LAMA VERMELHA

A lama vermelha é o resíduo do processo de beneficiamento da bauxita em alumina, mais especificamente, do procedimento de clarificação, onde o licor de alumina é separado.

Previamente à estocagem, é feita a lavagem da lama vermelha. Contudo, parte do hidróxido de sódio adicionado ao processo não pode ser retirado, o que promove a alcalinidade e periculosidade ao resíduo.

Entretanto, não há consenso quanto à classificação ambiental da lama vermelha, decorrente da utilização de diferentes minerais de alumínio que compõem a bauxita e variações de processamento e estocagem do resíduo, adotados pelas mais diversas empresas.

2.4.1 Classificação ambiental

Devido à natureza altamente alcalina e corrosiva, Bertochi *et al.* (2006) e Ribeiro *et al.* (2011) classificaram a lama vermelha como resíduo de caráter perigoso. Assim, qualquer reutilização do material somente seria possível após sua neutralização.

Hind *et al.* (1999), consideram a lama vermelha tóxica pelos elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio, podendo constituir um perigo para as populações circundantes à área de estocagem do resíduo.

Silva Filho *et al.* (2007) destacam que a *Environmental Protection Agency* (EPA, 2014) não classifica a lama vermelha como um rejeito perigoso ou particularmente tóxico (NUNN, 1998). Contudo, Lima (2006) sugere que o resíduo seja classificado como classe II-A, ou seja, não perigoso não inerte, conforme classificação da ABNT (LIMA, 2006).

As diferentes classificações da lama vermelha estão relacionadas à variação na composição química do resíduo e à diversidade de metodologias utilizadas para avaliação (MANFROI, 2009). Ainda que não haja consenso, a maioria dos pesquisadores concorda que a presença de metais pesados e a elevada alcalinidade da lama vermelha conferem-lhe o caráter de resíduo perigoso (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999; BERTOCCHI; GHIANI; PERETTI, 2006; RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012; RIBEIRO, *et al.*, 2011).

No estudo de Manfroi (2009), amostras de lama vermelha secas e calcinadas que apresentaram pH alcalino com valores inferiores ao limite de 12,5 (valor estipulado pela NBR 10.004/2004), não foram caracterizadas como corrosivas. No entanto, os resultados da lixiviação mostram que a lama vermelha, seca ou calcinada, é classificada com resíduo perigoso (classe I), pois apresenta concentrações de cromo e selênio superiores aos valores limites estabelecidos por norma (MANFROI, 2009).

Na lama vermelha de origem italiana foi detectada a presença de metais pesados, como arsênio, cádmio, níquel, zinco, chumbo, cobre, cromo e vanádio (BRUNORI, *et al.*, 2005). Na lama vermelha de origem grega verificou-se somente a presença de cromo (LEONARDOU, *et al.*, 2008). Na França, a lama apresentou arsênio, cádmio, cromo e zinco (AMBROISE; PERA, 2000).

A composição química da lama vermelha varia e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer em cada indústria (MACÊDO, *et al.*, 2011). A composição química da lama vermelha pode variar, ainda, em função do tempo de deposição e do grau de exposição ao meio ambiente (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

No estudo de Yang e Xiao (2008), amostras de lama vermelha, com um tempo de deposição superior a 10 anos, apresentaram perda da capacidade de combustão quando comparadas com amostras recentemente depositadas. A modificação ocorreu devido à carbonatação de compostos como aluminato de cálcio e silicato di-cálcico, expostos ao ambiente.

Amostras de lama vermelha coletadas na empresa Alunorte (Alumina do Norte do Brasil S.A.), localizada no Estado do Pará, apresentaram uma quantidade de hidróxido de sódio (soda cáustica) em torno de 8% em peso, o que explica a causticidade presente na lama vermelha. O material apresentou teores elevados de ferro, vanádio, gálio, fósforo, manganês, magnésio, zinco, tório, cromo e nióbio (MACÊDO, *et al.*, 2011).

Na Tabela 2 são apresentados exemplos conforme a fonte produtiva, das porcentagens de alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), sílica (SiO_2), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e cal (CaO), presentes na lama vermelha.

Tabela 2 - Composição química da lama vermelha (%)

Composto (%)	ALUNORTE Brasil	ALCOA Brasil	CBA Brasil	ALCAN Canadá	ALCOA Austrália	ALCAN África
Al_2O_3	35,5	35,67	36,7	37,6	25,45	26,6
Fe_2O_3	37,16	33,78	29,89	32,45	34,5	48,4
SiO_2	2,34	3,45	6,78	3,67	17,06	5,5
TiO_2	6,18	4,56	5,67	4,12	4,9	2,8
Na_2O	8,49	9,67	7,89	6,78	2,74	2,4
CaO	1,23	2,34	1,2	3,45	3,69	-

Fonte: Adaptado de Macedo *et al.* (2011); Silva Filho, Alves e Motta (2007)

2.4.2 Armazenamento e estocagem

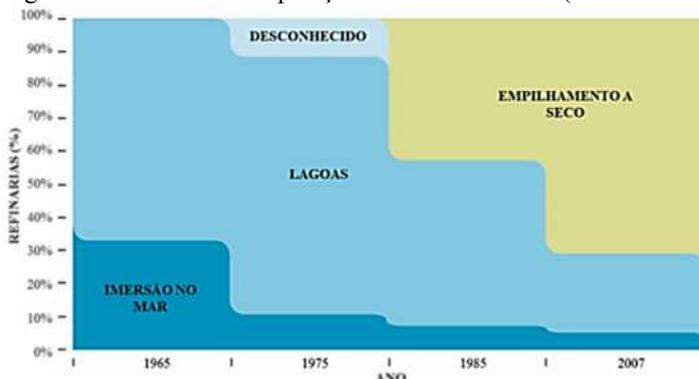
Historicamente, a lama vermelha tem sido depositada em locais próximos aos de operação, em áreas inadequadas, o que, em muitos casos, propicia a lixiviação do material alcalino. Atualmente, melhorias consideráveis foram feitas na gestão, controle e monitoramento das áreas de resíduos a fim de minimizar risco de contaminação (IAI, 2013).

Por questões de segurança, a lama vermelha exige um armazenamento diferenciado. São utilizadas técnicas de elevado custo que impossibilitam a ocorrência de lixiviação e consequente contaminação de mananciais e águas subterrâneas (WANG; ANG; TADÉ, 2008). Estima-se que o custo de armazenamento da lama vermelha seja de 1 a 2% do valor da alumina, por requerer grandes áreas de ocupação (TSAKIRIDIS; AGATZINI-LEONARDOU; OUSTADAKIS, 2004; HILDEBRANDO, *et al.*, 2013).

Em geral, os métodos de deposição de lama vermelha utilizados são: imersão no mar, lagunagem, empilhamento a seco e eliminação a seco. A Figura 5 ilustra a evolução das práticas de armazenamento de 17

refinarias espalhadas pelo mundo, responsáveis por, aproximadamente, 44% da produção mundial de alumina no período de 1965 a 2007 (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009).

Figura 5 - Métodos de disposição da lama vermelha (1965 – 2007)



Fonte: Adaptado de Power; Gräfe; Klauber (2009)

O método de imersão no mar, praticado em um pequeno número de instalações, está sendo progressivamente eliminado (IAI, 2013). Esta prática refere-se ao depósito do resíduo da bauxita em oceanos profundos, realizada por meio de trincheiras ou gasoduto (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009; IAI, 2013). A disposição do resíduo é precedida de processos de espessamento e lavagem que removem a causticidade e elevam consideravelmente o teor de sólidos (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009).

Estudos realizados no mar Mediterrâneo e no Oceano Pacífico mostraram que o método de imersão no mar tem um efeito adverso mínimo sobre o ambiente marinho. Os rios Mississippi (Estados Unidos da América) e Severn (Grã-Bretanha) foram alguns locais de eliminação do resíduo da bauxita até meados dos anos 1970 (IAI, 2013).

A lagunagem tem sido o método de disposição tradicional em quase todas as refinarias de alumina iniciais. O procedimento consiste no bombeamento do resíduo (neutralizado ou não) relativamente diluído, com um teor de sólidos entre 15 e 30%, para tanques terrestres, instalados dentro de depressões naturais ou usando barragens e outras obras de terraplanagem, necessárias para assegurar uma contenção segura (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009; IAI, 2013).

Na ausência de topografia natural adequada, as lagoas de lama vermelha são armazenadas em diques ou barragens especialmente

construídas para essa finalidade. As técnicas utilizadas para impedir possíveis infiltrações e contaminação de lençol freático envolvem a aplicação de uma camada de argila compactada ou recobrimento do solo com material polimérico (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009).

Posteriormente ao preenchimento da lagoa e consolidação de sólidos, a área pode ser reabilitada por meio de nivelamento e/ou tratamento com gesso para incentivar o reflorestamento.

A neutralização prévia da lama vermelha, seja por mistura com água do mar ou adição de ácidos minerais, como ácido sulfúrico, reduz substancialmente os custos de armazenamento por lagunagem (IAI, 2013). Na Figura 6 pode ser visualizada a estocagem de lama vermelha pelo método de lagunagem no Estado do Pará.

Figura 6 - Estocagem de lama vermelha em Barcarena/PA



Fonte: Souza (2010)

Em locais em que o método da lagunagem não é possível, por questões de limitação de espaço, adota-se o empilhamento a seco como um procedimento alternativo para disposição de lama vermelha (IAI, 2013).

O método de empilhamento a seco exige um espessamento prévio do resíduo, elevando o teor de sólidos (48 a 55%) do material. O processo é concebido de tal forma que a pasta seca pode ser empilhada a alturas consideráveis dentro diques de contenção que minimizam a área necessário para armazenamento (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009; IAI, 2012).

Desta forma, são concebidas inclinações relativas que permitam o escoamento da água da chuva, o que reduz o risco de fugas e melhora a integridade estrutural. A água recuperada a partir da superfície é

bombeada de volta para a fábrica para recuperar e reciclar os sais de sódio solúveis (IAI, 2012).

A Figura 7 ilustra um exemplo de empilhamento a seco da refinaria *Rusal Aughinish*, localizada na Irlanda.

Figura 7 - Empilhamento a seco em refinaria irlandesa



Fonte: International Aluminium Institute (2013)

A metodologia de eliminação a seco consiste na filtração da lama vermelha até adquirir consistência semi-seca, com porcentagem de sólidos superior a 65%. O resíduo da bauxita deve ser lavado de forma a recuperar a soda e minimizar a alcalinidade do mesmo. O “bolo” de resíduo seco é transportado até o local de eliminação, onde é despejado sem tratamento adicional (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009; IAI, 2013).

O Instituto Internacional do Alumínio (IAI) (2013) destaca pontos positivos e negativos referentes às diferentes técnicas de disposição do resíduo, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens das técnicas de disposição de lama vermelha (continua).

Métodos de disposição	POSITIVOS	NEGATIVOS
Imersão no mar	Elimina a necessidade de áreas de grande extensão territorial para alocação do resíduo;	Potencial destruição de ecossistemas marítimos;
	Elimina a necessidade de manutenção e reabilitação de áreas de armazenamento;	Potencial liberação de metais tóxicos em ambiente marinho;

Tabela 3 (Continuação) - Vantagens e desvantagens das técnicas de disposição de lama vermelha

Imersão no mar	Elimina potenciais impactos ambientais associados à lixiviação de metais pesados e contaminação de efluentes;	Efeitos de curto e longo prazo desconhecidos;
	Menores custos operacionais em relação aos métodos de descarte em terra;	Perda de sódio e alumina presentes no resíduo;
	Não requer espessamento ou filtração da lama antes da eliminação;	-
Lagunagem	Menores custos de instalação;	Requer a concessão de substanciais áreas de terra para armazenamento;
	Não exige tratamentos prévios do resíduo;	Requer planejamento e alocação de recursos de longo prazo;
	Minimização de poeira do resíduo;	Perda de sódio e alumina presentes no resíduo;
	Não retorna as impurezas para unidade Bayer;	-
Empilhamento a seco	Exige menor área territorial para armazenamento do resíduo;	Requer a concessão de suficientes áreas de terra para o armazenamento;
	Reaproveitamento da soda e alumina;	Requer uma etapa prévia de espessamento ou filtração antes da descarga;
	Reduz potencial contaminação do solo e lençol freático;	As superfícies da pilha seca estão sujeitas ao levantamento de poeira, sendo necessários processos de mitigação;
	-	Compactação significativa dificulta o estabelecimento da vegetação;
Eliminação a seco	A área de terra necessária para o armazenamento é minimizado;	Requer a concessão de suficientes áreas de terra para o armazenamento;
	O risco de colapso minimizado;	Requer planejamento e alocação de recursos de longo prazo;
	Soda e alumina devolvidas ao processo;	Requer a instalação e operação de uma planta de filtragem;
	O baixo teor alcalino do material facilita a reabilitação do solo e reflorestamento;	-

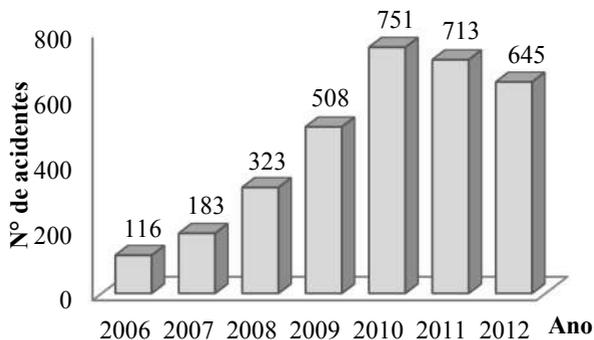
Fonte: Adaptado de Instituto Internacional do Alumínio (2013)

2.4.3 Acidentes ambientais

O relatório de acidentes ambientais do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)

registrou o número de acidentes ambientais ocorridos no país no período de 2006 a 2012, conforme mostrado na Figura 8 (BRASIL, 2012 B). Dentre estes, estão incluídos aqueles relacionados aos vazamentos de lama vermelha nas refinarias de alumina.

Figura 8 - Número de acidentes ambientais (2006 – 2012)



Fonte: IBAMA (2012)

Ainda que acidentes ambientais relacionados ao processo de beneficiamento da bauxita não possuam representatividade numérica devido à reduzida quantidade de refinarias no país, quando relacionado a outros processos produtivos, suas consequências são tão ou mais danosas ao meio ambiente e à saúde humana quanto qualquer outro (BRASIL, 2012 B).

Os rios Murucupi e Pará, situados no Estado do Pará, foram prejudicados por vazamentos de lama vermelha ocorridos em 2003 e 2009. Em ambos os anos, a contaminação pelo resíduo culminou em alterações físico-químicas da água e mortalidade de peixes e outros seres vivos (LIMA, *et al.*, 2009; BRABO; LIMA, 2003). Foram também diretamente afetadas populações ribeirinhas situadas a mais de dois mil metros do local de vazamento (IOS, 2008).

Em 2004, a região de Sorocaba, localizada no Estado de São Paulo, foi atingida pelo vazamento de aproximadamente um mil de metros cúbicos de lama vermelha. Após, constatou-se alteração da qualidade da água, tornando-a imprópria para uso humano, além de danos ocasionados à fauna e à flora (CETESB, 2004; SMITH, 2011).

Em outubro de 2010, na cidade de Ajka, na Hungria, aproximadamente 1,1 milhão de metros cúbicos de lama vermelha vazaram de uma indústria de alumínio, matando sete pessoas e deixando

mais de cem feridos com queimaduras químicas (MATOS, 2010). O resíduo recobriu uma área de aproximados 40 km², conforme Figura 9.

Figura 9 - Vazamento de lama vermelha na Hungria



Fonte: *Greenpeace* (2010)

Após sucessivos impactos ambientais, empresas e pesquisadores vêm estudando novas alternativas de utilização e neutralização da lama vermelha (HYDRO, 2013 B).

Segundo Coutinho Neto (2004), descobrir alternativas de utilização de resíduos industriais, por vezes, não resolve totalmente o problema, uma vez que a quantidade gerada é grande. Entretanto, o autor justifica que o uso de resíduos na construção civil é capaz de reduzir o consumo de recursos naturais, além de solucionar aspectos de ordem social, como redução de áreas de estocagem, poluição de lençóis freáticos e possíveis ameaças à vida humana (GREENPEACE, 2010; COUTINHO NETO, 2004).

2.4.4 Métodos de neutralização do resíduo

A elevada causticidade da lama vermelha e toda problemática envolvendo seu manuseio e estocagem levou ao desenvolvimento de métodos de neutralização. Dentre estes, estão: água do mar, utilização de ácidos (sulfúrico ou clorídrico), tratamento térmico e dióxido de carbono (CO₂) (IAI, 2013; GENÇ, *et al.*, 2003; SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

A alcalinidade do resíduo se dá pela presença de hidróxido de sódio, aluminato de sódio e carbonato de sódio, compostos de cálcio, tais como hidrocalumita, aluminato tri-cálcico e sodalita. Para alcançar a neutralização total do resíduo, todas estas espécies precisam ser

neutralizadas e o pH é um indicativo importante a ser considerado neste processo (JOHNSTONE, *et al.*, 2013).

Para que a lama vermelha possa ser considerada ambientalmente inofensiva, o pH deve ser inferior a 9, já que com este valor o sódio é liberado, minerais alcalinos são neutralizados e metais tóxicos são insolúveis (HANAHAN, *et al.*, 2004; RAI, *et al.*, 2012; GLENISTER; THORNER, 1985).

A neutralização parcial ou total do resíduo reduz potenciais perigos associados ao depósito, auxilia no reflorestamento e amplia as oportunidades de reutilização do resíduo (IAI, 2013; RAI, *et al.*, 2012). Desta forma, os custos da neutralização são compensados pela redução de despesas na gestão de resíduos (HANAHAN, *et al.*, 2004).

2.4.4.1 Neutralização com água do mar

Diversas pesquisas têm abordado o potencial de neutralização da água do mar em resíduos de refinaria de bauxita (RAI, *et al.*, 2012; IAI, 2013; HANAHAN, *et al.*, 2004).

A água do mar contém, aproximadamente, 3,5% de salinidade, é constituída por íons de cloro (55%), sódio (30,6%), sulfato (7,7%) magnésio (3,65%), cálcio (1,17%) e potássio (0,7%) (RAI, *et al.*, 2012). Quando adicionada à lama vermelha, reduz o pH da mistura, provocando precipitações de hidróxidos, carbonatos e/ou hidrocarbonetos minerais (PALMER, *et al.*, 2010).

A água do mar não elimina hidróxidos do sistema, mas transforma resíduos fortemente cáusticos em sólidos menos solúveis (RAI, *et al.*, 2012). Os íons de Mg^{+2} e Ca^{+2} presentes na água do mar, reagem aos hidróxidos, carbonatos e aluminatos para formar sólidos alcalinos, em especial, hidrotalcita ($Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16}.4(H_2O)$) e calcita ($CaCO_3$), o que mantém a solução com pH no intervalo entre 8 e 9 (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009; HANAHAN, *et al.*, 2004; IAI, 2013).

O processo de neutralização com água do mar pode reduzir a alcalinidade do resíduo a limites seguros para descarga em barragens e para reutilização em certo número de aplicações, no entanto, para atingir a neutralização total, necessita-se de uma equivalência de 20 vezes de água do mar em relação à quantidade de resíduo. Isso aumenta os requisitos de infraestrutura, produtividade, volumes de descarga e peso da indústria de alumina sobre o meio ambiente (JOHNSTON, *et al.*, 2010; JOHNSTONE, *et al.*, 2013).

Foram desenvolvidos produtos a partir da lama vermelha neutralizada com água do mar que receberam denominação comercial ou foram patenteados. Como exemplo, a empresa Virotec *International* Ltd. (Austrália) desenvolveu um adsorvente a partir da lama vermelha neutralizada, cujo produto obtido é denominado Bauxsol (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; BRUNORI, *et al.*, 2005).

A tecnologia Bauxsol abrange uma diversidade de procedimentos e produtos que podem ser utilizados em programas de reabilitação e gestão ambiental. Fundamentalmente, a tecnologia utiliza-se de uma mistura complexa de minerais oriunda da modificação química e física do resíduo de lama vermelha (MCCONCHIE; SAENGER; FAWKES, 1996).

De maneira geral, o Bauxsol tem capacidade de neutralizar ácidos e pode ser utilizado em solos e águas de baixo pH. Outra utilidade do Bauxsol é ajudar na localização de determinados metais, situados em rochas ácidas (CLARK, *et al.*, 2004).

2.4.4.2 Neutralização com ácidos

A utilização de ácidos, especialmente o sulfúrico (H_2SO_4), é comum no processo de neutralização do resíduo da bauxita, visto que auxilia na remoção de metais alcalinos e outras impurezas orgânicas ou inorgânicas presentes na lama (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; HANAHAN, *et al.*, 2004).

Para realizar a neutralização, no entanto, são requeridas grandes quantidades de ácido, o que eleva consideravelmente o custo do processo (RAI, *et al.*, 2012).

O desempenho de ácido sulfúrico é avaliado em termos da capacidade de redução do nível de aluminato na solução final. Verificou-se que o ácido é significativamente menos eficaz na remoção de aluminatos, porque se baseia na precipitação de compostos menos solúveis, como hidróxido de alumínio (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2009).

2.4.4.3 Neutralização por sinterização

Este método consiste na exposição do resíduo a altas temperaturas até a decomposição de substâncias indesejáveis. O tratamento por sinterização na presença de aditivos é um dos métodos para superar o problema cáustico da lama vermelha (HANAHAN, *et al.*, 2004; RAI, *et al.*, 2013).

A lama vermelha calcinada a 900°C apresentou um pH entre 7 e 9, no entanto, ensaios de lixiviação e solubilização de resíduos realizados por Manfroi (2009) classificaram-na como perigosa ao apresentarem concentrações de metais pesados superiores aos valores limites. Entende-se, portanto, que o pH não deve ser o único parâmetro a ser considerado na classificação ambiental do resíduo.

A sinterização, portanto, pode ser considerada eficaz na redução da causticidade do resíduo, mas ainda assim haverá dificuldades relacionadas à permanência de metais pesados e ao consumo de energia necessário no tratamento térmico, que elevaria o custo do processo consideravelmente (COOLING, 2007; RAI, *et al.*, 2012).

2.4.4.4 Neutralização por carbonatação

Este processo representa o mecanismo de neutralização da lama vermelha por meio da inserção de dióxido de carbono (CO₂) (RAI, *et al.*, 2012). De modo geral, o sódio presente na lama vermelha reage com o dióxido de carbono para formar carbonato (Na₂CO₃) e/ou bicarbonato de sódio (NaHCO₃) reduzindo, assim, o pH do resíduo (IAI, 2013). O armazenamento a céu aberto permite o contato direto entre resíduo e dióxido de carbono, dessa forma apenas uma pequena fração superficial é neutralizada (RAI, *et al.*, 2012)

Embora o pH da lama vermelha seja rapidamente reduzido após exposto ao CO₂, a alcalinidade sobe novamente para níveis inaceitáveis (pH>10) após adição de novos resíduos provenientes do processo Bayer. Entende-se, portanto, que a taxa de neutralização não é rápida o suficiente para satisfazer as necessidades industriais (IAI, 2013; RAI, *et al.*, 2012).

Assim, estão sendo ainda investigados métodos de inserção de dióxido de carbono líquido a altas pressões, que poderiam neutralizar o resíduo (RAI, *et al.*, 2012; SAHU; PATEL; RAY, 2010; CHUNMEI, *et al.*, 2005).

Além de reduzir o pH da superfície de um lago a menos de 10, quando exposto por período suficiente, o consumo de dióxido de carbono tem mérito adicional da perspectiva de mudanças climáticas (IAI, 2013; COOLING, 2007).

Esta metodologia possui custos iniciais significativos, entretanto, compensados em longo prazo pela reduzida gestão de passivos e custos operacionais (COOLING, 2007).

2.4.5 Estudos de reaproveitamento da lama vermelha

Diversas pesquisas relacionadas ao reaproveitamento da lama vermelha foram realizadas. A maioria avalia o comportamento do resíduo em meio cerâmico, ou seja, aplicando-o em tijolos, telhas e cimento. A Tabela 4 apresenta alguns estudos realizados com o resíduo do processo Bayer.

Tabela 4 - Aplicações da lama vermelha

Ano	Referência	País	Materiais produzidos com lama vermelha
1996	Gordon <i>et al.</i>	Jamaica	Compósito cimentício
2000	Sglavo <i>et al.</i>	Itália	Produtos cerâmicos
2000	Yalçın e Sevinç	Turquia	Artigos sanitários, porcelanas
2004	Tsakiridis e Leonardou	Grécia	Clinquer
2006	Kavas	Turquia	Tijolos
2007	Yang e Xiao	China	Tijolos sem queima
2008	Ribeiro e Morelli	Brasil	Pozolana
2008	Rossi <i>et al.</i>	Brasil	Agregado graúdo
2009	Yang <i>et al.</i>	China	Telhas cerâmicas
2010	Bezerra; Macêdo; Souza	Brasil	Misturas asfálticas
2012	Jitsangiam e Nikraz	Austrália	Base de pavimentos
2012	Hanumanth Rao <i>et al.</i>	Índia	Base, Sub-base e Subleito de pavimentos
2013	Jitsangiam e Nikraz	Austrália	Base de pavimentos

Fonte: Adaptado de Manfroi (2009)

Grande parte das pesquisas realizadas abrangendo materiais cerâmicos evidencia a afinidade físico-química existente entre a lama vermelha e os demais componentes da mistura (GORDON; PINNOCKH; MOOREH, 1996; SGLAVO, *et al.*, 2000; YALÇIN; SEVINÇ, 2000; RIBEIRO; MORELLI, 2008; YANG, *et al.*, 2009). Em muitos casos, esta combinação promove propriedades relevantes, tal como resistência à tração (ROSSI; RAMOS; OLIVEIRA, 2008)

Macêdo *et al.* (2011) avaliaram o comportamento de blocos cerâmicos estruturais compostos por uma mistura de lama vermelha e argila, ambas originárias do norte do país. No estudo, foram confeccionados blocos de referência com 100% de argila e outros compostos por 40% de argila e 60% de lama vermelha. Ainda, foram realizados ensaios de absorção de água, variações dimensionais e resistência à compressão, concluíram que a fabricação de blocos

cerâmicos estruturais é tecnicamente viável do ponto de vista de absorção de água e resistência à compressão. As amostras constituídas por lama vermelha obtiveram menores índices de absorção (porosidade) e maior resistência mecânica, explicados pelo acréscimo de elementos fundentes contidos no resíduo. Observou-se, também, um alto índice de retração da mistura, provocados pelo sódio e zeólitas (aluminatos) presentes na lama vermelha (MACÊDO, *et al.*, 2011).

As variações relacionadas ao tamanho dos blocos estruturais puderam ser controladas com ajustes nas dimensões dos moldes, assim como problemas relacionados à retração puderam ser solucionados com controle da velocidade de secagem e temperatura de queima (MACÊDO, *et al.*, 2011).

A inserção de lama vermelha em blocos cerâmicos eleva a quantidade de fundentes e promove propriedades de sinterização, dessa forma, podem ser obtidos componentes cerâmicos mais resistentes sem necessariamente aumentar a temperatura de sinterização, o que pode vir a reduzir custos operacionais (SOUZA, 2010; VIEIRA, 2008).

O elevado consumo de energia em processos de sinterização incentivou Yang e Xiao (2008) à fabricação de blocos estruturais não sinterizados, constituídos de lama vermelha. Para tanto, foram utilizados cinzas, areia, cal, gesso e cimento na composição dos blocos. Os autores obtiveram bons resultados relacionados à variação de temperatura, demonstrando a durabilidade dos blocos quando submetidos a temperaturas extremas.

Nesta pesquisa, observou-se que o aumento na porcentagem de lama vermelha gerou melhorias na resistência mecânica dos blocos, fato decorrente da aceleração na velocidade de hidratação da mistura (YANG; XIAO, 2008). Quando aplicadas em produtos cimentícios, a sílica e a alumina presentes na lama vermelha reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos hidratados que aumentam a resistência da pasta de cimento (MANFROI, 2009).

No ensaio de difração de raios-x foram encontrados valores significativos de quartzo, calcita e silicato de cálcio hidratado (CSH). No microscópio eletrônico de varredura observaram-se grandes quantidades de etringita (estruturas aciculares) e de gel hidratada (CSH) preenchendo os vazios. Ambas as substâncias foram formadas pelo contato da lama vermelha com o cimento, contribuindo para o aumento da resistência do bloco (YANG; XIAO, 2008).

Com objetivo de comparar propriedades físicas e mecânicas, Rossi, Ramos e Oliveira (2008) confeccionaram concretos de cimento Portland com uso de agregados graúdos constituídos de 80% de lama

vermelha e 20% de areia fina. O concreto de referência foi produzido com seixo rolado.

Com a mistura de lama vermelha e areia fina foram moldados corpos de prova de granulometria graúda, semelhantes ao seixo rolado, submetidos ao processo de sinterização (1.200°C) por um período de aproximadamente 3 horas. Verificou-se uma retração de 4,8% a 15% do volume inicial, contudo, o diâmetro máximo obtido foi semelhante ao do seixo rolado, 19 mm (ROSSI; RAMOS; OLIVEIRA, 2008).

Os corpos de prova compostos por agregados de lama vermelha obtiveram valores de massa específica, semelhantes ao concreto de referência. No ensaio de resistência à compressão, o concreto constituído por agregados de lama vermelha obtiveram valores de resistência em torno de 55% acima daqueles dosados com seixo rolado. Os autores verificaram que as rupturas dos concretos dosados com seixo rolado ocorreram no próprio agregado, enquanto que nos dosados com lama vermelha a ruptura se deu na pasta cimentícia, comprovando a elevada resistência da lama vermelha (ROSSI; RAMOS; OLIVEIRA, 2008).

Rossi *et al.* (2008) realizaram um estudo complementar de resistência à abrasão à pesquisa de Rossi, Ramos e Oliveira (2008). Neste estudo, os corpos de prova compostos por lama vermelha obtiveram um desgaste médio da amostra 85,5% inferior ao da amostra de referência com seixo rolado.

A partir dos estudos realizados com a lama vermelha, os autores concluíram que os elementos fundentes presentes no resíduo reduzem a porosidade e aumentam significativamente a resistência à compressão de blocos cerâmicos, contudo, produzem elevados índices de retração na mistura (ROSSI; RAMOS; OLIVEIRA, 2008; ROSSI, *et al.*, 2008; YANG; XIAO, 2008; MACÊDO, *et al.*, 2011).

Com a mistura de lama vermelha e cimento formaram-se a etringita e a gel hidratada, responsáveis em promover a resistência mecânica do material, o que pode vir a ser uma excelente opção no revestimento de pavimentos rígidos de baixo tráfego (YANG; XIAO, 2008).

Bezerra, Macêdo e Souza (2010) realizaram uma comparação entre misturas asfálticas compostas por filer de cimento Portland (referência) e misturas asfálticas compostas por filer de lama vermelha. Para fabricação de ambas as misturas utilizaram seixo, areia média e CAP 50/70 nas proporções mostradas na Tabela 5.

Bezerra, Macêco e Souza (2010) realizaram o peneiramento dos agregados e puderam observar a similaridade granulométrica entre o cimento Portland e a lama vermelha.

Tabela 5 - Proporção de agregados e ligante utilizados na fabricação de misturas asfálticas

Componentes	Mistura de referência	Mistura com lama vermelha
Seixo (%)	56,58	56,46
Areia (%)	34,89	34,82
Filer (%)	2,83	2,82
CAP (%)	5,7	5,9

Fonte: Bezerra, Macêco e Souza (2010)

Os autores utilizaram a Faixa C definida pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e realizaram ensaios de caracterização dos agregados e do ligante, sendo os resultados obtidos expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados por Bezerra, Macêco e Souza (2010)

Ensaio	Seixo	Areia	Cimento	Lama vermelha	CAP 50/70
Massa específica real (g/cm ³)	2,632	2,624	3,014	2,732	1,03
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,520	-	-	-	-
Equivalente de areia (%)	-	78	-	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	55	-	-	-	-
Absorção (%)	1,79	-	-	-	-
Penetração (0,1mm)	-	-	-	-	58
Viscosidade Saybolt Furol a 160°C (segundos)	-	-	-	-	92
Ponto de amolecimento (°C)	-	-	-	-	52
Ponto de fulgor (°C)	-	-	-	-	298

Fonte: Bezerra, Macêco e Souza (2010)

O projeto das misturas asfálticas foi realizado segundo a metodologia Marshall. Utilizaram-se teores de 5%, 5,5%, 6% e 6,5% de CAP em relação ao peso total da mistura. Os autores estabeleceram um

teor de projeto de 5,7% e 5,9%, para as misturas compostas por cimento e lama vermelha, respectivamente.

Ambas as misturas seguiram os parâmetros volumétricos estabelecidos. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração, estabilidade e fluência.

Os autores constataram que a lama vermelha utilizada na composição das misturas asfálticas foi totalmente envolvida pelo ligante. Os resultados obtidos por Bezerra, Macêco e Souza (2010) demonstraram a similaridade de resultados entre ambas as misturas, o que sugere a viabilidade técnica de utilização da lama vermelha como filer na constituição de misturas asfálticas. Ressaltaram ainda, a necessidade de realizar análises ambientais para constatação da viabilidade.

Tabela 7 - Propriedades avaliadas por Bezerra, Macêco e Souza (2010)

Parâmetro	Mistura de referência	Mistura c/ lama vermelha	Especificação DNER-ES 031/06
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,326	2,321	-
Volume de vazios (%)	4	3,8	3%-5%
Vazios com Betume (%)	12,9	13,3	-
Relação Betume vazios (%)	76,5	78	75%-82%
Estabilidade (Kg/cm ²)	880	900	>500
Vazios de agregado mineral (%)	16,85	17,2	-
Fluência (mm)	3,1	3,3	2,5-4,5
Resistência à tração (MPa)	2	2,11	-

Fonte: Bezerra, Macêco e Souza (2010)

2.5 MISTURAS ASFÁTICAS

A camada de revestimento de pavimentos flexíveis é constituída por misturas asfálticas produzidas com materiais (agregados e ligante asfáltico), e projetada para resistir aos esforços solicitantes de forma a garantir o melhor desempenho do pavimento.

As pesquisas relacionadas à inserção da lama vermelha em camadas do pavimento são escassas, sobretudo no que diz respeito ao revestimento de pavimentos flexíveis. Entretanto, existem diversas pesquisas que abordam a utilização de outros resíduos industriais aplicados às misturas asfálticas, tais como areias de fundição, escória de aciaria e resíduo de manganês. Muitas delas apresentam resultados satisfatórios quanto à aplicação de resíduos no pavimento.

Para garantir o melhor desempenho das misturas asfálticas são utilizados métodos de dosagem, que permitem estabelecer teores de ligante adequados, conforme as especificações de projeto. No Brasil, o método de dosagem oficial é o método Marshall (BRASIL, 1995 B), que faz uso de uma compactação por impacto e vêm gradativamente sendo substituída pela metodologia SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavements*).

Desta forma, neste tópico são abordados os tipos de ligantes asfálticos e as pesquisas relacionadas à inserção de resíduos em misturas asfálticas e a metodologia de dosagem SUPERPAVE.

2.5.1 Ligantes asfálticos

Em serviços de pavimentação empregam-se diferentes tipos de materiais com propriedades aglomerantes, dentre eles estão o cimento asfáltico, asfalto diluído e emulsão asfáltica (BRASIL, 1996).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), ligantes asfálticos são amplamente utilizados, por proporcionarem a união de agregados, além de reforçar características de impermeabilidade, durabilidade, flexibilidade e resistência às intempéries.

O cimento asfáltico derivado da destilação do petróleo em refinarias (CAP) é um ligante que proporciona características adequadas ao pavimento. Semi-sólido à temperatura ambiente, o cimento asfáltico necessita de aquecimento para alcançar uma consistência que facilite o recobrimento dos agregados (BRASIL, 1996). Os asfaltos diluídos são cimentos asfálticos diluídos em solventes derivados do petróleo de volatilidade adequada (SANTOS, 2010).

Para fabricação de emulsões, utilizam-se cimentos asfálticos combinados com água e emulsificantes, que auxiliam na estabilidade do conjunto e favorecem a dispersão (BRASIL, 1996).

No Brasil, a especificação do CAP estabelecida em 2005 (Tabela 8), baseia-se na penetração, ou seja, profundidade que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material em condições pré-estabelecidas de carga (100 gramas), tempo (5 segundos) e temperatura (25°C), expressa em décimo de milímetros (BRASIL, 2010 B).

Existem, portanto, quatro categorias: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, sendo os números, relativos à faixa de penetração obtida pelo ligante (ANP, 2005).

Tabela 8 - Especificação brasileira do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

	UN	Especificações				Norma
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	DNIT
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200	155/10
Ponto de Amolecimento , mín.	°C	52	46	43	37	131/10
Viscosidade Saybolt-Furol						
135°C, mín.	S	192	141	110	80	04/94
150°C, mín.		90	50	43	36	
177°C		40-150	30-150	15-60	15-60	
Viscosidade Brookfield						
135°C mín, SP(*) 21, 20 rpm(**), mín.	cP	374	274	214	155	-
150°C, mín.		203	112	97	81	
177°C		76-285	57-285	28-114	28-114	
Índice de Suscetibilidade e Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	153/94
Dutibilidade a 25°C, mín.	Cm	60	60	100	100	163/98
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos (RTFOT)						
Varição em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Dutibilidade a 25°C, mín.	Cm	10	20	50	50	163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	-
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	155/10

Fonte: Adaptado de Brasil (2006 B)

Além da penetração, propriedades como viscosidade e susceptibilidade térmica do ligante virgem e envelhecido, devem ser satisfatórias às especificações, e para constatação destes valores e faixas,

são realizados ensaios de caracterização, tais como ponto de amolecimento, viscosidade e ductilidade.

Para fabricação de misturas asfálticas é importante que o ligante seja ensaiado quanto às propriedades de viscosidade, pois assim é possível traçar uma curva viscosidade-temperatura, e então, estabelecer valores adequados de temperaturas para procedimentos de mistura e compactação do concreto asfáltico (BERNUCCI, *et al.*, 2010).

2.5.2 Misturas asfálticas com adição de resíduos

Neste tópico, é realizada uma breve explanação a respeito de pesquisas com utilização de resíduos, de granulometria e composições semelhantes à lama vermelha, aplicados às misturas asfálticas. Para tanto, foram escolhidas areias de fundição (COUTINHO NETO, 2004; COUTINHO NETO; FABBRI, 2004; PEREIRA, *et al.*, 2005), escória de aciaria (CASTELO BRANCO, 2004; TAVARES, 2012; NÓBREGA; CAMPOS; SOARES, 2004; SOUZA, 2007) e resíduo de manganês (CARDOSO, *et al.*, 2011 A; CARDOSO, *et al.*, 2011 B).

2.5.2.1 Areias de fundição

As areias de fundição são utilizadas na moldagem de metais fundidos, essencialmente constituídos por sílica (SiO_2). Entretanto, durante o processo podem ser incorporadas substâncias oriundas do metal moldado e/ou aglomerante utilizado. De um modo geral, a areia utilizada nos diversos processos de fundição apresenta granulometria entre 0,075 e 1 mm (COUTINHO NETO, 2004).

Para avaliar as propriedades mecânicas das misturas, Coutinho Neto (2004) moldou corpos de prova com teores de vazios de 3, 4 e 5% e realizou os ensaios de dosagem Marshall, envelhecimento (RTFOT), cântabro, dano por umidade induzida, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fluência por compressão uniaxial estática.

Foram realizados ensaios de lixiviação, solubilização e análise química da massa bruta nas misturas asfálticas soltas contendo 10% de areia virgem (areia antes da utilização no processo de fundição) e 15% de areia de fundição.

Para compor as misturas, Coutinho Neto (2004) adotou o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 20 e teores de 5, 10 e 15% de areia de fundição em relação à massa total de agregados. Todas as misturas no teor de projeto, com volume de vazios (V_v) de 4%,

apresentaram parâmetros que satisfazem os requisitos das especificações.

As análises químicas realizadas por Coutinho Neto (2004) em amostras não compactadas, contendo 15% do resíduo, classificaram o material como Classe II – B – Inerte, o que sugere um encapsulamento das areias pela mistura asfáltica.

As misturas com areia de fundição apresentaram um consumo de asfalto superior à mistura de referência, apresentando-se mais sensíveis ao desgaste. Todas as misturas foram aprovadas no aspecto de dano por umidade induzida.

No estudo conduzido por Coutinho Neto (2004), o aumento no teor de areia de fundição utilizado reduziu a resistência à tração e a susceptibilidade a deformação permanente das misturas.

A areia de fundição é classificada como Classe II – B – Não perigoso e Inerte, o que garante a viabilidade de reutilização do resíduo como agregado miúdo em misturas asfálticas densas (COUTINHO NETO, 2004; COUTINHO NETO; FABBRI, 2004; PEREIRA, *et al.*, 2005).

2.5.2.2 Escória de aciaria

A escória de aciaria é um subproduto da produção do aço, composta por silicatos de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita cálcica (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO) e alumina (Al_2O_3) (CASTELO BRANCO, 2004; TAVARES, 2012), caracterizada pela elevada expansibilidade, essencialmente ocasionada pela hidratação do óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio livres (CASTELO BRANCO, 2004).

A utilização da escória de aciaria na construção rodoviária é um desafio, visto que a expansibilidade do resíduo pode reduzir o tempo de vida útil do pavimento com a propagação de defeitos (SOUZA, 2007).

Para que a escória de aciaria seja aplicada na camada de revestimento do pavimento, a norma estabelece uma expansão máxima de 3%, com granulometria entre 12,7 e 50,8 mm (BRASIL, 1994 D). No estudo de Castelo Branco (2004) 90% da escória de aciaria apresentou-se com granulometria inferior a 19,1mm.

Freitas e Motta (2008) empregaram a escória de aciaria na produção de misturas asfálticas de módulo elevado, com o uso de ligantes duros e granulometria contínua (VILLELA, 2012). Os autores compararam as misturas asfálticas convencional e composta por escória

de aciaria por meio de ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração, fadiga e *creep* estático.

O teor de ligante adotado em misturas compostas pelo resíduo foi de 7,0% e da mistura convencional de 5,0%. O módulo de resiliência e a resistência à tração da mistura composta por escória de aciaria foram superiores em relação a convencional. Entretanto, a deformação permanente obtida pelos ensaios de *creep* estático foi inferior (FREITAS; MOTTA, 2008)

Os resultados obtidos por Freitas e Motta (2008) evidenciam a promoção de propriedades físicas e mecânicas com a inserção do resíduo em questão.

Silva (2010) avaliou o comportamento mecânico de misturas asfálticas modificadas com rejeito de minério de ferro e escória de aciaria, dosadas pelo método Marshall. Foram adicionados brita e escória de aciaria como agregados e minério de ferro na forma de filer. O autor realizou ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga, *creep* estático, além de avaliações ambientais.

De maneira geral, observou-se que misturas asfálticas compostas por resíduos, como por exemplo escória de aciaria, consomem uma quantidade maior de ligante em relação às misturas convencionais (COUTINHO NETO, 2004; SILVA, 2010).

O acréscimo de rejeito de minério de ferro, como filer em misturas com a escória, proporcionou uma redução do volume de vazios, permitindo um arranjo estrutural estável e resistente da camada. A substituição do filer natural pelo rejeito de minério de ferro reduziu em 3,1% o consumo de ligante para as misturas contendo escória de aciaria (SILVA, 2010).

Para a obtenção de misturas com volume de vazios entre 3% e 5%, conforme especificação brasileira (BRASIL, 2006 A), Silva (2010) utilizou valores de CAP entre 5,5 e 7,5% em relação ao peso total da mistura. A escória de aciaria foi classificada como Classe II – B – Não perigoso e Inerte (SILVA, 2010).

2.5.2.3 Resíduo de manganês

O resíduo de manganês é um rejeito constituído de elementos nocivos ao meio ambiente, tais como arsênio, e por isso merece maior atenção quanto à sua reutilização (SOUZA; BURLAMAQUI; COUTINHO NETO, 2009).

Cardoso *et al.* (2011A) e Cardoso *et al.* (2011B) avaliaram a aplicação de resíduo de manganês na fabricação de misturas asfálticas,

para isso, utilizaram CAP 50/70 e resíduo de manganês com granulometria inferior a 4,76mm. Os autores realizaram um comparativo entre misturas compostas por agregados convencionais (areia e seixo) com adições de 5,0% e 10,0% de rejeito de manganês, respectivamente, dosados pela metodologia Marshall. Foram realizados ensaios de resistência à tração e dano por umidade induzida. Em nenhuma das pesquisas foram avaliados possíveis impactos ambientais ocasionados pela utilização do rejeito.

Nenhuma das misturas conseguiu atingir os valores da Relação Betume/Vazios (RBV) e porcentagem Volume de Vazios (Vv) estimados por norma. Contudo, o aumento na quantidade de resíduo de manganês inserido nas misturas aproximou os resultados dos valores requeridos. Os autores ressaltam, todavia, que o acréscimo de resíduo de manganês também elevou o teor de ligante necessário (CARDOSO, *et al.*, 2011 A; CARDOSO, *et al.*, 2011 B).

O teor de projeto, tanto para a mistura com 5,0% como com 10,0% de resíduo foi de 9,2%, onde o Vv apresentou valores de 7,95% e de 7,28%, respectivamente. Conforme os autores, estes resultados foram devido à elevada porcentagem de areia natural na composição granulométrica das misturas, além da alta superfície específica do resíduo de manganês, que promove a capacidade de absorção do material (12,02%) (CARDOSO, *et al.*, 2011 B). As texturas e formato arredondado da areia e do resíduo dificultaram a compactação da mistura, ocasionando o surgimento de um maior número de vazios (CARDOSO, *et al.*, 2011 A).

Apesar de não terem sido realizados ensaios ambientais, Cardoso *et al.* (2011 A) e Cardoso *et al.* (2011 B) sugerem que haja um encapsulamento do resíduo de manganês por parte do ligante. Esta conclusão é reafirmada no trabalho de Coutinho Neto (2004), com a areia de fundição, que defende a retenção de substâncias nocivas ao ambiente pelo ligante.

2.5.3 Dosagem SUPERPAVE

No fim dos anos 1980, iniciou-se nos Estados Unidos, um programa de pesquisa que visava à melhoria no desempenho das estradas do país. Conhecido por *Strategic Highway Research Program* (SHRP), o projeto desenvolveu novas especificações conhecidas por SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*), que provocaram mudanças significativas nos procedimentos de ensaio compactação de misturas asfálticas do país e do mundo (TRB, 2011).

As diferenças existentes entre os procedimentos Marshall e SUPERPAVE consistem na escolha da graduação dos agregados e na forma de compactação da mistura. Enquanto a metodologia Marshall exige a escolha prévia de uma faixa granulométrica, usando-se de uma compactação por impacto, a metodologia SUPERPAVE permite a escolha de três composições granulométricas, a fim de selecionar a de melhor desempenho, realizando uma compactação por amassamento (giros) (BERNUCCI, *et al.*, 2010; TRB, 2011).

Para a escolha do teor de projeto, ambas as metodologias estabelecem parâmetros volumétricos para atestar a viabilidade da mistura, tais como Volume de Vazios (Vv), Vazios no Agregado Mineral (VAM) e vazios preenchidos com asfalto, também denominado Relação Betume/Vazios (RBV) (BRASIL, 2006 A; MARQUES, 2004). A metodologia SUPERPAVE pré-estabelece, ainda, a proporção pó/asfalto, correspondente à razão entre o teor de material passante na peneira n°200 (0,075 mm) e o teor de ligante utilizado.

O procedimento SUPERPAVE leva em consideração o nível de tráfego e a importância da rodovia para determinação dos critérios de dosagem, que devem ser enquadrados conforme os parâmetros estabelecidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros avaliativos da metodologia SUPERPAVE

Nível	1	2	3
Critério	Volumétrico	Volumétrico + Ensaios de previsão de desempenho a uma temperatura	Volumétrico + Ensaios de previsão de desempenho a três temperaturas
N (AASHTO)	<10 ⁶	10 ⁶ a 10 ⁷	≥10 ⁷

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Dessa forma, o teor de projeto de misturas asfálticas utilizadas em vias de tráfego leve e médio é selecionado apenas com a obediência de critérios volumétricos, contudo, para tráfegos médio-alto e alto, denominados Nível 2 e 3, respectivamente, devem ser executados ensaios de desempenho, como deformação permanente e fadiga (BERNUCCI, *et al.*, 2010).

O Nível 3 é semelhante ao procedimento de projeto utilizado no Nível 2, mas utiliza um conjunto mais completo de propriedades baseadas no desempenho das misturas, além de fornecer previsões mais

confiáveis de deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico à baixa temperatura (SHRP, 1994 B).

As temperaturas em que são realizados os ensaios de desempenho, nos Níveis 2 e 3, são selecionadas a partir do histórico de temperaturas local, de modo que sejam adotados os valores mais desfavoráveis (SHRP, 1994 B).

Para iniciar os procedimentos de dosagem SUPERPAVE, são testadas três composições granulométricas, de caráter graúdo, intermediário e miúdo, misturadas a um teor inicial de ligante, determinado por equações, baseadas em parâmetros de massa específica dos componentes (MARQUES, 2004 ; BERNUCCI, *et al.*, 2010). Estabelecido o teor de ligante inicial, são moldados dois corpos de prova para cada composição granulométrica adotada. As amostras são compactadas, para então serem obtidas as propriedades volumétricas das respectivas misturas. O Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) empregado durante o processo é um equipamento prático que, em geral, funciona com ângulo de $1,25 \pm 0,02^\circ$, taxa de 30 rotações por minuto e tensão de compressão vertical de 600 kPa (DANTAS, 2013; SHRP, 1994 B).

A composição granulométrica que apresentar melhores resultados nos requisitos volumétricos avaliados deverá compor novas amostras, desta vez, com teores variáveis em $\pm 0,5\%$ e $+1\%$ do teor de ligante inicial (BERNUCCI, *et al.*, 2010).

Previamente ao processo de compactação, as misturas asfálticas são condicionadas em estufa, com objetivo de simular o envelhecimento em curto prazo. Para análises volumétricas, a mistura deve ser condicionada por 2 horas na temperatura de compactação, fornecida pela curva viscosidade-temperatura do ligante (MARQUES, 2004).

O número de giros requerido durante o processo de compactação é determinado em função do tráfego, analisando esforços de compactação inicial (N_{inicial}), de projeto (N_{projeto}), no qual o V_v deve ser igual a 4%, e máximo ($N_{\text{máximo}}$), que representa a condição de compactação do pavimento no fim da vida de serviço, conforme Tabela 10 (MARQUES, 2004 ; BERNUCCI, *et al.*, 2010).

Para realizar a compactação necessitam-se informações de quantidade (gramas) e massa específica máxima (DMT ou Gmm) da mistura asfáltica, inseridas no *software*, de forma que durante o processo possam ser automaticamente calculados e visualizados a altura, massa específica e o volume de vazios da amostra conforme o número de giros realizado. O ensaio pode ser finalizado pela altura, massa específica ou

número de giros requeridos pelo operador (MARQUES, 2004 ; BERNUCCI, *et al.*, 2010).

Tabela 10 - Número de giros especificados em função do tráfego

$N_{(AASHTO)}$	Nível de Compactação			Tráfego
	$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$	
$<10^5$	6	50	75	Leve
$10^5 - 10^6$	7	75	115	Médio
$10^6 - 10^7$	8	100	160	Médio-Alto
$>10^7$	9	125	205	Alto

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010) e Marques (2004)

Em seguida é aferida a massa específica aparente medida da amostra, e assim, podem ser realizadas correções, que permitem computar um volume de vazios mais preciso (MARQUES, 2004 ; BERNUCCI, *et al.*, 2010).

Assim, são testados diferentes teores até que sejam atendidos os requisitos volumétricos já estabelecidos (Tabela 11), sendo o volume de vazios mínimo aceitável para $N_{máximo}$ correspondente a 2%, o que fornece garantias de que não irá haver uma compactação excessiva do pavimento ao fim de sua vida útil (BERNUCCI, *et al.*, 2010).

Tabela 11 - Parâmetros volumétricos de misturas asfálticas

Propriedades da mistura	Critério SUPERPAVE
Volume de Vazios (V_v)	4%
Volume do Agregado Mineral (VAM)	>13%
Relação Betume/Vazios (RBV)	65-75%
Proporção pó/asfalto	0,8 a 1,6
%Gmm ($N_{inicial}$)	< 89%
%Gmm ($N_{máximo}$)	< 98%

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010)

2.5.4 Influência da adição do filer em misturas asfálticas

Entre os fatores que influenciam diretamente a durabilidade de misturas asfálticas aplicadas em pavimentos está o teor e o tipo de filer utilizado. O atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) define filer como qualquer material de enchimento que passe pelo menos 65% na peneira N° 200 (75 μ m) (BRASIL, 1997), conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Granulometria do filer

Abertura da malha (mm)	% passante
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

Fonte: BRASIL (1997)

O filer é incorporado à mistura asfáltica a fim de melhorar seu desempenho reológico, térmico e de sensibilidade à água, tendo funções de preencher os vazios e aumentar a viscosidade do ligante e, portanto, sua resistência à deformação permanente. A atuação do filer depende da granulometria do material de modo que partículas maiores que 40 μm tendem a preencher os vazios dos outros agregados e as partículas menores que 20 μm misturam-se ao ligante, formando o que alguns autores chamam de mástique, aumentando a sua viscosidade e o seu ponto de amolecimento e diminuindo a suscetibilidade térmica do mesmo (CAVALCANTE; SOARES, 2001; PINILLA, 1965; SANTANA, 1995; MOTTA; LEITE, 2000).

A rigidez do mástique influencia a resistência à fadiga, bem como a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica a altas temperaturas (BARDINI; JÚNIOR; KLINSKY, 2009).

Segundo Motta e Leite (2000) a utilização de filer reduz os vazios do esqueleto mineral, melhora a granulometria e a trabalhabilidade de misturas asfálticas até certo ponto. Entretanto, se ultrapassado este limite, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo o contato entre partículas e alterando a capacidade de compactação da mistura.

A interação pó/asfalto é um fator importante a ser considerado na caracterização de misturas asfálticas. Esta interação depende da composição química do asfalto e das características do filer, tais como a composição mineralógica, textura superficial e superfície específica (FONTES, 2009).

A proporção pó/asfalto indica a ausência de “asfalto livre”, ou seja, a porção não aderida aos agregados, que unida ao filer forma o mástique, e atua inibindo o trincamento de misturas asfálticas (CERATTI; WESSLING; SPECHT, 2003).

A taxa de pó/asfalto é calculada usando o teor de ligante efetivo, ou seja, não é levada em consideração a quantidade de ligante absorvido. Na especificação SUPERPAVE, a proporção ideal de pó/asfalto estabelecida foi de 0,6 a 1,2 em peso. Contudo, ao utilizar o teor de ligante efetivo em vez do conteúdo total de ligante,

normalmente, há um aumento na proporção pó/asfalto devido à absorção dos agregados. Dessa forma, posteriormente, a entidade responsável alterou o limite de misturas asfálticas densas de 0,8 a 1,6 (FHWA, 2001).

Motta e Leite (2000) estudaram o efeito de três tipos de filer: pó calcário, cimento Portland e pó de pedra. Dentre eles, o pó calcário apresentou o menor tamanho de partícula, seguido do cimento Portland e pó de pedra, respectivamente. As autoras observaram que os corpos de prova constituídos de pó calcário apresentaram valores de módulos de resiliência e resistência à tração superiores aos obtidos com os demais. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram a influência da granulometria do filer na rigidez da mistura asfáltica, uma vez que quanto menor o tamanho de partícula do filer, maior é sua incorporação no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

O pó calcário utilizado como filer em misturas asfálticas possui um efeito mais expressivo, em comparação com o cimento ou com o pó de pedra, uma vez que 80% de partículas possuem tamanho inferior ou igual a 0,02 mm (20 μ m), que interagem com o ligante, aumentando seu ponto de amolecimento, reduzindo a susceptibilidade térmica e aumentando a resistência à deformação permanente. Por outro lado, o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 0,06 mm (60 μ m). O pó de pedra, por sua vez, possui granulometria mais grossa com grande proporção de partículas maiores que 0,04 mm (40 μ m) (MOTTA; LEITE, 2000).

Cavalcante e Soares (2001) produziram misturas asfálticas utilizando seis tipos de filer: 1) areia de campo, 2) pó de pedra, 3) pó calcário, 4) cal hidratada, 5) carbonato de magnésio e 6) cimento Portland. Os autores adotaram a faixa “C” do DNIT e utilizaram CAP 50-60 para confecção das misturas. Foram empregados dois teores de filer (2% e 5%), e as misturas dosadas no teor de projeto. Os seis tipos de filer foram caracterizados química e fisicamente através dos ensaios de granulometria a laser, análise de forma e textura dos grãos através da utilização de MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e determinação da massa específica real. As misturas foram avaliadas por ensaio de resistência à tração estática.

Na Tabela 13 são apresentados alguns resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados no estudo de Cavalcante e Soares (2001).

Tabela 13 - Granulometria e massa específica dos diferentes tipos de filer usados

Filer	% de grãos < que 40 μm	% de grãos < que 20 μm	Massa específica aparente (g/cm^3)
Carbonato de Magnésio	28,17	16,16	2,415
Pó de pedra	45,98	23,28	2,647
Areia de Campo	61,67	34,89	2,546
Pó Calcário	74,42	36,27	2,765
Cimento Portland	80,00	55,13	3,030
Cal Hidratada	85,70	55,87	2,536

Fonte: Adaptado de Cavalcante e Soares (2001)

Os materiais expostos na Tabela 13 apresentam-se de forma decrescente de acordo com a granulometria, ou seja, o carbonato de magnésio é o filer que possui maiores tamanhos de grãos e a cal hidratada menores tamanhos de grãos.

Os resultados obtidos pela microscopia eletrônica no trabalho de Cavalcante e Soares (2001) mostraram que a areia de campo, o cimento Portland e o pó de pedra possuíam grãos com forma lamelar e as amostras de pó calcário, carbonato de magnésio e cal hidratada possuíam grãos com forma arredondada.

A dosagem das misturas foi feita utilizando a metodologia Marshall e obedeceu aos limites de volume de vazios (Vv) de 3% a 5% e relação betume/vazios (RBV) de 75% a 82%, estabelecido pelo DNIT para concretos asfálticos, conforme Tabela 14.

Os autores observaram que houve uma tendência de redução do volume de vazios com o aumento do tamanho de grão do filer utilizado. Contudo, esta relação não se confirmou para as amostras de areia de campo (2%) e de cal hidratada (2% e 5%).

O volume de vazios e a relação betume vazios tende a manter-se constante com a manutenção de um mesmo teor de filer, seja ele qual for. Com o aumento do teor de filer houve uma redução no teor de projeto, além de promover o aumento do Vv e a redução da RBV (CAVALCANTE; SOARES, 2001).

Cavalcante e Soares (2001) consideraram equivalentes os teores de projeto das misturas, visto que o erro admissível para a execução em campo é de $\pm 0,3\%$. Contudo, os autores ressaltam que existem indicativos de que um aumento da consistência do ligante, devido à incorporação de filer, leva a um teor de ligante inferior para atender às mesmas especificações volumétricas da mistura asfáltica.

Tabela 14 - Parâmetros volumétricos de dosagem obtidos por Cavalcante e Soares (2001)

Tipo de Filer	Teor de projeto (%)		Vv (%)	RBV (%)
Carbonato de Magnésio	2%	6,5	3,3	81,5
	5%	6,1	3,7	78,8
Pó de pedra	2%	6,6	3,7	80,2
	5%	6,4	3,1	82,2
Areia de Campo	2%	6,5	3,7	80,0
	5%	6,3	4,4	76,2
Pó Calcário	2%	6,6	3,3	81,9
	5%	6,2	4,2	76,9
Cimento Portland	2%	6,5	3,2	82,1
	5%	6,1	3,5	79,5
Cal Hidratada	2%	6,4	3,5	80,4
	5%	6,3	4,3	76,5

Fonte: Adaptado de Cavalcante e Soares (2001)

Os corpos de prova moldados no teor de projeto foram submetidos ao ensaio de resistência à tração estática (DNER-ME 138/94). Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados de resistência à tração (MPa) obtidos por Cavalcante e Soares (2001)

Filer	Resistência à Tração (Mpa)	
	2% de filer	5% de filer
Carbonato de Magnésio	0,77	1,11
Pó de pedra	0,70	1,00
Areia de Campo	0,71	0,97
Pó Calcário	0,68	1,12
Cimento Portland	0,78	0,92
Cal Hidratada	0,71	1,20

Fonte: Adaptado de Cavalcante e Soares (2001)

Os autores constataram valores de resistência à tração, superiores em corpos de prova constituídos com 5% filer. Destacando-se misturas com cal hidratada e pó calcário, nas quais os valores da resistência à tração estática praticamente duplicaram. Este fato indicou que as partículas do filer uniram-se ao ligante, aumentando sua consistência e consequentemente a rigidez e a resistência da mistura, neste trabalho.

Cavalcante e Soares (2001) concluíram que materiais aparentemente iguais, se usados como filer, podem provocar mudanças

significativas nas misturas asfálticas, fazendo-se, portanto, necessária à caracterização física e química do material.

2.6 ENSAIOS DE DESEMPENHO

Previamente ao estabelecimento das misturas asfálticas faz-se necessária à realização de ensaios de desempenho que permitem analisar o comportamento do material quando aplicado em campo. Dessa forma, neste tópico serão abordados os ensaios realizados nesta pesquisa, tais como deformação permanente e dano por umidade induzida.

2.6.1 Deformação permanente (DP)

Aproximadamente 50% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de deficiência, sendo classificadas pela Confederação Nacional do Transporte (2014) como regular, ruim ou péssima. Buracos, afundamentos e ondulações, são defeitos comumente encontrados, e sua ocorrência compromete diretamente a segurança do usuário, além de tornar viagens rodoviárias mais demoradas e onerosas.

Os defeitos podem apresentar-se em conjunto ou isoladamente. Afundamentos são deformações permanentes decorrentes no revestimento asfáltico ou em camadas subjacentes do pavimento classificados como locais ou trilhas de roda. Os afundamentos de trilhas de roda são depressões contínuas ocasionadas pelo tráfego intenso de veículos e, geralmente, promovem a elevação da massa asfáltica ao longo da borda da depressão (CNT, 2014).

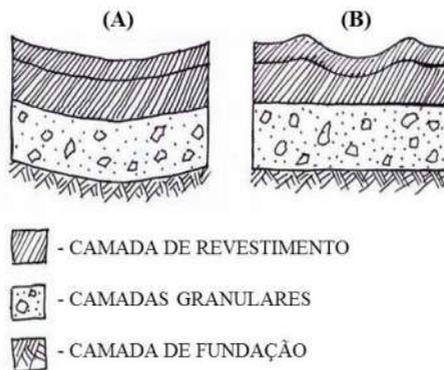
A deformação permanente por trilha de roda é um defeito estrutural frequente em rodovias brasileiras, ocasionada pelo acúmulo de deformações não recuperáveis resultantes de carregamentos oriundos do tráfego provocado por uma seleção equivocada de materiais e/ou compactação e dosagem inadequadas (MOURA, 2010).

A deformação permanente que ocorre em camadas asfálticas é maior próxima à carga e gradualmente decresce com a profundidade. Fontes (2009) afirma que com a abertura ao tráfego, as camadas do pavimento são gradativamente compactadas, especialmente na zona de contato pneu-pavimento, até que haja constância de material deslocado entre as trilhas de roda e zonas adjacentes. A partir daí, a deformação permanente é causada essencialmente por deslocamento com constância de volume.

Gardete (2006) cita a acomodação das camadas de fundação (A) e a deformação da camada de revestimento (B), como possíveis causas de

deformação permanente em pavimentos flexíveis, as quais podem ser visualizadas na Figura 10.

Figura 10 - Deformações permanentes no pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Gardete (2006)

A acomodação das camadas de fundação (A) é caracterizada por uma trilha de roda de maior raio, com variação de volume, na qual as camadas inferiores deformam-se e promovem acomodação do pavimento como um todo (GARDETE, 2006).

A trilha de roda demonstrada no caso (B) deve-se essencialmente a acomodação da camada asfáltica, sem variação de volume, favorecida pelas altas temperaturas, carga de veículos e pressão de enchimento dos pneus (GARDETE, 2006).

Muitos fatores influenciam o comportamento à deformação permanente de misturas asfálticas. O tráfego é uma ação externa de grande influência, especialmente quando se refere ao transporte de cargas pesadas, onde eventualmente são utilizadas rodas simples ao invés de duplas. A redução da área de contato pneu-pavimento ocasiona o aumento das tensões aplicadas, agravadas nas camadas superiores, uma vez que nas subsequentes as mesmas são distribuídas (MOURA, 2010).

A temperatura é a ação externa de maior influência no comportamento das misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. A elevação da temperatura altera a viscosidade do material, aumenta a fluidez do asfalto e promove a densificação da mistura, reduzindo assim, a resistência à deformação (VIERA, 2002; GARDETE, 2006).

A dosagem está dentre os fatores relativos à mistura que mais influenciam. Um teor de ligante insuficiente resulta na desagregação de grãos, e um teor de ligante excessivo reduz a resistência à deformação permanente (VIERA, 2002).

Com o tempo o ligante utilizado na mistura envelhece, por volatilização e oxidação de seus componentes, o ligante tende a enrrijecer, tornando-se menos suscetível à deformação permanente, entretanto, mais propenso a trincamento e outros defeitos (MOURA, 2010; SHELL, 2003).

A escolha do tipo de ligante a ser utilizado na composição da mistura é uma variável importante, uma vez que a temperatura influencia diretamente na viscosidade do mesmo. Existem, contudo, alguns agentes modificadores que podem ser inseridos no intuito de aumentar a rigidez e, até determinado ponto, melhorar o desempenho das misturas asfálticas (GARDETE, 2006).

A resistência à deformação permanente das misturas asfálticas é proveniente da coesão, fornecida pelo ligante, e atrito interno dos agregados. Desta forma, a seleção de agregados para composição de misturas asfálticas deve levar em consideração características de granulometria, forma, origem e textura dos grãos. Uma curva granulométrica bem selecionada é capaz de promover uma mistura coesa e de boa resistência (ASPHALT INSTITUTE, 2003; FHWA, 2001).

Fontes (2009) afirma que granulometrias densas são apropriadas para mitigação de efeitos de deformação permanente. Segundo a autora, misturas asfálticas densas ou contínuas quando bem compactadas e com poucos vazios possuem maior interação entre partículas do que graduações abertas ou descontínuas.

A utilização de grãos arredondados tende a reduzir o atrito interno e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento (UGE; VAN DE LOO, 1974). Entretanto, a textura mais rugosa de agregados de origem granítica melhora o atrito interno e promove a resistência à deformação permanente (SHRP, 1994 A; FHWA, 2001).

A resistência à deformação permanente de misturas asfálticas pode ser melhorada com o uso de agregados maiores (diâmetro máximo superiores a 25,0 mm), segundo Davis (1988) o uso de agregados de diâmetro máximo equivalente a 2/3 da espessura da camada é benéfico para redução da deformação permanente.

A porcentagem de volume de vazios é uma particularidade importante, por isso, a forma e qualidade da compactação são essenciais para a fabricação de misturas resistentes. Misturas asfálticas com

volume de vazios elevado tendem a densificar-se quando solicitadas, provocando consequentes deformações. Entretanto, um volume de vazios muito baixo também é capaz de desestabilizar a mistura, tornando-a menos resistente e mais suscetível à deformação permanente, pois o asfalto preenche o espaço entre as partículas, que para altas temperaturas funcionará como lubrificante, potencializando a ocorrência de deformações (MENDES, 2011; SHRP, 1994 A; FHWA, 2001).

Em escala laboratorial, são realizados ensaios a fim de avaliar a deformação permanente em revestimentos asfálticos, como a compressão uniaxial não confinado e triaxial com carregamento repetido, conhecidos também como *creep* estático e *creep* dinâmico. Existem ainda, simuladores de tráfego, que permitem uma investigação mais próxima da realidade sem, contudo, eliminar a necessidade de utilização de fatores campo-laboratório (BERNUCCI, *et al.*, 2010; MOURA, 2010).

Na Tabela 16 podem ser visualizados os ensaios normalmente utilizados para caracterizar a susceptibilidade de misturas asfálticas à deformação permanente.

Tabela 16 - Ensaios de caracterização da resistência à deformação permanente

Tipo de ensaio	Designação	Tipo de corpo de prova	Esquema do ensaio
Compressão	Compressão uniaxial (aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas)	Cilíndrico	
	Compressão triaxial (aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas)	Cilíndrico	
Cisalhamento	Cisalhamento simples (aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas)	Cilíndrico	
Simulação	Simuladores de tráfego/Wheel Tracking	Prismático (laje)	
	Pista à escala real	Trecho experimental	-

Fonte: Adaptado de Mendes (2011)

De maneira geral, ensaios estáticos utilizam-se de temperatura e nível de tensão fixos e ensaios de cargas repetidas (dinâmicas), embora mantenham a temperatura constante, variam a carga aplicada ao longo do tempo (CAPITÃO, 2003; FONTES, 2009).

O ensaio de compressão uniaxial consiste em submeter corpos de prova cilíndricos a uma carga axial de compressão (estática ou cíclica) ao longo do tempo, atuando na direção do eixo do corpo de prova. Durante o ensaio, a deformação axial é medida em função do tempo, podendo também ser medida a deformação radial (MENDES, 2011; SHELL, 2003).

Em comparação com os ensaios estáticos, os ensaios de compressão cíclicos em que o corpo de prova é submetido a carregamentos repetidos, permitem simular de forma mais eficiente as ações a que uma mistura asfáltica está sujeita quando aplicada a um pavimento rodoviário (FONTES, 2009). Assim, ensaios realizados com carregamento repetido têm demonstrado ser mais adequados para a avaliação da deformação permanente (MENDES, 2011; SHELL, 2003).

O ensaio de compressão triaxial permite aproximar as condições de tensão à que a mistura asfáltica é sujeita quando aplicada a pavimentos rodoviários, consistindo na aplicação de cargas axiais em corpos de prova cilíndricos sujeitos a tensões de confinamento lateral. As cargas axiais e as tensões de confinamento podem ser constantes (ensaio estático) ou variáveis (ensaio de cargas repetidas), podendo ainda ser realizado com cargas axiais cíclicas e tensões de confinamento estáticas (MENDES, 2011; COUTINHO NETO, 2004).

A existência da tensão de confinamento permite que o ensaio de compressão triaxial seja realizado em temperaturas e tensões superiores aos utilizadas no ensaio de compressão uniaxial, sem que ocorra a rotura prematura do corpo de prova (FREIRE, 2002).

Segundo Gardete (2006), a deformação permanente ocorrida em misturas asfálticas está intimamente relacionada às tensões de cisalhamento propagadas pela aplicação de cargas do tráfego. Dessa forma, desenvolveram-se ensaios capazes de avaliar o comportamento à deformação permanente de misturas asfálticas fabricadas em laboratório sujeitando-as a esforços similares aos encontrados em campo.

O ensaio de cisalhamento simples consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico a tensões de cisalhamento, sem que sejam permitidas variações de volume. Para analisar o comportamento das misturas à deformação permanente o procedimento de ensaio mais utilizado é o RSST-CH (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height*) (MENDES, 2011). Segundo Fontes (2009) o fenômeno da

deformação plástica por cisalhamento sem variação de volume é bem representado pelo ensaio de cisalhamento simples a altura constante (RSST-CH). Neste, os corpos de prova são colados em pratos do equipamento, de modo a evitar movimentos laterais e consequentes variações de volume.

O ensaio é geralmente realizado aplicando um carregamento sinusoidal, com uma tensão máxima de 70 kPa, que simula a passagem de um veículo (FREIRE, 2002).

Os ensaios de simulação têm objetivo de aproximar os efeitos ocasionados pelo tráfego em situações reais a uma escala laboratorial. Estes ensaios podem ser realizados em escala reduzida com condições controladas, ou em escala real utilizando pistas especialmente fabricadas para este intuito (MENDES, 2011).

Embora os ensaios de simulação possuam objetivos semelhantes, existem diferenças entre eles. Dentre muitas outras divergências estão, a variação de carregamento, forma de aplicação da carga até diâmetro e tipo de roda (GARDETE, 2006). Desenvolvidos em diferentes países, alguns equipamentos são citados a seguir:

- *Asphalt Pavement Analyser (APA)*
- *Hamburg Wheel Tracker Device*
- *Ornièreur do LCPC (IFSTAR)*

O equipamento APA permite ensaiar seis corpos de provas cilíndricos ou três corpos de provas retangulares simultaneamente. Os corpos de provas são termicamente condicionados e coloca-se um tubo de borracha pressurizado (690 kPa) em cima dos corpos de prova. Posteriormente é acionada uma roda que em um movimento de vaivém passa cerca de 8000 vezes sobre o tubo pressurizado (MAHONEY; ZINKE, 2008).

O APA tem uma largura de aplicação da carga pequena, logo os resultados para misturas com agregados de maiores dimensões não são muito confiáveis, permitindo que algumas misturas de qualidade inferior possam dar bons resultados (FHWA, 2001).

O *Hamburg Wheel Tracker* utiliza uma roda de aço para aplicar a carga. Devido à ação da roda ser bastante agressiva, os corpos de prova são submersos em água. Dessa forma, o ensaio permite avaliar não somente a susceptibilidade de misturas asfálticas à deformação permanente, como também problemas de adesividade existentes entre agregado e ligante (RAHMAN; HOSSAIN, 2014).

O uso de uma roda de aço para aplicação de carga torna o equipamento *Hamburg Wheel Tracker* um tanto rigoroso, uma vez que o aço não se deforma como rodas de borracha, a pressão de carregamento pode ser muito superior à prevista. Assim, os critérios de aceitabilidade podem resultar na rejeição de misturas que teriam um comportamento aceitável em serviço (FHWA, 2001; GARDETE, 2006).

Desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), atual *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR), o *Ornièreur* (Figura 11), equipamento utilizado neste trabalho, utiliza uma roda com pneu de borracha com 90 mm de diâmetro e corpos de prova com 180 mm de comprimento para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas.

Figura 11 - Simulador de tráfego *Ornièreur* do LCPC (IFSTTAR)



Fonte: Autora

O simulador de tráfego *Ornièreur* é bastante difundido no meio científico, e utiliza corpos de prova retangulares em forma de laje expostos a carregamentos longitudinais com ciclos de ida e volta equivalente a frequência de 1 Hz (AFNOR, 1993).

Na Tabela 17 é apresentado um comparativo entre os simuladores de tráfego APA, *Hamburg Wheel Tracker* e *Ornièreur*.

Tabela 17 - Comparativo entre simuladores de tráfego

Parâmetro	Equipamento		
	<i>Orniéreur</i>	<i>Hamburg</i>	APA
Dimensões dos corpos de prova	50 cm x 18 cm (espessura de 2 a 10 cm)	25 cm x 28 cm (espessura de 6 a 9 cm)	7,5 cm x 38,1 cm (espessura de 3 cm)
Amplitude da carga	Carga regulável (5000N) Pressão de insuflagem dos pneus (0,6MPa regulável)	Roda metálica (705N)	Carga de roda (445N) aplicada através de mangueira inflada (0,7Mpa)
Aplicação da carga	1 ciclo = 1 Hz 1 ciclo = 2 passadas	1 ciclo = 1 Hz 1 ciclo = 2 passadas	1 ciclo = 1 Hz 1 ciclo = 2 passadas
Tempo de ensaio (h)	9	6	4
Critério	Até 10% de deformação em relação à espessura para 30.000 ciclos é considerada adequada	Até 4 mm de deformação após 20.000 ciclos é considerada adequada	Até 7,6 mm de deformação após 8.000 ciclos é considerada adequada

Fonte: Adaptado de Moura (2010) *apud* Leahy e McGennis (1999)

Baseado no comportamento dos materiais durante a compactação giratória e realização de ensaios mecânicos, Nascimento (2008) propôs uma nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas, com foco na prevenção da deformação permanente.

O autor utilizou diferentes agregados minerais, granulometrias e ligantes para o preparo de misturas asfálticas, dosadas em compactador Marshall e giratório, que foram submetidas aos ensaios de deformação permanente em simulador de tráfego *Orniéreur*.

Para cada mistura asfáltica foram confeccionadas 2 placas com 50cm de comprimento, 18cm de largura e 5cm de espessura. Os ensaios foram conduzidos a 60°C, até 30.000 ciclos, sendo a deformação permanente medida após 1.000 ciclos, 10.000 ciclos e ao final do ensaio.

Os agregados minerais utilizados na pesquisa são de origem gnaisse-granítica. O autor utilizou 4 curvas granulométricas densas, ajustadas para atender simultaneamente as faixas da especificação brasileira DNIT 031/2004 – ES e da especificação norte-americana AASHTO M 323-04. Dessa forma, foram utilizadas Faixas A e B do

DNIT, com tamanho nominal máximo dos agregados correspondente a 25 mm e 19 mm, respectivamente. A Faixa C do DNIT foi testada para tamanhos nominais máximos de 12,5 mm e 9,5 mm.

O autor utilizou CAP-20 (atual CAP 50/70), proveniente de duas diferentes refinarias (REVAP- Refinaria Henrique Lage e REGAP- Refinaria Gabriel Passos). Ao todo foram realizadas oito tipos de misturas, com teor de projeto entre 4,2% e 4,9%.

Os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente mostraram que o afundamento das placas variou em função da granulometria dos agregados, sendo que as misturas com agregados graúdos tiveram melhor comportamento do que as finas (NASCIMENTO, 2008).

Tabela 18 - Resultados de deformação permanente obtidos por Nascimento (2008)

Mistura	Ligante	Teor de ligante (%)	TNM	Afundamento a 30.000 ciclos (%)
1	CAP-20 REVAP	4,2	25 mm	7,75
2	CAP-20 REGAP	4,3	25 mm	8,55
3	CAP-20 REVAP	4,9	19 mm	25,4
4	CAP-20 REGAP	4,7	19 mm	27,17
5	CAP-20 REVAP	4,6	12,5 mm	7,44
6	CAP-20 REGAP	4,5	12,5 mm	9,66
7	CAP-20 REVAP	4,9	9,5 mm	9,96
8	CAP-20 REGAP	4,6	9,5 mm	12,09

Fonte: Nascimento (2008)

Como pode ser visto na Tabela 18, nenhuma das misturas atendeu as especificações europeias estabelecidas pelo Grupo COST 333, que limitam as deformações permanentes em 5% no caso de misturas asfálticas densas a serem aplicadas em rodovias de tráfego pesado. Enquanto que o limite francês de 10% não foi atendido pelas misturas 3, 4 e 8.

Os resultados mostraram que o tipo e teor de ligante asfáltico influenciou os resultados de deformação permanente. Apesar de pequena variação, todas as misturas com CAP-20 REVAP obtiveram desempenho levemente superior ao das misturas preparadas com o ligante da REGAP.

Verificou-se que o teor de projeto não foi um fator decisivo no afundamento, visto que, as misturas 3 e 7 apresentam o mesmo teor de

4,9% e apenas a mistura 7 encaixou-se nos padrões franceses, com afundamento máximo de 10%.

Entende-se, portanto, que a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas estudadas é muito mais dependente do esqueleto pétreo do que da rigidez dos ligantes asfálticos em alta temperatura (NASCIMENTO, 2008).

Melo (2014) avaliou o desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas modificadas com nanocompósitos. O autor utilizou dois tipos de nanomateriais (NNA-nanoargila e NTC-nanotubo de carbono), incorporados ao ligante asfáltico (CAP 50/70) em três diferentes porcentagens (1%, 2% e 3%) relativas ao peso. Ao todo foram realizados sete tipos de misturas, das quais uma é denominada como de referência, fabricada com materiais convencionalmente utilizados.

Para cada mistura asfáltica foram confeccionadas 2 placas com 50cm de comprimento, 18cm de largura e 5cm de espessura. Os ensaios foram conduzidos a 60°C até 30.000 ciclos. Todas as misturas asfálticas foram submetidas ao ensaio de deformação permanente em simulador de tráfego *Orniéreur* (LCPC/IFSTTAR).

Em seu trabalho, Melo (2014) constatou uma grande dificuldade na compactação das placas com volume de vazios em torno de 4,0%. O autor explica que o fato decorre de pequenas variações na espessura final da placa, que resultaram em grandes alterações no volume de vazios da mistura compactada.

Em campo, esta variação volumétrica também pode ser observada, sendo permitida pelas especificações de serviço, desde que, não apresentem grau de compactação inferior a 97% em relação à massa específica aparente do projeto da mistura.

Destaca-se que o risco de deformação permanente ocorre no começo da vida útil do pavimento, quando apresentam um grau de compactação entre 97% e 101%. Dessa forma, pode-se afirmar que as placas produzidas pelo autor são adequadas para a avaliação da susceptibilidade à deformação permanente (MELO, 2014).

Nos resultados obtidos por Melo (2014), apresentados na Tabela 19, a única mistura asfáltica que atendeu ao limite máximo europeu de 5% de deformação permanente, foi produzida com 2% NTC. Todas as misturas asfálticas atenderam ao limite indicado pela especificação francesa (10%).

Em linhas gerais, as misturas asfálticas com nanocompósitos obtiveram melhor desempenho que a mistura de referência. Verifica-se também, que o NTC é mais eficiente que a NNA na resistência à

deformação permanente, quando incorporado na faixa de 1% a 2% (MELO, 2014).

Dessa forma, o autor afirma que o afundamento da trilha de roda na camada de revestimento asfáltico está associado a fatores de composição granulométrica, dosagem, e principalmente, propriedades do ligante asfáltico e adesão ligante-agregados (MELO, 2014).

Tabela 19 - Resultados de deformação permanente obtidos por Melo (2014)

Mistura	Nanocompósitos	Afundamento a 30.000 ciclos (%)
1	0%	9,5
2	1%NNA	7,0
3	2%NNA	6,9
4	3%NNA	6,7
5	1%NTC	6,6
6	2%NTC	4,6
7	3%NTC	7,5

Fonte: Melo (2014)

Melo (2014) verificou ainda uma possível influência do volume de vazios das placas no desempenho à deformação permanente. Entretanto, constatou não ser possível afirmar que haja uma relação entre as duas.

2.6.2 Dano por umidade induzida (DUI)

No Brasil, a adesividade entre agregado e ligante é avaliada por meio de ensaios visuais de verificação da ocorrência de desprendimento da película de ligante em agregados graúdos (BRASIL, 1994 A) e em agregados miúdos, pela ação de água destilada fervente e a soluções de carbonato de sódio ferventes (BRASIL, 1994 B). De acordo com Rohde (2007), estes métodos não representam de maneira fiel o que acontece em campo, podendo apresentar resultados equivocados.

Para a avaliação da sensibilidade à água em misturas asfálticas compactadas, foram desenvolvidos ensaios como o método Lottman modificado, normatizado pela AASHTO T 283 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage* (AASHTO, 2014). No Brasil, o ensaio de dano por umidade é normatizado pela ABNT NBR 15617/2011: Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida.

Para a realização do ensaio, são compactados seis corpos de prova com um teor de vazios em torno de 7%. Um grupo com três

corpos de prova é saturado a vácuo, submetido ao congelamento a $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por um período de $15 \pm 1\text{h}$, e colocado em banho a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ por $24 \pm 1\text{h}$. Os três corpos de prova restantes não são condicionados e servem de referência. Todos os corpos de prova são avaliados em termos de resistência à tração após 1h de imersão a 25°C .

São consideradas resistentes ao dano por umidade, as misturas asfálticas que obtiverem um quociente (R_{tu}/RT) entre os valores da resistência à tração das misturas condicionadas (R_{Tu}) e não condicionadas (RT), igual ou superior a 70% (BERNUCCI, *et al.*, 2010).

Melo (2014) avaliou a sensibilidade à água de misturas modificadas com nanoargila (NNA) e nanotubo de carbono (NTC), incorporados ao ligante asfáltico (CAP 50/70) em três diferentes porcentagens (1%, 2% e 3%) relativas ao peso. O autor realizou uma mistura de referência para comparação. Foram moldados em compactador giratório 6 corpos de prova para cada mistura, com 100 mm de diâmetro e volume de vazios em torno de 6,5% e 7,5%, os provetes foram fabricados em seus respectivos teores de projeto. Dos 6 corpos de prova, 3 foram submetidos ao condicionamento conforme a normativa (AASHTO, 2014). Em seguida, determinou-se a resistência à tração indireta estática a 25°C , de todos os corpos de prova.

Dentre os corpos de prova não condicionados percebe-se uma maior resistência à tração dos corpos de prova produzidos com o nanotubos de carbono (NTC). Segundo o autor, este desempenho mecânico observado está diretamente relacionado a maior rigidez ocasionada pela incorporação do nanomateriais.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que todas as misturas estudadas por Melo (2014) apresentaram comportamento satisfatório quanto ao comportamento de dano por umidade induzida, já que não houve uma redução da resistência à tração maior que 30%.

Segundo o autor, a composição química, estrutura mineralógica, cargas elétricas superficiais e características físicas do agregado utilizado na pesquisa, assim como, o emprego de filler ativo (cal hidratada tipo CH-1) foram os responsáveis pela satisfação dos resultados.

Melo (2014) afirma que a origem basáltica do agregado, de caráter eletropositivo e com menor concentração de sílica (SiO_2) indicam uma maior tendência do agregado a desenvolver melhores ligações com o ligante asfáltico do que com a água. Segundo o autor, outras rochas, como as graníticas, ácidas, eletronegativas e com maiores porcentagens de sílica (SiO_2), são hidrofílicas e apresentam maior

afinidade com água, resultando em baixa adesão ao ligante asfáltico na presença de água.

Melo (2014) conclui que a adição de nanoargila resultou em significativa melhora da adesividade em presença de água.

A nanoargila melhorou a afinidade química da interface asfalto-agregado em função dos híbridos presentes nela (sais quaternários de amônio), que possuem em uma extremidade cadeias alquilas de características hidrofóbica (apolar) que interagem com o ligante asfáltico e na outra extremidade, característica hidrofílica (polar) que se ligam quimicamente às formas cristalinas de sílica (SiO_2) presentes na superfície dos agregados, formando assim uma melhor ligação adesiva entre os materiais (MELO, 2014).

Dessa forma, a nanoargila promoveu a dopagem do ligante asfáltico, reduzindo a tensão superficial, melhorando a molhabilidade e facilitando o envolvimento das partículas durante a usinagem e a compactação da mistura asfáltica (MELO, 2014).

As misturas nanomodificadas com NTC retrataram um comportamento superior à mistura de referência (CAP 50/70) e inferior às misturas nanomodificadas com nanoargila. Dessa forma, NTC providencia melhor molhabilidade da superfície dos agregados, produzindo uma adesão mais eficiente do ligante aos agregados em relação ao ligante convencional, contudo pior desempenho quando comparado as misturas com nanoargila, o que sugere a falta de afinidade química entre o ligante asfáltico e as formas cristalinas de sílica (SiO_2) presentes na superfície do agregado na presença de água (MELO, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados no trabalho, assim como, métodos de caracterização, ensaios de desempenho mecânico e equipamentos empregados.

3.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho foram avaliados o desempenho à deformação permanente e o dano por umidade induzida de misturas asfálticas constituídas por CAP 50/70, agregados de origem granítica e filer de lama vermelha e pó de pedra. Previamente à execução dos ensaios, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados (ligante asfáltico, agregados e lama vermelha).

Tendo em vista analisar a influência do resíduo na constituição das misturas, variaram-se os teores de lama vermelha e pó de pedra, de forma que a somatória da quantidade de filer utilizada em todas as misturas fosse de 7% em relação à massa total de agregados.

Dessa forma, foram fabricadas misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha, completadas com 7%, 4%, 2% e 0% de pó de pedra, respectivamente. A mistura com 0% de lama vermelha e 7% de pó de pedra foi considerada de referência. Todas as misturas foram dosadas para definição do teor de projeto, levando em consideração os parâmetros volumétricos estabelecidos pelo método SUPERPAVE. Para tanto, utilizou-se uma curva granulométrica empírica, correspondente à média da Faixa “C” do DNIT.

O número de giros (N) de projeto utilizado para estabelecer os esforços de compactação durante o processo de dosagem foi de 125. Este valor foi escolhido no intuito de simular uma compactação correspondente a um elevado volume de tráfego.

A fim de ratificar a dosagem, os corpos de prova no teor de projeto foram compactados no N máximo de 205 giros, correspondente ao fim da vida de serviço das misturas asfálticas.

Pela metodologia SUPERPAVE, a dosagem para um elevado volume de tráfego leva em consideração os parâmetros volumétricos da mistura, o desempenho à deformação permanente e a resistência à fadiga, em três diferentes temperaturas, selecionadas a partir do histórico de temperaturas local. Contudo, a dosagem foi feita considerando os parâmetros volumétricos, sendo posteriormente avaliado o desempenho à deformação permanente a 60°C e o dano por umidade induzida das misturas asfálticas.

A introdução da lama vermelha em misturas asfálticas pode provocar contaminações de lençóis freáticos e canais d'água, e consequentemente afetar populações circundantes ao local de aplicação. De modo a avaliar possíveis percolações do resíduo, analisou-se a qualidade da água no ensaio de dano por umidade induzida com a ajuda de um fotocolorímetro, comparando concentrações de alumínio e ferro, além da avaliação do pH.

A lama vermelha foi avaliada quanto aos critérios de corrosividade e toxicidade, por meio da análise do pH e caracterização química do resíduo. Dessa forma, pôde ser ambientalmente classificada conforme a norma NBR 10.004/2004.

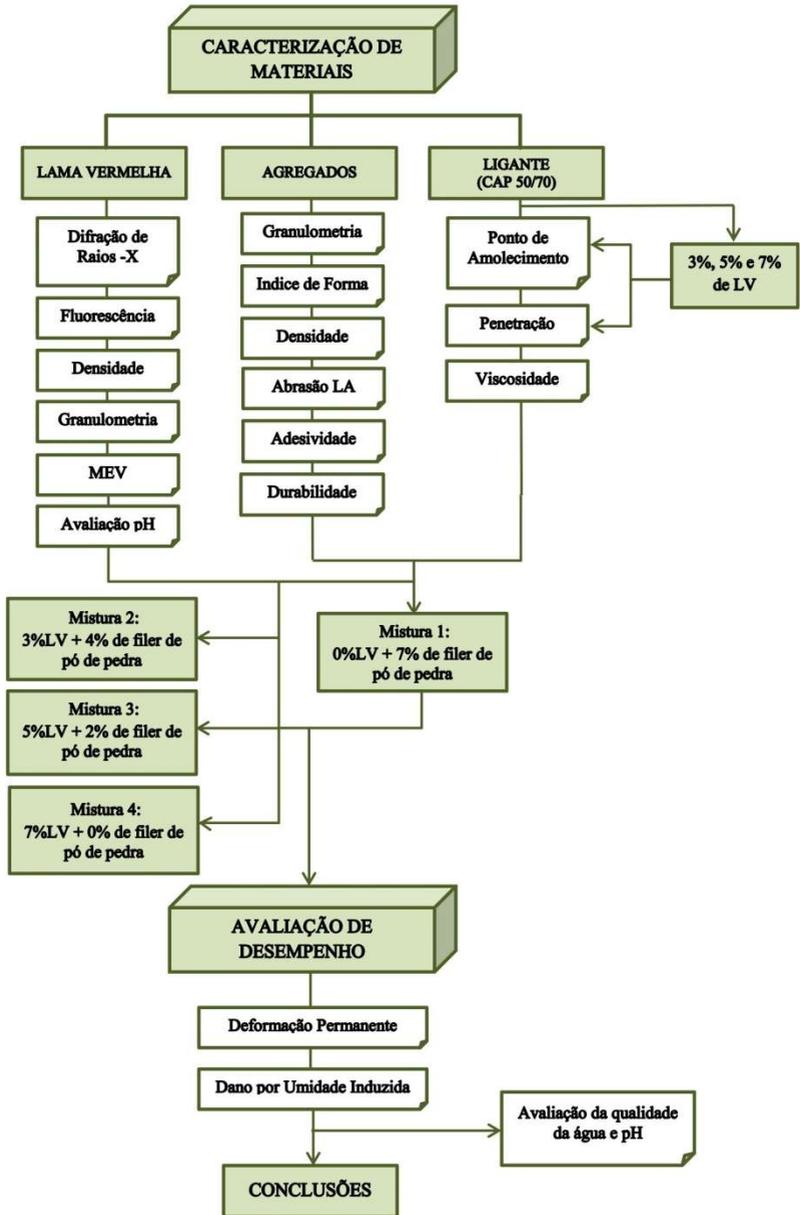
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A etapa de experimentos, sintetizada na Figura 12, consiste na realização dos seguintes procedimentos:

1. Caracterização da lama vermelha, para obter maiores informações a respeito de suas características físico-químicas, por meio de ensaios de massa específica, granulometria a laser, espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDX), também conhecida por fluorescência. A microestrutura do resíduo foi avaliada por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o potencial corrosivo, com auxílio de pHmetro;
2. Caracterização dos agregados minerais, por meio dos ensaios de análise granulométrica (DNER-ME 083/98), índice de forma (ABNT NBR 7809/05), massa específica real de agregado graúdo (DNER-ME 081/98) e miúdo (DNER-ME 084/95), abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), adesividade em agregados graúdos (DNER-ME 078/94) e durabilidade (DNER-ME 89/94);
3. Caracterização do ligante (CAP 50/70) por meio dos ensaios de ponto de amolecimento (DNIT-ME 131/10), penetração (DNIT-ME 155/10), viscosidade aparente (viscosímetro rotacional Brookfield; ABNT NBR 15184/04);
4. Caracterização do ligante + lama vermelha (3%, 5% e 7% em peso de CAP) por meio dos ensaios de ponto de amolecimento e penetração;

5. Determinação da faixa e composição granulométrica a ser utilizada para moldagem dos corpos de prova;
6. Determinação de teores iniciais a serem utilizados no projeto das misturas;
7. Determinação da massa específica máxima medida (Gmm) das misturas asfálticas, utilizando-se da metodologia Rice (AASHTO, 1999);
8. Compactação de misturas asfálticas em compactador giratório, no N de projeto (125) e N máximo (205) (AASHTO, 2012), utilizando-se de molde de 150 mm de diâmetro para a dosagem;
9. Determinação da massa específica aparente (Gmb) das misturas asfálticas compactadas (ASTM, 2000);
10. Determinação do teor de projeto das misturas asfálticas, relativo a um volume de vazios de 4%;
11. Confecção de duas placas de dimensões de 500×180×50 mm, para realização dos ensaios de deformação permanente e seis corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 7% de vazios, para os ensaios de dano por umidade induzida, totalizando oito placas e 24 corpos de prova cilíndricos para cada tipo de mistura, sendo a porcentagem de lama vermelha e filer de pó de pedra inseridos em peso total da mistura:
 - Mistura 1: 0% lama vermelha + 7% de filer de pó de pedra
 - Mistura 2: 3% lama vermelha + 4% de filer de pó de pedra
 - Mistura 3: 5% lama vermelha + 2% de filer de pó de pedra
 - Mistura 4: 7% lama vermelha + 0% de filer de pó de pedra
12. Realização dos ensaios de deformação permanente (AFNOR, 1993) e dano por umidade induzida (ABNT, 2011);
13. Análise da água residual do ensaio de dano por umidade induzida, por meio da avaliação de pH e concentrações de ferro e alumínio (realizado com corpos de prova das Misturas 3 e 4, condicionados a 60°C). Os resultados foram comparados a água de abastecimento público.
14. Análise dos dados obtidos.

Figura 12 - Fluxograma referente às etapas de trabalho



Fonte: Autora

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção das misturas asfálticas são a lama vermelha, ligante asfáltico (CAP 50/70), agregados graúdos e miúdos.

3.3.1 Lama Vermelha

A lama vermelha utilizada neste trabalho é originária da empresa Hydro Alunorte, localizada no município de Barcarena, Estado do Pará, disponibilizada pelo Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (UFPA).

As características químicas, físicas e morfológicas da lama vermelha foram avaliadas por meio de técnicas de fluorescência, ensaios de massa específica, granulometria a laser e Microscopia Eletrônica de Varredura, além do cálculo de superfície específica.

Previamente a realização dos ensaios e fabricação de misturas asfálticas, a lama vermelha foi seca a 100°C e destorroada em almofariz. Tendo em vista, que o resíduo ainda apresentava sinais de aglomeração, o processo de secagem e destorroamento foram realizados novamente, o que proporcionou ao resíduo uma regularidade granulométrica, conforme Figura 13.

Figura 13 - Lama vermelha destorroada



Fonte: Autora

A lama vermelha foi avaliada quanto aos critérios de corrosividade e toxicidade, que permitiu classificá-la ambientalmente conforme a normativa de resíduos sólidos (ABNT, 2004 A).

A fim de analisar possíveis contaminações que a inserção de lama vermelha às misturas asfálticas pode vir a ocasionar, foi realizada uma análise da qualidade da água no ensaio de dano por umidade induzida, aferindo o pH e possíveis variações na concentração de alumínio e ferro.

3.3.1.1 Fluorescência

Os elementos presentes na lama vermelha foram avaliados utilizando o espectrômetro de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDX), da marca Shimadzu e modelo 700HS. O ensaio foi realizado a vácuo, no Laboratório Valorização de Resíduos (ValoRes) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Para realização deste ensaio foram confeccionadas pastilhas com, aproximadamente, dois gramas de lama vermelha com granulometria inferior a 0,15 mm (150 μm).

3.3.1.2 Massa específica

A massa específica da lama vermelha seca a 100°C, destorroada em almofariz, foi realizada segundo a norma DNER-ME 084/95 (BRASIL, 1995 A).

O resultado do ensaio foi obtido a partir da média de duas determinações.

3.3.1.3 Granulometria a laser

A granulometria da lama vermelha foi verificada em analisador de partículas a laser da marca MICROTRAC, modelo S3500, com intervalo de detecção compreendido entre 0,02 a 2.800 micrômetros (μm), utilizando o *Software* Microtrac Flex versão 10.5.4. Esta metodologia foi escolhida pela praticidade e precisão de resultados obtidos se comparada a outras formas de mensuração granulométrica.

Para realização do ensaio utilizou-se uma única amostra.

3.3.1.4 Superfície específica

Com informações de massa específica e granulometria da lama vermelha pôde ser calculada a superfície específica do resíduo.

No Brasil, a superfície específica dos agregados tem sido calculada (SILVEIRA, 1999; MOREIRA, 2005; BERNUCCI, *et al.*, 2010) utilizando uma adaptação da fórmula de Duriez, conhecida como fórmula de Vogt, conforme Equação 6, sendo o resultado expresso em m^2/g .

$$\Sigma = \frac{0,07P_4 + 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F}{1000} \quad (6)$$

P₄ – fração retida entre as peneiras 50 – 25 mm (2” – 1”);

P₃ – fração retida entre as peneiras 25 e 12,5 mm (1” – 1/2”);

P₂ – fração retida entre as peneiras 12,5 – 4,76 mm (1/2” – n°4);

P₁ – fração retida entre as peneiras 4,76 – 2,00 mm (n°4 – n°10);

S₃ – fração retida entre as peneiras 2,00 – 0,42 mm (n°10 – n°40);

S₂ – fração retida entre as peneiras 0,42 – 0,177 mm (n°40 – n°80);

S₁ – fração retida entre as peneiras 0,177 – 0,075 mm (n°80 – n°200);

F – fração passante na peneira 0,075 mm (n° 200).

A fórmula acima foi estabelecida para uma massa específica real de 2,65 g/cm³. Dessa forma, para casos em que a massa específica real seja diferente multiplica-se o resultado encontrado pelo fator de correção apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Fator de correção utilizado no cálculo de superfície específica

Massa específica (g/cm ³)	Fator de correção
2,35	1,13
2,45	1,08
2,55	1,02
2,65	1,00
2,75	0,97
2,85	0,93
2,95	0,90

Fonte: Silveira (1999)

3.3.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

A estrutura morfológica do material foi verificada utilizando microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6390LV, do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.3.1.6 Avaliação ambiental

A avaliação do pH da lama vermelha foi realizada no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC-Lab), com equipamento PHTEK, modelo PHS-3B. Para tanto, a lama vermelha foi misturada em água destilada em proporção de 1:1 relativa ao peso.

3.3.2 Agregados

Os agregados utilizados neste trabalho são de origem granítica e foram cedidos pela empresa de Mineração Santa Bárbara, localizada no município de Palhoça, Estado de Santa Catarina. Para composição das misturas asfálticas foram utilizadas Brita 1 com tamanho máximo de 3/4", Brita zero com tamanho máximo de 3/8" e Pó de pedra com tamanho máximo de 4,75 mm.

Os agregados mostraram-se aptos a serem utilizados na composição de misturas asfálticas.

3.3.2.1 Granulometria

Os ensaios de análise granulométrica realizados seguiram as premissas da normativa DNER-ME 083/98.

Os resultados foram obtidos a partir do peneiramento de três amostras diferentes de brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra.

3.3.2.2 Índice de Forma

A norma utilizada para realização deste ensaio foi ABNT NBR 7809/05: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.

O ensaio consistiu na mensuração da largura e comprimento de cem grãos de cada material analisado, ou seja, brita 3/4" e 3/8".

3.3.2.3 Massa específica

Os agregados graúdos (britas 3/4" e 3/8") foram ensaiados conforme normativa DNER-ME 081/98, e o agregado miúdo (pó de pedra), conforme normativa DNER-ME 084/95.

Os resultados obtidos são oriundos da média de três determinações.

3.3.2.4 Superfície específica

Para efeito comparativo, realizou-se o cálculo da superfície específica do filer de pó de pedra utilizado na composição das misturas empregando a fórmula de Vogt, expressa na Equação 6.

3.3.2.5 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles, normatizado pela DNER-ME 035/98, foi realizado com agregado graúdo, utilizando graduações B (brita 3/4") e C (brita 3/8"), que correspondem a inserção de 11 e 8 esferas de aço, respectivamente.

Os resultados foram obtidos a partir da média de duas determinações.

3.3.2.6 Adesividade

A adesividade, normatizada pela DNER-ME 078/94 (BRASIL, 1994 A), é um ensaio baseado na comparação visual de grãos, onde é verificada a ocorrência do descolamento da película ligante-agregado após imersão em água destilada por um período de 72 horas.

O ensaio foi realizado em brita 3/4" e o DOPE utilizado foi fornecido pela Empreiteira Fortunato Ltda, localizada na cidade de Joinville/SC.

3.3.2.7 Durabilidade

O ensaio de durabilidade, também conhecido por sanidade, avalia a resistência de agregados quando expostos a intempéries. Regulamentado pela DNER-ME 089/94, o ensaio foi realizado com brita 3/4".

3.3.3 Ligante

O ligante utilizado neste trabalho é o CAP 50/70, fornecido pela empresa CBB Asfaltos, com sede na cidade de Curitiba, Paraná.

A caracterização do ligante foi realizada por meio de ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade.

Com a finalidade de avaliar se a lama vermelha pode aumentar a rigidez do asfalto, foram realizados ensaios de ponto de amolecimento e penetração em amostras de CAP 50/70 com 3%, 5% e 7% de lama vermelha em peso total de ligante, misturados até homogeneização à temperatura de 135°C.

É importante dizer que a mistura foi realizada nesta temperatura por ser a recomendada na preparação de amostras para o ensaio de ponto de amolecimento.

3.3.3.1 Penetração

O ensaio de penetração é regulamentado pela normativa DNIT-ME 155/10 (BRASIL, 2010 B) e permite mensurar a consistência do ligante, por meio da profundidade em que uma agulha padronizada (100g) penetra na amostra durante o tempo de 5 segundos a uma temperatura de 25°C.

Os valores de penetração obtidos com o ligante isolado foram comparados ao mástique produzido com três diferentes porcentagens de lama vermelha (3%, 5% e 7%) dosadas em relação ao peso total de ligante.

Os valores finais correspondem a média de cinco penetrações realizadas conforme estabelecido em norma.

3.3.3.2 Ponto de Amolecimento

A fim de avaliar a susceptibilidade térmica do ligante, correlacionando temperatura e condições de escoamento, foi realizado o ensaio de ponto de amolecimento pelo método Anel e Bola, regulamentado pela normativa DNIT-ME 131/10 (BRASIL, 2010 A).

O ensaio foi realizado em CAP 50/70 misturado a três diferentes porcentagens de lama vermelha (3%, 5% e 7%) dosadas em relação ao peso total de ligante, comparados ao CAP 50/70 tradicional.

Os resultados foram obtidos a partir da média de duas determinações.

3.3.3.3 Viscosidade

A determinação da viscosidade aparente do ligante foi realizada em viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, normatizado pela ABNT NBR 15184/04 (ABNT, 2004 D).

Os resultados foram obtidos a partir do ensaio de uma amostra de CAP 50/70.

3.4 DOSAGEM SUPERPAVE

Os procedimentos de dosagem realizados seguiram as recomendações das normas AASHTO M 323 - *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* e AASHTO R 35 - *Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)*.

Para a compactação utilizaram-se moldes de 150 mm de diâmetro e compactador giratório da marca SERVOPAC, conforme Figura 14,

utilizando ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$, taxa de 30 rotações por minuto e tensão vertical de 600 kPa.

Figura 14 - Compactador giratório SUPERPAVE



Fonte: Autora

As misturas foram compactadas a 125 giros, correspondente ao N de projeto. Após definir o teor de ligante relativo a um volume de vazios de 4%, as misturas foram compactadas a 205 giros (N máximo) com objetivo de atingir um grau de compactação máximo de 98%. A compactação a 205 giros foi realizada apenas para confirmação de dados visto que, atualmente, muitos pesquisadores facultam o uso do N máximo e põe em questão a real necessidade de realizar este procedimento.

Para cada teor de ligante testado, foi realizada uma correção nas porcentagens de agregados e filer inseridos, utilizando-se da Equação 7.

$$\%N = \%n \times (100\% - a\%) \quad (7)$$

%N = percentual em massa do agregado corrigido;

%n = percentual em massa do agregado;

%a = percentual em massa do teor de ligante em questão.

Dessa forma, estabeleceram-se os parâmetros volumétricos dos corpos de prova (volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação

betume/vazios e proporção pó/asfalto), conforme Equações 8, 9, 10 e 11, apresentadas a seguir:

$$Vv = 100 - \%Gmm@Nprojeto \quad (8)$$

$$VAM = 100 - \left[\frac{\%Gmm@Nprojeto \times Gmm \times Pag}{Gsb} \right] \quad (9)$$

$$RBV = 100 \times \left[\frac{VAM - Vv}{VAM} \right] \quad (10)$$

$$P/A = \frac{\%filer}{Ple} \quad (11)$$

Vv = volume de vazios (%);

VAM = vazios do agregado mineral (%);

RBV = relação betuma/vazios (%);

P/A = relação pó/asfalto (adimensional);

Gmm = massa específica máxima medida da mistura (g/cm^3);

Gsb = massa específica aparente da combinação dos agregados (g/cm^3);

$\%Gmm@Nprojeto$ = massa específica máxima no N projeto (%);

Pag = percentual agregado utilizado (1- Pl);

Ple = teor de ligante efetivo (%).

Tendo em vista que o teor de ligante inicial é apenas uma estimativa, e ainda, o estudo realizado por Bezerra, Macêco e Souza (2010), no qual foi utilizado um teor de 5,9% para 3% de lama vermelha, inicialmente, optou-se por testar o teor de 5,2% para todas as misturas, para então serem definidas as próximas etapas.

Estabelecido o teor de ligante inicial, foram moldados dois corpos de prova para cada mistura, mediante compactação giratória e, produzidas mais duas misturas soltas para determinação da massa específica máxima medida (Gmm), conforme o método Rice (AASHTO, 1999).

Previamente ao processo de compactação, as misturas asfálticas foram condicionadas por 2 horas em estufa, a uma temperatura de 137° C (temperatura de compactação), com objetivo de simular o envelhecimento de curto prazo do ligante (SHRP, 1994 A).

Após a compactação, determinou-se a massa específica aparente (Gmb) das amostras compactadas, realizando pesagem dos corpos de

prova nas condições de superfície seca, saturada seca e submersa, conforme norma ASTM D 2726 - *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures* (ASTM, 2000), para então, realizar a correção do volume de vazios correspondente.

O teor de projeto adotado para as misturas atendeu aos critérios estabelecidos na Tabela 11. Tais parâmetros são definidos segundo a metodologia SUPERPAVE para um tamanho nominal máximo de 19 mm e alto volume de tráfego.

Devido à facilidade de aglomeração do resíduo, previamente à fabricação das misturas asfálticas, a lama vermelha foi seca em estufa a uma temperatura de 100°C e submetida ao processo de destorroamento. Contudo, as primeiras misturas fabricadas no teor de ligante inicial, apresentaram uma aparência de “catapora”, conforme Figura 15, sinalizando que o resíduo não havia sido bem homogeneizado na mistura.

Figura 15 - Corpo de prova com lama vermelha aglomerada



Fonte: Autora

Dessa forma, a lama vermelha necessitou ser submetida novamente ao processo de secagem e destorroamento para que pudesse ser aplicada às misturas asfálticas.

3.5 ENSAIOS DE DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho à deformação permanente e dano por umidade induzida, foram fabricadas misturas asfálticas conformadas em formato de placa e cilindro, respectivamente.

3.5.1 Deformação permanente (DP)

Para realização do ensaio de deformação permanente, as misturas asfálticas foram compactadas em forma de placas, segundo os critérios da norma NFP 98-250-2 (AFNOR, 1997), em dimensões de 50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 cm de espessura (Figura 16). Para tanto, foi utilizada a mesa compactadora desenvolvida pelo atual *Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de L'amenagement et des Reseaux* (IFSTTAR).

Figura 16 - Mesa compactadora utilizada para moldagem das placas



Fonte: Autora

A quantidade de mistura asfáltica a ser compactada foi definida por meio do cálculo da massa específica aparente referente a um volume de vazios de 4%. Ao todo foram moldadas oito placas, sendo duas para cada tipo de mistura asfáltica, conforme Figura 17. As placas foram ensaiadas quanto ao desempenho à deformação permanente 15 dias após a compactação.

O ensaio de deformação permanente é regulamentado pela norma francesa NFP 98-253-1: *Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*. (AFNOR, 1993), e realizado em simulador de tráfego francês denominado *Orniéreur*, conforme Figura 11.

O equipamento possui rodas pneumáticas lisas de eixo simples, que aplicam uma carga de 5,0 kN e pressão de inflagem dos pneus de 0,6 MPa. A máquina permite que sejam ensaiados dois corpos de prova simultaneamente, a uma temperatura de 60°C, expostos a carregamentos longitudinais de até 30.000 ciclos com frequência de 1 Hz, sendo o ciclo equivalente ao movimento de ida e volta do pneu.

Figura 17 - Placas moldadas para ensaio de DP

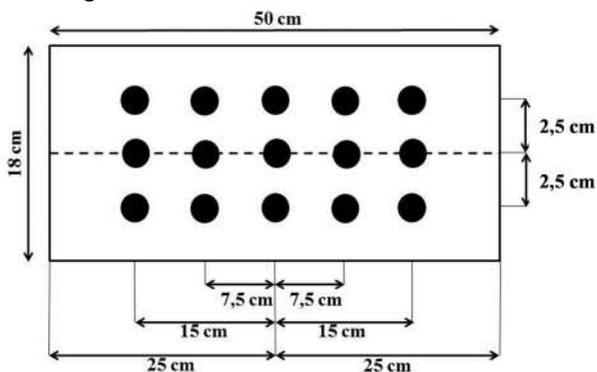


Fonte: Autora

Antes do início do ensaio, realizou-se a acomodação das placas no molde, submetendo-as a passagem de 1.000 ciclos, na temperatura ambiente. Em seguida, as placas foram condicionadas a temperatura de 60°C. Entretanto, até que essa temperatura fosse atingida e estabilizada necessitou-se de aproximadamente 8 a 12 horas.

Foram realizadas leituras a 0, 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos em 15 pontos distintos da placa, conforme Figura 18, com auxílio de paquímetro digital (Figura 19).

Figura 18 - Pontos de leitura do ensaio de DP



Fonte: Adaptado da AFNOR NF P 98-253-1 (1993)

Figura 19 - Medições realizadas no ensaio de DP



Fonte: Autora

A profundidade da deformação permanente em cada ciclo é calculada pela média das profundidades medidas nos 15 pontos em relação ao referencial do ciclo zero, utilizando-se da Equação 12:

$$P_i \% = 100 \times \frac{\sum j(m_{ij} - m_{0j})}{15 \times ES} \quad (12)$$

$P_i\%$ = média de afundamento na superfície da placa, no ciclo i (%);

j = ponto de leitura da deformação permanente da placa (1-15);

m_{ij} = medida da profundidade do ponto j , no ciclo i ;

m_{0j} = medida da profundidade do ponto j , no ciclo 0;

ES = espessura da placa (cm).

3.5.2 Dano por umidade induzida (DUI)

Com o objetivo de avaliar a resistência das misturas asfálticas à umidade, utilizou-se o ensaio de dano por umidade induzida normatizada pela NBR 15617/2011, baseada na metodologia conhecida por “Lottman modificado” (AASHTO, 2014).

Para realização do ensaio, foram moldados em compactador giratório, seis corpos de prova com 100 mm de diâmetro para cada tipo de mistura estudada (0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha), compactados com um volume de vazios de $7 \pm 1\%$ (ABNT, 2011).

Para atingir um volume de vazios de $7 \pm 1\%$, a compactação dos corpos de prova foi finalizada pela massa específica aparente estimada ($G_{mb\text{estimada}}$), definida a partir da massa específica real das misturas. Ao todo foram confeccionados vinte e quatro corpos de prova com 100 mm de diâmetro, nos respectivos teores de projeto, conforme Figura 20.

Figura 20 - Corpos de prova para ensaio de DUI



Fonte: Autora

Os seis corpos de prova correspondentes a cada mistura foram divididos em dois grupos, dos quais três foram submetidos a um processo de condicionamento, que consiste basicamente em saturar os corpos de prova de 55 a 80% de água, sujeita-los a uma temperatura de $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ por no mínimo 16h (Figura 21), e colocá-los em um banho de 60°C por 24 horas, para então serem submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 22), juntamente com o primeiro grupo de amostras (ABNT, 2011).

Figura 21 - Corpos de prova saturados em temperatura de -18°C



Fonte: Autora

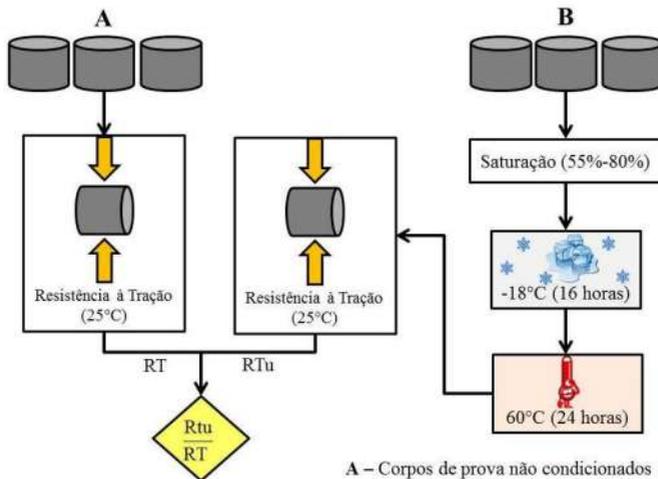
Figura 22 - Resistência à tração realizado no ensaio de DUI



Fonte: Autora

O processo de seleção e condicionamento a que foram submetidos os corpos de prova pode ser visualizado na Figura 23.

Figura 23 - Representação esquemática do ensaio de DUI



Fonte: Autora

A resistência à tração estática por compressão diametral foi calculada conforme Equação 13.

$$RT = \frac{2F}{100\pi Dh} \quad (13)$$

RT = resistência à tração (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

h = altura do corpo de prova (cm).

O resultado do ensaio é determinado pela razão entre as médias aritméticas de resistência à tração dos grupos A (RT) e B (RTu), expressa como resistência à tração retida por umidade induzida (RTT), conforme Equação 14:

$$RTT = \frac{RTu}{RT} \times 100 \quad (14)$$

RTT = razão de resistência à tração retida (%);

RT = média da resistência à tração por compressão diametral de três amostras sem condicionamento (MPa);

RTu = média da resistência à tração por compressão diametral de três amostras com condicionamento (MPa).

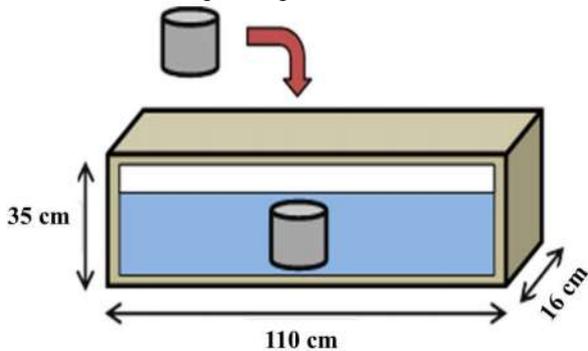
De acordo com Bernucci *et al.* (2010), o valor mínimo de RTT admissível para misturas asfálticas contínuas é 70%.

3.5.3 Análise da qualidade da água

Neste trabalho, a análise da qualidade da água proveniente do ensaio de dano por umidade induzida é de caráter preliminar e têm objetivo de fornecer informações a respeito de possíveis desprendimentos de lama vermelha da mistura asfáltica.

O condicionamento dos corpos de prova a 60°C foi realizado em equipamento semelhante ao esquema apresentado na Figura 24. Com uma capacidade para 60 litros, o recipiente é munido de resistências responsáveis por controlar a temperatura, sendo constituído por uma canalização que mantém a água circulando durante o condicionamento dos corpos de prova, de maneira que a mesma temperatura possa ser mantida em todo o equipamento.

Figura 24 - Esquema de equipamento utilizado no condicionamento de corpos de prova a 60°C



Fonte: Autora

Os corpos de prova constituídos por 5% e 7% de lama vermelha foram mantidos em banho-maria por 24 horas a uma temperatura de 60°C. Terminado o condicionamento, os corpos de prova foram retirados do recipiente e aproximadamente 500 ml de água foram recolhidos do centro do equipamento para a análise.

A análise da água foi realizada com auxílio de fotocolorímetro (Figura 25), equipamento que determina concentrações por meio do comprimento de onda emitido pela solução.

Figura 25 - Fotocolorímetro utilizado para realizar análise da água



Fonte: Autora

Por serem elementos representativos na lama vermelha, foram analisadas as concentrações de ferro e alumínio. Outras substâncias não puderam ser avaliadas devido à restrição de reagentes disponíveis.

Cada amostra avaliada possuía aproximadamente 5 ml. Utilizaram-se três amostras de cada material (água oriunda do condicionamento e proveniente de abastecimento público), uma para cada análise (ferro, alumínio e ph).

Para avaliar o pH, foram feitas análises colorimétricas, que utilizam um sistema de comparação visual com cartela de cores, conforme Figura 26. O *kit* acompanha reagentes específicos para cada parâmetro analisado e assim pôde ser avaliado o pH da água nas condições de condicionamento e sem condicionamento dos corpos de prova.

Tanto para o fotocolorímetro, quanto para o sistema de comparação visual com cartela de cores foram inseridos 5 ml de água em recipientes específicos para cada metodologia, em seguida, aplicados os reagentes, que permitiram a análise das concentrações de ferro, alumínio e pH. Em ambos os modelos as análises são rápidas e o resultado é dado em no máximo 10 minutos.

Figura 26 - Análise do pH em água sem ensaio utilizando sistema de comparação visual com cartela de cores



Fonte: Autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Lama vermelha

4.1.1.1 Fluorescência

A lama vermelha apresentou em sua constituição 35,47% de alumina (Al_2O_3), 31,45% de óxido de ferro (Fe_2O_3), 12,68% de sílica (SiO_2), 5,84% de dióxido de titânio (TiO_2), 1,81% de cal (CaO), 0,20% de pentóxido de vanádio (V_2O_5), 0,13% de óxido de manganês (MnO) e 12,4% de dióxido de carbono (CO_2), conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Constituição da lama vermelha

Substâncias	%
Al_2O_3	35,47
Fe_2O_3	31,45
SiO_2	12,68
TiO_2	5,84
CaO	1,81
V_2O_5	0,20
MnO	0,13
CO_2	12,4

Fonte: Autora

Se comparados aos resultados obtidos por Macêdo *et al.* (2011) e Silva Filho *et al.* (2007), expressos na Tabela 2, os valores de alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), dióxido de titânio (TiO_2) e cal (CaO) apresentados na Tabela 21 mantiveram-se semelhantes. Contudo, no estudo de ambos os autores, os valores de sílica (SiO_2) foram inferiores aos obtidos nesta pesquisa, além de não terem sido constatadas as presenças de pentóxido de vanádio (V_2O_5) e óxido de manganês (MnO).

A lama vermelha analisada por Manfroi (2009) apresentou porcentagens de pentóxido de vanádio (V_2O_5) e óxido de manganês (MnO) equivalentes aos apresentados na Tabela 21.

Em geral, os resultados relativos à constituição da lama vermelha obtidos nesta pesquisa e em outros estudos (MANFROI, 2009; MACÊDO, *et al.*, 2011; SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007) são semelhantes. Entretanto, as pequenas diferenças encontradas devem-se a

variação na constituição da bauxita, processamento e até mesmo métodos de disposição do resíduo.

Segundo Silva Filho, Alves e Motta (2007) como a bauxita não possui uma composição mineralógica definida, tanto seus resíduos de lavagem como de processamento (lama vermelha) podem variar de acordo com a jazida de origem. Logo, existe uma grande variação na composição da lama vermelha, mesmo para as geradas em um mesmo país.

Apesar de Macêdo *et al.* (2011) afirmarem que a lama coletada da empresa Alunorte (a mesma em questão) apresenta 8% de soda cáustica, o Na_2O não foi identificado pelo ensaio de fluorescência, como em outras pesquisas (MANFROI, 2009; MACÊDO, *et al.*, 2011; SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

É possível que o Na_2O não tenha sido identificado devido a mudança do modelo de disposição da lama vermelha adotado pela empresa, que anteriormente era realizada pelo método de lagunagem e agora, vem sendo gradativamente modificada para empilhamento à seco, por ser menos agressivo ao ambiente.

Segundo Power, Gräfe e Klauber (2009) o espessamento prévio realizado no método de empilhamento à seco permite que parte da soda cáustica e alumina, ainda presentes na lama vermelha, possa ser extraída e reutilizada no processo, tornando o resíduo menos alcalino.

4.1.1.2 Massa específica

A lama vermelha apresentou uma massa específica de 2,609 g/cm^3 .

A lama vermelha analisada por Manfroi (2009) apresentou massa específica de 2,71 g/cm^3 . Entretanto, Souza (2010) obteve um resultado de 2,13 g/cm^3 . Chandra (1997) comenta que a lama vermelha no estado seco pode apresentar massa específica entre 2,5 a 2,7 g/cm^3 .

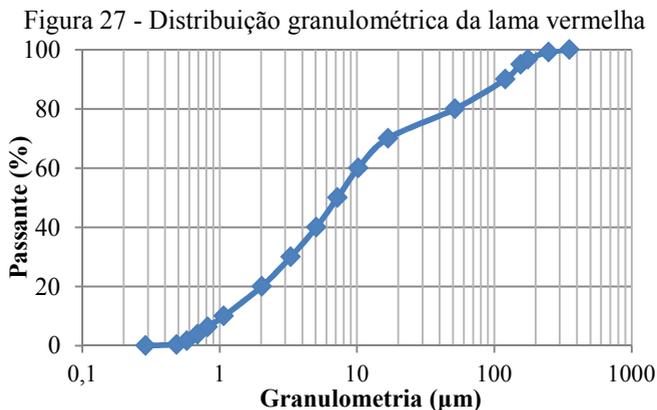
4.1.1.3 Granulometria a laser

Na Figura 27 pode ser visualizado o resultado do ensaio de granulometria a laser.

A lama vermelha é um material de granulometria fina, com 100% de suas partículas inferiores a 290 μm , sendo 80% inferior a 50 μm e 40% de diâmetro inferior a 5 μm .

Aproximadamente 85% das partículas de lama vermelha possuem um diâmetro na faixa de 0,4 μm a 60 μm , sendo 20% correspondente à fração argila (< 2 μm) e 65% a fração silte (2 μm a 60 μm), conforme a

classificação de solos baseada em critérios granulométricos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995). Apenas 15% das partículas do resíduo apresentam uma granulometria na faixa de 60 μm a 200 μm , característico de areia fina.



Fonte: Autora

De acordo com resultados granulométricos, similares aos obtidos neste trabalho, Antunes, Conceição e Navarro (2011) classificaram a lama vermelha como um material franco-argilo-siltoso, segundo a classificação textural de solos proposta pelo *United States Department of Agriculture* (USDA, 1967), caracterizando-a como um material coeso de baixa porosidade, com intensos fenômenos de capilaridade, alguma plasticidade e existência de fenômenos de adsorção (CAMARGO, *et al.*, 2009).

A granulometria da lama vermelha é um fator importante a ser considerado quando utilizada para compor misturas asfálticas, visto que partículas maiores que 40 μm tendem a preencher os vazios dos agregados e partículas menores que 20 μm misturam-se ao ligante, alterando a viscosidade, ponto de amolecimento e suscetibilidade térmica do mesmo (CAVALCANTE; SOARES, 2001; PINILLA, 1965; SANTANA, 1995; MOTTA; LEITE, 2000).

Dessa forma, como aproximadamente 70% dos grãos que compõe a lama vermelha possuem granulometria inferior a 20 μm , é possível que parte do resíduo utilizado na composição de misturas asfálticas seja incorporado ao CAP, alterando suas propriedades reológicas.

4.1.1.4 Superfície específica

Sabendo que 85% dos grãos de lama vermelha possuem diâmetro inferior a 0,075 mm e os 15% restantes são correspondentes ao intervalo da variável S_1 , e ainda que a massa específica do resíduo é 2,609 g/cm³, o fator de correção utilizado foi de 1,008, obtido por meio de interpolação. Assim, obteve-se um valor de superfície específica da lama vermelha correspondente a 11,90 m²/g.

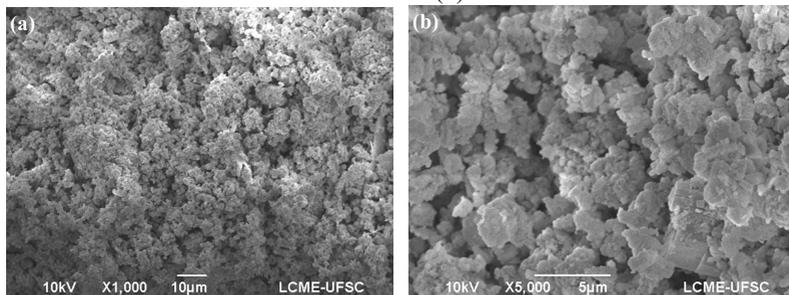
Galdino (2008) obteve um valor de superfície específica da lama vermelha correspondente a 12,96 m²/g, semelhante ao obtido neste trabalho.

4.1.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foi possível avaliar a microestrutura e tamanhos de grãos presentes na lama vermelha.

Na micrografia com aproximação de 1000x (Figura 28 a), é possível visualizar uma estrutura esponjosa, que caracteriza elevados valores de superfície específica do material. Com aproximação de 5000x (Figura 28 b), podem ser observados aglomerados de partículas de tamanho inferior a 10 µm. Algumas partículas possuem formato arredondado e outras são ligeiramente laminares, assinalando a composição diversificada do material.

Figura 28 - Micrografias da lama vermelha com aproximações de 1000× (a) e 5000× (b)



Fonte: Autora

4.1.1.6 Avaliação ambiental

A lama vermelha apresentou um pH de $10,25 \pm 0,05$. De acordo com a normativa NBR 10.004/2004, o resíduo somente seria

considerado corrosivo, quando o pH estiver inferior ou igual a 2, ou superior ou igual a 12,5.

Ainda que a lama vermelha não tenha sido ambientalmente classificada como corrosiva, o pH superior a 7, confere ao resíduo um caráter básico, de modo que a superfície do resíduo se torne eletricamente negativa, o que poderá influenciar na adesividade ligante-agregado.

A lama vermelha analisada por Souza (2010) obteve um pH de 12,8, já as amostras analisadas por Manfroí (2009) apresentaram um pH entre 10 e 12.

4.1.2 Agregados

4.1.2.1 Granulometria

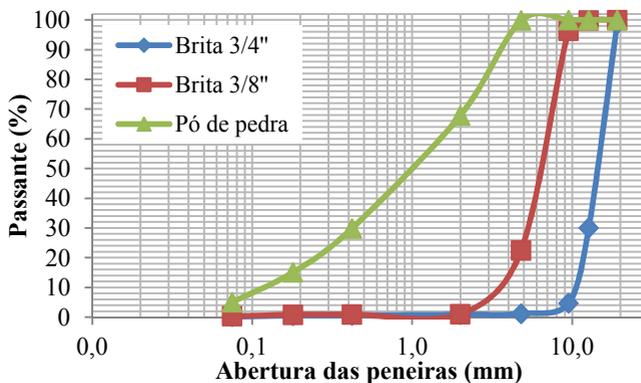
A granulometria dos agregados pode ser visualizada na Tabela 22. Na Figura 29 é apresentada a distribuição granulométrica dos grãos, conforme resultados obtidos no peneiramento.

Tabela 22 - Granulometria dos agregados

Peneira		% de passante acumulado		
Peneira	Abertura (mm)	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
3/4"	19,10	98,7	100,0	100,0
1/2"	12,70	30,1	99,9	100,0
3/8"	9,50	4,7	96,4	100,0
nº 4	4,80	1,1	22,4	99,8
nº10	2,00	0,9	1,0	67,9
nº 40	0,42	0,6	0,9	29,8
nº 80	0,18	0,5	0,8	15,1
nº 200	0,075	0,1	0,4	5,0

Fonte: Autora

Figura 29 - Distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: Autora

4.1.2.2 Índice de Forma

As amostras coletadas e referentes às britas, com tamanhos nominais de 3/4" e de 3/8" apresentaram uma relação entre comprimento e espessura de 2 e 2,4, respectivamente, ambas abaixo do especificado. O que significa dizer que apresentam forma cúbica, ideal para composição de misturas asfálticas.

O índice de forma dos agregados refere-se à média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos de agregado, devendo esta ser inferior a 3 (ABNT, 2005 A; ABNT, 2005 B).

4.1.2.3 Massa específica

Os resultados de massa específica são expressos na Tabela 23.

Tabela 23 - Massa específica dos agregados

Item	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
Massa específica real – G_{sa} (g/cm^3)	2,774	2,740	2,717
Massa específica aparente – G_{sb} (g/cm^3)	2,748	2,701	-
Absorção (%)	0,351	0,521	-

Fonte: Autora

4.1.2.4 Superfície específica

Tendo em vista que 100% de sua granulometria é passante da peneira n°200, e que sua massa específica corresponde a $2,717 g/cm^3$,

utilizou-se um fator de correção de 0,98. Assim, a superfície específica do pó de pedra encontrado foi de 13,228 m²/g.

4.1.2.5 Abrasão Los Angeles

Os agregados com tamanho máximo nominal de 3/4” e 3/8” apresentaram valores de abrasão de 20,68% e 21,73%, respectivamente, resultado satisfatório (< 50%) conforme normativa do DNIT 031/06 – ES (BRASIL, 2006 A).

4.1.2.6 Adesividade

Inicialmente, o ensaio de adesividade foi realizado para a brita 3/4” utilizando-se apenas CAP 50/70. Ao fim do ensaio, os agregados apresentaram indícios de descolamento do ligante, como pode ser visualizado na Figura 30, o que expôs a necessidade de utilização de agente melhorador de adesividade (DOPE) para confecção de misturas asfálticas.

Figura 30 - Descolamento de ligante no ensaio de adesividade



Fonte: Autora

Em geral, a porcentagem de DOPE necessária na composição de misturas asfálticas a fim de promover uma adesividade adequada depende da origem do agregado utilizado. Assim, foram testados teores de 0,4%, 0,6% e 1% de DOPE, dosados em relação ao peso de ligante, conforme Figura 31.

Após a realização do ensaio de adesividade com as três porcentagens de DOPE constatou-se que apenas os agregados recobertos com ligante + 1% de DOPE não apresentaram indícios de descolamento, sendo, portanto, considerado satisfatório para a fabricação de misturas asfálticas, conforme Figura 32.

Figura 31 - Agregados recobertos por ligante e DOPE antes do ensaio de adesividade



Fonte: Autora

Figura 32 - Agregados recobertos por ligante e DOPE depois do ensaio de adesividade



Fonte: Autora

4.1.2.7 Durabilidade

A brita 3/4", utilizada para realização do ensaio, não apresentou qualquer sinal de trincamento ou desintegração, com perda de apenas 0,2% de material.

A norma do DNIT 031/06 – ES determina que a perda no ensaio de durabilidade seja inferior a 12%. Dessa forma, considera-se que o agregado obteve resultados satisfatórios, passíveis de ser aplicado na composição de misturas asfálticas.

4.1.3 Ligante

4.1.3.1 Penetração

Todos os valores obtidos no ensaio de penetração são compatíveis com o estabelecido por norma (Tabela 8), e podem ser visualizados na Tabela 24.

Obtida a partir de cinco determinações, a média dos resultados mostra a redução da penetração conforme o acréscimo de lama vermelha no ligante.

O CAP 50/70 tradicional obteve uma penetração de 64 décimos de milímetro, enquanto que as mástiques de ligante com 3%, 5% e 7% de lama vermelha, dosados em relação ao peso total de ligante, obtiveram valores de 61, 60 e 59 décimos de milímetro, respectivamente.

O desvio padrão apresentado permite afirmar que os resultados diferenciam-se uns dos outros havendo, portanto, uma relação inversamente proporcional entre a inserção de lama vermelha e a penetração obtida. Assim, pode-se afirmar que o resíduo promove um ligeiro enrijecimento do ligante, que influenciará na fabricação de misturas asfálticas.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de penetração

Leitura	Penetração (0,1 mm)			
	CAP 50/70	CAP + 3% LV	CAP + 5% LV	CAP + 5% LV
1°	65	62	59	59
2°	64	60	60	58
3°	63	62	61	59
4°	64	60	59	58
5°	63	61	60	60
Média	63,8	61	59,8	58,8
δ	0,84	1,00	0,84	0,84

Fonte: Autora

4.1.3.2 Ponto de amolecimento

Os resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento

Leitura	Ponto de Amolecimento (°C)			
	CAP 50/70	CAP + 3% LV	CAP + 5% LV	CAP + 5% LV
1°	50	49	50	50
2°	49	50	50	50
Média	49,5	49,5	50	50
δ	0,71	0,71	0,00	0,00

Fonte: Autora

Apesar das médias mostrarem um acréscimo de 0,5° C conforme a inserção de lama vermelha, não se pode afirmar que os resultados sejam diferentes, visto que o desvio padrão insere todos os valores em uma mesma faixa de resultados.

4.1.3.3 Viscosidade

A temperatura de mistura apropriada para ligantes asfálticos não modificados na metodologia SUPERPAVE é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade aparente de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, correspondente a 170 ± 20 cP. Enquanto que a temperatura de compactação adequada corresponde a viscosidade de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s, ou seja, 280 ± 30 cP (ASTM, 2009; NCHRP, 2010; ASPHALT INSTITUTE, 2003). Estes valores são tradicionalmente aplicados a misturas asfálticas dosadas pela metodologia Marshall com ligantes puros, e têm sido utilizados também na determinação das temperaturas de usinagem e de compactação de misturas modificadas (ZEGARRA, 2007). Segundo o DNER-ME 043/95, a temperatura do ligante em ambos os procedimentos não deve ser inferior a 107°C nem exceder 177°C.

Os resultados obtidos no ensaio de viscosidade são expressos na Tabela 26 e encontram-se dentro dos padrões estabelecidos por norma, conforme Tabela 8.

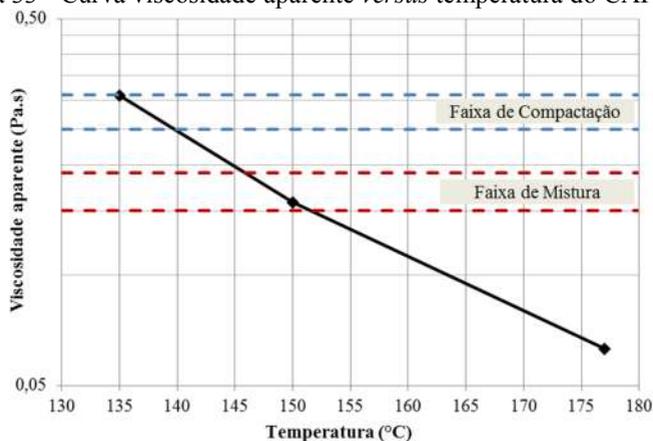
Com os resultados obtidos no ensaio (Tabela 26), foi possível traçar uma curva viscosidade-temperatura, e assim, estabelecer valores de temperaturas de mistura e compactação adequados, conforme Figura 33.

Com as faixas de temperatura expressas na Figura 33, puderam ser estabelecidas temperaturas de 148°C e 137°C para os procedimentos de mistura e compactação, respectivamente. A temperatura de aquecimento dos agregados foi 15°C acima da temperatura de mistura do ligante asfáltico, ou seja, 163°C.

Tabela 26 - Resultados obtidos no ensaio de viscosidade

Viscosidade Brookfield				
Item	1° Leitura	2° Leitura	3° Leitura	Média
135°C, SP 21, 50 rpm				
Viscosidade (cP)	307	311	308	308,67
Torque (%)	30,7	31,1	30,8	30,87
150°C, SP 21, 60 rpm				
Viscosidade (cP)	157,5	157,5	157,5	157,50
Torque (%)	18,9	18,9	18,9	18,90
177°C, SP 21, 100 rpm				
Viscosidade (cP)	63,5	63	63	63,17
Torque (%)	12,7	12,6	12,6	12,63

Fonte: Autora

Figura 33 - Curva viscosidade aparente *versus* temperatura do CAP 50/70

Fonte: Autora

4.2 DOSAGEM SUPERPAVE

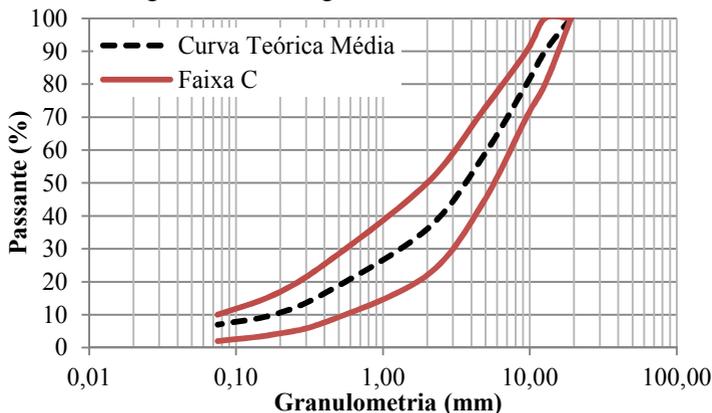
Para realização da dosagem das misturas utilizou-se uma curva teórica correspondente à média da Faixa C do DNIT (BRASIL, 2006 A), conforme Tabela 27 e Figura 34.

Tabela 27 - Composição granulométrica utilizada

Pol/nº	Mm	Faixa C (%)		Passante (%)	Retido (%)
		Mínimo	Máximo		
3/4"	19,10	100	100	100	0
1/2"	12,70	80	100	90	10
3/8"	9,50	70	90	80	10
Nº 4	4,80	44	72	58	22
Nº10	2,00	22	50	36	22
Nº 40	0,42	8	26	17	19
Nº 80	0,18	4	16	10	7
Nº 200	0,075	2	10	7	3
Fundo	< 0,075	-	-	-	7
SOMA					100

Fonte: Autora

Figura 34 - Curva granulométrica das misturas



Fonte: Autora

Levando em consideração a influência do teor de filer na definição da quantidade de ligante e conseqüentemente na deformação permanente da mistura, optou-se por utilizar uma porcentagem constante. O 7% foi definido como o valor máximo passível de ser aplicado, de forma que pudesse ser mantida a composição granulométrica da curva teórica correspondente à média da Faixa C.

Dessa forma determinaram-se quatro tipos de misturas, constituídas por 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha (LV),

complementadas por 7%, 4%, 2% e 0% de filer de pó de pedra (PP), respectivamente.

O filer de pó de pedra e lama vermelha, assim como os agregados empregados na fabricação das misturas asfálticas sofrem ligeiras reduções em suas porcentagens, uma vez que são corrigidos os valores de acordo com o teor de ligante empregado. Na Tabela 28, são apresentadas as porcentagens corrigidas utilizados nos respectivos teores de projeto de cada mistura.

Tabela 28 - Composições granulométricas corrigidas

Peneira	Retido (%)	Corrigida (%)			
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	10	9,5	9,5	9,6	9,6
3/8"	10	9,5	9,5	9,6	9,6
Nº 4	22	21,0	21,0	21,0	21,0
Nº10	22	21,0	21,0	21,0	21,0
Nº 40	19	18,1	18,1	18,1	18,2
Nº 80	7	6,7	6,7	6,7	6,7
Nº 200	3	2,9	2,9	2,9	2,9
Filer de pó de pedra	-	6,7	3,8	1,9	0,0
Lama vermelha	-	0,0	2,9	4,8	6,7

Fonte: Autora

Para realização da dosagem foram compactados aproximadamente trinta e seis corpos de prova com 150 mm de diâmetro, contendo entre quatro e cinco quilogramas (kg) cada, de aparência semelhante a apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Corpos de prova de 150 mm constituídos por 0% e 7% de lama vermelha obtidos na compactação giratória



Fonte: Autora

Foram testados oito diferentes teores dentre os quatro tipos de mistura, até que se chegasse ao teor de projeto respectivo de cada uma, conforme Tabela 29.

Tabela 29 - Teores testados na dosagem das misturas

Mistura	Teores testados		Teor de projeto
0% LV + 7%PP	5,20%	-	4,70%
3% LV + 4%PP	5,20%	4,90%	4,70%
5% LV + 2%PP	5,20%	5%	4,70%
7% LV+ 0%PP	5,20%	4,70%	4,47%

Fonte: Autora

O teor de projeto das misturas decresceu com o aumento da quantidade de lama vermelha, assim, adotou-se um teor de 4,7%, 4,6%, 4,5% e 4,4% de ligante para as misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha, respectivamente.

Tendo em vista o fato de que as misturas diferenciam-se apenas pela variação da porcentagem de lama vermelha e filer de pó de pedra utilizados, as modificações gradativas do teor de projeto podem ser atribuídas à diferença de superfície específica dos materiais. Logo, a maior superfície específica do filer de pó de pedra, em relação à da lama vermelha, promove um maior consumo de ligante, e dessa forma, a mistura com 7% de filer de pó de pedra necessita de 0,3% a mais de CAP se comparada à mistura com 7% de lama vermelha.

Na Tabela 30 são apresentados os dados referentes à compactação das misturas asfálticas no N de projeto, correspondente a 125 giros, em seus respectivos teores de projeto, assim como a massa específica máxima medida (Gmm) e a massa específica aparente (Gmb) das mesmas. Os resultados obtidos são relativos à média de 2 corpos de prova.

Na Figura 36 é apresentada a curva referente aos dados de compactação no N de projeto. Apenas as misturas que obtiveram um grau de compactação de 96% no teor de projeto após 125 giros foram compactadas no N máximo, correspondente a 205 giros.

Nenhuma das misturas apresentou variação significativa nos valores de massas específicas máxima medida (Gmm) e aparente (Gmb) para um volume de vazios de 4%, o que assinala a equivalência de propriedades entre os materiais utilizados para composição das misturas.

Todas as misturas se adequaram aos parâmetros de compactação no que diz respeito ao número de giros inicial (%Gmm@Ninicial <

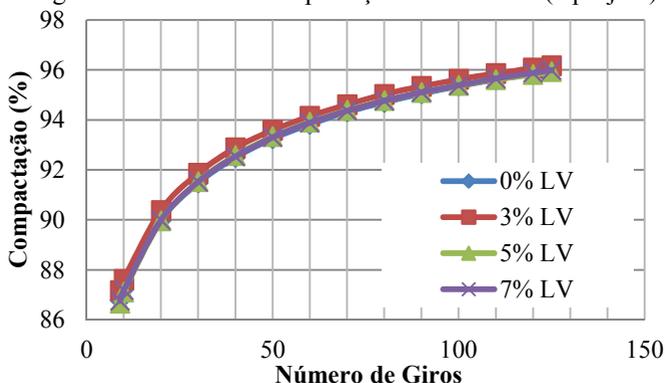
89%), de projeto (%Gmm@Nprojeto = 96%) e final (%Gmm@Nfinal < 98%), exigidos pela metodologia SUPERPAVE.

Tabela 30 - Grau de compactação das misturas para Nprojeto

Giros	Compactação (Nprojeto)			
	0%LV	3%LV	5%LV	7%LV
9	86,8	87,2	86,7	86,8
10	87,2	87,6	87,1	87,2
20	90,0	90,4	90,0	90,0
30	91,5	91,9	91,5	91,5
40	92,5	92,9	92,6	92,5
50	93,2	93,6	93,3	93,3
60	93,8	94,1	93,9	93,9
70	94,3	94,6	94,4	94,4
80	94,7	95,0	94,8	94,8
90	95,0	95,3	95,1	95,1
100	95,3	95,6	95,4	95,4
110	95,6	95,9	95,6	95,7
120	95,8	96,1	95,8	95,9
125	95,9	96,2	95,9	96,0
Gmm	2,551	2,558	2,559	2,557
Gmb	2,448	2,460	2,455	2,455

Fonte: Autora

Figura 36 - Curva de compactação das misturas (Nprojeto)



Fonte: Autora

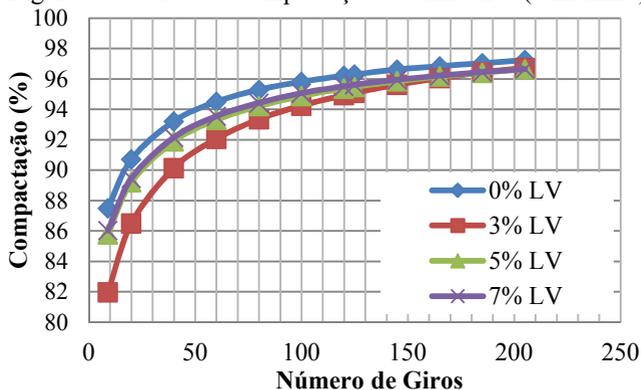
Na Tabela 31 e Figura 37 são demonstrados os dados de compactação das misturas para o número de giros máximo de 205, correspondente a um alto volume de tráfego.

Tabela 31 - Grau de compactação das misturas para N_{máximo}

Giros	Compactação (N _{máximo})			
	0%LV	3%LV	5%LV	7%LV
9	87,5	82,0	85,8	86,0
20	90,7	86,5	89,2	89,5
40	93,2	90,1	91,9	92,2
60	94,5	92,1	93,3	93,6
80	95,3	93,3	94,2	94,4
100	95,8	94,2	94,9	95,1
120	96,2	94,9	95,4	95,5
125	96,3	95,1	95,5	95,6
145	96,6	95,6	95,8	95,9
165	96,8	96,1	96,2	96,2
185	97,0	96,4	96,4	96,4
205	97,2	96,7	96,6	96,7
Gmb	2,479	2,475	2,473	2,472

Fonte: Autora

Figura 37 - Curva de compactação das misturas (N_{máximo})



Fonte: Autora

Apesar das curvas para o número de giros máximo apresentarem-se ligeiramente diferentes devido a acomodação inicial dos grãos, todas as misturas atenderam às especificações quanto ao grau de compactação,

volume de vazios (Vv), relação betume/vazios (RBV) e relação pó/asfalto (P/A) exigidos pela metodologia SUPERPAVE, conforme Tabela 32.

Tabela 32 - Paramêtrios volumétricos das misturas no teor de projeto

Lama vermelha (%)	Teor CAP (%)	%Gmm (N _{inicial})	%Gmm (N _{projeto})	%Gmm (N _{máximo})	VAM	RBV	P/A
0	4,7	86,8	95,9	97,1	14,1	70,9	1,45
3	4,6	87,2	96,2	96,7	13,4	71,7	1,48
5	4,5	86,7	95,9	96,6	12,6	67,6	1,51
7	4,4	86,8	96	96,6	12,4	67,8	1,55
SUPERPAVE		< 89%	96%	< 98%	>13%	65-75%	0,8-1,6
DNIT		-	94-97%	-	>15%	65-82%	

Fonte: Autora

Levando em consideração os valores exigidos de Vv e RBV para a camada de ligação e rolamento da normativa do DNIT (BRASIL, 2006 A), os resultados obtidos neste trabalho atendem às especificações.

No que diz respeito a porcentagem de volume de vazios do agregado mineral (VAM), as misturas com 5% e 7% de lama vermelha não atenderam o valor mínimo exigido. Entretanto, tendo em vista que os valores obtidos não distam dos requeridos e ainda o caráter experimental do trabalho, as misturas com 5% e 7% de lama vermelha foram consideradas aceitáveis.

Em geral, os resultados expressos na Tabela 32 mostram que as porcentagens de ligante escolhidas conseguem satisfazer às especificações da metodologia SUPERPAVE e DNIT. A porcentagem de vazios a 125 giros variou entre 3,8% e 4,1%, valores aceitáveis. O grau de compactação para todas as misturas no número de giros inicial manteve-se abaixo do valor recomendado, 89%. Já as porcentagens de vazios a 205 giros variaram entre 2,75% e 3,36%, satisfazendo o critério de ser superior a 2%.

No que se refere à relação pó/asfalto, os valores ascenderam gradativamente com a incorporação da lama vermelha na mistura, sendo que a mistura com 0% de lama vermelha obteve um valor de 1,45 e a com 7% de lama vermelha alcançou um quociente de 1,55. Contudo, a variação da relação pó/asfalto não se deve ao aumento da quantidade de lama vermelha inserida, mas à redução do teor de ligante utilizado, de

modo que para o cálculo é considerada a porcentagem de filer total, que neste caso é igual para todas as misturas.

Como demonstrado nas curvas de compactação, a estrutura granulométrica e o teor de ligante relativamente parecido, variado em até 0,3%, promovem uma trabalhabilidade similar entre as misturas.

Entretanto, se levarmos em consideração que o erro admissível para a execução de misturas asfálticas em campo é de $\pm 0,3\%$, os teores de projeto para as misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha podem até ser considerados iguais. Logo, não se pode afirmar que o teor de ligante influenciou substancialmente na compactação das misturas, visto que todas obtiveram os parâmetros volumétricos requeridos, além de um grau de acomodação de grãos semelhante.

Entende-se que a pequena variação no teor de projeto das misturas foi ocasionada pela divergência de superfícies específicas dos tipos de filer utilizados (lama vermelha e pó de pedra). Assim, o aumento da quantidade de lama vermelha reduziu o teor de ligante necessário porque a lama vermelha possui uma superfície específica menor que a do filer de pó de pedra.

Dessa forma, percebe-se que não somente a quantidade de filer inserido em misturas asfálticas deve ser considerada na seleção de materiais para dosagem e aplicação, como também suas propriedades químicas e físicas.

4.3 ENSAIOS DE DESEMPENHO

4.3.1 **Deformação permanente (DP)**

O desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente foi verificado em simulador de tráfego francês *Orniéreur*.

Após a compactação, realizou-se a pesagem hidrostática para a determinação da massa específica aparente (G_{mb}) e do volume de vazios das placas. Os resultados apresentados na Tabela 33 foram obtidos pela média de duas placas.

Ainda que as misturas asfálticas tenham sido dosadas para um volume de vazios de 4%, nenhuma delas alcançou este índice durante o processo de compactação, apresentando valores entre 4,91% e 5,51% de vazios. Tal fato decorre de pequenas variações na espessura final da placa, que resultam em grandes alterações no volume de vazios da mistura compactada.

Tabela 33 - Volume de vazios médio das placas

Parâmetro	0%LV	3%LV	5%LV	7%LV
Gmm (g/cm ³)	2,552	2,559	2,560	2,558
Gmb médio (g/cm ³)	2,427	2,421	2,433	2,417
Volume de vazios médio (%)	4,91	5,39	4,96	5,51

Fonte: Autora

Ressalta-se que misturas asfálticas compactadas em campo também apresentam variações volumétricas, permitidas pelas especificações de serviço do DNIT desde que possuam entre 3% e 6% de vazios (BRASIL, 2006 A).

Deste modo, as placas produzidas foram consideradas adequadas para a avaliação da susceptibilidade à deformação permanente.

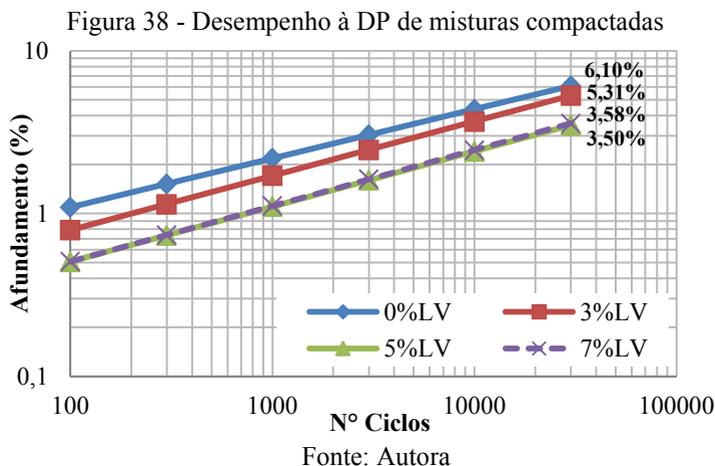
Na Tabela 34 são apresentados os dados de afundamento das misturas asfálticas produzidas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha, como também, a redução da deformação permanente em relação a mistura de referência (0% de lama vermelha) à 30.000 ciclos. Na Figura 38 é apresentado o aspecto gráfico dos dados apresentados.

Tabela 34 - Valores de afundamento de misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de lama vermelha

Número de ciclos	Afundamento (%)			
	0%LV	3%LV	5%LV	7%LV
100	1,09	0,79	0,51	0,51
300	1,52	1,14	0,73	0,74
1000	2,19	1,71	1,10	1,11
3000	3,05	2,46	1,60	1,62
10000	4,38	3,68	2,41	2,46
30000	6,10	5,31	3,50	3,58
Redução de afundamento (%)	-	12,82	42,63	41,30

Fonte: Autora

As diretrizes francesas limitam em 10% o valor aceitável de deformação de misturas asfálticas utilizadas para fins de revestimento (LCPC, 2007). Contudo este valor admissível de deformação é definido conforme as diretrizes francesas de tráfego, na qual o eixo padrão de solicitação corresponde a 130kN. No Brasil, o eixo padrão utilizado no dimensionamento de pavimento é de 80kN (8,2 tf).



Existem ainda outras diretrizes europeias que limitam as deformações permanentes em 5% no caso de misturas asfálticas densas, utilizadas como revestimento em rodovias de tráfego pesado (COST 333, 1999).

Conforme apresentado na Tabela 34 e Figura 38, todas as misturas realizadas neste trabalho obtiveram uma deformação permanente inferior aos 10% especificado pela normativa francesa. Entretanto, apenas as misturas com 5% e 7% de lama vermelha cumpriram as diretrizes europeias, apresentando valores de deformação inferiores a 5%, com 3,50 e 3,58%, respectivamente.

Mesmo com um volume de vazios maior, a mistura com 7% de lama vermelha obteve resultados satisfatórios e relativamente iguais aos da mistura com 5%. As placas fabricadas com 3% de lama vermelha obtiveram um volume de vazios médio de 5,39%, e ainda assim, reduziram o afundamento em 12,82% em relação à mistura com 0% de lama vermelha.

As misturas com 5% e 7% de lama vermelha obtiveram um afundamento 40% menor que o da mistura de referência constituída por 7% de filer de pó de pedra.

Nas Figura 39 e Figura 40 podem ser visualizadas as placas ensaiadas quanto à deformação permanente das quatro misturas.

Figura 39 - Corpos de prova ensaiados quanto à DP referentes às misturas de 0% e 3% de lama vermelha (esquerda pra direita), respectivamente



Fonte: Autora

Figura 40 - Corpos de prova ensaiados quanto à DP referentes às misturas de 5% e 7% de lama vermelha (esquerda pra direita), respectivamente



Fonte: Autora

A deformação permanente apresentada pelas misturas decresceu com a incorporação do resíduo, dessa forma, a mistura que obteve o pior desempenho dentre as ensaiadas foi a de referência, com 0% de lama vermelha e 7% de pó de pedra, e aquelas que obtiveram o melhor desempenho foram as misturas com 5% e 7% de lama vermelha.

Diversos fatores são capazes de influenciar o desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas, dentre eles estão a porcentagem de volume de vazios, tipo e teor de ligante, porcentagem de fíler, composição granulométrica e tipo de agregado utilizado na composição das misturas. De maneira geral, como todas as misturas avaliadas neste trabalho possuem a mesma composição granulométrica e

o mesmo tipo de agregado granítico, as diferenças obtidas nos resultados podem ser atribuídas às variáveis relativas ao volume de vazios, ao teor de ligante, a porcentagem e ao tipo de filer empregado.

Todos os corpos de prova moldados obtiveram porcentagem de volume de vazios dentro da especificação estabelecida pelo DNIT. No entanto, não se pode afirmar que esta variável tenha contribuído de maneira significativa na resistência à deformação permanente das placas ensaiadas.

O filer de pó de pedra apresentou uma superfície específica superior a da lama vermelha. Assim, estabeleceu-se uma equivalência direta entre o teor de projeto e a quantidade de filer de pó de pedra utilizados, ou seja, quanto maior a porcentagem de filer de pó de pedra, maior o consumo de ligante.

Com base na revisão bibliográfica realizada, sabe-se que o teor de ligante possui grande influência na susceptibilidade térmica de misturas asfálticas, sendo capaz de promover a lubrificação entre partículas, favorecer a acomodação mais eficiente de agregados, aumentar a trabalhabilidade da mistura asfáltica e eventualmente, reduzir a resistência à deformação permanente.

Apesar de todas as misturas asfálticas serem dosadas no teor de projeto, é possível estabelecer uma relação entre a elevação do teor de ligante utilizado e a redução da resistência à deformação permanente das misturas. Dessa forma, a maior superfície específica do filer de pó de pedra, elevou o teor de ligante e, portanto, aumentou a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, favorecendo a deformação permanente.

Conforme os resultados obtidos em MEV, a lama vermelha possui grãos levemente arredondados. Já o pó de pedra possui um formato predominantemente laminar (CAVALCANTE; SOARES, 2001). A utilização de grãos arredondados tende a reduzir o atrito interno, e conseqüentemente a resistência ao cisalhamento. Entretanto, sua textura rugosa é capaz de melhorar o atrito interno e a resistência à deformação permanente.

Os ensaios de penetração e ponto de amolecimento, realizados com o CAP 50/70 misturado à lama vermelha retrataram que a adição do resíduo favoreceu o enrijecimento da mistura, tornando-a mais rígida e resistente à deformação. É possível que parte dos grãos de lama vermelha de granulometria inferior a 20 μm , tenha sido incorporada ao ligante, alterando as propriedades do mástique, e dessa forma, auxiliando na promoção da resistência à deformação permanente.

4.3.2 Dano por umidade induzida (DUI)

Na Tabela 35 podem ser visualizados os resultados de resistência à tração de corpos de prova condicionados e não condicionados, obtidos durante a realização do ensaio de dano por umidade induzida.

Dentre as misturas realizadas, aquelas constituídas de lama vermelha (3%, 5% e 7%) obtiveram as maiores médias de resistências em corpos de prova não condicionados, com 0,60, 0,65 e 0,64 MPa, respectivamente, seguidos da mistura de referência com 0,57 MPa.

O condicionamento reduziu as médias de resistência à tração dos corpos de prova, contudo, as reduções não foram consideráveis e mantiveram os resultados de dano por umidade induzida dentro dos padrões estabelecidos. Pode-se observar ainda, que a resistência dos corpos de prova condicionados foi gradativamente superior conforme o aumento na porcentagem de lama vermelha. Dessa forma, os melhores resultados de resistência em corpos de prova condicionados foram obtidos pelas misturas com 7%, 5% e 3% de lama vermelha, respectivamente.

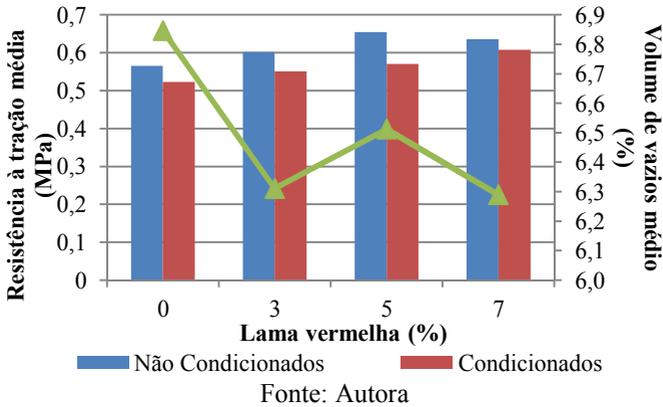
Tabela 35 - Resistência à tração de corpos de prova condicionados e não condicionados

Corpos de Prova	Carga de ruptura (MPa)			
	0% LV	3%LV	5%LV	7%LV
Não Condicionados (RT)	0,54	0,57	0,64	0,67
	0,56	0,61	0,67	0,60
	0,60	0,62	0,65	0,64
Média RT	0,57	0,60	0,65	0,64
δ	0,03	0,03	0,02	0,04
Condicionados (Rtu)	0,56	0,58	0,62	0,59
	0,48	0,67	0,60	0,64
	0,54	0,41	0,49	0,59
Média RTu	0,53	0,55	0,57	0,61
δ	0,04	0,13	0,07	0,03

Fonte: Autora

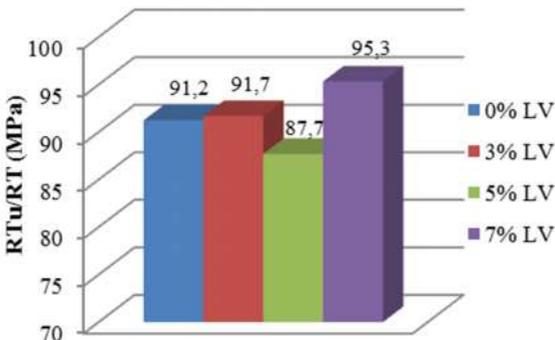
O resultado do ensaio de dano por umidade induzida se deu, contudo, pelo quociente da média de resistências à tração de corpos de prova condicionados e não condicionados. Assim, na Figura 41 são apresentadas as médias de resistências à tração e volume de vazios respectivo dos corpos de prova utilizados.

Figura 41 - Representação gráfica da resistência à tração e volume de vazios de corpos de prova submetidos ao ensaio de DUI



Apesar de terem obtido melhores resultados de resistência à tração em ambas as situações, no que diz respeito ao dano por umidade induzida, na qual é avaliado o quociente de resistências entre corpos de prova condicionados e não condicionados, as misturas asfálticas constituídas por lama vermelha não predominaram. O melhor resultado, no entanto, foi da mistura constituída por 7% de lama vermelha e o pior foi da mistura com 5% de lama vermelha. As misturas de referência e a com 3% de lama vermelha apresentaram resultados similares, sendo a da mistura de referência ligeiramente mais baixa, conforme pode ser verificado na Figura 42.

Figura 42 - Representação gráfica da relação entre resistências à tração de corpos de prova condicionados e não condicionados



Fonte: Autora

O dano por umidade apresentado pela mistura com 5% de lama vermelha se dá devido a maior diferença dentre as médias de resistências, ou seja, quando submetidos ao processo de condicionamento, os corpos de prova com 5% de lama vermelha apresentaram uma redução de resistência considerável em relação aos valores dos corpos de prova não condicionados. Da mesma maneira, a mistura com 7% de lama vermelha obteve os melhores resultados, por não apresentar grandes variações de resistência dentre corpos de prova condicionados e não condicionados.

Apesar da variação de aproximadamente 8% nos resultados de dano por umidade induzida das misturas, todas apresentaram um comportamento satisfatório, superiores a 70%, em conformidade com as prerrogativas estabelecidas por norma (ABNT, 2011).

É possível que a variação da resistência à tração de alguns corpos de prova possa ter ocorrido devido a perdas de material durante o processo de mistura e compactação, que afetam a acomodação e interação de grãos, especialmente no que diz respeito à mistura com 5% de lama vermelha.

De maneira geral, as resistências médias dos corpos de prova constituídos por lama vermelha, condicionados e não condicionados, foram superiores à média de resistência obtida em corpos de prova sem lama vermelha.

Todos os corpos de prova mantiveram um volume de vazios dentro do estabelecido por norma (6% a 8%), e, portanto, não se pode afirmar que a resistência à tração das misturas é consideravelmente influenciada pela quantidade de vazios. Assim, a melhoria de resistências pode estar relacionada à inserção de lama vermelha e a promoção da adesividade agregado-ligante nas misturas.

As rochas graníticas, de mesma origem que os agregados utilizados neste trabalho, apresentam características de acidez, eletronegatividade e hidrofília, o que pode ter sido responsável pela redução da adesividade ao ligante asfáltico na presença de água.

Apesar de ter em sua composição algumas substâncias de caráter eletronegativo, é possível que eventualmente, a lama vermelha seja capaz de melhorar a adesividade entre ligante-agregado pela existência de elementos eletropositivos, como o cálcio e o sódio, presentes em sua composição.

A lama vermelha é constituída por substâncias hidrófobas e hidrófilas, o que a caracteriza como um material anfílico, ou seja, capaz de ser dissolvida em solventes polares e apolares. Dessa forma, ao mesmo tempo em que o resíduo adequa-se a mistura, sendo envolvida

pelo ligante, quando em contato com água, parte de seus componentes tendem a ser dissolvidos, favorecendo a liberação da lama vermelha não encapsulada, como pode ser visualizado nos corpos de prova sujeitos a condicionamento, conforme Figura 43.

Figura 43 - Corpo de prova condicionados submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autora

Dessa forma, entende-se que a melhoria de resistência por parte das misturas asfálticas pode ser atribuída, em parte, às propriedades anfílicas da lama vermelha que, se incorporada ao ligante asfáltico, poderia promover o enrijecimento do mástique e aos elementos eletropositivos que compõe o resíduo, capazes de atrair elétrons e, eventualmente, melhorar a adesividade da mistura.

4.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A norma NBR 10.004/2004 determina que para realizar a classificação de um resíduo como perigoso ele deve constar nos anexos A e B da normativa, possuir substâncias presentes nos anexos C e D ou apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade patogenicidade e/ou toxicidade.

Em alguns casos há a necessidade de realizar ensaios de lixiviação e solubilização de resíduos (ABNT, 2004 B; ABNT, 2004 C) para constatar se existem substâncias em concentrações superiores as permitidas. Neste trabalho, contudo, a lama vermelha pôde ser classificada apenas com os resultados da análise química, sem que houvesse necessidade de realizar ensaios adicionais.

O pH do resíduo foi de $10,25 \pm 0,05$, que conforme a norma, não caracteriza a lama vermelha como uma substância corrosiva. Entretanto, nos ensaios de caracterização química, foi constatada a presença de pentóxido de vanádio (V_2O_5), substância inserida nos Anexos C ('Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos') e D ('Substâncias agudamente tóxicas') da normativa NBR 10.004/2004, que caracteriza a lama vermelha como uma substância tóxica, classificando-a com um resíduo de Classe I – Perigoso.

No ensaio de dano por umidade induzida foram constatados pH e concentrações de alumínio e ferro superiores na água utilizada para condicionamento à 60°C de corpos de prova compostos por 5% e 7% de lama vermelha, conforme Tabela 36.

Tabela 36 - Análise da água proveniente de abastecimento público e após ensaio de DUI à 60°C

Elementos Avaliados	Água sem ensaio	Água após ensaio	Limites permitidos
Alumínio (mgL^{-1})	0,42	1,44	0,20
Ferro (mgL^{-1})	0,09	0,29	0,30
pH	7	8	6 - 9

Fonte: Autora

A principal forma de exposição humana ao alumínio é pela ingestão de alimentos e água, contudo, apesar do contato frequente, não há indicações de que o alumínio provoque qualquer tipo de intoxicação. A Portaria 2.914/2011 estabelece um valor máximo permitido de alumínio de 0,2 mg/L como padrão de aceitação para água de consumo humano.

Assim como o alumínio, o ferro não é considerado tóxico, entretanto, traz diversos problemas para o abastecimento público de água, conferindo cor e sabor à água. Por estes motivos, constitui-se em padrão de potabilidade, uma concentração limite de 0,3 mg de ferro para cada litro de água (BRASIL, 2011 C).

O pH é um parâmetro importante em muitos estudos no campo do saneamento ambiental. De acordo com a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o padrão de potabilidade do pH para águas de abastecimento público é de 6,0 a 9,5.

Dessa forma, dos valores apresentados na Tabela 36, somente a concentração de alumínio de ambas as amostras não se encontra dentro dos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Cabe ressaltar que a água sem ensaio provém diretamente do abastecimento de água público,

e que a mesma ultrapassou o limite desejado de concentração de alumínio.

Os valores obtidos na Tabela 36 com a água proveniente do ensaio de dano por umidade induzida são superiores aos de referência e, portanto, indicam a liberação da lama vermelha dos corpos de prova asfálticos. Ressalta-se, contudo, que esta análise é de caráter preliminar e há necessidade de realizar ensaios ambientais mais aprofundados, a fim de avaliar a real contaminação do resíduo na composição de pavimentos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou a possibilidade de aplicação do resíduo proveniente do processamento da bauxita em misturas asfálticas densas, compostas por CAP 50/70 em três diferentes porcentagens.

Foram analisados os resultados de resistência à deformação permanente e dano por umidade induzida de misturas asfálticas compostas por 0%, 3%, 5% e 7% de filer de lama vermelha, complementadas por 7%, 4%, 2% e 0% de filer de pó de pedra, respectivamente. A mistura com 0% de lama vermelha e 7% de pó de pedra foi considerada a mistura de referência.

Com os resultados da caracterização do resíduo foi possível realizar a classificação da lama vermelha quanto aos aspectos ambientais, de acordo com a normativa da NBR 10.004/2004, sendo avaliada quanto aos critérios de corrosividade e toxicidade, por meio da análise do pH e caracterização química do resíduo.

Ainda que o pH do resíduo tenha se apresentado dentro dos padrões estabelecidos por norma, nos ensaios de caracterização química, foi constatada a presença de pentóxido de vanádio (V_2O_5), substância presente nos Anexos C (“Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos”) e D (“Substâncias agudamente tóxicas”) da normativa NBR 10.004/2004, que automaticamente caracteriza a lama vermelha como uma substância tóxica, e, portanto, classificada com um resíduo de Classe I – Perigoso.

No que diz respeito à dosagem das misturas asfálticas, o teor de projeto elevou-se conforme o aumento da quantidade de filer de pó de pedra inserido. Isso ocorreu devido a maior superfície específica do filer de pó de pedra, em relação à da lama vermelha. Assim, o maior teor de projeto obtido, foi de 4,7%, correspondente à mistura com 7% de filer de pó de pedra e 0% de lama vermelha, e o menor teor, foi de 4,4% de CAP para a mistura com 7% de lama vermelha e 0% de filer de pó de pedra. As misturas com 3% e 5% de lama vermelha foram dosadas em 4,6% e 4,5 % de ligante, respectivamente.

Quanto ao comportamento à deformação permanente, todas as misturas analisadas neste trabalho obedeceram às diretrizes francesas de deformação, apresentando valores de afundamento inferiores a 10%. Contudo, apenas as misturas com 5% e 7% de lama vermelha cumpriram com as normas européias, inferiores a 5%, apresentando valores de afundamento de 3,50 e 3,58%, respectivamente.

Dessa maneira, os melhores resultados obtidos no ensaio de deformação permanente foram das misturas com 5% e 7% de lama

vermelha, que apresentaram uma redução de 40% do afundamento em relação à mistura de referência.

Entende-se que a angularidade dos agregados utilizados na composição das misturas favoreceu o melhor intertravamento dos grãos promovendo a resistência ao cisalhamento e, portanto, permitindo bons resultados de deformação.

Em linhas gerais, a melhoria do desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas constituídas por lama vermelha pode ser atribuída à redução do teor de ligante asfáltico, que restringiu a susceptibilidade térmica da mistura e ao enrijecimento do mástique decorrente da incorporação da lama vermelha pelo ligante asfáltico.

No que diz respeito ao dano por umidade, a incorporação da lama vermelha pelo ligante asfáltico aprimorou a resistência à tração das misturas asfálticas, assim, os corpos de prova condicionados e não condicionados compostos pelo resíduo obtiveram valores de resistência à tração superior aos da mistura de referência.

Apesar de todas as misturas terem obedecido aos critérios de resistência (RT_u/RT) ao dano por umidade induzida, sendo superiores a 70%, a mistura com 7% de lama vermelha obteve os melhores resultados.

Para casos em que os agregados utilizados são de origem granítica, ou possuem caráter eletronegativo, os elementos eletropositivos que compõem a lama vermelha são capazes de atrair elétrons e, eventualmente, melhorar a adesividade da mistura asfáltica. Logo, é possível atribuir à incorporação da lama vermelha os melhores resultados no dano por umidade induzida.

A propensão da lama vermelha de ser dissolvida em solventes polares e apolares favorece o encapsulamento do resíduo pelo ligante, contudo, também é capaz de promover a percolação da água em misturas asfálticas que a compõem, como pode ser constatado na borda dos corpos de prova condicionados, que apresentaram redução da coloração vermelha, sinalizando a percolação do resíduo.

A liberação da lama vermelha da mistura asfáltica pôde ser reafirmada com a análise da qualidade da água, que constatou o aumento do pH e das concentrações de ferro e alumínio, principais elementos constituintes do resíduo.

A qualidade da água após o condicionamento de corpos de prova constituídos por lama vermelha foi realizado avaliando o pH e concentrações de ferro e alumínio. Os resultados foram comparados com a água de abastecimento público. Apesar do pH e da concentração de ferro terem obedecido aos padrões estabelecidos pelo Ministério da

Saúde, as concentrações de alumínio de ambas as amostras não obtiveram o mesmo êxito, ou seja, nem a água recolhida do ensaio, nem a água proveniente de abastecimento público apresentaram uma concentração de alumínio igual ou inferior a 0,2 mg/L.

Embora o pH e a concentração de ferro tenham sido consideradas satisfatórias quanto aos valores normatizados, todos os parâmetros analisados na água proveniente do ensaio apresentaram resultados superiores aos de referência, o que fortalece a tese de liberação do resíduo.

Observa-se que a avaliação da qualidade da água realizada neste trabalho tem caráter preliminar e, portanto, não se pode afirmar que a utilização de lama vermelha em misturas asfálticas é capaz de provocar contaminações ao ambiente. Dessa forma, os indícios de liberação da lama vermelha não são suficientes para inviabilizar a aplicação do resíduo em misturas asfálticas, sendo necessárias avaliações mais precisas e aprofundadas em trabalhos futuros.

Levando em consideração que 70% da lama vermelha possui granulometria propícia para incorporação ao asfalto, os resultados obtidos no ensaio de penetração e ponto de amolecimento realizado com o mástique, nos quais não houve um aumento substancial de valores em relação aos resultados do CAP 50/70, levam a crer que poderiam ser utilizadas maiores porcentagens do resíduo na composição de misturas asfálticas.

Apesar de haver a mesma quantidade de filer em todas as misturas, aquelas constituídas com maior porcentagem de lama vermelha obtiveram melhores resultados no que se refere ao desempenho à deformação permanente e dano por umidade induzida, logo, entende-se que tão importante quanto à determinação de uma quantidade de filer a ser inserida são as propriedades químicas e físicas do material.

De maneira geral, as misturas asfálticas constituídas por lama vermelha obtiveram resultados superiores aos da mistura de referência, principalmente no que diz respeito aos valores de deformação permanente. Em linhas gerais, entende-se que a lama vermelha aumentou a resistência à deformação permanente e melhorou o desempenho ao dano por umidade induzida das misturas asfálticas.

É importante que sejam continuadas pesquisas referentes ao reaproveitamento deste resíduo, principalmente no que diz respeito à constituição de misturas asfálticas, visto que a utilização da lama vermelha não somente retira esse passivo ambiental da natureza, como é capaz de reduzir a probabilidade de contaminações ocasionadas pelo

armazenamento contínuo do resíduo, além de melhorar o desempenho de pavimentos flexíveis.

Contudo, para a real constatação da viabilidade de reinserção da lama vermelha na cadeia produtiva, faz-se necessário a realização de ensaios mais aprofundados, no que diz respeito ao aspecto ambiental, avaliando se a concentração de outros elementos liberados (além dos testados) é capaz de poluir ou afetar o ambiente.

Tendo em vista a escassez de trabalhos produzidos neste tema, este trabalho espera contribuir para a mitigação de problemas relacionados ao descarte da lama vermelha e, sobretudo, ampliar as possibilidades de reaproveitamento do resíduo, transformando-o em um material alternativo passível de ser utilizado na indústria da construção.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se:

- Avaliar maneiras de estudar possíveis contaminações que a lama vermelha pode vir a ocasionar em lençóis freáticos;
- Utilizar agregados de caráter eletropositivo para compor misturas com lama vermelha;
- Estudar a incorporação de porcentagens superiores a 7% de lama vermelha em outros tipos de ligante;
- Avaliar o comportamento à deformação permanente e ao dano por umidade induzida de misturas asfálticas com lama vermelha utilizando o teor de projeto da mistura de referência;
- Realizar o estudo de comportamento reológico e desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com lama vermelha;
- Realizar ensaios de fadiga com misturas asfálticas compostas por lama vermelha;
- Avaliar a incorporação da lama vermelha como um agente modificador do asfalto;
- Avaliar a incorporação da lama vermelha em misturas asfálticas mornas;
- Avaliar a incorporação da lama vermelha como promotor de adesividade.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **T 209: Theoretical maximum specific gravity and density of hot mix asphalt**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C. 1999.

AASHTO. **M 323 - Standard specification for SUPERPAVE Volumetric mix Design**. American Association of State Highway and Transportation. Washington, DC. 2011.

AASHTO. **R 35-12: Standard Practice for SUPERPAVE Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C. 2012.

AASHTO. **T 283-14: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. American Association of State and Highway Transportation Officials. USA, p. 9. 2014.

ABAL. Fluxo da cadeia de produção do alumínio primário. **Associação Brasileira do Alumínio**, 2013 A. Disponível em: <www.abal.org.br/aluminio/producao>. Acesso em: 20 Dez 2013.

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio**, 2013 B. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/bauxita>>. Acesso em: 18 Setembro 2014.

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Associação Brasileira do Alumínio**, 2015. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/bauxita>>. Acesso em: 26 abr. 2015.

ABNT. **NBR 6502/95: Rochas e solos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil, p. 18. 1995.

ABNT. **NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 71. 2004 A.

ABNT. **NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 16. 2004 B.

ABNT. **NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 3. 2004 C.

ABNT. **NBR 15184: Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 4. 2004 D.

ABNT. **NBR 7809/05: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 3. 2005 A.

ABNT. **NBR 7211/05: Agregados para concreto – Especificação.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 11. 2005 B.

ABNT. **NBR 15617: Misturas asfálticas — Determinação do dano por umidade induzida.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.], p. 5. 2011.

AFNOR. **NF P 98-253-1: Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai d’Orniérage.** Association Française de Normalisation, AFNOR. France, p. 11. 1993.

AFNOR. **NF-P-98-250-2: Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques.** Association Française de Normalisation. France. 1997.

AMBROISE, J.; PERA, J. **Red mud, an interesting secondary raw material.** CIB - SYPOSIUM ON CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE. São Paulo/SP: [s.n.]. 2000.

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Regulamento Técnico no 03/2005. Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005. Anexo I, Brasília, DF, Julho 2005.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T. D.; NAVARRO, G. R. B. **Caracterização da Lama Vermelha Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras**

Aplicações. 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, Brazil: [s.n.]. 2011. p. 10.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave mix designs, superpave series no.2.(SP-2).** Lexington, KY, USA. 2003.

ASSIS, P. R. P. D.; BRAZ, E. M. Q.; SANTOS, C. L. D. Contabilidade ambiental. **Revista Ceciliana**, v. III, n. 1, p. 13-16, jun. 2011. ISSN 2175-7224.

ASTM. **D 2726-00: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of NonAbsorptive Compacted Bituminous Mixtures.** American Society for Testing and Materials. USA. 2000.

ASTM. **D2493-09: Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. 2009.

AVENA, R. C. S. **Gestão Ambiental - Manual do Aluno.** DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. [S.l.], p. 197. 2011.

BARDINI, V. S. D. S.; JÚNIOR, J. L. F.; KLINSKY, L. M. G. **INFLUÊNCIA FÍLER MINERAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS.** XXIII ANPET. [S.l.]. 2009.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 3ª. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BERTOCCHI, A. F.; GHIANI, M.; PERETTI, R. & Z. A. Red mud and fly ash for remediation of mines sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb e Zn. **J. Hazard Mater**, Julho 2006. 112 -119.

BEZERRA, W. S.; MACÊCO, E. N.; SOUZA, J. A. D. S. **Utilização da lama vermelha proveniente do processo produtivo da alumina como filer em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).** 40ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro/RJ: [s.n.]. 2010.

BRABO, E. S.; LIMA, M. O. . S. J. G.. **Relatório Técnico: Avaliação do Impacto no rio Murucupi em decorrência do Transbordo de Efluentes da Bacia de Rejeitos Sólidos da ALUNORTE no Município de Barcarena-Pa.** Instituto Evandro Chagas. Belém, Pará. 2003.

BRASIL. **DNER ME 078/94: Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.], p. 3. 1994 A.

BRASIL. **DNER ME 079/94: Agregado – adesividade a ligante betuminoso.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.], p. 4. 1994 B.

BRASIL. **DNER EM 262/94. Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.]. 1994 D.

BRASIL. **DNER-ME 084/95: Agregado miúdo - Determinação da densidade real.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.], p. 3. 1995 A.

BRASIL. **DNER ME 043/95: Misturas asfálticas a quente – Ensaio Marshall.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ, p. 11. 1995 B.

BRASIL. **Manual de pavimentação.** Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, p. 320. 1996.

BRASIL. **DNER-EM 367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas.** DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Rio de Janeiro, RJ, p. 03. 1997.

BRASIL. **DNER ME 035/98: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.], p. 6. 1998 A.

BRASIL. **DNER ME 083/98: Agregados - análise granulométrica.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.], p. 5. 1998 B.

BRASIL. Lei Federal Nº 9605, de 12 de Fevereiro de 1998. **Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências**, 1998 C. Disponível em: <<http://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/104091/lei-de-crimes-ambientais-lei-9605-98>>. Acesso em: 22 Abril 2014.

BRASIL. **DNER-ME 081/98: Agregados - Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. [S.l.], p. 6. 1998 D.

BRASIL. **DNIT 031/06-ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte. Rio de Janeiro, RJ. 2006 A.

BRASIL. **DNIT 095/06-EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. Departamento Nacional de Infraestrutura Viária. [S.l.], p. 6. 2006 B.

BRASIL. **DNIT 131/2010-ME: Materiais asfálticos-Determinação do ponto de amolecimento-Método do Anel e Bola**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. [S.l.], p. 6. 2010 A.

BRASIL. **DNIT 155/2010-ME: Material asfáltico-Determinação da penetração-Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. [S.l.], p. 7. 2010 B.

BRASIL. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030): Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 157. 2010 C.

BRASIL. Decreto-lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a nº 9.605/1998, e dá outras providências**, 2010 D. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 22.Abril. 2014.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão Preliminar para Consulta Pública**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília/DF, p. 109. 2011 A.

BRASIL. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 6ª. ed. Brasília/DF: IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração, 2011 B.

BRASIL. **PORTARIA Nº 2.914 : Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Brasília/DF. 2011 C.

BRASIL. **Sumário Mineral 2011**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia. Brasília/ DF. V.31, p. 105. 2011 D. (0101-2053).

BRASIL. **Informações e análises da economia mineral Brasileira. 7ª edição**. IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília/DF, p. 65. 2012 A.

BRASIL. **Relatório de Acidentes Ambientais**. IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. [S.l.], p. 27. 2012 B.

BRUNORI, C. et al. Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility. **Journal of Hazardous Materials**, v. 117, p. 55-63, 2005. ISSN 0304-3894.

CAMARGO, O. A. et al. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, SP, p. 77. 2009.

CAPITÃO, S. D. **Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade**. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal. 2003.

CARDOSO, M. C. et al. **Avaliação comparativa de misturas asfálticas densas Convencional e com 5% de resíduo de manganês**. CONINFRA – 5º Congresso de Infraestrutura de Transportes. São Paulo, SP: ISSN 1983-3903. 2011 A. p. 15.

CARDOSO, M. C. et al. Avaliação de misturas asfálticas densas com agregados regionais e resíduo de manganês. **REVISTA ENGRENAGEM**, Belém/PA, v. I, n. 1, p. 70-80, Junho 2011 B. ISSN 2236-4757.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, p. 135. 2004.

CAVALCANTE, V. T. F.; SOARES, J. B. **O efeito do tipo e do teor de filler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas**. 33ª Reunião anual de pavimentação. Florianópolis/SC, p. 13. 2001.

CERATTI, J. A. P.; WESSLING, D. H.; SPECHT, L. P. **Estudo Laboratorial do Comportamento de Misturas em concreto Asfáltico com Diferentes Tipos de Filers**. 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv). Campinas, SP. 2003.

CETEM. **A utilização nacional dos minerais metálicos mais consumidos no mundo**. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo/SP. 2008.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **CBA multada por poluir rios da região de Sorocaba**, 2004. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/004/07/29_multa.pdf>. Acesso em: 07 Maio 2014.

CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing**. New Jersey, EUA. 1997.

CHUNMEI, S. et al. Carbondioxide sequestration via pH reduction of red mud using liquid CO₂. **Journal ACS Division of Fuel Chemistry**, v. 45, n. 4, p. 703-707, 2005.

CISCATO, C. A. M. Aplicações da eletrólise. **Revista de Ensino de Ciências - FUNBEC**, v. 21, p. 24-36, SETEMBRO 1988.

CLARK, M. et al. **Bauxsol™ technology to treat acid and metals; applications in the coal industry**. American Society of Mining and Reclamation. [S.l.], p. 293-322. 2004.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2014: Relatório Gerencial**. Confederação Nacional do Transporte. Brasília/DF: CNT, SEST, SENAT, p. 389. 2014.

COLLAZO, A. et al. Evaluation of red mud as surface treatment for carbon steel painting. **Process in Organic Coating**, v. 52, p. 351-358, 2005. ISSN 0300-9440.

CONAMA. Resolução nº 237, 19 de dezembro de 1997. **Conselho Nacional de Meio Ambiente. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental**, 1997. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 22.Abril. 2014.

CONAMA. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002; Revoga a Resolução nº 6/88. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, gestão de resíduos e produtos perigos**, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 22.Abril. 2014.

CONTROLS. Controls-Group. **PAVELAB DWT Universal AASHTO/EN double wheel tracker**. Disponível em: <<http://www.controls-group.com/eng/asphaltbituminous-mixture-testing-equipment/pavelab-dwt-universal--aashtoen-double-wheel-tracker.php>>. Acesso em: 17 Maio 2015.

COOLING, D. J. Improving the sustainability of residue management practices-Alcoa World Alumina Australia. **Australian Centre of Geomechanics**, Perth, Australia, p. 14, 2007. ISSN 0-9756756-7-2.

COST 333. **Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action**. European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research.European Commission Directorate General Transport. Belgium. 1999.

COUTINHO NETO, B. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. Universidade de São Paulo. Tese de doutorado. São Carlos/SP, p. 271. 2004.

COUTINHO NETO, B.; FABBRI, G. T. P. Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas. **Revista Transportes**, v. XII, p. 50-57, Dezembro 2004.

DANTAS, G. H. S. **Estudo do emprego do Compactador Giratório Superpave na compactação de um solo argiloso**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, p. 125. 2013.

DAVIS, R. **Large Stone Mixes: An Historical Right**. National Asphalt Paving. [S.l.]. 1988.

DNPM. ALUMÍNIO. In: MINERAL, D. N. D. P. **Sumário Mineral 2014**. Brasília/DF: [s.n.], 2014.

ELIAS, L. M. S. D. L.; OLIVEIRA, N. F. D.. Análise da sustentabilidade organizacional das empresas do setor mineral do estado do Pará. **AOS - Amazônia, Organizações e Sustentabilidade**, v. II, n. 1, p. 45-57, jan./jun 2013. ISSN 2238-8893.

EPA. Environmental Protection Agency. U. S. Government Printing Office. **Electronic code of federal regulations**, 2014. Disponível em: <<http://ecfr.gpoaccess.gov>>. Acesso em: 12 abril 2014. Title 40, Part 261, Sect 4 (b) (7) (ii) (c).

FHWA. **Superpave Mixture: Design Guide**. Federal Highway Administration. U.S. Department Transportation. Westrack Forensic Team Consensus Report. Washington, DC. 2001.

FONTES, L. P. T. D. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese de Doutorado. UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina; Universidade do Minho. [S.l.], p. 541. 2009.

FREIRE, A. C. **Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários**. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Coimbra. 2002.

FREITAS, H. B. D.; MOTTA, L. M. G. D. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. **REVISTA TRANSPORTES**, v. XVI, n. 2, p. 5-12, Dezembro 2008.

GALDINO, C. A. B. et al. **Passivo ambiental das organizações: uma abordagem teórica sobre avaliação de custos e danos ambientais no setor de exploração de petróleo**. XXII ENEGEP-Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba/PR: [s.n.]. 2002.

GALDINO, L. G. **Aproveitamento da Lama Vermelha, um Resíduo da Indústria de Alumínio, na Obtenção de Materiais Cerâmicos Estruturais por Extrusão**. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO. São Luís - MA, p. 119. 2008.

GARCIA, M. C. S. **Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo bayer por tratamento térmico**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo , p. 102. 2012.

GARDETE, D. C. **Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. Coimbra, p. 186. 2006.

GENÇ, H. et al. Adsorption of arsenate from water using neutralized red mud. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 264, p. 327–334, 2003. ISSN 0021-9797.

GLENISTER, D. J.; THORNER, M. R. **Alkalinity of red mud and its application for the management of acid wastes** . Chemeca 85: Innovation in the Process and Resource Industry: The Thirteenth Australian Chemical Engineering Conference. Perth: [s.n.]. August 1985. p. 109-113.

GORDON, J. N.; PINNOCKH, W. R.; MOOREH, M. M. A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 371-379, 1996. ISSN 0958-9465.

GREENPEACE. **Uol notícias internacional**, 2010. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/internacional/ultimas-noticias/2010/10/08/numero-de-mortos-por-lama-vermelha-na-hungria-sobe-para-sete.htm>>. Acesso em: 21 Janeiro 2014.

HABASHI, F. A short history of hydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, v. 79, p. 15-22, 2005. ISSN 0304-386X.

HANAHAN, C. et al. Chemistry of seawater neutralization of bauxite refining residues (red mud). **Journal Environmental Engineering Science**, v. 21, n. 2, p. 125-138, 2004.

HANUMANTH RAO, C. V. et al. Application of GGBS stabilized Redmud in Road Construction. **IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)**, v. 2, n. 8, p. 14-20, August 2012. ISSN 2250-3021.

HILDEBRANDO, E. A. et al. Application of Bauxite Waste from Amazon Region in the Heavy Clay Industry. **Materials Research**, v. XVI, n. 6, p. 1418-1422, Nov/Dez 2013. ISSN 1516-1439.

HIND, R. A.; BHARGAVA, S. K.; GROCCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **J. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**, 146, 1999. p. 359-374.

HYDRO. **Annual Report**. Norsk Hydro. Oslo, Noruega, p. 220. 2013 A.

HYDRO. Como a alumina é extraída da bauxita. **A Hydro no Brasil**, 2013 B. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Refino-da-alumina/>>. Acesso em: 25.abril. 2014.

IAI. Aluminium for Future Generations. **International Aluminium Institute. Bauxite Residue Management**, 2012. Disponível em: <<http://bauxite.world-aluminium.org/refining/bauxite-residue-management.html#top>>. Acesso em: 03.Maio. 2014.

IAI. **Bauxite Residue Management: Best Practice**. International Aluminium Institute. World Aluminium. European Aluminium Association. [S.l.], p. 32. 2013.

IOS. **Estudo da cadeia produtiva do alumínio na região norte do Brasil (Pará e Maranhão):O caso da empresa ALUNORTE**. Instituto Observatório Social. [S.l.], p. 70. 2008.

ITOEZ, C.; CASTRO NETO, J. L.; KOWALSKI, F. D. **A Evidenciação do Passivo Ambiental e seu Efeito sobre as Usinas Hidrelétricas**. 6º Congresso USP de Controladoria e Contabilidade. São Paulo/SP: [s.n.], 2006.

J&E. **The „Kolontár Red Mud Case” : Environmental Liability 2011 - Case Study**. Justice and Environment. European Network of Environmental Law Organizations. Budapest, p. 20. 2011.

JAMIESON, E. J. **Development and Utilisation of Bayer process By-products**. Curtin University. Tese de doutorado. Austrália, p. 408. 2013.

JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Coarse bauxite residue for roadway construction materials. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 14, n. 3, p. 265-273, 2012. ISSN 1029-8436.

JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. R. Sustainable use of coarse bauxite residue for alternative roadway construction materials. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2013. ISSN 1448-8353.

JOHNSTON, M. et al. **Alkalinity conversión of bauxite refinery residues by neutralisation**. Journal Hazardous Materials, vol. 182. [S.l.], p. 710-715. 2010.

JOHNSTONE, D. et al. **Improvements to Bauxite Residue Neutralisation Efficiency Through the use of Alternative Feed Sources**. [S.l.]. 2013.

KAVAS, T. Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. **Building and Environment**, v. 41, p. 1779-1783, 2006. ISSN 0360-1323.

KOMNITSAS, K.; BARTZAS, G.; PASPALIARIS, I. Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies Miner. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 183–194, 2004. ISSN 0892-6875.

KRAEMER, M. E. P. Contabilidade ambiental como sistema de informações. **Revista Contabilidade Vista e Revista**, Belo Horizonte/MG, v. XII, n. 3, p. 71-92, dez. 2001. ISSN 0103-734X.

LCPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud**. Groupe de travail RST Formulation des enrobés à chaud. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. France. 2007.

LEAHY, R. B.; MCGENNIS, R. B. **Asphalt mixes: materials, design and characterization**. Asphalt paving technology. Illinois. 1999.

LEONARDOU, S. A. et al. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure. **Journal of Hazardous Materials**, v. 157, p. 579-586, 2008. ISSN 0304-3894.

LIMA, F. S. S. **Utilização da Lama Vermelha e do Resíduo Caulínico na Produção de Pigmento Pozolânico para Argamassas e Concretos de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará - UFPA. Belém/PA. 2006.

LIMA, M. O. et al. **Relatório IEC-SAMAM 001/2009 - Caracterização preliminar dos impactos ambientais, danos ao ecossistema e riscos a saúde decorrentes do lançamento no rio Murucupi de efluentes do processo de beneficiamento de bauxita, Barcarena-Pará**. Instituto Evandro Chagas. Belém, Pará., p. 32. 2009.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: _____ **Tratamento de Minérios**. 4^a. ed. Rio de Janeiro: CETEM-Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004. Cap. 1, p. 3-16.

MACÊDO, A. N. et al. Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. XI, n. 4, p. 25-36, outubro/dezembro 2011. ISSN 1678-8621.

MAHONEY, J.; ZINKE, S. **Asphalt Pavement Analyzer Equipment Acquisition Final Report**. Connecticut Department of Transportation. Connecticut, EUA. 2008.

MANFROI, E. P. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassa**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis/SC, p. 151 p. 2009.

MARQUES, G. L. D. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 490. 2004.

MARTIRES, R. A. C. **Balço Mineral Brasileiro 2001 - ALUMÍNIO**. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília/DF, p. 31. 2001.

MASSARENTE, M. et al. **Alumínio no Brasil: transformações nos últimos 15 anos**. Bain & Company. São Paulo/SP, p. 16. 2013.

MATOS, C. E. Acidente com Resíduo Tóxico na Hungria. **RevInter - Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, São Paulo/SP, v. III, n. 3, p. 44, Outubro 2010. ISSN 1984-3577.

MCCONCHIE, D.; SAENGER, P.; FAWKES, R. **An environmental assessment of the use of seawater to neutralize bauxite refinery wastes**. V. Ramachandran and C.C. Nesbitt (eds.) Proceedings of the 2nd Internat. Symp.on Extraction and Processing for the Treatment and Minimisation of Wastes, The Minerals, Metals & Materials Soc. Scottsdale, Arizona, p. 407-416. 1996.

MCCORMICK, P. G.; PÍCARO, T.; SMITH, P. A. I. Mechanochemical treatment of high silica bauxite with lime. **Minerals Engineering**, v. 15, p. 211-214, 2000. ISSN 0892-6875.

MELO, J. V. S. D. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese de doutorado. Engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 414. 2014.

MENDES, S. F. **Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes**. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, p. 117. 2011.

MERCURY, J. M. R. et al. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro/RJ, v. XV, n. 3, p. 445-460, 2010. ISSN 1517-7076.

MOREIRA, H. S. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com diferentes teores de agregado fresado incorporado e diferentes modos de compactação**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Dissertação de Mestrado. Fortaleza/CE. 2005.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. M. F. **Efeito do filer nas características mecânicas das misturas asfálticas**. XI PANAM. Brasil, p. 09-19. 2000.

MOURA, E. D. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 299. 2010.

NASCIMENTO, L. A. H. D. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil-COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro,RJ, p. 204. 2008.

NCHRP. **Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt: REPORT 648**. National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C. 2010.

NDJ. **The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission**. The National Diet of Japan. Nuclear Accident Independent Investigation Commission. [S.l.], p. 88. 2012.

NÓBREGA, L. M.; CAMPOS, L. E. P. D.; SOARES, J. B. **Uso da escória como agregado em misturas asfálticas tipo CBUQ**. XIII ANPET- Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis, SC: [s.n.]. 2004. p. 22-25.

NUNN, R. F. Advances in red mud dewatering and disposal technologies. **J. Light Metals - The Minerals, Metals & Materials Society**, Warrendale, 1998. p. 107-114.

PALMER, S. J. et al. Thermally activated seawater neutralised red mud used for the removal of arsenate, vanadate and molybdate from aqueous solution. **Journal of Colloid and Interface Science** , v. 342, n. 1, p. 147-154, 2010. ISSN 0021-9797.

PEREIRA, R. L. et al. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 12º CONAF- Congresso de Fundição. São Paulo, SP: [s.n.]. 2005.

PINILLA, A. **O sistema filer-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Conselho Nacional de Pesquisas. [S.l.]. 1965.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. **Review of current bauxite residue management, disposal and storage: Practices, Engineering & Science.** The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). CSIRO document DMR-3608. Austrália, p. 44. 2009.

QUARESMA, D. D. S. **Estudo hidrometalúrgico de compostos de titânio proveniente do resíduo do processo Bayer.** Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia química. Universidade Federal do Pará. Belém, PA, p. 107. 2012.

RAHMAN, F.; HOSSAIN, M. **Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data.** Kansas State University Transportation Center. [S.l.]. 2014.

RAI, S. et al. Neutralization and utilization of red mud for its better waste management. **Journal Archives of Environmental Science** , v. 6, p. 13-33, 2012. ISSN 2167-1664.

RAI, S. et al. An Alternative to Clay in Building Materials: Red Mud Sintering Using Fly Ash via Taguchi's Methodology. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 7, 2013.

RIBEIRO, D. V. et al. Estudo de eventuais patologias associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Revista Cerâmica Industrial**, p. p. 31-42, Janeiro/Fevereiro 2011. ISSN 1413-4608.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Efeito da adição da lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas. **RIEM - Revista IBRACON de Estruturas e Materiais** , v. 5, n. 4, p. 451-467, Agosto 2012. ISSN 1983-4195.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland.**

CBECiMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Pernambuco: [s.n.]. 2008.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. porto alegre. 2007.

ROSSI, C. R. C. et al. **Concretos com agregados de lama vermelha para reparo de elementos de concreto sob abrasão hidráulica**. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2008. Salvador/BA: IBRACON. 2008.

ROSSI, C. R. C.; RAMOS, M. A.; OLIVEIRA, D. R. C. D. **Estudo experimental das propriedades físicas e mecânicas de agregados para a construção civil produzidos a partir de lama vermelha**. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2008. Salvador/BA: IBRACON. 2008.

SAHU, R. C.; PATEL, R.; RAY, B. C. Neutralisation of red mud using CO2 sequestration cycle. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, p. 28-34, 2010. ISSN 0304-3894.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C. D.; DUTRA, A. J. B. In: _____ **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. Cap. 13: BAUXITA, p. 279-304.

SANTANA, H. **Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filer em misturas asfáltica**. 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Associação Brasileira de Pavimentação. Cuiabá. 1995.

SANTOS, J. M. R. D. **Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. [S.l.], p. 111. 2010.

SGLAVO, V. M. et al. Bauxite red mud in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, p. 245-252, 2000. ISSN 0955-2219.

SHELL. **The Shell Bitumen Handbook**. Fifth Edition. Thomas Telford Publishing. London, United Kingdom. 2003.

SHRP. SHRP-A-698. Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. 1994 A.

SHRP. SHRP-A-10. Superior performing asphalt pavement (Superpave): The product of the SHRP. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. 1994 B.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. D. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. XII, n. 2, p. 322-338, 2007. ISSN 1517-7076.

SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. 2010.

SILVEIRA, M. A. **Estudo sobre adição de polímero em areia-asfalto a frio.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 1999.

SMITH, W. S. **ATA da 10ª reunião ordinária do COMDEMA – Conselho Municipal de Desenvolvimento do Meio Ambiente, da prefeitura de sorocaba, realizada no dia 10 março de 2011.,** Sorocaba/SP, 2011. Disponível em: <[http://www.meioambientesorocaba.com.br/sema/UserFiles/file/10%C2%AA%20REUNI%C3%83O%20-%20ATA%20\(1\).pdf](http://www.meioambientesorocaba.com.br/sema/UserFiles/file/10%C2%AA%20REUNI%C3%83O%20-%20ATA%20(1).pdf)>. Acesso em: 07 Maio 2014.

SOUZA, E. B. D. O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, p. 111. 2007.

SOUZA, J. A. D. S. **Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará - UFPA. Belém/PA, p. 148. 2010.

SOUZA, R. D. O.; BURLAMAQUI, A. T.; COUTINHO NETO, B. **Avaliação dos parâmetros Marshall em misturas asfálticas tipo C.A.U.Q com 5, 15 e 25% de resíduo de manganês.** CONINFRA-5º Congresso de Infraestrutura de Transportes. São Paulo, SP: ISSN 1983-3903. 2009. p. 16.

SPERANDIO, L. A.; TRINDADE, M.; FAVERO, H. L. Uma introdução à discussão do passivo ambiental. **Revista Enfoque: Reflexão Contábil**, Maringá/PR, v. XXIV, n. 2, p. 05-18, Julho-Dezembro 2005. ISSN 1984-882X.

TAVARES, D. S. **Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, p. 138. 2012.

TRB. **National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) - REPORT 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary.** Transportation Research Board. WASHINGTON, D.C., p. 285. 2011. (0077-5614).

TSAKIRIDIS, P. E.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials B**, v. 116, p. 103-110, 2004. ISSN 0304-3894.

UGE, P.; VAN DE LOO, P. J. **Permanent Deformation of Asphalt Mixes.** Amsterdam. 1974.

USDA. **Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples.** Department of Agriculture. Washington, USA, p. 50. 1967.

VIEIRA, T. M. **Produção de Agregado Utilizando Lama Vermelha: caracterização microestrutural visando sua aplicação em concreto.** UFPA - Universidade Federal do Pará. Belém/PA. 2008.

VIERA, C. S. **Desempenho de um pavimento flexível solicitado por simulador de tráfego.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 149. 2002.

VILLELA, A. R. A. **Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, p. 150. 2012.

WANG, S.; ANG, H. M.; TADÉ, M. O. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. **Chemosphere**, v. 72, p. 1621-1635, 2008. ISSN 0045-6535.

XAVIER, C. L. **Relatório estudos setoriais: Alumínio**. Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas. Universidade de São Paulo - Faculdade de economia, administração e contabilidade. Ribeirão Preto/SP, p. 77. 2012.

YALÇIN, N.; SEVINÇ, V. Utilization of bauxite waste in ceramic glazes. **Ceramics International**, v. 26, p. 485-493, 2000. ISSN 0272-8842.

YANG, H. et al. Preparation of double-layer glass-ceramic/ceramic tile from bauxite tailings and red mud. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, p. 1887-1894, 2009. ISSN 0955-2219.

YANG, J.; XIAO, B. Development of unsintered construction materials red mud wastes produced in the sintering alumina process. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 2299-2307, 19 Novembro 2008. ISSN 0950-0618.

YOUNG, C. E. F.; LUSTOSA, M. C. J. Meio ambiente e competitividade na indústria brasileira. **Revista de Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro: IE/UFRJ, v. 5, p. 231-259, 2001.

ZEGARRA, J. R. E. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22**. Dissertação. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2007.