



Alex Gomes Batista

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BAUXITA COMO FILLER,
ADICIONADO DE POLIPROPILENO DO RESÍDUO DE
GARRAFÃO DE ÁGUA MINERAL NO CONCRETO
BETUMINOSO USINADO A QUENTE.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2023

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Alex Gomes Batista

Utilização de resíduo de bauxita como filler, adicionado de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral no concreto betuminoso usinado a quente.

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém
Abril de 2023

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alex Gomes Batista.

TÍTULO: Utilização de resíduos de bauxita como filler, adicionado de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral no concreto betuminoso usinado a quente.

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alex Gomes Batista.

Rodovia Augusto Montenegro, nº 7200,
Residencial Ilha Porchat, bloco 07 apt 102.
Parque Verde.66.070-300 Belém – PA –
Brasil.

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) de acordo com IS BD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada Automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

G633u Gomes Batista, Alex.

Utilização de resíduos de bauxita como filler, adicionado de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral no concreto betuminoso usinado a quente / Alex Gomes Batista. – 2019.

88 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2019.

1. polipropileno, resíduo de bauxita, mistura asfáltica. I. Título.

CDD – 620.11



**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BAUXITA COMO FILLER,
ADICIONADO DE POLIPROPILENO DO RESÍDUO DE GARRAFÃO
DE ÁGUA MINERAL NO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A
QUENTE**

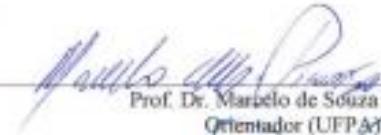
AUTOR:

ALEX GOMES BATISTA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM 14/04/2023

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Marielito de Souza Picanço
Orientador (UFPA)


Prof. Dr. Alcebiades Negão Macedo
Membro Intenso (UFPA)


Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)


Dr. Anderson José de Oliveira Aguiar
Membro Externo (Conselho Engenharia)

Visto:


Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

RESUMO

O aumento da geração de resíduos industriais, aliado a preocupação com a escassez de recursos naturais e os impactos ambientais decorrentes da extração destes, tem levado a elaboração de diversos estudos que visam indicar possíveis alternativas para o reaproveitamento dos resíduos sólidos. Neste contexto, o presente estudo visa avaliar a utilização do resíduo de bauxita em conjunto com o polipropileno, proveniente dos garrafões de água mineral, na composição do Concreto Betuminoso Usinado à Quente – CBUQ. Para tanto, foram elaboradas composições com três diferentes porcentagens de resíduo de bauxita (3%, 5% e 7%), misturas utilizando apenas o polipropileno, nos teores de (1%, 3% e 5%), e dosagens com substituição de 3% de filler pelo resíduo de bauxita e 3% de polipropileno. Os materiais constituintes foram caracterizados quanto a composição química, física e microestrutural. O resíduo de bauxita foi avaliado quanto aos aspectos de granulometria, microestrutura, pH1, massa específica e composição química. Os agregados foram submetidos aos ensaios de massa específica, abrasão, índice de forma e adesividade e enquadrados na curva granulométrica teórica correspondente à média da “Faixa C” do DNIT. Para o ligante CAP 50/70 foi realizado o ensaio de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. O desempenho das misturas asfálticas foi aferido por meio dos parâmetros do ensaio Marshall e resultados da tração por compressão diametral estática a 25°C mínima MPa. A água proveniente do condicionamento a 60°C de corpos de prova constituídos por resíduo de bauxita foi recolhida e avaliada quanto ao pH e concentrações de ferro e alumínio. Os resultados demonstram que há perspectiva de melhorar os parâmetros Marshall para diferentes teores de resíduo de bauxita utilizada como filler e polipropileno, criando materiais alternativos na constituição de pavimentos, capazes de conferir propriedades mecânicas satisfatórias ao tráfego, sem contaminação do meio ambiente.

Palavras-chave: Resíduo de bauxita. Mistura asfáltica. Polipropileno. Ensaio Marshall.

ABSTRACT

The increase in the generation of industrial waste, together with concerns about the scarcity of natural resources and the environmental impacts arising from their extraction, has led to the development of several studies aimed at indicating possible alternatives for the reuse of solid waste. In this context, the present study aims to evaluate the use of bauxite residue in conjunction with polypropylene, from mineral water bottles, in the composition of Hot Mixed Bituminous Concrete - CBUQ. For this purpose, compositions were elaborated with three different percentages of bauxite residue (3%, 5% and 7%), mixtures using only polypropylene, in the contents of (1%, 3% and 5%), and dosages with substitution of 3% filler from bauxite residue and 3% polypropylene. The constituent materials were characterized in terms of chemical, physical and microstructural composition. The bauxite residue was evaluated in terms of granulometry, microstructure, pH1, specific mass and chemical composition. The aggregates were subjected to specific mass, abrasion, shape index and adhesiveness tests and framed in the theoretical granulometric curve corresponding to the average of "Range C" of DNIT. For the CAP 50/70 binder, the penetration test, softening point and viscosity were carried out. The performance of the asphalt mixtures was measured using the parameters of the Marshall test and the results of static diametral compression traction at 25°C minimum MPa. The water from the conditioning at 60°C of specimens consisting of bauxite residue was collected and evaluated for pH and concentrations of iron and aluminum. The results show that there is a prospect of improving the Marshall parameters for different levels of bauxite residue used as filler and polypropylene, creating alternative materials in the constitution of pavements, capable of providing satisfactory mechanical properties to traffic, without contaminating the environment.

Keywords: Bauxite waste. Asphalt mix. Polypropylene. Marshall essay.

“Projeto funcional é a principal medida de progresso do projeto”
(Manifesto Ágil)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	17
1.3	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	18
2.1	CONCEITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS.....	18
2.2	POLIPROPILENO.....	19
2.3	BAUXITA, ALUMINA E ALUMÍNIO.....	21
2.4	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO.....	24
2.5	RESÍDUO DE BAUXITA.....	29
2.6	MISTURAS ASFÁLTICAS.....	38
2.6.1	Ligantes Asfálticos.....	39
2.6.2	Misturas asfálticas com adição de resíduos da mineração.....	42
2.6.3	Influência da adição do filler em misturas asfálticas.....	46
2.6.4	Uso de modificadores em ligantes asfálticos.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	52
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	56
3.3.1	Resíduo de bauxita.....	56
3.4	DOSAGEM MARSHALL.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	72
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
6	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação da bauxita de acordo com seus constituintes.....	22
Tabela 2 - Composição química do resíduo de bauxita (%)	31
Tabela 3 - Aplicações do resíduo de bauxita.....	34
Tabela 4 - Proporção de agregados e ligante utilizados na fabricação de misturas asfálticas	36
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados por Bezerra, Macêco e Souza (2010).....	37
Tabela 6 - Propriedades avaliadas por Bezerra, Macêco e Souza (2010)	38
Tabela 7 - Especificação brasileira do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	41
Tabela 8 - Granulometria do filler	46
Tabela 9 - Granulometria e massa específica dos diferentes tipos de filler usados ..	48
Tabela 10 - Parâmetros volumétricos de dosagem obtidos por Cavalcante e Soares (2001).....	49
Tabela 11 - Resultados de Resistência à tração (MPa) obtidos por Cavalcante e Soares (2001).....	50
Tabela 12 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar	51
Tabela 13 - Fator de correção utilizado no cálculo de superfície específica	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de Bauxita, Alumina e Alumínio Primário.....	22
Figura 2 - Principais empresas da mineração no Brasil	23
Figura 3 - Evolução esquemática de processos hidrometalúgicos.....	25
Figura 4 - Processo Bayer.....	27
Figura 5 - Fluxograma e Esquema Processo Bayer.....	28
Figura 6 - Etapas do programa experimental	52
Figura 7 - Resíduo de bauxita destorroada	56
Figura 8 - Amostras de água	57
Figura 9 - Porcentagem de vazios.....	64
Figura 10 - Volume de vazios de agregado mineral.....	65
Figura 11 - Relação de Betume/Vazios - RBV	66
Figura 12 - Estabilidade.....	67
Figura 13 - Porcentagem de vazios x estabilidade.....	68
Figura 14 - Relação Betume/Vazios x Estabilidade.....	68
Figura 15 - Tração por Compressão Diametral	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

P/A	Relação pó/asfalto
PDF	<i>Powder Diffraction File</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
Pli	Teor de ligante inicial
PP	Fíler de pó de pedra
RBV	Relação Betume/Vazios
REGAP	Refinaria Gabriel Passos
REVAP	Refinaria Henrique Lage
RSST-CH	<i>Repeated Simple Shear Test at Constant Height</i>
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 – <i>Strategic Highway Research Program</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> 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
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	Especrometria 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 – Resíduo de bauxita
Mag	Massa do agregado
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
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	
ABINAM	Associação Brasileira da indústria de Águas Minerais
SPAC	Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute
PE	Polietileno
PET	Polietileno tereftalato
PP	Polipropileno
APP	Polipropileno Atático
ODOT	Ohio State Department of Transportation

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA

Em geral, no Brasil, as indústrias produzem maior ou menor quantidade de resíduos, o que depende de cada etapa do seu processo produtivo. Contudo, principalmente na mineração, o volume de rejeitos gerados é alto, e a sua deposição passa a ser um problema, pois, torna-se necessário um grande espaço para depositá-los, sendo um grande desafio de hoje, o tratamento adequado desses rejeitos, dando a eles um destino ecologicamente correto.

O lucro é o principal objetivo de uma empresa, entretanto, a preocupação ambiental tornou-se cada vez mais importante em função da conscientização do consumidor e do seu interesse com os métodos em que os produtos e serviços são produzidos, utilizados e descartados e de que forma afetam a natureza (MIRANDA *et al.*, 2019).

Nesta toada, questões de carácter ambiental vêm ganhando importância em discussões internacionais, e fatores como a retirada das matérias-primas de forma desordenada e os altos índices de resíduos lançados no âmbito natural, contribuem para o aumento dos danos ambientais, gerando no ramo empresarial uma preocupação em preservar o meio natural e buscar soluções que minimizem esses impactos, estabelecendo medidas de controle padrão, principalmente no que se refere à geração e disposição de resíduos sólidos industriais. A procura por inovações e melhorias em todo o ciclo do processo é alvo de diversos estudos, que visam a sustentabilidade.

Os fabricantes de água mineral aparecem como grandes fontes geradoras de resíduos plásticos, a ANVISA estabelece procedimentos de Boas Práticas de Fabricação em todos os processos de industrialização da água até o seu produto final para a comercialização. Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Águas Minerais (ABINAM, 2022), são consumidos no Brasil, cerca de cinco bilhões de litros de água, todos os anos. A indústria de água mineral é caracterizada pelo grande consumo de recursos naturais e produção de efluentes, assim deve se adaptar a processos ambientalmente corretos. Neste sentido, alguns estudos têm sido realizados quanto à aplicabilidade de sistemas de qualidade e à questão dos

resíduos nas indústrias de águas minerais, utilizando novas tecnologias mais limpas (ARAGÃO & TAMIARANA, 2021).

Ainda segundo os autores citados acima, o garrafão de água mineral é um tipo de vasilhame fabricado em termoplástico, sendo os mais comumente utilizados na confecção de garrafão de água, o PET, polietileno tereftalato, o pp, polipropileno, e o policarbonato. Tendo diferentes nomes, conforme a região do país, ele pode ser chamado de garrafão, galão, vasilhame, recipiente ou bombona. Todos esses tipos de termoplásticos são materiais altamente resistentes e duráveis, sendo bastante utilizados no armazenamento e conservação de líquidos, como é o caso da água mineral, que pode ser envasada tanto em garrafas, quanto em garrafão de água.

O termoplástico, por ser resistente, permite que o garrafão de água seja utilizado várias vezes. Mas ainda assim, com o passar do tempo e o uso e reuso constante, o material sofre desgaste e precisa ser descartado. A validade de um vasilhame de água mineral é de três anos, segundo as portarias do Departamento Nacional de Produção Mineral. Após esse tempo, o garrafão de água deve ser encaminhado para a reciclagem, evitando, dessa forma, que seja descartado de forma indevida NBR 14222 (ABNT, 2019).

Como derivado do petróleo, o termoplástico demora muito tempo para ser absorvido pelo meio ambiente, sendo considerado um material altamente poluente. A reciclagem deste tipo de material tem se mostrado uma alternativa viável para resolver problemas como o destino de resíduos plásticos e a degradação ambiental provocada pelos processos industriais.

Em 1901 se iniciaram as aplicações práticas de asfaltos modificados, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. Em 1902 foi construída a primeira estrada utilizando asfalto modificado com borracha natural, em Cannes, França. Depois de 1945, após término da segunda guerra mundial, passaram a ser utilizados também polímeros sintéticos como modificadores do asfalto (SOUZA, 2010).

Mello et al., (2008), na Universidade do Arizona - EUA, verificaram o uso de fibras sintéticas de polipropileno e aramida, misturadas aleatoriamente, em concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ) e constataram os benefícios trazidos por esta adição.

A literatura demonstra que as fibras podem melhorar o desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente, ao trincamento por fadiga e à suscetibilidade das misturas a variações térmicas. Mello *et al.*, (2008), numa parceria entre a Universidade do Arizona - EUA e a Universidade de Brasília (UNB), elaboraram estudos sobre a adição de fibras sintéticas de polipropileno e de aramida no pavimento, obtendo significativas melhorias em ligantes e concretos asfálticos utilizados nos EUA. Segundo Fernandes *et al.*, (2007) as melhorias nos ligantes e misturas asfálticas (modificadas) ocorrem, basicamente, pela redução da suscetibilidade do material à temperatura e devido ao aumento de sua flexibilidade

Ainda com relação ao uso de resíduos, nas atividades de mineração, dois tipos de resíduos sólidos são gerados em maiores quantidades, os estéreis ou resíduos sólidos de extração e os rejeitos. Os rejeitos da mineração são compostos por partículas finas derivadas da rocha explorada, e que não são aproveitados após o processo de beneficiamento, que é o processo responsável por extrair o mineral de interesse econômico dos demais materiais encontrados no processo de mineração. No caso o resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012; HILDEBRANDO, *et al.*, 2013).

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

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

Ainda que armazenados de maneira eficiente, resíduos industriais como a resíduo de bauxita 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 26 padrões de produção. Assim, uma vez produzidos, é conveniente tentar reinseri-los no ciclo produtivo.

Dessa forma, pesquisas têm sido desenvolvidas visando à utilização do resíduo de bauxita 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.

Diante das informações acima descritas, é neste cenário que se estabelece esta pesquisa, onde procura-se avaliar a adição de resíduo do processo de reutilização do garrafão de água mineral (polipropileno) no comportamento de misturas asfálticas tipo CBUQ.

Sendo a pesquisa conduzida por uma análise experimental paramétrica do comportamento mecânico da mistura asfáltica modificada com resíduo de polipropileno a uma mistura asfáltica comum aplicadas a estruturas de pavimentos na cidade de Belém do Pará, além de uma segunda análise comparativa do comportamento mecânico da mistura asfáltica modificada com resíduo polipropileno adicionada de resíduo de bauxita (resíduo de bauxita) utilizada como filler.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as variações dos parâmetros Marshall e resultados da tração por compressão diametral estática a 25°C mínima MPa em mistura de Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ para diferentes teores de resíduo de bauxita, utilizada como filler, além da possibilidade de adição de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral na mistura isoladamente e integrado com o resíduo de bauxita, utilizado como aglomerante.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se as misturas asfálticas adicionadas com resíduo de bauxita e ou resíduos do processo de reutilização do garrafão de água mineral obtêm resultados de desempenho compatíveis com os parâmetros Marshall obtidos em uma mistura de referência;
- Avaliar o melhor desempenho, dentre as misturas compostas por resíduo de bauxita e resíduo processo de reutilização do garrafão de água mineral;
- Avaliar a influência da porcentagem de resíduo de bauxita e resíduo de polipropileno no comportamento da mistura asfáltica tipo CBUQ;
- Avaliar a qualidade da água e possível liberação do resíduo, com objetivo de fornecer subsídios para a classificação ambiental do resíduo de bauxita.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por seis capítulos sendo estes: introdução; revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos relacionados ao tema; materiais e métodos, que explica a metodologia experimental utilizada para obtenção dos resultados da pesquisa; resultados e discussão; conclusão e referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 CONCEITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALIS

Resíduo sólido industrial é todo o resíduo que resulta de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido, gasoso quando contido, e líquido cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (RESOLUÇÃO CONAMA 313, 2002).

Naime (2005) afirma que os resíduos sólidos industriais são os materiais que sobram dos processos industriais em geral. Alguns líquidos não passíveis de tratamento por métodos convencionais e que, por suas características peculiares não podem ser lançados na rede de esgotos, também são incluídos neste conceito. Em geral, se tornam pastosos após a desidratação.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que os materiais possam ter manuseio e destinação adequados, ficando a classificação da seguinte forma: Classe I – perigosos, Classe II A – não perigosos e não inertes, e Classe II B – não perigosos e inertes

As indústrias de fabricação e transformação de materiais produzem, em maior ou menor grau, uma certa quantidade de resíduos que nem sempre são reaproveitados ou têm um destino ecologicamente correto. Dar um destino correto a estes subprodutos constitui um grande desafio. Em alguns casos, estes produtos secundários podem ser reutilizados diretamente ou podem ser aproveitados como matéria-prima básica em outros processos industriais.

Considerando a produção industrial, Reis (2014), “poluição é sinônimo de desperdício e ineficiência produtiva”, dentro desta mesma visão Rosário (2013) afirma que os resíduos industriais representam, na maioria dos casos, perdas de matérias-primas e insumo.

Todas as decisões sejam elas técnicas ou econômicas, tomadas em todas as fases do trato dos resíduos sólidos industriais (manuseio, acondicionamento, armazenagem, coleta, transporte e disposição final) deverão ser fundamentadas na classificação dos mesmos. A Lei nº 12.305/2010, através de seu art. 10, determina que a gestão dos resíduos seja de responsabilidade do gerador e que os mesmos sejam tratados e depositados em destinação adequada e segura.

Apesar de não existir uma padronização pelo governo, todas as empresas devem apresentar informações a respeito da geração, características, armazenamento, transporte e destinação de resíduos sólidos produzidos, com objetivo de promover um Inventário Nacional de Resíduos Sólidos (Resolução CONAMA 313, 2002).

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).

2.2 POLIPROPILENO

O polipropileno é um plástico abundante e de baixo custo, possuindo grande e significativa importância industrial, devido a sua alta resistência a produtos químicos e umidade, bem como boas propriedades mecânicas. O tipo de configuração das cadeias do polipropileno afeta extremamente suas propriedades mecânicas. As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar uma sobre as outras (BERNARDI, 2003).

Bernardi (2003) explica que o polipropileno é um plástico incolor, inodoro, atóxico e com densidade de 0,9 g/cm³ aproximadamente. Por isso, é um dos plásticos mais leves. Apresenta uma estrutura apolar, sendo inerte quimicamente, pois só é suscetível a solventes polares. A fibra de polipropileno apresenta resistência aos ácalis, temperatura de fusão alta, na ordem de 165°C, baixo custo e sensibilidade à luz e ao fogo.

Feuerharmel (2000) explica que em função de sua constituição, as fibras de polipropileno possuem uma grande flexibilidade e tenacidade, seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma substancial resistência ao impacto.

Silva (2005) complementa em sua pesquisa que as poliolefinas como PE (Polietileno) e PP (Polipropileno), em particular o polipropileno atático (APP), são mais comumente utilizadas em mantas asfálticas impermeabilizantes do que na modificação de asfalto para pavimentação. A ausência de duplas ligações nestes polímeros confere uma boa estabilidade térmica, porém sua dispersão no ligante asfáltico torna-se difícil principalmente pela baixa densidade destes em relação ao ligante. Quando adicionadas ao ligante asfáltico, as poli(alfa)olefinas são dispersas pela agitação mecânica e após recristalizam no resfriamento, sem formação de rede em sua estrutura. O ligante modificado altamente instável tem suas propriedades alteradas principalmente devido a um aumento de sua viscosidade, o que contribui para melhorar suas propriedades impermeabilizantes (SILVA, 2005).

Algumas literaturas afirmam que as fibras de PP não têm um uso frequente em misturas asfálticas devido sua baixa resistência a temperaturas elevadas. Contudo, existe um crescente uso deste material como modificador asfáltico ou como sendo reforço de misturas asfálticas pré-misturadas a frio, tornando seu uso bem plausível. Reforçando esta ideia as fibras de polipropileno são usadas também como um modificador em concreto betuminoso, nos Estados Unidos. *Ohio State Department of Transportation* (ODOT) publicou normas para a utilização de fibras de polipropileno em concreto asfalto de alto desempenho (JAHROMI & KHODAII, 2008).

2.3 BAUXITA, ALUMINA E ALUMÍNIO

O alumínio é o terceiro elemento em abundância na natureza, superado só pelo oxigênio e o silício. Porém, possui uma reatividade química muito elevada, nunca sendo encontrado em estado metálico. Ele tem uma grande afinidade com o oxigênio e somente no século passado se conseguiu obter o metal. As 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).

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).

De uma maneira prática, pode se dizer que os óxidos de alumínio são a matéria prima para a obtenção deste metal. As rochas ricas em alumina hidratada são agrupadas sob a denominação de bauxitas, nome inicialmente escolhido para designar a alumina hidratada da região de Baux, na França (ROSÁRIO, 2013).

Ainda segundo Rosário (2013), o nome bauxita é dado à espécie mineralógica de composição $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, que nunca foi encontrada na natureza como mineral, e bauxito, à rocha residual, constituída essencialmente por um ou vários dos hidróxidos de alumínio, diáspero, gibsita ou hidrargilita e bohemita, podendo também conter argilo-minerais, hidróxido de ferro e quartzo.

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).

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 extração da bauxita é economicamente viável na produção de alumínio, somente para minérios constituídos de no mínimo 30% de alumina.

A bauxita ocupa a terceira posição de recursos naturais em volume produzido no Brasil, conforme Figura 01, com cerca de 37 milhões de toneladas anuais, atrás dos agregados para construção civil (areia, brita, cascalho e cimento), com cerca de 772 milhões, e do minério de ferro, com 411 milhões de toneladas anuais (SUMÁRIO MINERAL, 2015).

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 (SUMÁRIO MINERAL, 2015).

Figura 1 - Produção de Bauxita, Alumina e Alumínio Primário

Ranking	Reservas de Bauxita Em milhões de toneladas		Produção Em mil toneladas					
	Países	Volume	Bauxita	Volume	Alumina	Volume	Alumínio Primário	Volume
1º	Guiné	7 400	Austrália	81 741	China	58 978	China	31 870
2º	Austrália	6 200	China	65 000	Austrália	20 097	Rússia	3 454
3º	Brasil	2 600	Brasil	37 057	Brasil	10 452	Canadá	3 209
4º	Vietnã	2 100	Guiné	27 605	Índia	5 000	Emirados Árabes	2 471
5º	Jamaica	2 000	Índia	24 219	Estados Unidos	4 541	Índia	1 909
6º	Indonésia	1 000	Jamaica	8 540	Rússia	2 593	Austrália	1 646
7º	China	980	Malásia	7 664	Jamaica	1 865	Noruega	1 231
8º	Guiana	850	Rússia	5 432	Canadá	1 561	Bahrein	971
9º	Índia	590	Cazaquistão	4 802	Ucrânia	1 481	Estados Unidos	818
10º	Suriname	580	Grécia	2 100	Cazaquistão	1 448	Brasil	793
11º	Arábia Saudita	210	Arábia Saudita	1 660	Espanha	1 400	Islândia	764
	Outros	3 490	Outros	4 672	Outros	7 284	Outros	8 421
	Total	28 000		270 492		116 700		57 557

Fonte: Anuário ABAL – Edição 2015

O estado do Pará concentra 91% da produção de bauxita para fins de uso metálico no Brasil. As principais empresas que atuam na mineração de bauxita no Brasil, para fins de usos metálicos estão descritas na Figura 02.

Figura 2 - Principais empresas da mineração no Brasil

Empresa	Volume - 2015 (milhões tpa, base úmida)	%	Localização
MRN – Mineração Rio do Norte S.A.	17,82	48	Trombetas (PA)
Mineração Paragominas S.A. (Hydro)	10,06	27	Paragominas (PA)
Alcoa Alumínio S.A.	5,73	15	Juruti (PA) e Poços de Caldas (MG)
Companhia Brasileira de Alumínio -CBA	2,12	6	Itamarati**, Cataguases e Miraí (MG)
Outros *	1,33	4	
Total	37,06	100	

Fonte: Anuário ABAL – Edição 2015

A Mineração Rio do Norte (MRN) foi um dos primeiros projetos industriais de grande porte na Amazônia. A capacidade da planta é de 18,3 milhões de toneladas anuais, e coloca o estado do Pará no grupo dos mais importantes produtores de minério do mundo (ABAL, 2017).

A mineração de bauxita em Paragominas (Hydro) fica a 64 quilômetros da área urbana, no nordeste do Pará, a 350 km da capital Belém. Controlada pela empresa norueguesa Hydro, iniciou suas operações em 2007 e transporta 100% de sua bauxita por um mineroduto de 244 quilômetros de extensão, com capacidade de 15 milhões de toneladas por ano, é pioneiro no mundo para transporte de bauxita. Por ele, o minério vai para o município de Barcarena no Pará, para alimentar a refinaria de alumina da Hydro Alunorte (ABAL, 2017).

A unidade da Alcoa em Juruti, no oeste do estado do Pará, iniciou suas operações em setembro de 2009 e a sua capacidade produtiva atual é de 5,3 milhões de toneladas/ano (ABAL, 2017).

A Companhia Brasileira de Alumínio – CBA, empresa do grupo Votorantim, atua nos municípios de Poços de Caldas, Itamarati de Minas e Miraí, em Minas Gerais. A Unidade Poços de Caldas tem capacidade instalada para beneficiar anualmente um milhão de toneladas de bauxita (ABAL, 2017).

2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

A produção de alumínio começa com sua matéria-prima, a bauxita, que é transportada para a área de beneficiamento, onde passa por um moinho e é então lavada, para retirada da argila. A alumina, ou óxido de alumínio, é extraída da bauxita através do processo de refino, que consiste em separar a alumina da bauxita utilizando uma mistura de soda cáustica e cal. A mistura é aquecida e, após filtrada, a alumina é transformada em um pó branco seco (HYDRO, 2021).

O beneficiamento 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).

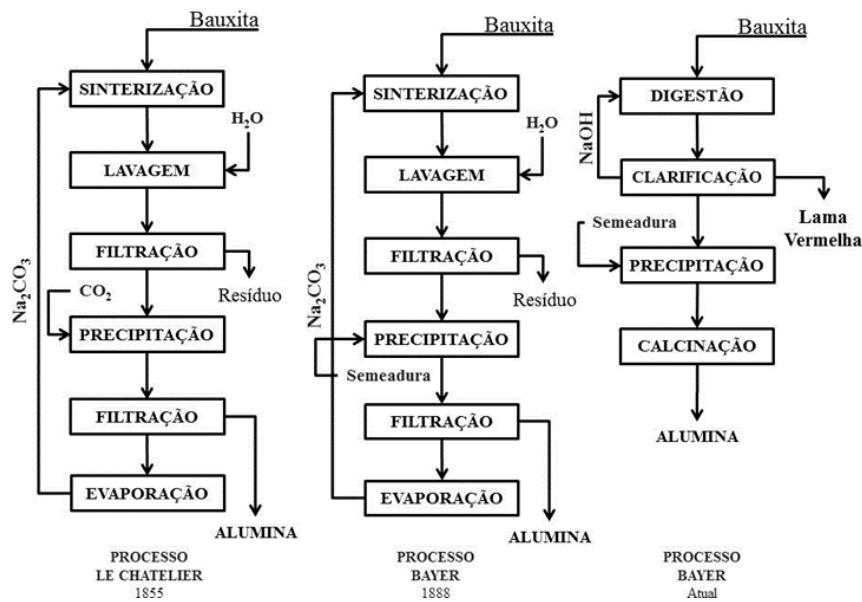
O método *Bayer*, desenvolvido em 1888 por Karl Josef Bayer, representa um marco na história da metalurgia, uma vez que anteriormente, o beneficiamento da bauxita era realizado por meio de um custoso e demorado processo denominado *Le Chatelier* (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007).

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)

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).

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 resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita passa por um processo de lavagem, para então ser armazenada (SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; QUARESMA, 2012).

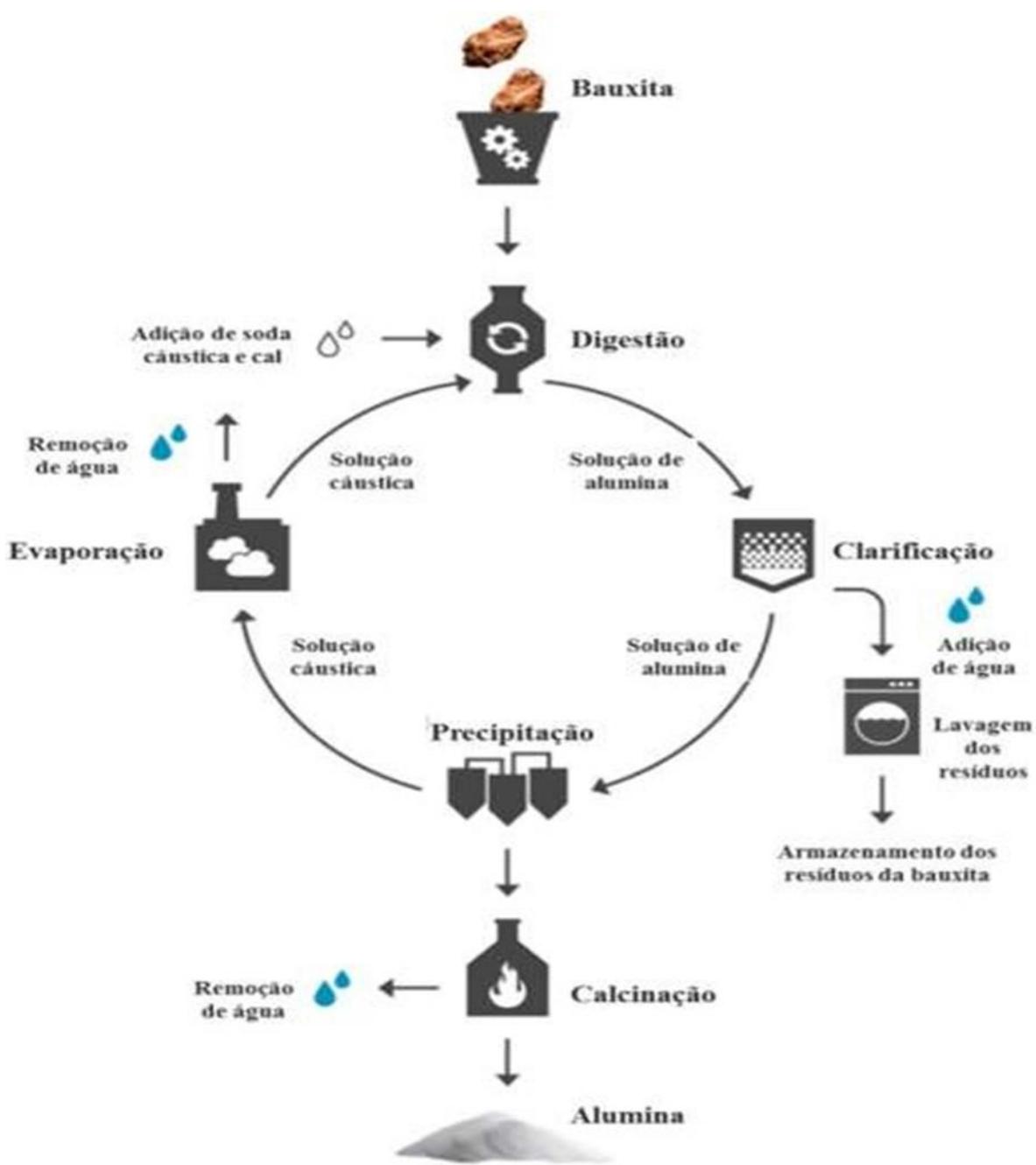
O licor resultante da etapa de clarificação é então resfriado e transferido para os precipitadores, nos quais serão adicionados cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação (MANFROI, 2009; SILVA FILHO; ALVES; MOTTA, 2007; GARCIA, 2012).

O material precipitado é filtrado e lavado para remover a solução cáustica (HYDRO, 2013), em seguida calcinado a temperaturas superiores a 960°C. 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).

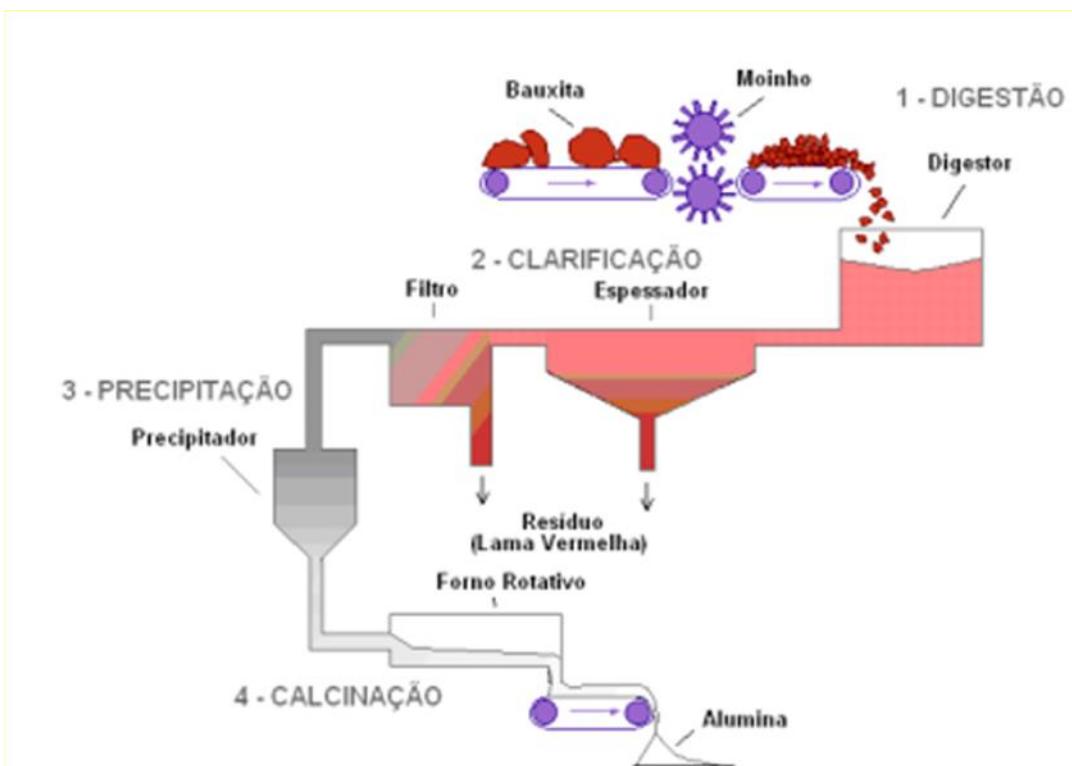
O processo de beneficiamento da bauxita em alumina pode ser entendido com melhor detalhamento nas Figura 4 e 5. Ressalta-se que algumas etapas podem ser realizadas de maneiras diferentes, de acordo com a empresa produtora.

Figura 4 - Processo Bayer



Fonte: HYDRO (2013)

Figura 5 - Fluxograma e Esquema Processo Bayer



Fonte: Adaptado de WAO (2003)

O processo, em que a alumina refinada é transformada em alumínio é denominado processo eletrolítico e requer três componentes básicos: alumina, eletricidade e carbono (HYDRO, 2021), 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 se une ao oxigênio presente na alumina formando dióxido de carbono e alumínio metálico. O alumínio produzido funde-se a 660°C, acumulando-se na parte inferior do recipiente (CISCATO, 1988). O resultado é o alumínio em forma líquida, que assim pode ser retirado dos fornos e está pronto para ser moldado (HYDRO, 2021).

2.5 RESÍDUO DE BAUXITA

A resíduo de bauxita (*red mud*) é a denominação genérica para o resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo *Bayer*, onde o licor de alumina é separado, sendo normalmente disposta em lagoas projetadas especialmente para este fim.

A composição química do resíduo de bauxita varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo *Bayer* em cada planta industrial. Normalmente, a resíduo de bauxita retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (ROSÁRIO, 2013).

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

A literatura apresenta controvérsia quanto à toxicidade do resíduo de bauxita, 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. A resíduo de bauxita não é particularmente tóxica, inclusive a *Environmental Protection Agency* (EPA) não classifica a resíduo de bauxita como um rejeito perigoso (EPA, 2005). Entretanto, Hind *et al.*, (1999), consideram-na tóxica, na medida em que podem constituir um perigo para as populações vizinhas, devido à presença de elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio. Outros relatos encontrados na literatura apontam para os riscos ao meio ambiente associados a resíduo de bauxita, em função de sua elevada alcalinidade e capacidade de troca iônica (LI, 2001; COLLAZO *et al.*, 2005).

Segundo Hind e *et al.*, (1999), o resíduo de bauxita é considerado tóxico pelos elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio, podendo constituir um perigo para as populações circundantes à área de estocagem do resíduo.

A *Environmental Protection Agency* (EPA, 2014) não classifica a resíduo de bauxita 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.

As diferentes classificações do resíduo de bauxita estão relacionadas à variação na composição química do resíduo e à diversidade de metodologias utilizadas para avaliação (MANFROI, 2009).

No estudo de Manfroi (2009), amostras de resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita, 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).

No resíduo de bauxita de origem italiana foi detectada a presença de metais pesados, como arsênio, cádmio, níquel, zinco, chumbo, cobre, cromo e vanádio (BRUNORI, *et al.*, 2005). No resíduo de bauxita 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).

Amostras de resíduo de bauxita 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 no resíduo de bauxita. 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 no resíduo de bauxita.

Tabela 2 - Composição química do resíduo de bauxita (%)

Composto (%)	ALUNORTE Brasil	ALCOA Brasil	CBA Brasil	ALCAN Canadá	ALCOA Austrália	ALCAN África
Al ₂ O ₃	35,5	35,67	36,7	37,6	25,45	26,6
Fe ₂ O 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 ₂ O	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)

A resíduo de bauxita representa um passivo ambiental importante para a indústria de beneficiamento de alumínio, devido aos riscos de contaminação do meio ambiente e aos custos associados ao seu manejo e disposição, os quais representam uma grande parte dos custos de produção da alumina. Estima-se que o custo de armazenamento do resíduo de bauxita seja de 1 a 2% do valor da alumina, por requerer grandes áreas de ocupação (TSAKIRIDIS; AGATZINI-EONARDOU; OUSTADAKIS, 2004; HILDEBRANDO, *et al.*, 2013).

Por questões de segurança, a resíduo de bauxita 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).

Os riscos com relação ao rompimento dos diques também estão presentes, e representam um motivo de preocupação para a população vizinha. Atualmente, melhorias consideráveis foram feitas na gestão, controle e monitoramento das áreas de resíduos a fim de minimizar risco de contaminação (IAI, 2013).

Os métodos convencionais de disposição de lamas, ou métodos úmidos, são assim denominados devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para disposição. Os métodos úmidos aplicáveis à resíduo de bauxita consistem em grandes diques onde a resíduo de bauxita é disposta com baixo teor de sólidos. A separação de fases ocorre no local de disposição, onde o material sólido sedimenta e surge um sobrenadante alcalino. A operação é simples e barata, consistindo na sedimentação natural da fase sólida e na recirculação do sobrenadante para a fábrica. Porém o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto. A área de disposição final necessária é grande, 100 a 200 acres em média.

Os custos associados são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, feita normalmente através de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, devido aos riscos de contaminação do solo e do lençol freático, entre outros componentes. A vida útil da área de disposição é curta, normalmente entre 4 a 7 anos, e a reabilitação da área é um processo lento (KIRKPATRICK, 1996; NGUYEN & BOGER, 1998; JAMAICAN BAUXITE CASE, 2006). Os riscos com relação ao rompimento dos diques também estão presentes, e representam um motivo de preocupação para a população vizinha (HIND *et al.*, 1999; FAHEY *et al.*, 2002, SOFRÁ & BOGER, 2002; LI, 2004).

Dentre os métodos de disposição a seco, o mais comumente aplicado à resíduo de bauxita é o “*dry-stacking*”. Este método consiste na disposição progressiva do resíduo de bauxita. A área de disposição é dividida em leitos de secagem, onde a resíduo de bauxita é descarregada até atingir uma determinada altura, passando-se a seguir para o leito de secagem livre e assim por diante. Quando todos os leitos de secagem estiverem ocupados repete-se o ciclo, depositando uma nova camada de resíduo de bauxita no leito de secagem inicial. O “*dry-stacking*” permite a diminuição da umidade através da evaporação e da drenagem (SOFRÁ & BOGER, 2002; NUNN, 1998).

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 permitem 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 metodologia de eliminação a seco consiste na filtração do resíduo de bauxita 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).

Atualmente a Hydro utiliza uma avançada tecnologia de empilhamento de rejeitos a seco para o descarte de resíduos de bauxita, o que permite o seu armazenamento em terrenos mais íngremes, reduzindo dessa maneira o espaço necessário, reduzindo assim a pegada ecológica. A nova área de deposito de resíduos de bauxita na Hydro, inclui mais 08 (oito) filtros-prensa avançados, capazes de reduzir o teor de umidade para 22%, em comparação com os 36% obtidos com a tecnologia anterior de filtros de tambor rotativo (HYDRO, 2021).

Com a combinação dessas duas tecnologias (filtros prensa e compactação), o espaço necessário para armazenar os resíduos é quatro vezes menor, quando comparado à tecnologia anterior de filtro tambor. O resíduo seco é armazenado no Depósito de Resíduos Sólidos (HYDRO, 2021)

Com relação ao reaproveitamento do resíduo de bauxita foram realizadas diversas pesquisas, contudo, maioria delas, avalia o comportamento do resíduo em meio cerâmico, ou seja, aplicando-o em tijolos, telhas e cimento, são poucas as pesquisas que utilizam a resíduo de bauxita na pavimentação, a Tabela 3 apresenta alguns estudos realizados com a resíduo de bauxita.

Tabela 3 - Aplicações do resíduo de bauxita

Ano	Referência	País	Materiais produzidos com resíduo de bauxita
1996	Gordon <i>et al.</i>	Jamaica	Compósito cimentíceo
2000	Sglavo <i>et al.</i>	Itália	Produtos cerâmicos
2000	Yalçin e Sevinç	Turquia	Artigos sanitários, porcelanas
2004	Tsakiridis e Leonardou	Grécia	Clínquer
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; Macêco; 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)

Chaves (1962) destacou que por muito tempo a resíduo de bauxita foi considerada um resíduo inaproveitável para a indústria do alumínio. Entretanto, os custos econômicos e os riscos ambientais associados à disposição do resíduo de bauxita têm motivado companhias e pesquisadores na busca por alternativas ambientalmente mais seguras, que possibilitem a redução do volume de resíduo encaminhado para a disposição final.

A utilização do resíduo de bauxita como insumo para produção de cimentos especiais, também foi pesquisada, mas esta aplicação encontra problemas devido à alcalinidade do resíduo de bauxita (SHIMANO & KOGA, 1979; SINGH *et al.*, 1997; TSAKIRIDIS *et al.*, 2004; PAN *et al.*, 2003).

A resíduo de bauxita também encontra aplicações na indústria cerâmica. Yalçin & Sevinç (2000) propuseram a produção de revestimentos cerâmicos (porcelanas, vítricos e eletroporcelanas) usando a resíduo de bauxita. Outros pesquisadores propõem a utilização do resíduo de bauxita na confecção de tijolos, telhas, isolantes, etc. (NAKAMURA *et al.*, 1969; KARA, 2005; SINGH & GARG, 2005).

As pesquisas realizadas abrangendo a combinação entre a resíduo de bauxita e materiais cerâmicos, bem como demais componentes da mistura, em muitos casos 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 resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita. 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 resíduo de bauxita 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 no resíduo de bauxita (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).

Rossi, Ramos e Oliveira (2008) confeccionaram concretos de cimento Portland com uso de agregados graúdos constituídos de 80% de resíduo de bauxita e 20% de areia fina, com objetivo foi de comparar propriedades físicas e mecânicas de um concreto de referência foi produzido com seixo rolado.

Os corpos de prova compostos por agregados de resíduo de bauxita obtiveram valores de massa específica, semelhantes ao concreto de referência. No ensaio de resistência à compressão, o concreto constituído por agregados de resíduo de bauxita obteve valores de resistência em torno de 55% acima daqueles dosados com seixo rolado. Rossi, Ramos e Oliveira (2008), verificaram que as rupturas dos concretos dosados com seixo rolado ocorreram no próprio agregado, enquanto nos dosados com resíduo de bauxita a ruptura se deu na pasta cimentícia, comprovando a elevada resistência do resíduo de bauxita.

A partir dos estudos realizados com a resíduo de bauxita, 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).

No âmbito da pavimentação, a Kaiser Aluminium & Chemical Company utilizou a resíduo de bauxita como material para recobrimento de aterros e pavimentação (KIRKPATRICK, 1996).

Bezerra, Macêco e Souza (2010) realizaram uma comparação entre misturas asfálticas compostas por filler de cimento Portland (referência) e misturas asfálticas compostas por filler de resíduo de bauxita. Para fabricação de ambas as misturas utilizaram seixo, areia média e CAP 50/70 nas proporções mostradas na Tabela 4.

Bezerra, Macêco e Souza (2010) puderam observar a similaridade granulométrica da mistura, tanto para o cimento Portland, como para a resíduo de bauxita.

Tabela 4 - Proporção de agregados e ligante utilizados na fabricação de misturas asfálticas

Componentes	Mistura de referência	Mistura com resíduo de bauxita
Seixo (%)	56,58	56,46
Areia (%)	34,89	34,82
Fíler (%)	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 5.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização realizados por Bezerra, Macêco e Souza (2010)

Ensaio	Seixo	Areia	Cimento	Resíduo de bauxita	CAP 50/70
Massa Específica Real (g/m ³)	2,632	2,624	3,014	2,732	1,03
Massa Específica aparente	2,520	-	-	-	-
Equivalente de Areia (%)	-	78	-	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	55	5,9	-	-	-
Absorção (%)	1,79	-	-	-	-
Penetração (0,1mm)	-	-	-	-	58
Viscosidade Saybolt Furol	-	-	-	-	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 resíduo de bauxita, respectivamente.

Os autores constataram que a resíduo de bauxita 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 do resíduo de bauxita como filler na constituição de misturas asfálticas. Ambas as misturas seguiram os parâmetros volumétricos estabelecidos, conforme resultados apresentados na tabela abaixo, para ensaios de resistência à tração, estabilidade e fluência. Ressaltaram ainda, a necessidade de realizar análises ambientais para constatação da viabilidade.

Tabela 6 - Propriedades avaliadas por Bezerra, Macêco e Souza (2010)

Parâmetro	Mistura de referência	Mistura c/ resíduo de bauxita	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 (Kgf/cm ²)	880	900	>500
Vazios de agregado mineral (%)	16,85	17,2	-
Fluênciia (mm)	3,1	3,3	2,5-4,5
Resistência à tração (MPa)	2	2,11	-

Fonte: Bezerra, Macêco e Souza (2010)

2.6 MISTURAS ASFÁLTICAS

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada final que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. No Brasil, a camada de revestimento mais utilizada é o pavimento flexível que é constituída por misturas asfálticas produzidas com materiais (agregados e ligante asfáltico), sendo projetada para resistir aos esforços solicitantes de forma a garantir o melhor desempenho do pavimento.

No pavimento flexível o ligante é conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é definido como um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. A pavimentação é uma das aplicações mais importantes do CAP, e isso se deve ao fato de ser um material aglomerante, com grande adesividade, proporcionando forte união dos agregados e permitindo flexibilidade controlável. Este é impermeável, durável e resiste à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, podendo ainda ser utilizado com ou sem aditivos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Um dos tipos de misturas mais empregados no país são as misturas asfálticas betuminosas à quente, mais conhecidas como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Nestas misturas os agregados são aquecidos a elevadas temperaturas, liberando compostos orgânicos voláteis e fumaça ao serem misturados ao ligante, causando danos ao meio ambiente e à saúde do trabalhador.

As misturas asfálticas são classificadas como misturas a quente, mornas, semi-mornas e a frio. As misturas à quente são usinadas a temperaturas consideradas bastante elevadas, são aquelas em que o agregado é aquecido cerca de 10 a 15 °C acima da temperatura do ligante, que não deve ser superior a 177°C. (Bernucci *et al.*, 2010)

As pesquisas relacionadas à inserção do resíduo de bauxita 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.

2.6.1 Ligantes Asfálticos

Para ser utilizado em pavimentação, o asfalto, material termoplástico que é semi-sólido à temperatura ambiente, precisa ser aquecido para atingir a viscosidade adequada à mistura (>100°C). Além do aquecimento, as alternativas para tornar o asfalto trabalhável são a diluição com solventes derivados de petróleo e o emulsionamento. De forma geral, os ligantes asfálticos são classificados, de acordo com o seu processo de produção, em: cimento asfáltico, asfalto diluído e emulsão asfáltica (BERNUCII *et al.*, 2010).

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 (BERNUCII *et al.*, 2010).

O asfalto diluído resulta da mistura do cimento asfáltico com derivados de petróleo mais leves, que proporcionam produtos menos viscosos e podem ser aplicados a temperaturas mais baixas. Os asfaltos diluídos são classificados em função do tipo de solvente que é misturado ao CAP: cura rápida, CR (nafta), cura média, CM (querosene) e cura lenta, CL (gasóleo) (BERNUCCI *et al.*, 2010).

As emulsões asfálticas são constituídas pela dispersão de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, formando um produto estável que pode ser empregado em serviços de pavimentação à temperatura ambiente. De acordo com o tempo de ruptura, as emulsões são classificadas em três tipos: ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL) (ANP, 2005).

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.

No Brasil, a especificação do CAP estabelecida em 2005 (Tabela 7), 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 (BERNUCCI *et al.*, 2010).

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 7 - Especificação brasileira do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

	Unid.	Especificações				Norma DNIT
		CAP30/45	CAP50/70	CAP85/100	CAP150/200	
Penetração (100g, 5s, 25C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200	155-10
Ponto de amolecimento (min.)	C	52	46	43	37	131/10
Viscosidade Saybolt-Furol						
135C, min.		192	141	110	80	
150C, min.	S	90	50	43	36	abr/94
177C		40-150	30-150	15-60	15-60	
Viscosidade Brockfield						
135C, min., SP (*)		374	274	214	155	
21,20 rpm (**), min.						
150C, min.	cP	203	112	97	81	-
177C		76-285	57-285	28-114	28-114	
Índice de suscetibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-
Ponto de fulgor, min.	C	235	235	235	235	149/94
Solubilidade em tricloroetileno, min.	%massa	99,5	99,5	99,5	99,5	153/94
Durabilidade a 25C, min.	Cm	60	60	100	100	163/98
Efeito do calor e do ar a 163C por 85 minutos (RTFOT)						
Variação em massa, máx.	%massa	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Ductibilidade a 25C, min.	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)

Além da penetração, outros ensaios de caracterização devem ser realizados nas amostras de CAP, propriedades como viscosidade e susceptibilidade térmica do ligante virgem e envelhecido, devem ser satisfatórias às especificações, além dos ensaios de 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)

2.6.2 Misturas asfálticas com adição de resíduos da mineração

Neste tópico, é realizada uma breve explanação a respeito de pesquisas com utilização de resíduos da mineração em misturas asfálticas, a maior parte desses resíduos apresenta caracterização semelhantes à resíduo de bauxita.

Silva (2010) realizou análise laboratorial levando em consideração os aspectos físicos e mecânicos do uso de agregados alternativos, como a escória de aciaria em substituição aos agregados graúdos e miúdos convencionais, bem como o uso do resíduo de minério de ferro como material de enchimento alternativo (filler). O autor realizou ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga, creep estático, após o estudo, chegou à conclusão que as misturas alternativas mostraram desempenho mecânico satisfatório, ressaltando a qualidade desses resíduos na composição das misturas asfálticas e vantagens para o meio ambiente quando comparados aos agregados pétreos.

Apaza (2015), realizou estudo sobre a utilização de resíduos da mineração do ferro como agregado em misturas asfálticas do tipo micro revestimento a frio e lama asfáltica, sendo os resultados excelentes para as misturas com 15% de resíduo na composição granulométrica e satisfatórios para misturas com até 20% desse material alternativo.

Valadares (2016), analisou a viabilidade da utilização do resíduo de minério de ferro na composição dos agregados de misturas do tipo areia-as falto, cujos resultados remeteram sua aplicação apenas para vias de baixo tráfego.

Arêdes (2016), avaliou a utilização do resíduo de ferro como agregado em misturas do tipo concreto asfáltico. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando viabilidade técnica, através dos ensaios mecanísticos, e econômica, em função do comparativo financeiro realizado.

As areias de fundição apresentam curva granulométrica semelhantes às do resíduo de bauxita, e 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), cátabro, 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, classificou 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).

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).

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.

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 filler em misturas com a escória, proporcionou uma redução do volume de vazios, permitindo um arranjo estrutural estável e resistente da camada. A substituição do filler 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, 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.

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.*, (2011) 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).

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). 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).

Apesar de não terem sido realizados ensaios ambientais, Cardoso *et al.*, (2011) 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.

2.6.3 Influência da adição do filler em misturas asfálticas

Entre os fatores que influenciam diretamente a durabilidade de misturas asfálticas aplicadas em pavimentos está o teor e o tipo de filler utilizado. O atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) define filler como qualquer material de enchimento que passe pelo menos 65% na peneira Nº 200 (75 µm) (COUTINHO NETO, 2004), conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Granulometria do filler

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

Fonte: BRASIL (1997)

O filler 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 filler 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 filler 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 filler, 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 filler 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 filler: 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 filler na rigidez da mistura asfáltica, uma vez que quanto menor o tamanho de partícula do filler, maior é sua incorporação no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

O pó calcário utilizado como filler 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 ($20\mu\text{m}$), 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 ($60\mu\text{m}$). O pó de pedra, por sua vez, possui granulometria mais grossa com grande proporção de partículas maiores que 0,04 mm ($40\mu\text{m}$) (MOTTA; LEITE, 2000).

Cavalcante e Soares (2001) produziram misturas asfálticas utilizando seis tipos de filler: 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 filler (2% e 5%), e as misturas dosadas no teor de projeto. Os seis tipos de filler 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 9 são apresentados alguns resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados no estudo de Cavalcante e Soares (2001).

Tabela 9 - Granulometria e massa específica dos diferentes tipos de filler usados

Fíller	% 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 9 apresentam-se de forma decrescente de acordo com a granulometria, ou seja, o carbonato de magnésio é o filler 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 10.

Os autores observaram que houve uma tendência de redução do volume de vazios com o aumento do tamanho de grão do filler 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 filler, seja ele qual for. Com o aumento do teor de filler 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 filler, leva a um teor de ligante inferior para atender às mesmas especificações volumétricas da mistura asfáltica.

Tabela 10 - Parâmetros volumétricos de dosagem obtidos por Cavalcante e Soares (2001)

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

Fonte: Adaptado de Cavalcante e Sores (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 11.

Tabela 11 - Resultados de Resistência à tração (MPa) obtidos por Cavalcante e Soares (2001)

Fíler	Resistência à 2% de fíler	Tração (Mpa) 5% de fíler
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% filler. 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 filler 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 filler, podem provocar mudanças significativas nas misturas asfálticas, fazendo-se, portanto, necessária à caracterização física e química do material.

2.6.4 Uso de modificadores em ligantes asfálticos

A mistura de materiais betuminosos e polímeros, visando melhorar as características do ligante asfáltico, não é recente. A primeira patente da combinação de uma borracha natural com asfalto, a ser utilizada como impermeabilizante, foi obtida por T. Hancock em 1823. Já a primeira patente de uma mistura de material betuminoso com borracha natural para construção de estradas foi obtida por E.E. Castell em 1844 (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

Aplicações práticas de asfaltos modificados se iniciaram em 1901, quando a *Société du Pavage en Asphalt Caoutchoute* foi estabelecida na França. A primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época. O principal objetivo em se combinar asfalto com polímeros é inibir a formação de trincas por fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos, além de

aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente a altas temperaturas e a formação de trincas por origem térmica quando submetidos a baixas temperaturas (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

O uso de modificadores para melhorar as propriedades de um ligante em misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados visando melhorar o desempenho dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformação permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade (CONSTANTINO *et al.*, 1998).

Ainda segundo Constantino *et al.*, (1998), os principais tipos de modificadores utilizados em materiais asfálticos são os polímeros (SBR, SBS e EVA) e a borracha de pneus descartados moída (Tabela 12). Para Morilha Jr. (2018), a borracha reciclada é um dos melhores modificadores utilizados em materiais asfálticos para pavimentação, ficando atrás apenas dos polímeros.

Outras evidências de que borracha de pneus usados podem melhorar algumas propriedades físicas e aumentar a vida útil do pavimento foram apresentadas por Charania *et al.*, (1991), por Schnormeier (1980, 1983 e 1986) e por Roberts *et al.*, (1989), que obtiveram resultados que indicam uma redução de tensões internas do ligante asfáltico a baixas temperaturas, e consequente aumento da resistência à formação de trincas por origem térmica, quando são adicionados o polímero SBR e a borracha de pneus.

Tabela 12 - Principais modificadores utilizados em ligantes asfálticos e os defeitos que eles procuram evitar

TIPO DE MODIFICADOR	CLASSE	DEFEITOS		
		DP	TF	TT
Polímero-Elastômero	Copolímero Estireno-Butadieno (SB)	X	X	X
	Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)	X	X	X
	Borracha Estireno-Butadieno (SBR)	X	X	X
	Borracha de Pneus	X	X	X
Polímero-Plastômero	Copolímero Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	X	X	
Hidrocarboneto	Asfalto Natural	X	X	X
Fibra	Celulose	X		X
	Polipropileno	X	X	X
	Polyester	X		X
	Mineral	X	X	X

DP = Deformação Permanente; TF = Trincas por Fadiga; TT = Trincas Térmicas

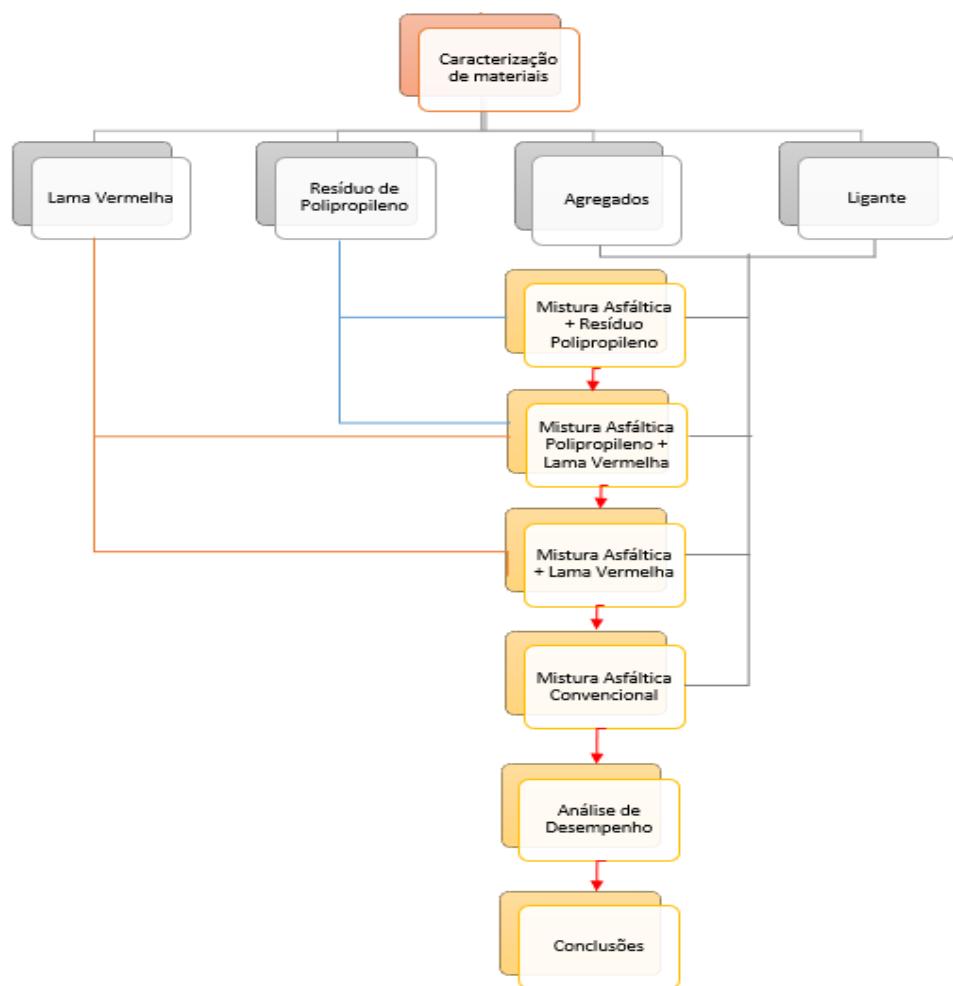
Fonte: BAHIA *et. al.*, (1998)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os principais materiais utilizados no estudo, assim como, métodos de caracterização, ensaios de desempenho mecânico, análises químicas e equipamentos empregados. O fluxograma da Figura 6 apresenta a estrutura da metodologia experimental.

Figura 6 - Etapas do programa experimental



Fonte: O Autor (2023)

Conforme abordado em diversas literaturas, o reaproveitamento de resíduos e rejeitos dos mais diversos processos industriais traz enormes benefícios econômicos, sociais e ambientais, a substituição dos materiais convencionais por resíduos e rejeitos, reduz o consumo de matéria prima, contribuindo para preservação do meio ambiente. Nesta toada, buscando a melhor alternativa técnica para o reuso e a reciclagem do rejeito de bauxita (resíduo de bauxita) e rejeito de garrafão de água mineral (polipropileno), apresentamos a etapa de experimentos, que consistirá na realização dos seguintes procedimentos.

Neste trabalho será avaliado o desempenho da mistura asfáltica tipo CBUQ constituídas por CAP 50/70, adicionadas com resíduo de bauxita e ou resíduos de garrafão de água mineral, a fim de obter resultados de desempenho compatíveis com os parâmetros Marshall e resistência a tração por compressão diametral, obtidos em uma mistura de referência, além disso, será avaliado o melhor desempenho entre as misturas compostas por resíduo de bauxita e resíduo de garrafão de água mineral, utilizando a influência da porcentagem de resíduo de bauxita e resíduo de polipropileno no comportamento da mistura asfáltica, não menos importante será realizada a avaliação da qualidade da água e possível liberação do resíduo, com objetivo de fornecer subsídios para a classificação ambiental da resíduo de bauxita.

Tendo em vista analisar a influência do resíduo na constituição das misturas, variaram-se os teores de resíduo de bauxita. Dessa forma, foram fabricadas misturas com 0%, 3%, 5% e 7% de resíduo de bauxita, misturas utilizando o polipropileno resíduo do garrafão de água mineral nos teores de 1%, 3% e 5%, misturas utilizando como filler 3% de Resíduo de bauxita e 3% de Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral, além da mistura com 0% de resíduo de bauxita e 3% de gesso como filler que foi considerada de referência. Todas as misturas foram dosadas seguindo o mesmo teor de ligante, levando em consideração os parâmetros volumétricos estabelecidos pelo método Marshall. Para tanto, utilizou-se uma curva granulométrica empírica, correspondente à média da Faixa “C” do DNIT.

A introdução do resíduo de bauxita 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 através da análise físico-química das amostras, conforme requisitos estabelecidos pela NBR ISO IEC 17025:2018 e RDC 11/2012 do Ministério da Saúde - ANVISA, comparando concentrações de alumínio e ferro, além da avaliação do pH.

A resíduo de bauxita 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 10004 (ABNT, 2004).

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A caracterização do resíduo de bauxita foi realizada utilizando literatura existente, com ensaios já realizados para amostras de resíduo de bauxita coletadas no site da Hydro Alunorte em Barcarena, as informações obtidas tratam 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;

A Caracterização dos agregados minerais, foi realizada por meio dos ensaios de análise granulométrica (DNER-ME 083/98), índice de forma NBR 7809 (ABNT, 2005), 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);

A Caracterização do ligante (CAP 50/70) foi realizada por meio dos ensaios de ponto de amolecimento (DNIT-ME 131/10), penetração (DNIT-ME 155/10), viscosidade aparente (viscosímetro rotacional Brookfield; NBR 15184 (ABNT, 2004)).

Com a caracterização dos agregados minerais, foi então realizada a determinação da faixa e composição granulométrica a ser utilizada para moldagem dos corpos de prova e em seguida adotou-se o teor de ligante (5,2%) para o traço padrão, como o único para todas as misturas de CBUQ.

Para cada mistura betuminosa foram preparados 06 (seis) corpos de prova, totalizando 48 (quarenta e oito) corpos de prova, sendo 03 (três) corpos de prova para o ensaio Marshall e 03 (três) corpos de prova para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, dispostos da seguinte forma:

- ✓ Mistura 01: Traço padrão de CBUQ que não continha qualquer resíduo (resíduo de bauxita e polipropileno)
- ✓ Mistura 02: Traço padrão utilizando como filler 3% de Resíduo de bauxita
- ✓ Mistura 03: Traço padrão utilizando como filler 5% de Resíduo de bauxita
- ✓ Mistura 04: Traço padrão utilizando como filler 7% de Resíduo de bauxita
- ✓ Mistura 05: Traço padrão sem filler utilizando 1% de Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral
- ✓ Mistura 06: Traço padrão sem filler utilizando 3% de Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral
- ✓ Mistura 07: Traço padrão sem filler utilizando 5% de Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral
- ✓ Mistura 08: Traço padrão utilizando como filler 3% de Resíduo de bauxita e 3% de Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral.

Realizada a análise da água residual dos corpos de prova imersos, por meio da avaliação de pH e concentrações de ferro e alumínio (realizado com corpos de prova das Misturas 1, 2 e 3 condicionados a 60°C). Os resultados foram comparados a água de abastecimento público.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção das misturas asfálticas são a resíduo de bauxita, polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral, ligante asfáltico (CAP 50/70), agregados graúdos e miúdos.

3.3.1 Resíduo de bauxita

A resíduo de bauxita 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 do resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita 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 7.

Figura 7 - Resíduo de bauxita destorroada

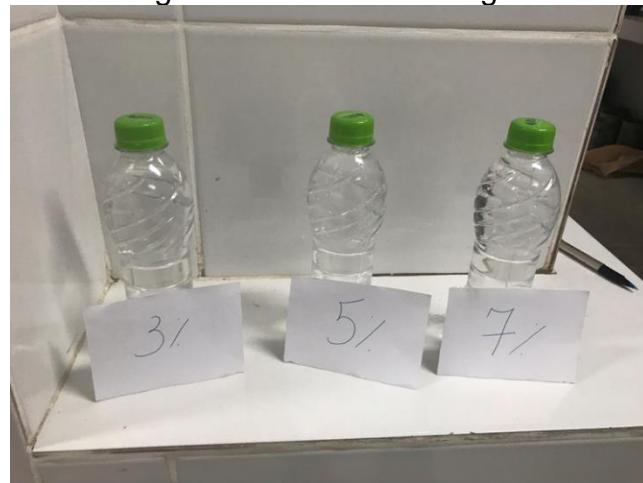


Fonte: O Autor (2023)

A resíduo de bauxita foi avaliada quanto aos critérios de corrosividade e toxicidade, que permitiu classificá-la ambientalmente conforme a normativa de resíduos sólidos NBR 15184 (ABNT, 2004).

A fim de analisar possíveis contaminações que a inserção de resíduo de bauxita às misturas asfálticas pode vir a ocasionar, foi realizada uma análise da qualidade da água, aferindo o pH e possíveis variações na concentração de alumínio e ferro, na Figura 8 é possível observar a separação das amostras de água.

Figura 8 - Amostras de água



Fonte: O Autor (2023)

- **Fluorescência**

Os elementos presentes no resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita com granulometria inferior a 0,15 mm (150 µm).

- **Massa específica**

A massa específica do resíduo de bauxita 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.

- **Granulometria a laser**

A granulometria do resíduo de bauxita 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.

- **Superfície específica**

Com informações de massa específica e granulometria do resíduo de bauxita pôde ser calculada a superfície específica do resíduo.

No Brasil, a superfície específica dos agregados tem sido calculada utilizando uma adaptação da fórmula de Duriez, conhecida como fórmula de Vogt, conforme Equação 1, sendo o resultado expresso em m^2/g (SILVEIRA, 1999; MOREIRA, 2005; BERNUCCI, *et al.*, 2010).

$$\Sigma = 0,07P4 + 0,14P3 + 0,33P2 + 0,81P1 + 2,7S3 + 9,15S2 + 21,9S1 + 135F \text{ eq. (1)}$$

Onde:

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 13.

Tabela 13 - 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)

- **Agregados**

Os agregados utilizados neste trabalho são de origem granítica e foram cedidos pela empresa Terraplena, localizada no distrito industrial de Icoaraci, município de Belém, Estado do Pará. Para composição das misturas asfálticas foram utilizados seixo fino do município de Ourém e Areia do município de Santo Antônio do Tauá, ambos localizados no estado do Pará.

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

- **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 duas amostras diferentes de seixo fino e areia.

- **Índice de Forma**

A norma utilizada para realização deste ensaio foi NBR 7809 (ABNT, 2005): 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.

- **Massa específica**

Os agregados graúdos (seixo fino) foram ensaiados conforme normativa DNER-ME 081/98, e o agregado miúdo (areia), conforme normativa DNER-ME 084/95. Os resultados obtidos são oriundos da média de três determinações.

- **Superfície específica**

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

- **Abrasão Los Angeles**

O ensaio de abrasão Los Angeles, normatizado pela DNER-ME 035/98, foi realizado com agregado graúdo. Os resultados foram obtidos a partir da média de duas determinações.

- **Adesividade**

A adesividade, normatizada pela DNER-ME 078/94, 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 no seixo fino e o DOPE utilizado foi fornecido pela Empresa Terraplena.

- **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 seixo fino.

- **Ligante**

O ligante utilizado neste trabalho é o CAP 50/70, fornecido pela empresa Terraplena LTDA, Belém, Pará. A caracterização do ligante foi realizada por meio de ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade.

- **Penetração**

O ensaio de penetração é regulamentado pela normativa DNIT- ME 155/10 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 finais correspondem a média de cinco penetrações realizadas conforme estabelecido em norma.

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

- **Viscosidade**

A determinação da viscosidade aparente do ligante foi realizada em viscosímetro rotacional do tipo *Brookfield*, normatizado pela ABNT NBR 15184 (ABNT, 2004). Os resultados foram obtidos a partir do ensaio de uma amostra de CAP 50/70.

- **Análise da qualidade da água**

Neste trabalho, a análise da qualidade da água proveniente condicionamento dos corpos de prova a 60°C, é de caráter preliminar e têm objetivo de fornecer informações a respeito de possíveis desprendimentos de resíduo de bauxita da mistura asfáltica.

O condicionamento dos corpos de prova a 60°C foi realizado em equipamento com uma capacidade para 60 litros, o recipiente é munido de resistências responsáveis por controlar a temperatura, de maneira que a mesma temperatura possa ser mantida em todo o equipamento.

Os corpos de prova constituídos por 3%, 5% e 7% de resíduo de bauxita 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.

Por serem elementos representativos no resíduo de bauxita, 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).

3.4 DOSAGEM MARSHALL

Para realização da dosagem foram compactados aproximadamente 48 (quarenta e oito) corpos de prova, contendo em torno de 1200 quilogramas (kg) cada, sendo dispostos da seguinte forma:

(a) 18 (dezoito) corpos de prova para os teores de 3%, 5% e 7% de resíduo de bauxita, sendo 03 (três) corpos de prova para o ensaio Marshal e 03 (três) corpos de prova para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, totalizando um montante de 06 (seis) corpos de prova por teor de resíduo de bauxita;

(b) 18 (dezoito) corpos de prova para os teores de 1 %, 3% e 5% de polipropileno, sendo 03 (três) corpos de prova para o ensaio Marshal e 03 (três) corpos de prova para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, totalizando um montante de 06 (seis) corpos de prova por teor de polipropileno;

(c) 06 (seis) corpos de prova para mistura padrão de CBUQ que não continha qualquer resíduo (resíduo de bauxita e polipropileno), sendo 03 (três) corpos de prova para o ensaio Marshal e 03 (três) corpos de prova para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, totalizando um montante de 06 (seis) corpos de prova;

(d) 06 (seis) corpos de prova para mistura de CBUQ com 3% de resíduo de bauxita e 3% de polipropileno, sendo 03 (três) corpos de prova para o ensaio Marshal e 03 (três) corpos de prova para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral, totalizando um montante de 06 (seis) corpos de prova contendo a mistura dos resíduos de resíduo de bauxita e polipropileno;

Adotou-se o teor de ligante (5,2%) do traço padrão, como o único teor para todas as misturas com 3%, 5% e 7% de resíduo de bauxita, com 1 %, 3% e 5% de polipropileno e para a mistura com 3% de resíduo de bauxita + 3% de polipropileno.

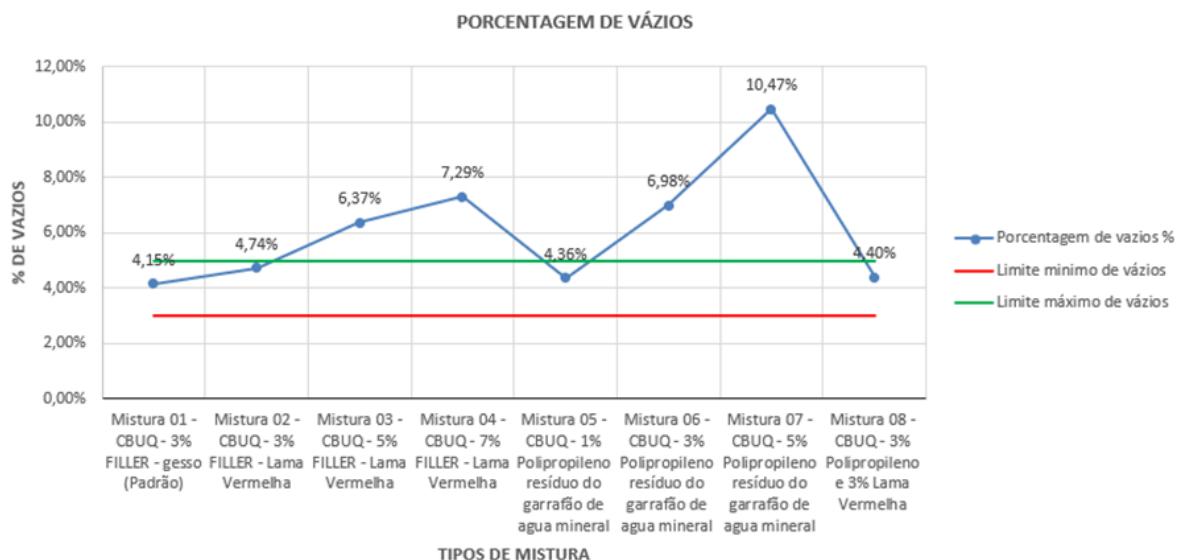
Os corpos de prova foram preparados um a um, dosados, utilizando material previamente peneirado para obedecer com exatidão as porcentagens previamente calculadas para cada tipo de agregado e aglomerante. Os agregados foram aquecidos em estufa para que se garanta a temperatura de mistura e compactação, de modo a se aproximar ao máximo da realidade das usinas brasileiras, logo após os agregados saírem da estufa, foram adicionados ao ligante CAP 60/70 que estava sendo pré-aquecido em um recipiente no fogão, cuja temperatura estava sendo controlada por meio de um termômetro, a mistura toda foi aquecida no fogão até que se atingisse a temperatura ideal para a compactação. E em seguida compactado com 75 golpes em cada face utilizando o compactador manual.

Após 24 horas da compactação foi utilizado o paquímetro para determinação das dimensões dos corpos de prova e a balança hidrostática para determinar a Massa Seca (M_s) e a Massa Submersa (M_{sub}) de cada CP. Com as dimensões e volumetria determinadas, os corpos de prova foram imersos em banho-maria a 60 °C, por um período de 30 minutos e então levados a prensa *Marshall* para determinação de estabilidade e fluênciia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados desta pesquisa. O Gráfico da Figura 9 apresenta os valores de porcentagem de vazios.

Figura 9 - Porcentagem de vazios

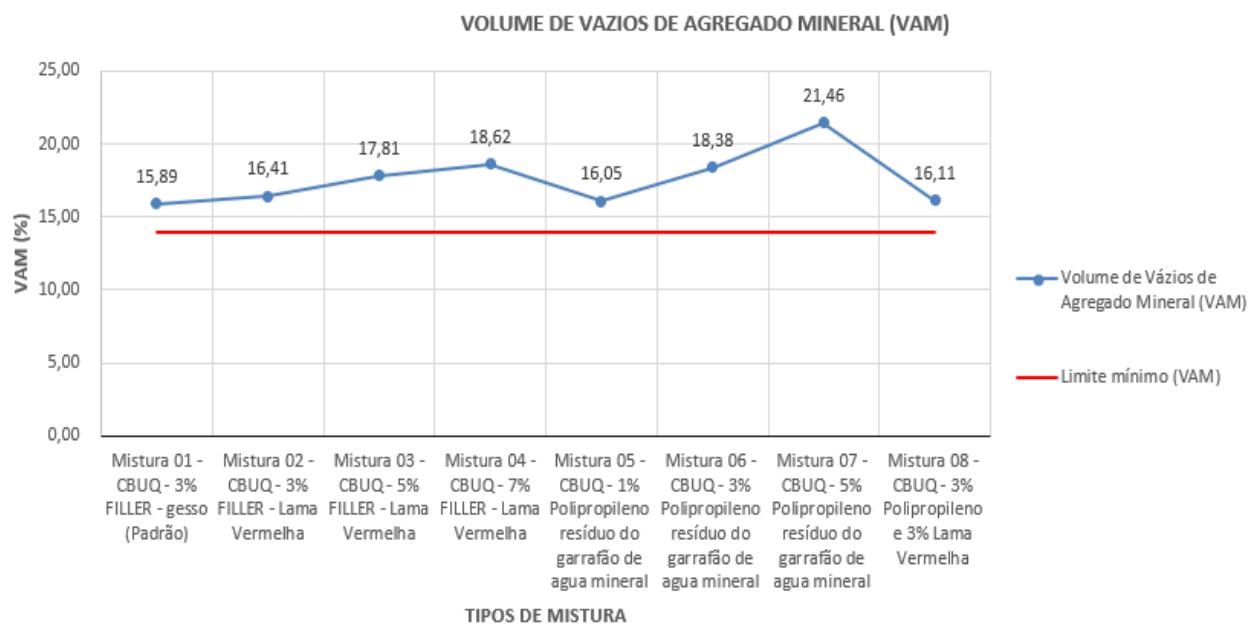


Fonte: O Autor (2023)

Nota-se a partir do gráfico acima que apenas quatro dos valores encontrados estão dentro da faixa de 3,0% e 5,0% de Volume de Vazios, mas como era de se esperar, quando se adota uma porcentagem muito mais alta de material fino (resíduo de bauxita e polipropileno resíduo) com superfície específica elevada, promove-se um maior consumo de ligante, como o teor de ligante utilizado para todas as misturas foi igual (5,2%), o volume de vazios teve um aumento, à medida que se aumentava o percentual de material fino, pois o betume não consegue preencher os mesmos de maneira eficiente. Da mesma forma, se fosse adotado uma porcentagem de ligante muito alta, o betume preencheria todos os vazios e isso prejudica o desempenho do pavimento, uma vez que com a compactação dos agregados pelo alto fluxo de veículos, o asfalto exsuda gerando o conhecido problema de pistas derrapantes.

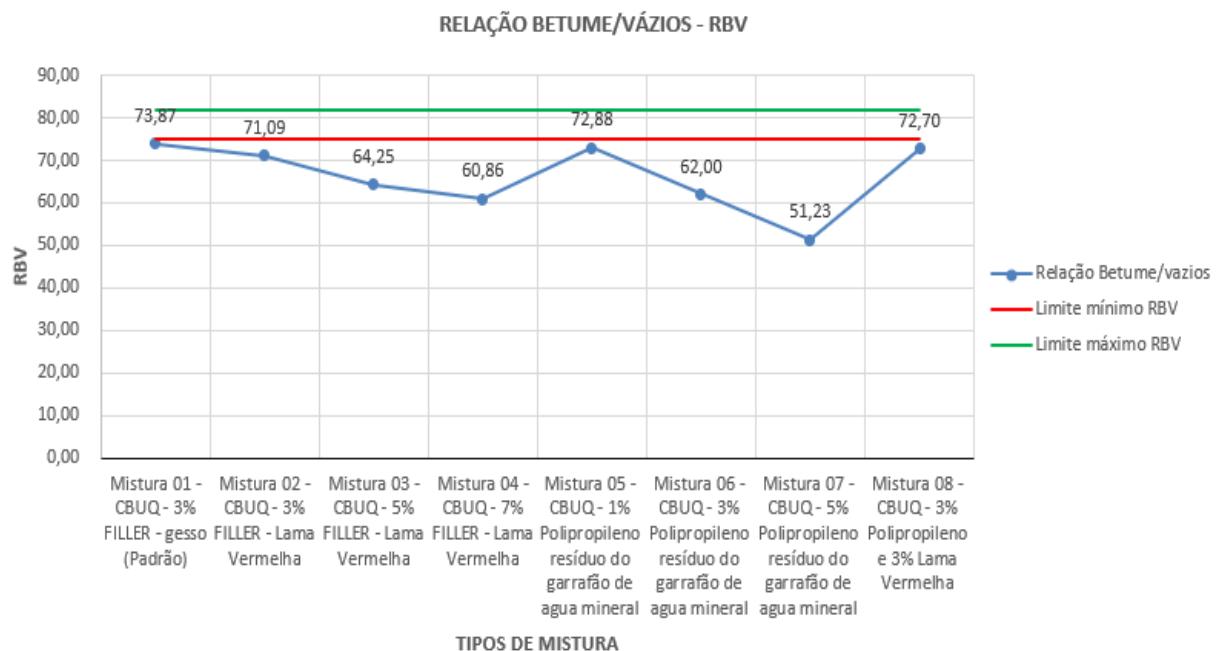
Conforme estabelece a norma ME 043 (DNER, 1995), para a faixa C só são aceitos valores de VAM maiores do que 14%, então todos os valores encontrados atendem essa exigência, conforme demonstrado no Gráfico da Figura 10, contudo, como é possível notar ao se determinar a mistura ideal para o projeto, o valor de RBV tem influência direta na segurança e parâmetros mecânicos da mistura asfáltica, nesta toada, observa-se no Gráfico da Figura 11 que os valores obtidos na mistura não atendem o que determina norma ME 043 (DNER, 1995), que estabelece valores de 75 à 82, entretanto, alguns desses valores podem se enquadraram com um estudo do aumento do teor de ligante, todavia, não se pode afirmar que o teor de ligante influenciou substancialmente na compactação das misturas, visto que todas as misturas foram moldados com o mesmo teor de ligante, e obtiveram os parâmetros volumétricos requeridos, além de um grau de acomodação de grãos semelhante.

Figura 10 - Volume de vazios de agregado mineral



Fonte: O Autor (2023)

Figura 11 - Relação de Betume/Vazios - RBV



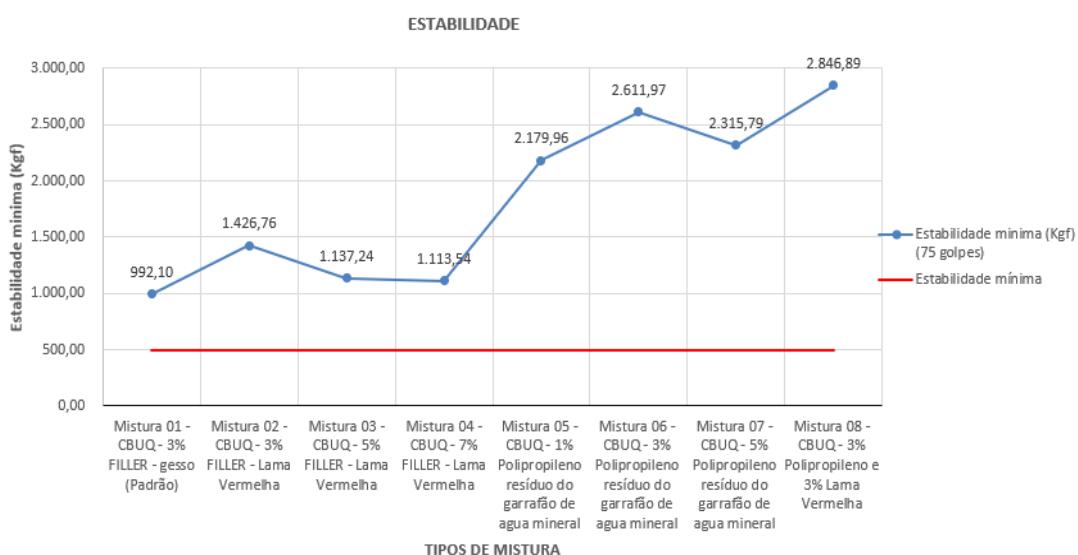
Fonte: O Autor (2023)

Conforme explicito acima, no que diz respeito a Relação Betume Vazios (RBV), todas as misturas 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 01 (traço padrão), mistura 02 (3% de resíduo de bauxita), mistura 05 (1% de polipropileno resíduo do garrafão de água mineral) e mistura 08 (3% Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral e 3% Resíduo de bauxita) foram consideradas aceitáveis.

Ademais, foi calculado um valor de estabilidade corrigida (N) que é a média dos valores encontrados para os três corpos de prova de cada mistura asfáltica. Para entender a importância desse parâmetro, é necessário analisar o que ocorre neste ensaio. Devido à resistência do material ensaiado, é necessária uma força crescente para manter o prato inferior movendo-se na taxa especificada. Esta força cresce até um determinado ponto em que ocorre uma perda de estabilidade do material, causada por deslocamento ou quebra de agregados. A carga máxima correspondente a este ponto que foi denominada estabilidade Marshall.

O pavimento advindo de uma mistura com valores de estabilidade altos pode ser submetido a maiores intensidades de tráfego, sem apresentar risco a segurança e ao conforto dos usuários. No caso das misturas avaliadas neste trabalho, os resultados estão demonstrados no Gráfico da Figura 12 a seguir, de acordo com a norma, os valores de estabilidade (N) precisam ser maiores do que 500 kgf para que se possa aceitar a mistura como camada de rolamento, como se pode observar no gráfico supracitado acima, todos os valores encontrados são bem maiores que a exigência normativa.

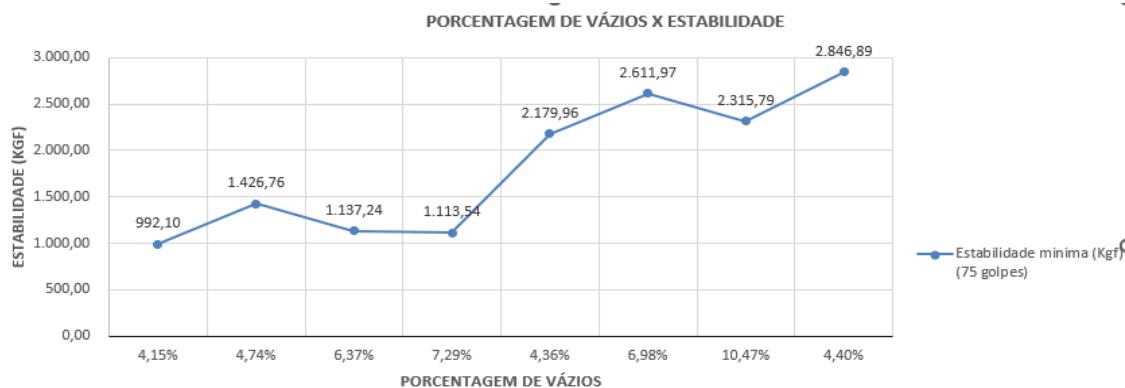
Figura 12 - Estabilidade



Fonte: O Autor (2023)

Como era de se esperar, o Gráfico da Figura 9– Porcentagem de vazios demonstra que quanto maior o teor de finos (resíduo de bauxita e polipropileno resíduo) maior será a porcentagem de vazios, e, portanto, maior será a superfície específica que é determinante para um maior consumo de ligante, nota-se que o teor de ligante usado nas misturas não foi suficiente para preencher a quantidade de vazios, tornando-se necessário um aumento da quantidade de ligante na mistura, contudo, quando essa quantidade de ligante passa a ficar muito alta, o RBV se aproxima de 100% e começa a estabilizar. Um RBV de 100% significa que todos os vazios estão completamente preenchidos com betume. Essa situação é perigosa pois impede a permeabilidade da mistura asfáltica e atrapalha a vida útil do pavimento.

Figura 13 - Porcentagem de vazios x estabilidade



Fonte: O Autor (2023)

Figura 14 - Relação Betume/Vazios x Estabilidade



Fonte: O Autor (2023)

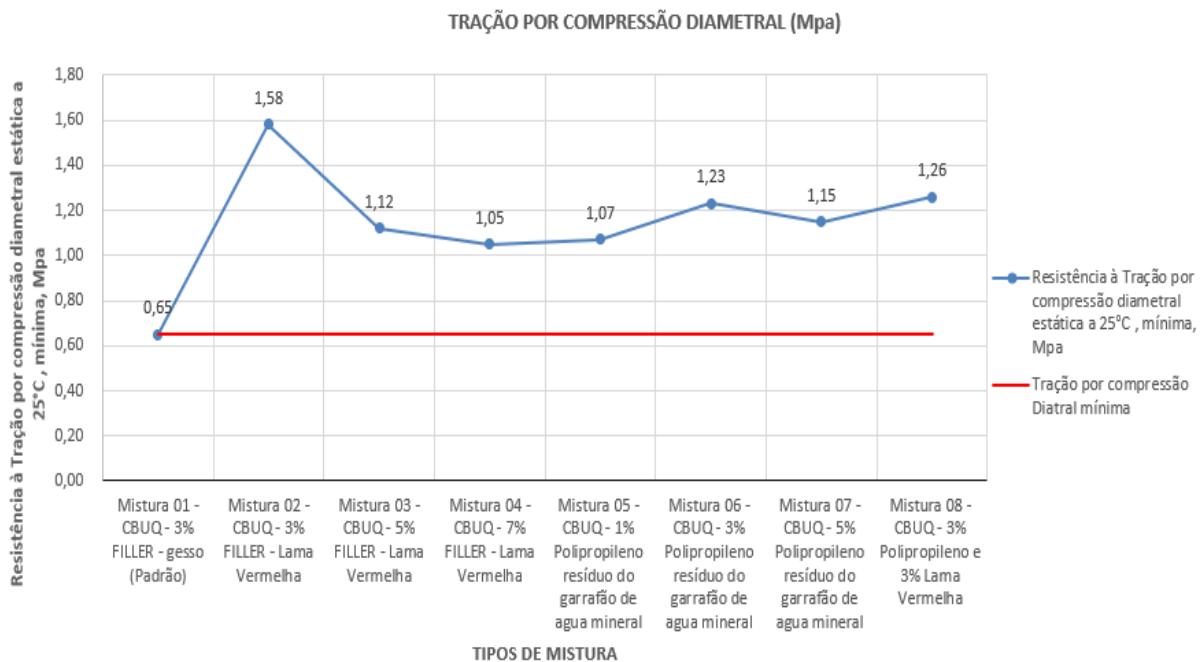
Conforme demonstrado nos Gráficos das Figuras 13 e 14, o aumento da porcentagem de vazios está diretamente ligada a necessidade de preenchimento de vazios com ligante, em apertada síntese, quando aumenta-se o teor de ligante na mistura, o que ocorre com o aumento da Relação Betume/Vazios (RBV), aumenta-se também a estabilidade da mistura e isso já era esperado, pois o que ocorre é que se está preenchendo melhor os vazios e deixando a mistura mais uniforme. Destaca-se que para todas as misturas asfálticas deve se manter uma certa percentagem de vazios, pois com o tempo os agregados tendem a se compactar sob a ação do tráfego e o asfalto tende a subir para a superfície da capa de rolamento (exsudação). Este fato cria o conhecido problema das pistas derrapantes, devido à película de asfalto que aparece no topo de uma camada de concreto asfáltico. Outra razão de se manter os vazios em certo intervalo de valor

é a característica da variação de volume do asfalto por influência da temperatura, o que causaria o mesmo problema, se os vazios não existissem.

Outro ponto importante demonstrado nos Gráficos das Figuras 13 e 14, é que para as misturas utilizando polipropileno resíduo do garrafão de água mineral, onde na medida em que se aumentava o percentual de resíduo na mistura, os valores de vazios aumentavam e a Relação Betume/vazios diminuía, o que é um processo natural, conforme explicitado acima, entretanto, para estas misturas quando se diminuía a Relação Betume/Vazios a estabilidade da mistura ainda conseguia aumentar.

Com relação as misturas submetidas ao ensaio de resistência a tração (RT), através do ensaio de compressão diametral. De acordo com a norma do DNIT ME – 136 (DNIT, 2010) que substitui a ME 138 (DNER, 1994). Foi aplicada de maneira progressiva a carga, com velocidade de deformação de 0,8 mm/s, até que se observou a ruptura. Com o valor obtido de carga de ruptura, foi calculada a resistência a tração do corpo de prova rompido, é especificado na norma DNIT ME – 136 (DNIT, 2010), que é necessário para utilização da mistura asfáltica em pavimentos de rolamento um valor de resistência a tração superior a 0.65 Mpa. Como é possível analisar no Gráfico da Figura 15, onde o valor encontrado é muitas vezes superior ao exigido, assim como no parâmetro de estabilidade, o aumento na resistência a Tração se deve ao fato da adição de Resíduo de bauxita e Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral, que retrata a melhoria dessa mistura em terá capacidade para aguentar as cargas as quais um pavimento é submetido.

Figura 15 - Tração por Compressão Diametral



Fonte: O Autor (2023)

A norma NBR 10.004 (ABNT, 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 para constatar se existem substâncias em concentrações superiores as permitidas NBR 10.004 (ABNT, 2004). Neste trabalho, contudo, o resíduo de bauxita pôde ser classificada apenas com os resultados da análise química, sem que houvesse necessidade de realizar ensaios adicionais.

Todos os ensaios de qualidade da água foram realizados pelo laboratório Multianalises S/S LTDA, sendo dispostos os seguintes resultados:

- a) o pH do resíduo com resíduo de bauxita a 3% apresentou um valor de 5,81 ± 0,10, conforme certificado de Análise nº 5FBC0B659593B160615920500483B8117DB8F201;
- b) o pH do resíduo com resíduo de bauxita a 5% apresentou um valor de 6,12 ± 0,10, conforme certificado de Análise nº 5FBC0B6AE33421606159210C6000B2B6B4DCD252 e;
- c) o pH do resíduo com resíduo de bauxita a 7% apresentou um valor de 6,16 ± 0,10, conforme certificado de Análise nº 5FBC0B6ABBC1516061592105A20B258F4D8E1418, que conforme a norma, não caracteriza a resíduo de bauxita como uma substância corrosiva.

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, ademais, todas as amostras analisadas apresentaram 0,00 (zero) mg/L de alumínio, cujo os valores se encontram dentro dos parâmetros estabelecidos pela portaria de consolidação nº 05 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde que estabelece um valor máximo permitido de alumínio de 0,1 mg/L como padrão de aceitação para água de consumo humano.

Com relação ao ferro todas as amostras analisadas se apresentaram dentro do padrão de potabilidade, pois, estavam abaixo da concentração limite de 0,3 mg de ferro para cada litro de água. 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, contudo, para as amostras analisadas atende os padrões potabilidade.

O pH é um parâmetro importante em muitos estudos no campo do saneamento ambiental. De acordo com a Portaria de consolidação nº05/2017 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 todos se encontram dentro dos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Cabe ressaltar que a água sem ensaio provém diretamente do abastecimento de água público.

Os valores obtidos com a água proveniente do condicionamento dos corpos de prova a 60°C encontram-se dentro dos padrões de referência e, portanto, não indicam a liberação do resíduo de bauxita 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 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a possibilidade de aplicação do resíduo proveniente do processamento da bauxita em misturas asfálticas tipo CBUQ, compostas por CAP 50/70 em três diferentes porcentagens, além da possibilidade de adição de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral na mistura isoladamente e integrado com a resíduo de bauxita.

Foram analisados os resultados do ensaio de tração por compressão diametral estática a 25°C mínima, Mpa e também analisados todos os parâmetros do ensaio *Marshal* (Porcentagem de vazios, Relação Betume/Vazios (RBV) e Estabilidade das misturas asfálticas compostas de 3%, 5% e 7% de resíduo de bauxita, misturas asfálticas compostas de 1 %, 3% e 5% de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral, mistura padrão de CBUQ que não continha qualquer resíduo (resíduo de bauxita e polipropileno), misturas asfálticas compostas de 3% de resíduo de bauxita e 3% de polipropileno.

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

A liberação do resíduo de bauxita da mistura asfáltica pôde ser confirmada com a análise da qualidade da água, que constatou o aumento do pH para as concentrações com maior teor de resíduo de bauxita. A análise da qualidade da água após o condicionamento de corpos de prova constituídos por resíduo de bauxita foi realizada avaliando o pH e concentrações de ferro e alumínio, os resultados foram comparados com a água de abastecimento público.

Embora o pH e a concentração de ferro e alumínio tenham sido consideradas satisfatórias quanto aos valores normatizados, 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 resíduo de bauxita em misturas asfálticas não é capaz de provocar contaminações ao ambiente. Dessa forma, os indícios de liberação do resíduo de bauxita não são suficientes para inviabilizar a aplicação do resíduo em misturas asfálticas, sendo necessárias avaliações mais precisas e aprofundadas em trabalhos futuros.

As misturas constituídas com maior porcentagem de resíduo de bauxita obtiveram melhores resultados no que se refere ao desempenho com relação ao ensaio de tração por compressão diametral estática a 25°C mínima, Mpa, e parâmetros *marshall*, logo, entende-se que tão importante quanto à determinação de uma quantidade de filler a ser inserida são as propriedades químicas e físicas do material.

De maneira geral, as misturas asfálticas constituídas por resíduo de bauxita obtiveram resultados superiores aos da mistura de referência, principalmente no que diz respeito aos valores de estabilidade da mistura e ensaio de tração por compressão diametral estática a 25°C mínima. Em apertada síntese, entende-se que a resíduo de bauxita aumentou a resistência a tração por compressão diametral e estabilidade da mistura asfáltica

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 do resíduo de bauxita 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 do resíduo de bauxita 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 do resíduo de bauxita 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 o resíduo de bauxita pode vir a ocasionar em lençóis freáticos;
- Utilizar agregados de caráter eletropositivo para compor misturas com resíduo de bauxita;
- Estudar a incorporação de porcentagens superiores a 7% de resíduo de bauxita em outros tipos de ligante;
- Avaliar o comportamento à deformação permanente e ao dano por umidade induzida de misturas asfálticas com resíduo de bauxita utilizando o teor de projeto da mistura de referência;
- Realizar o estudo de comportamento reológico e desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com resíduo de bauxita.

6 REFERÊNCIAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio, 2013 B. Disponível em:<<http://www.abal.org.br/estatísticas/nacionais/bauxita>>. Acesso em: 18 setembro 2020.

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. Associação Brasileira do Alumínio, 2015. Disponível em:<<http://www.abal.org.br/estatísticas/nacionais/bauxita>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

AREDES, M. L. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 14222 (2019). **Embalagem plástica para água mineral e potável de mesa – Garrafão retornável – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

AMBROISE, J.; PERA, J. *Red mud, an interesting secondary raw material. CIB - symposium 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.

3

ARAGÃO, L. de P., & TAMIARANA, R. A. (2021). **Aplicabilidade dos pressupostos da economia circular na indústria de água mineral.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 10(1), 203–220. Recuperado de https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/7621.

ABINAM. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÁGUAS MINERAIS, 29º Congresso Brasileiro da Indústria de Águas Minerais & Expo-ABINAM&SINDINAM'2022. Disponível em: <<https://www.abinam.com.br/congresso-e-expo-abinam/>>, acessado em: 12/12/2022.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T. D.; NAVARRO, G. R. B. **Caracterização da Resíduo de bauxita Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras. Artigo científico,** in: *3rd International Workshop | Advances in Cleaner Production*, 2011.

APAZA, F. R. A. **Estudo de mistura asfáltica contendo resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BARDINI, V. S. D. S.; JÚNIOR, J. L. F.; KLINSKY, L. M. G. **Influência do filler mineral nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas.** XXIII ANPET. [S.I.]. 2009.

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

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

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.

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.

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

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** Dissertação de Mestrado, 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.** 33^a 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 fillers.** 34^a 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.

CHAVES, A. G. F. **A lama vermelha e sua eliminação da fábrica de alumina,** In: 2º semana de estudos. Alumínio e Zinco. Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos dos Alunos da Escola de Minas de Ouro Preto, n. 2, Ouro Preto, Minas Gerais, 1962.

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

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 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.

CONSTANTINO, R.S., LEITE, C.F.M., GONÇALVES, M.L.A (1998) - **Avaliação da Faixa de Plasticidade e da Viscoelasticidade de Asfaltos Modificados com Polímero.** 14ºEncontro do Asfalto, pp60-70.

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. XII, p. 50-57, dezembro 2004.

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).

FAHEY, M., NEWSON, T. A. e FUJIYASU, Y., *Engineering with tailings*, In: *Environmental Geotechnics*, v. 2, Balkema, pp. 947-973, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

FERNANDES, M. R. S.; FORTE, M. M. C.; LEITE, L. F. M. (2007). **Caracterização de Asfaltos Modificados com SBS.** 38ª Reunião Anual de Pavimentação, 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Manaus, AM, Brasil.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Dissertação de Mestrado – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

FHWA. *Superpave Mixture: Design Guide. Federal Highway Administration. U.S. Department Transportation. Westrak 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.I.], p. 541. 2009.

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.

GARCIA, M. C. S. **Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo bayer por tratamento térmico.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 102. 2012.

HABASHI, F. *A short history of hydrometallurgy.* Hydrometallurgy, v. 79, p. 15-22, 2005. ISSN 0304-386X.

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.; GROCOTT, 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. **Como a alumina é extraída da bauxita.** A Hydro no Brasil, 2013B. 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. 2021.

IAI. *Bauxite Residue Management: Best Practice. International Aluminium Institute. World Aluminiun. European Aluminium Association.* [S.I.], p. 32. 2013.

JAMAICAN BAUXITE CASE, <http://www.american.edu./TED/Jamaica.htm> Acessado em maio de 2006.

KARA, M. BCR - *From Byproduct To Brick: Using Red Mud Waste as a Construction Material,* http://www.ceramicindustry.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,2710,8119,00.html. Acessado em setembro de 2005.

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.

KIRKPATRICK, D.B., *Red mud product development, The Minerals, Metals & Materials Society*, 1996.

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.

LI, L. Y., *A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings*, *Waste management*, n. 21, pp. 525-534, 2001.

LIMA, F. S. S. **Utilização da Resíduo de bauxita e do Resíduo Caulinítico na Produção de Pigmento Pozolânico para Argamassas e Concretos de Cimento Portland.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará - UFPA. Belém/PA. 2006.

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 resíduo de bauxita e argila.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. XI, n. 4, p. 25-36, outubro/dezembro 2011. ISSN 1678-8621.

MANFROI, E. P. **Avaliação do resíduo de bauxita 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.

MARTIRES, R. A. C. **Balanço Mineral Brasileiro 2001 - ALUMÍNIO.** DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília/DF, p. 31. 2001.

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.

MELLO, L. G. R. (2008). **O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas.** Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF.

MIRANDA, et al., **Sustentabilidade – ODS 18 – Gestão ambiental nas empresas.** Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – Programa de pós-graduação em Economia FEA/PUC-SP, São Paulo, 2019.

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.

MORILHA JR., A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das**

misturas asfálticas. 2004. 165 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Acesso 11 de Setembro de 2018.

MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. M. F. **Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas.** XI PANAM. Brasil, p. 09-19. 2000.

NAKAMURA, H. H., BORTZ S. A E SCHWARTZ, M. A., "Use of Bauxite wastes for lighweight nuilding products", In: *71st Annual Meeting of the American Ceramic Society*, pp. 248-250, Washington, D. C., Estados Unidos, 1969.

NAIME, Roberto. **Gestão de Resíduos Sólidos: Uma Abordagem Prática.** Novo Hamburgo: Editora Feevale. 2005. 134 p.

NGUYEN, Q. D., BOGER, D. V., Application of rheology to solving tailings disposal problems, *International journal of Mineral Processing*, n. 54, pp. 217-233, 1998.

NUNN, R. F. *Advances in red mud dewatering and disposal technologies. J. Light Metals - The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale*, 1998. p. 107-114.

PAN, Z., LI, D., YU, J., YANG, N., *Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mudslag cementitious material, Cement and Concrete Research*, v. 33, pp. 14371441, 2003.

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 filler-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Conselho Nacional de Pesquisas. [S.I.]. 1965.

QUARESMA, D. D. S. **Estudo hidrometalúrgico de compostos de titânio proveniente do resíduo do processo Bayer.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia química. Universidade Federal do Pará. Belém, PA, p. 107. 2012.

REIS, A. W. **Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo Bayer.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2014.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. **Efeito da adição do resíduo de bauxita 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.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.

ROSSI, C. R. C. et al., **Concretos com agregados de resíduo de bauxita 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 resíduo de bauxita.** Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2008. Salvador/BA: IBRACON. 2008.

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 filler em misturas asfálticas.** 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Associação Brasileira de Pavimentação. Cuiabá. 1995.

SHIMANO, S., KOGA, T., *Utilization of red mud as raw material for the cement industry. Light Metals*, pp.53-68, 1979.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. D. **Resíduo de bauxita 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.

SINGH, M., GARG, M., "Study on anhydrite plaster from waste phosphogypsum for use in polymerized flooring composition", *Construction and Building Materials*, n.19, pp. 25-29, 2005.

SOFRÁ, F., BOGER, D. V., Environmental rheology for waste minimization in the minerals industry, *Chemical Engineering Journal*, n. 8, pp. 319-330, 2002.

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, M. V. R. **Efeito das fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos.** Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Brasília, 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.

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.

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.

VALADARES, R. G. **Comportamento mecânico de areia-asfalto contendo resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

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.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. J. *Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt.* Transportation Research Record. Washington, n.1530, p.51-58. 1996.

YALÇIN, N., SEVINÇ, V., Utilization of bauxite waste in ceramic glazes, Ceramics International, n 26, pp. 485-493, 2000.

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. 2012.3

YANG, J.; XIAO, B. *Development of unsintered construction materials red mud wastes produced in the sintering alumina process.* Construction and Building Materials, n. 22. 2299-2307, 19 novembro 2008. ISSN 0950-0618.

APÊNDICE

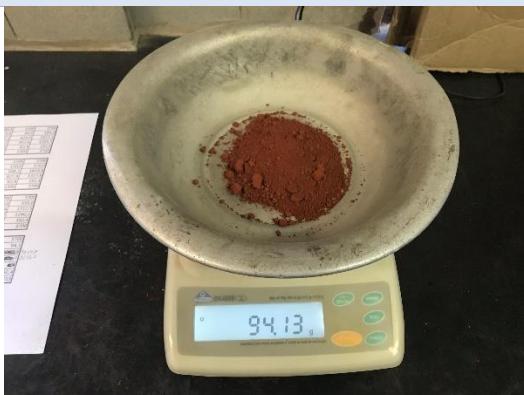
APÊNDICE A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



APÊNDICE A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



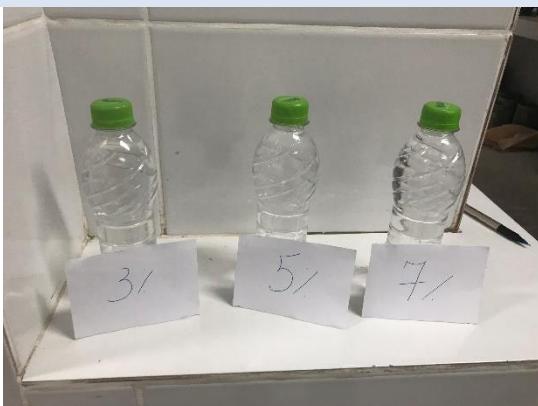
APÊNDICE A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



APÊNDICE A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



APÊNDICE A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

