



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LARA PEREIRA TAVARES MENDES

**VIABILIDADE MECÂNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE MISTURA
ASFÁLTICA RECICLADA COM RESÍDUO DE BAUXITA**

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2024

LARA PEREIRA TAVARES MENDES

**VIABILIDADE MECÂNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE MISTURA
ASFÁLTICA RECICLADA COM RESÍDUO DE BAUXITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como requisito obrigatório para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadoras:

Prof^ª. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Prof^ª. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2024

M538v Mendes, Lara Pereira Tavares.
Viabilidade mecânica, econômica e ambiental de mistura asfáltica reciclada com resíduo de bauxita / Lara Pereira Tavares Mendes. – Campina Grande, 2024.
190 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, Profa. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1. Misturas Asfálticas. 2. Resíduo de Bauxita. 3. Durabilidade. 4. Aspectos Ambientais. 5. Custos de Disposição. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. II. Lucena, Luciana de Figueiredo Lopes. III. Título.

CDU 625.8(043)

LARA PEREIRA TAVARES MENDES

**VIABILIDADE MECÂNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE MISTURA
ASFÁLTICA RECICLADA COM RESÍDUO DE BAUXITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como requisito obrigatório para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: 29/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Prof. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Coorientadora

Prof. Dra. Laiana Ferreira da Costa
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Examinadora Externa

Prof. Dra. Ana Paula Furlan
Universidade de São Paulo
Examinadora Externa

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL

Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**


2. **ALUNO(A): LARA PEREIRA TAVARES MENDES / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - COORIENTADORA, DR.^a LAIANA FERREIRA COSTA - UFRPE - EXAMINADORA EXTERNA, DR.^a ANA PAULA FURLAN - USP - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 10/2024). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "VIABILIDADE MECÂNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA COM RESÍDUO DE BAUXITA" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 09:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 29 DE FEVEREIRO DE 2024**

5.

6.

Documento assinado digitalmente
 ANA PAULA FURLAN
Data: 01/03/2024 14:38:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

7.

8.

9. **ANA PAULA FURLAN - EXAMINADORA EXTERNA**



Documento assinado eletronicamente por **Lara Pereira Tavares Mendes, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/02/2024, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laiana Ferreira da Costa, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 01/03/2024, às 07:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4206631** e o código CRC **0D32ACDA**.

Referência: Processo nº 23096.006868/2024-8

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido sabedoria e persistência na busca pela realização dos meus sonhos.

Às professoras Lêda Christiane e Luciana Lucena pela orientação, confiança, paciência, pelo empenho e ética como profissionais.

À minha família, em especial aos meus pais, Marcos Antônio e Josefa Pereira, por todo o apoio e incentivo ao longo dessa jornada, vocês são minha âncora.

Aos meus avôs, João Pereira, Francisca Pereira (*in memoriam*), Luiz Tavares (*in memoriam*) e Francisca Mendes (*in memoriam*), vocês são responsáveis pela criação de pessoas excepcionais.

Aos meus tios, em especial minha querida tia Maria de Fátima, por todo o apoio de sempre.

À minha irmã, Larissa, e primo-irmão, Guilherme, e a todos os meus primos, por sempre estarem presentes e dispostos a me ajudar.

A todos os meus amigos, colegas de laboratório, técnicos e professores que tive o prazer de conhecer nesse processo, vocês foram essenciais no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) por fornecer os meios necessários para a realização da minha pesquisa.

À Alumar por confiar no meu potencial e investir no desenvolvimento dessa dissertação, impulsionando o meu crescimento pessoal e profissional.

A todos, meu muitíssimo obrigada.

“O importante na ciência não é obter novos dados, mas descobrir novas maneiras de pensar sobre eles.”

William Lawrence Bragg

RESUMO

A industrialização e urbanização geram expressivos volumes de resíduos industriais, que demandam extensos espaços para sua disposição e, portanto, a destinação ambientalmente adequada destes representa um desafio tanto para os governos quanto para a indústria. Na gestão dos resíduos de mineração, o armazenamento, muitas vezes realizado em grandes pilhas ou barragens de rejeitos, constitui um desafio ambiental significativo para as empresas do setor, e uma possível solução para minimizar os impactos ambientais seria a utilização desses resíduos na construção civil. No setor de infraestrutura de transportes do país, materiais como RAP vêm sendo empregados em obras de pavimentação, prática que resulta na redução das externalidades atreladas à extração de recursos naturais. Com essa perspectiva, este trabalho avaliou a incorporação do resíduo de bauxita, resultante do processamento do minério de bauxita para obtenção da alumina (óxido de alumínio – Al_2O_3), matéria-prima do alumínio, na produção de misturas asfálticas virgens e com RAP sob três aspectos: o técnico, o econômico e o ambiental. Dessa forma, na primeira etapa, foi realizada a caracterização dos agregados, resíduo de bauxita (RB), RAP e ligante asfáltico virgem. No RB foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e térmica; a segunda etapa correspondeu à análise mecânica das misturas com percentuais de RB em 5%, 10% e 15% em substituição ao pó de pedra antes e após protocolo de envelhecimento térmico a longo prazo; na terceira etapa foi realizada a análise mecânica de misturas com RAP, teor de 20%, e, com RAP (20%) e resíduo (5%); e na quarta etapa, foi verificada a viabilidade econômica e ambiental. Os resultados apontaram que o resíduo de bauxita por conferir um maior teor de finos a mistura, promove maior rigidez e, com isso, comportamento superior quanto à resistência à tração, módulo de resiliência, módulo dinâmico e resistência à deformação permanente, em ambas as condições (antes e após protocolo de envelhecimento). Os resultados indicaram maior suscetibilidade à umidade devido à presença de metais solúveis na composição do RB, e na análise de vida de fadiga as misturas com resíduo apresentaram resultados semelhantes à mistura referência, indicando o potencial de utilização desse material para compor as misturas asfálticas. O RB associado ao RAP promoveu maior rigidez a mistura e classe de fadiga equivalente à mistura referência (sem RAP e RB). Na análise ambiental, as misturas mostraram potencial de enclausuramento do RB, com redução significativa das frações de metais que lixiviam e solubilizam da solução do material. Nos aspectos econômicos, a utilização do RB em misturas asfálticas nas condições e aspectos considerados mostrou-se positiva para a empresa de mineração, possibilitando a redução dos custos associados à disposição do resíduo de bauxita.

Palavras-chave: Resíduo de Bauxita. Misturas asfálticas. Durabilidade. Custos de disposição. Aspectos ambientais.

ABSTRACT

Industrialization and urbanization generate significant volumes of industrial waste, which require extensive spaces for disposal, making environmentally appropriate disposal a challenge for both governments and industry. In the management of mining waste, storage, often carried out in large piles or tailings dams, poses a significant environmental challenge for companies in the sector, and a possible solution to minimize environmental impacts would be to use these wastes in construction. In the country's transportation infrastructure sector, materials such as RAP have been used in paving works, a practice that results in reducing the externalities associated with the extraction of natural resources. With this perspective, this work evaluated the incorporation of bauxite residue, resulting from the processing of bauxite ore to obtain alumina (aluminum oxide - Al_2O_3), the raw material for aluminum, in the production of virgin asphalt mixtures and with RAP under three aspects: technical, economic, and environmental. Thus, in the first stage, the aggregates, bauxite residue (RB), RAP, and virgin asphalt binder were characterized. Physical, chemical, mineralogical, and thermal characterization tests were performed on RB; the second stage corresponded to the mechanical analysis of mixtures with RB percentages at 5%, 10%, and 15% replacing stone powder before and after a long-term thermal aging protocol; the third stage involved the mechanical analysis of mixtures with RAP content of 20%, and with RAP (20%) and residue (5%); and in the fourth stage, the economic and environmental viability was verified. The results indicated that bauxite residue, by providing a higher fines content to the mixture, promotes greater stiffness and, therefore, superior behavior regarding tensile strength, resilience modulus, dynamic modulus, and resistance to permanent deformation, in both conditions (before and after aging protocol). The results indicated greater susceptibility to moisture due to the presence of soluble metals in the RB composition, and in the fatigue life analysis, the mixtures with residue showed results similar to the reference mixture, indicating the potential use of this material to compose asphalt mixtures. The RB associated with RAP promoted greater stiffness to the mixture and fatigue class equivalent to the reference mixture (without RAP and RB). In the environmental analysis, the mixtures showed potential for RB encapsulation, with a significant reduction in the fractions of metals leaching and solubilizing from the material solution. In economic terms, the use of RB in asphalt mixtures under the conditions and aspects considered proved positive for the mining company, allowing for the reduction of costs associated with the disposal of bauxite residue.

Palavras-chave: Bauxite Residue. Asphalt Mixtures. Durability. Disposal Cost. Environmental Aspects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mineração de bauxita	27
Figura 2 – Processo Bayer	28
Figura 3 – Geração anual de resíduo de bauxita e produção de alumínio primário: histórico e projeções	30
Figura 4 – Zonas de diferentes permeabilidades causadas por segregação hidráulica	32
Figura 5 – Curvas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos associados as atividades da mineração	32
Figura 6 – Fluxograma referente às etapas da pesquisa.....	48
Figura 7 – Imagem da película de ligante aderida ao agregado antes (a) e após (b) adição de dope ao ligante asfáltico	51
Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados naturais	52
Figura 9 – Curva granulométrica do RAP	56
Figura 10 – Imagem de satélite da ARB 06.....	57
Figura 11 – Distribuição do Resíduo na ARB 06 (lagoa de onde foram retiradas as amostras) .	58
Figura 12 – Curvas granulométricas das amostras de Resíduo de Bauxita fornecidas por Empresa Multinacional localizada no Município de São Luís – MA.....	59
Figura 13 – Análise mineralógica do resíduo de bauxita (a) amostra Sul 0,5 m e (b) amostra Sul 1,0 m	64
Figura 14 – Análise termogravimétrica e termodiferencial da amostra de resíduo Sul 0,5 m.....	66
Figura 15 – Análise termogravimétrica e termodiferencial da amostra de resíduo Sul 1,0 m.....	67
Figura 16 – Composição de curvas granulométricas (TMN = 12.5 mm)	72
Figura 17 – Volume de vazios x teor de ligante da mistura de referência.....	74
Figura 18 – Composição de curvas granulométricas das misturas com resíduo de bauxita (TMN = 12.5 mm).....	75
Figura 19 – Volume de vazios x teor de ligante da mistura com 10% de RB.	78
Figura 20 – Definição do teor ideal de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada	80
Figura 21 - Faixa granulométrica da mistura asfáltica com 20%RAP, TMN = 12,5 mm	81
Figura 22 - Faixa granulométrica da mistura asfáltica com 20%RAP e 5% de RB, TMN = 12,5 mm	83
Figura 23 – Etapa da Avaliação Econômica.....	93
Figura 24 – Configuração do revestimento asfáltico do pavimento	94
Figura 25 – Sistema logístico.....	96
Figura 26 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB.....	105
Figura 27 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento.	105
Figura 28 -Resultados do ensaio de dano por umidade induzida da mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB antes e após protocolo de envelhecimento.....	107
Figura 29 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB.	108

Figura 30 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento.....	109
Figura 31 - Resultados do ensaio de módulo dinâmico para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB – Temperatura referência: 20°C.....	110
Figura 32 - Resultados do ensaio de módulo dinâmico para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento – Temperatura referência: 20°C.....	111
Figura 33 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).	112
Figura 34 - Módulo dinâmicos das misturas asfálticas 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c) para as misturas após envelhecimento a longo prazo.	113
Figura 35 - Ângulos de fase das misturas asfálticas a 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).	115
Figura 36 - Ângulos de fase das misturas asfálticas após protocolo envelhecimento a longo prazo a 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).	116
Figura 37 - Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB.....	119
Figura 38 - Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento.....	119
Figura 39 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP.....	121
Figura 40 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente.....	122
Figura 41 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP (Misturas LTOA).....	123
Figura 42 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente (Misturas LTOA).....	123
Figura 43 -Resultados do ensaio de dano por umidade induzida da mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB antes e após protocolo de envelhecimento.....	127
Figura 44 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral para a mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.	128
Figura 45 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida da mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.	130
Figura 46 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.	131
Figura 47 - Resultados do ensaio de módulo dinâmico para a mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB – Temperatura referência: 20°C.....	132
Figura 48 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas virgem, reciclada e reciclada com 5%RB 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).	133
Figura 49 – Ângulo de fase das misturas asfálticas virgem, reciclada e reciclada com 5%RB referentes às frequências de carregamento 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).	135
Figura 50 - Resultados do ensaio de deformação permanente da mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.....	137
Figura 51 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP (Mistura referência, reciclada e reciclada com 5% de RB)	140
Figura 52 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente (Mistura referência, reciclada e reciclada com 5% de RB)	140

Figura 53 -Resultados do ensaio de desgaste cântabro nas misturas reciclada e reciclada com 5% de RB.	143
Figura 54 – Aplicação de RB anual na produção de misturas asfálticas para recuperação das vias degradadas no Maranhão.	150
Figura 55 – Relação entre o VPL da situação 1 (sem utilizar o RB e sem considerar os custos externos) e as situações 3,4 e 5 com a utilização de 5%, 10% e 15% de RB no percentual das misturas asfálticas para recuperação das vias do Maranhão	156
Figura 56 – Relação entre o VPL da situação 2 (sem utilizar o RB e considerando os custos externos) e as situações 3,4 e 5 com a utilização de 5%, 10% e 15% de RB no percentual das misturas asfálticas para recuperação das vias do Maranhão	157
Figura 57 – Análise de sensibilidade quanto as distâncias de transporte do VPL das alternativas de utilização do RB em misturas asfálticas nos percentuais 5% (a), 10% (b), 15% (c).	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de segmentos de aplicação de rejeitos da mineração	25
Tabela 2 – Faixa típica de composição química dos principais componentes do resíduo de bauxita.	31
Tabela 3 – Exemplos de pesquisas acerca da aplicação de resíduo da bauxita em misturas asfálticas à quente	34
Tabela 4 – Características dos métodos de valoração.....	46
Tabela 5 – Ensaios para caracterização dos agregados.....	50
Tabela 6 – Ensaios para caracterização do ligante asfáltico	53
Tabela 7 – Ensaios para caracterização do ligante asfáltico envelhecido.....	54
Tabela 8 – Ensaios para caracterização do RAP.....	55
Tabela 9 – Percentuais granulométricos do RB.	60
Tabela 10 – Massa específica, massa específica aparente e absorção de água das amostras de Resíduo de Bauxita	60
Tabela 11 – Composição química e percentuais dos componentes presentes no resíduo de bauxita.	62
Tabela 12 – Ensaios para classificação do resíduo de bauxita.....	68
Tabela 13 – Resultado das análises de pH.	69
Tabela 14 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras lixiviadas de resíduo de bauxita.	70
Tabela 15 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras lixiviadas de resíduo de bauxita – metais sem limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).	70
Tabela 16 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras solubilizadas de resíduo de bauxita.....	70
Tabela 17 – Proporções de agregados para a mistura asfáltica de referência	72
Tabela 18 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial	73
Tabela 19 – Teor de ligante estimado	73
Tabela 20 – Parâmetros volumétricos da mistura referência com $\pm 0,5\%$ do teor estimado.	74
Tabela 21 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial	74
Tabela 22 – Proporção dos materiais da mistura asfáltica de referência	75
Tabela 23 – Análise de variância entre a curva de projeto referência e as curvas com resíduo de bauxita.....	76
Tabela 24 - Resumo do quantitativo de materiais das misturas com resíduo de bauxita.....	76
Tabela 25 – Parâmetros volumétricos da mistura com 5% de RB.....	77
Tabela 26 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial	77
Tabela 27 – Parâmetros volumétricos da mistura com 10% RB com dois teores de ligante.....	78
Tabela 28 – Parâmetros volumétricos da mistura com 15% RB.....	78
Tabela 29 – Proporção dos materiais das misturas com resíduo de bauxita	79
Tabela 30 – Proporções de agregados da mistura asfáltica reciclada	80
Tabela 31 – Parâmetros volumétricos da mistura reciclada com 4,4% de ligante.	81
Tabela 32 – Proporção dos materiais da mistura asfáltica reciclada.....	82

Tabela 33 – Proporções de agregados da mistura asfáltica reciclada	82
Tabela 34 – Parâmetros volumétricos da mistura reciclada com resíduo de bauxita com 4,4% de ligante.....	83
Tabela 35 – Proporção dos materiais da mistura asfáltica reciclada com resíduo de bauxita	83
Tabela 36 – Impactos associados a disposição de 1 tonelada de resíduo de bauxita e seus indicadores	90
Tabela 37 – Insumos utilizados para a produção de 1 tonelada métrica de alumina	95
Tabela 38 – Custos de transporte conforme o SINAPI.....	97
Tabela 39 – Taxa de custos estabelecida pelos Eco-costs	99
Tabela 40 – Distâncias verificadas na Análise de Sensibilidade	102
Tabela 41 - Classes das misturas asfálticas determinadas em virtude do Flow Number.....	120
Tabela 42 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga das misturas.....	122
Tabela 43 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga das misturas após envelhecimento a longo prazo.....	124
Tabela 44 – Classes de fadiga de misturas asfálticas.....	126
Tabela 45 - Classes das misturas asfálticas determinadas em virtude do Flow Number.....	139
Tabela 46 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga das misturas.....	141
Tabela 47 – Classes de fadiga de misturas asfálticas.....	142
Tabela 48 – Quantificação dos impactos ambientais associados a disposição do RB.....	145
Tabela 49 – Resultado das análises de pH das misturas asfálticas.	146
Tabela 50 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras lixiviadas das misturas com resíduo de bauxita.	146
Tabela 51 – Resultado da análise de metais nas amostras lixiviadas das misturas com resíduo de bauxita: metais sem limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).	147
Tabela 52 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras solubilizadas das misturas com resíduo de bauxita.	147
Tabela 53 – Custos de armazenamento do resíduo de bauxita	148
Tabela 54 – Custos de operação dos equipamentos por t de RB a ser transportada	149
Tabela 55 - Custo externo da emissão de CO ₂ equivalente	151
Tabela 56 - Custo externo da emissão de CO ₂ equivalente associado ao transporte do RB.....	152
Tabela 57 - Custo externo associado à eutrofização, ecotoxicidade e alcalinização.	152
Tabela 58 – Fluxo de custos internos da disposição do RB.....	153
Tabela 59 – Fluxo de benefícios com a utilização de resíduo em misturas asfálticas	155
Tabela 60 – Análise de custo-benefício – resultados do VPL	156
Tabela 61 – Variação dos custos de transporte por t de RB para diferentes distâncias	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Custo-Benefício
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AR	Agente Rejuvenescedor
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EC	Economia Circular
EMF	<i>Ellen MacArthur Foundation</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
IAI	Instituto Internacional de Alumínio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICM	Índice de Circularidade do Material
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>

RB	Resíduo de Bauxita
RBV	Relação Ligante-Vazios
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven</i>
SINAP	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura e Obras Públicas
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VPL	Valor Presente Líquido
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivos Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.1.3	Organização do trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	21
2.2	USO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO	24
2.3	BENEFICIAMENTO DA BAUXITA E A PRODUÇÃO DE RESÍDUO	26
2.3.1	Características do resíduo de bauxita	30
2.3.2	Utilização de resíduo de bauxita	33
2.3.3	Classificação ambiental do resíduo de bauxita	39
2.3.4	Custos relacionados a disposição do resíduo	40
2.4	IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS ASSOCIADOS AS ATIVIDADES DA MINERAÇÃO	42
2.4.1	Aproveitamento de resíduos como fator de redução de externalidades	43
2.5	EXTERNALIDADES E VALORAÇÃO ECONÔMICA	44
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
3	METODOLOGIA	48
3.1	MATERIAIS:	50
3.1.1	Agregados naturais	50
3.1.2	Ligante asfáltico	52
3.1.3	RAP – <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>	54
3.1.3.2	Agregado RAP	55
3.1.4	Resíduo de bauxita	56
3.1.4.1	Caracterização da área de estocagem do resíduo	56
3.1.4.2	Caracterização da amostra a ser utilizada no estudo	61
3.1.4.3	Composição química	62
3.1.4.4	Composição mineralógica	63
3.1.4.5	Área superficial específica	65
3.1.4.6	Análise térmica	66

3.1.4.7	Classificação ambiental do Resíduo de Bauxita	68
3.2	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	71
3.2.1	Dosagem da mistura asfáltica de referência	71
3.2.2	Dosagem das misturas com resíduo de bauxita	75
3.2.3	Dosagem da mistura reciclada	79
3.2.4	Dosagem da mistura reciclada com resíduo de bauxita	82
3.3	ENSAIOS MECÂNICOS	84
3.3.1	Resistência à tração por compressão diametral	84
3.3.2	Dano por umidade induzida (Lottman)	84
3.3.3	Módulo de resiliência	85
3.3.4	Módulo dinâmico	86
3.3.5	Resistência à deformação permanente	87
3.3.6	Vida de fadiga	87
3.3.7	Desgaste cântabro	89
3.3.8	Durabilidade a longo prazo	89
3.4	ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL	89
3.4.1	Aspectos ambientais	89
3.4.1.1	Impactos ambientais associados à disposição do RB	90
3.4.1.2	Avaliação ambiental das misturas	91
3.4.2	Aspectos econômicos	92
3.4.2.1	Pressupostos	93
3.4.2.2	Estimativa dos custos de disposição do RB	94
3.4.2.2.1	Custos internos	94
3.4.2.2.2	Custos externos	98
3.4.2.3	Estimativa dos benefícios: redução das externalidades	100
3.4.2.4	Análise Custo-Benefício	101
3.4.2.5	Análise de sensibilidade	102
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
4.1	ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS COM RESÍDUO DE BAUXITA ANTES E APÓS PROTOCOLO DE ENVELHECIMENTO (LTOA)	104
4.1.1	Resistência à tração por compressão diametral	104
4.1.2	Resistência ao dano por umidade induzida – DUI	106

4.1.3	Módulo de resiliência.....	108
4.1.4	Módulo dinâmico	110
4.1.5	Resistência à deformação permanente.....	118
4.1.6	Vida de fadiga.....	121
4.1.7	Desgaste cântabro	127
4.2	ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS RECICLADAS.....	128
4.2.1	Resistência à tração por compressão diametral.....	128
4.2.2	Resistência ao dano por umidade induzida – DUI.....	129
4.2.3	Módulo de resiliência.....	131
4.2.4	Módulo dinâmico	132
4.2.5	Resistência à deformação permanente.....	137
4.2.6	Vida de fadiga.....	139
4.2.7	Desgaste cântabro	143
4.3	ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	144
4.3.1	Aspectos ambientais.....	144
4.3.1.1	Quantificação dos impactos ambientais.....	144
4.3.1.2	Classificação ambiental das misturas asfálticas.....	145
4.3.2	Aspectos econômicos: determinação dos custos.....	148
4.3.2.1	Custos internos.....	148
4.3.2.2	Custos externos.....	151
4.3.2.3	Custos totais.....	152
4.3.2.4	Determinação dos benefícios.....	154
4.3.2.5	Análise de custo-benefício: utilização do RB em misturas asfálticas.....	155
4.3.2.6	Análise de sensibilidade: custos associados ao fornecimento do RB.....	158
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	160
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	160
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	162
	REFERÊNCIAS.....	163
	APÊNDICES	186

1 INTRODUÇÃO

Os impactos negativos ao meio ambiente decorrentes da intensificação do uso dos recursos naturais são impulsionados pela ampliação da produção e consumo resultante de circunstâncias como crescimento populacional e aumento da renda per capita. Essa situação associada ao descarte inadequado dos resíduos oriundos dos diversos processos produtivos e à falta de espaços apropriados para a disposição final desses materiais, demonstra a necessidade de serem estabelecidos mecanismos eficazes para uma gestão adequada (Upadhyay *et al.*, 2021).

No modal rodoviário, principal meio de transporte no Brasil, as atividades de construção, manutenção e restauração dos pavimentos estão associadas ao consumo de elevadas quantidades de energia, recursos naturais e liberação de substâncias nocivas ao meio ambiente em virtude dos processos de extração, transporte e transformação de materiais naturais - principalmente não renováveis, como o ligante asfáltico (Celauro *et al.*, 2015). Além disso, destaca-se a geração de uma elevada quantidade de resíduos ao fim da vida útil dos pavimentos, a qual resulta em impactos ambientais e financeiros, e pode estar atrelada ao mau dimensionamento da estrutura do pavimento, execução inadequada, dosagem equivocada dos materiais, mau uso das vias e, no melhor dos cenários, ao envelhecimento natural das camadas de revestimento (Fonseca *et al.*, 2014).

Nos últimos anos vem havendo um incentivo à reutilização desses resíduos na produção de novas misturas asfálticas, destacando-se a Resolução Nº14 de 08 de julho de 2021, a qual dispõe sobre o reaproveitamento do RAP – definido pela norma DNIT 033/2021 como sendo o “material proveniente do processo de fresagem ou de remoção de camada de revestimento asfáltico”, sendo o termo RAP oriundo do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*. Essa abordagem de reutilização atende ao 12º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Organização das Nações Unidas), pautado na meta de reduzir substancialmente a geração de resíduos até 2030 por meio da Economia Circular (EC) e suas ações de prevenção, redução, reciclagem e reuso de resíduos.

A EC contraria o atual sistema produtivo, o qual configura-se como um modelo linear que consiste basicamente em extrair, produzir, consumir e descartar, surgindo, dessa forma, como uma abordagem capaz de proporcionar benefícios econômicos e ambientais. Assim, de acordo com Su *et al.* (2013) e Geng *et al.* (2012), pode levar a uma maior competitividade por parte das empresas, uso mais eficiente de matérias primas e energia, receitas de vendas de “resíduos” e redução de penalidades ambientais.

Desse modo, visando unir o setor da indústria asfáltica ao setor da mineração e contribuir com a economia circular tem-se o emprego dos resíduos oriundos dessa última atividade na cadeia produtiva do modal rodoviário. O estudo do emprego desses resíduos provenientes do tratamento de minerais na pavimentação, para compor suas diferentes camadas (revestimento, base e sub-base), pode ser verificado nos trabalhos de Gabriel Bastidas-Martínez *et al.* (2022) e De Oliveira e Faxina (2021), os quais analisaram o uso do rejeito de minério de ferro em camadas de revestimento; Lima e Thives (2020) e Zhang *et al.* (2018b), que verificaram o uso do resíduo de bauxita; Sousa (2017) e Kato (2016) - estudaram a utilização do rejeito de minério de cobre; e Souza *et al.* (2023) e Silva *et al.* (2019) - com o estudo do uso do rejeito de minério de tungstênio.

Nessa perspectiva, a utilização do resíduo de bauxita, por meio de uma destinação ambientalmente adequada de modo a evitar os impactos associados ao descarte desses materiais, é um desafio para os governos e para a indústria do alumínio em todo o mundo. Conforme o Guia de Gestão Sustentável do Resíduo de Bauxita, desenvolvido pelo Instituto Internacional de Alumínio (IAI), é estimado que até 2050 possa haver um inventário global de resíduos de bauxita de 10 bilhões de toneladas.

O resíduo de bauxita é oriundo da extração dos óxidos de alumínio da bauxita por meio do Processo Bayer. Devido à sua natureza alcalina e presença de materiais pesados, como níquel e chumbo, este é considerado perigoso (Bertocchi, Ghiani e Peretti, 2006). Dessa forma, a preocupação para promover o uso desse material envolve a expressiva quantidade de material estocada e seu potencial contaminante. A cada 1 tonelada de alumina são produzidas em torno de 1,0 a 1,5 toneladas de resíduo e, com isso, há um crescimento anual estimado em aproximadamente 120 milhões de toneladas no inventário mundial (Lemougna *et al.*, 2017; Silveira *et al.*, 2021). No Brasil, Mercury *et al.* (2011) relata que se estima uma produção anual de 7 a 10 milhões de toneladas de resíduo de bauxita, o qual é normalmente descartado em barragens de contenção, gerando um elevado custo em transporte, áreas de armazenamento e monitoramento – visando atender às normas ambientais vigentes e a integridade desses depósitos. No entanto, existem outros métodos de descarte além desse, como o empilhamento a seco.

O Brasil, quarto maior produtor global de bauxita em 2020, apresenta uma grande reserva desse resíduo, entretanto, as soluções para a reutilização e reinserção desse material na cadeia produtiva apesar de serem aplicações tecnicamente viáveis, economicamente, não são. Este fato resulta em uma baixa utilização do resíduo de bauxita, aproximadamente 3 a 4% do total de

toneladas geradas anualmente a nível mundial são aproveitadas, o equivalente a uma estimativa de 3 milhões de toneladas (IAI, 2022; Persaud e You, 2022). Estudos como Zhang *et al.* (2019), Choudharya, Kumar e Rahman (2019), Zhang *et al.* (2020), Zhang *et al.* (2021) e Lima e Thives (2020) apontam o potencial de utilização do resíduo de bauxita em camadas de rolamento, porém, há uma escassez de pesquisas abordando a viabilidade técnica, econômica e ambiental de misturas asfálticas virgens e recicladas (RAP) produzidas com esse material.

Portanto, a presente pesquisa estudou a incorporação do resíduo de bauxita, resultante do processamento do minério de bauxita para obtenção da alumina (óxido de alumínio – Al_2O_3), matéria-prima do alumínio, na produção de misturas asfálticas virgens e com RAP.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Geral

Esta pesquisa objetivou verificar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização de resíduo de bauxita em mistura asfáltica virgem e reciclada (RAP) para aplicação em camadas de revestimento de pavimentos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pretendeu-se:

- Verificar o comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas com o resíduo de bauxita, investigando o teor ideal de resíduo a ser utilizado para obtenção do produto;
- Avaliar a durabilidade a longo prazo das misturas asfálticas com resíduo de bauxita;
- Analisar a viabilidade econômica do uso do resíduo de bauxita na produção de misturas asfálticas;
- Verificar a viabilidade do uso do resíduo como novo produto para a pavimentação, considerando as características ambientais da mistura, como alternativa sustentável para empresa de mineração.

1.1.3 Organização do trabalho

Essa dissertação é composta por 5 capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

- Capítulo 1 – compreende a Introdução, Objetivo Geral e Específicos e Organização do trabalho;
- Capítulo 2 – apresenta o Referencial Teórico, com os conceitos relacionados às misturas asfálticas recicladas, uso de rejeitos da mineração em misturas asfálticas, mineração de bauxita e o resíduo oriundo do beneficiamento desse minério, características desse resíduo, denominado resíduo de bauxita, métodos de disposição desse material e os custos associados, além disso, os impactos socioeconômicos associados às atividades da mineração e de que forma a gestão adequada dos rejeitos oriundos do setor auxilia na busca pela sustentabilidade promovendo redução das externalidades provenientes das suas atividades;
- Capítulo 3 – consiste na descrição dos métodos e materiais utilizados para realização do estudo;
- Capítulo 4 – explana-se os resultados obtidos com as devidas discussões;
- Capítulo 5 – aborda as conclusões do estudo com sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda informações relevantes acerca do tema em estudo, as quais foram coletadas em publicações de periódicos, livros, coleções de teses e dissertações. Com isso, são apresentados tópicos sobre misturas asfálticas recicladas, misturas asfálticas produzidas com rejeitos da mineração com enfoque na utilização do resíduo de bauxita (objeto de estudo nessa pesquisa), os aspectos e características do resíduo de bauxita – os quais abrangeram um panorama a respeito desse material (origem, propriedades físicas, químicas, mineralógicas e ambientais, métodos de disposição e custos associados) – e por fim, os impactos socioambientais associados às atividades da mineração e a valoração dessas externalidades visando uma avaliação holística.

2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

O revestimento asfáltico corresponde à camada do pavimento que recebe diretamente a ação do tráfego. Desse modo, tem como função melhorar as condições de rolamento, devendo assegurar o conforto e a segurança dos usuários, além de impermeabilizar o pavimento. Outrossim, deve ter a capacidade de resistir aos desgastes, aumentando a durabilidade do pavimento. Para Zhang *et al.* (2018a) a mistura asfáltica, constituída por uma associação de agregados, material de enchimento (fíler) e materiais asfálticos, corresponde ao material mais utilizado na camada de revestimento nas rodovias mundialmente.

Nesse cenário, segundo Yao *et al.* (2018) a mistura asfáltica a quente é o material rodoviário mais aplicado em pavimentos em todo o mundo. A ampla utilização desse tipo de estrutura pode estar associada às vantagens de sua aplicação, que englobam facilidade de construção, elevada produtividade, liberação para tráfego logo após a construção, boa qualidade e facilidade de realização de reparos. No entanto, este é um material suscetível à temperatura e à umidade, sendo em serviço exposto à degradação em razão da aplicação de cargas advindas do tráfego de veículos e dos impactos ambientais (chuva, radiação solar, variações climáticas). Logo, é um material sujeito a danos irreversíveis, como formação de sulcos e fissuras (Barros, 2020; Nguyen *et al.*, 2023).

O ciclo de vida dessas estruturas engloba a aquisição de materiais, construção, utilização e manutenção até a destinação final, sendo geradas ao fim da sua vida útil elevadas quantidades de resíduos asfálticos (Aurangzeb *et al.*, 2014). Em virtude desse cenário, a indústria da construção

civil explora significativamente os recursos naturais, com o consumo de aproximadamente 30%, e ainda é responsável por gerar 25% de resíduos sólidos (Benachio, Freitas e Tavares, 2020; Mariyappan, Palammal e Balu, 2023).

Nessa perspectiva, o uso do RAP, material proveniente do processo de fresagem ou de remoção de camadas de revestimento asfáltico, surge como uma prática que auxilia na conservação e economia dos recursos naturais, pois apresenta propriedades físicas e mecânicas que viabilizam sua introdução na composição de novas misturas asfálticas (Copeland, 2011; Zaumanis, Mallick e Frank, 2014; Cunha *et al.*, 2018). Além disso, resulta na redução da quantidade de resíduos estocada em aterros e emissões de gases de efeito estufa, promovendo o desenvolvimento sustentável do setor (Han *et al.*, 2019; Zhang, Huchet e Hobbs, 2019; Flores *et al.*, 2020).

Segundo Schreck (2007) a utilização de 10% a 40% de RAP proporciona economia nos custos de fabricação de 9% e 36%, respectivamente. Rafiq *et al.* (2021), ao realizarem um estudo de caso, puderam analisar os custos de uma mistura convencional e com 20% de RAP, obtendo resultados que indicaram uma redução total de custos de 14% pela utilização do RAP, com base em uma medição do custo total do ciclo de vida – que inclui valoração monetária dos custos associados aos materiais, mão de obra, custos de transporte, operação da planta e impactos ambientais (emissão de CO₂).

Embora a utilização de RAP seja uma prática comum nas últimas décadas, implementada pelas autoridades rodoviárias e partes interessadas em virtude dos benefícios econômicos e ambientais associados à sua aplicação, a incorporação desse material nas camadas superficiais do pavimento asfáltico ainda é limitada a cerca de 10 a 30% (Noferini *et al.*, 2017).

O relatório da *Federal Highway Administration* (FHWA) nº FHWA-HRT-11-021 (2011) aponta as principais preocupações/obstáculos das agências e departamentos de transporte, responsáveis por limitar a utilização do RAP nas misturas asfálticas a quente, e informa que envolvem a qualidade da mistura, a consistência do RAP, conteúdo e grau de desempenho do ligante, o procedimento de mistura, durabilidade e desempenho quanto à fissuração (vida de fadiga), além de dificuldades com o controle das características do RAP em detrimento da variabilidade de suas propriedades.

Nesse cenário, a gestão desse material (geração do material, armazenamento, processamento, dosagem e usinagem) é essencial para garantir a qualidade e desempenho das misturas asfálticas (Suzuki, 2019).

O comportamento do ligante asfáltico, aglutinante empregado no compósito, depende de variáveis como temperatura, frequência e magnitude do carregamento, suscetibilidade térmica e termoplasticidade. Dessa forma, possui baixa recuperação elástica quando sujeito a diferentes tensões, ocasionando deformações plásticas devido à sua natureza viscoelástica (Xu *et al.*, 2018; Lagos-Varas *et al.*, 2020). Com o envelhecimento desse material, em virtude das degradações sujeitas durante o período de serviço do pavimento, como oxidação, radiação solar, variação de temperatura e cargas advindas do tráfego, o ligante asfáltico torna-se mais rígido e quebradiço como consequência das alterações que ocorrem na sua estrutura química (Tonial, 2001; Moghaddam e Baaj, 2016).

Aspectos como esses podem proporcionar comportamento adverso ao pavimento, causando custos mais elevados de manutenção e reabilitação, assim, o uso do RAP é viável quando atender aos requisitos de materiais virgens e proporcionar desempenho igual ou superior à mistura convencional comumente utilizada.

O aumento da rigidez, proporcionado pelo ligante envelhecido presente no RAP, atribui à mistura uma maior resistência ao sulco em altas temperaturas, maior coesão, resistência à tração, módulo de resiliência e módulo dinâmico (Zhao *et al.*, 2013; Oliveira, Farias e Silva, 2022). No entanto, pode resultar na redução da resistência à fadiga (Cong *et al.*, 2020). Zhao *et al.* (2013) indicam que a incorporação de elevados percentuais de RAP resulta no aumento da suscetibilidade à fissuração sob ações de tráfego, devido à ativação do ligante asfáltico oxidado que provoca maior enrijecimento da mistura. Enquanto Melo Neto (2022), cujo estudo analisou a incorporação de altos teores de RAP utilizando agente rejuvenescedor, obteve melhor comportamento à fadiga, verificada com ensaios de tração indireta à tensão controlada, na mistura com 40% de RAP quando comparada à mistura asfáltica referência (produzida apenas com agregados virgens). Tais dados conflitantes na literatura levam à incerteza quanto ao percentual de RAP a ser incorporado na mistura.

Para a produção das misturas com RAP, o relatório “*Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual*” da *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) aponta que para baixos teores de RAP, em torno de 10 a 20%, não há necessidade de caracterização das propriedades aglutinantes recuperadas, pois o ligante envelhecido presente nesses quantitativos de RAP não é suficiente para alterar significativamente as propriedades do ligante asfáltico virgem, e o RAP pode ser

contabilizado apenas como um agregado. No entanto, recomenda para a aplicação em quantidades superiores a 20% que esse procedimento de recuperação e caracterização seja realizado.

Por fim, Oliveira, Farias e Silva (2022) analisaram misturas com 25%, 45% e 100% de RAP, e indicaram que o crescimento desse percentual levou à redução das deformações permanentes e maior suscetibilidade à fissuração, devido à proporcionalidade da rigidez com o teor de RAP incorporado. McDaniel e Anderson (2001) afirmam que a incorporação de teores entre 10 e 20% de RAP na mistura não são suficientes para dominar o seu comportamento

2.2 USO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO

O Brasil é um dos principais países produtores de minérios do mundo: em 2021, destaca-se que as substâncias metálicas responderam por cerca 89% do valor total da produção mineral. Entre estas substâncias, tem-se que o alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco corresponderam a 99,7% do valor da produção da referida classe, movimentando 312,9 bilhões de reais (ANM, 2023).

A realização dessas atividades de extração e beneficiamento de minérios estão associadas à geração de resíduos sólidos, destacando-se, como principais, os estéreis e os rejeitos/resíduos. Os estéreis são os materiais gerados pelas atividades de extração que ficam dispostos em pilhas e não apresentam valor econômico. Os rejeitos são gerados a partir do processo de beneficiamento dos minérios, que visa extrair o material de valor econômico, aumentando a qualidade ou o teor do produto final (IPEA, 2012).

A Agência Nacional de Transporte Terrestre – ANTT (2018) aponta que, normalmente, os rejeitos da mineração são armazenados em pilhas ou em barragens de contenção, soluções que demandam grande disponibilidade de área e recursos para implantação e manutenção das estruturas. Além disso, destaca a geração dos resíduos oriundos da mineração como uma das grandes preocupações ambientais do setor. Conforme a ANM (2020), com base nos dados declarados no Relatório Anual de Lavra (RAL), no período de 2010 a 2019, estima-se que, no Brasil, um total de 3,4 bilhões de toneladas de rejeitos e 8,2 bilhões de toneladas de estéril foram geradas em empreendimentos produtores de ferro, ouro, cobre, fosfato, estanho, alumínio, níquel, carvão, manganês, zinco, cromo e vanádio. No que diz respeito à produção global, aproximadamente 20-25 bilhões de toneladas de resíduos são gerados anualmente pela indústria da mineração (Benarchid *et al.*, 2019; Simonsen *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a busca por tecnologias que resultem no aproveitamento dos rejeitos de forma eficiente poderia reduzir a quantidade de material estocada. Em 2017, o número de grupos de pesquisa no Brasil estudando o tema mineração correspondia a 68 – difundidos em 41 Instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação em 17 unidades federativas –, das quais havia 25 linhas de pesquisas diretamente relacionadas ao reaproveitamento de resíduos/rejeitos (Moraes *et al.*, 2017). As pesquisas, como as apresentadas na Tabela 1 e as quais incluem estudos recentes, abordam a aplicação de rejeitos em diversas áreas. Os principais rejeitos estudados são provenientes dos minérios de ferro, bauxita, cobre e de tungstênio.

Tabela 1 – Exemplos de segmentos de aplicação de rejeitos da mineração

Co-produto	Minério	Estudos
Recuperação de metais	Rejeito de ferro	<ul style="list-style-type: none"> Nogueira, Daniel Ribeiro dos Santos. Compósitos magnéticos aplicados à concentração magnética de rejeitos e economia circular. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
	Resíduo de bauxita	<ul style="list-style-type: none"> AGUIRRE, Marcos. Recuperação de metais a partir da lama vermelha. 2015.
Fertilizantes	Rejeito de Ardósia	<ul style="list-style-type: none"> Sustentabilidade no uso dos rejeitos da mineração: economia, regulação e aproveitamento – Projetos em desenvolvimento no CETEM.
Pavimentação de estradas	Rejeito de minério de ferro	<ul style="list-style-type: none"> De Sá Fernandez, Suzana Dias; Sá, Thomas Schatzmayr Welp; Oda, Sandra. Análise da viabilidade técnica da adição de rejeito de mineração em materiais para pavimentos rodoviários. Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana, v. 4, n. 00, 2023.
	Rejeito de minério de cobre	<ul style="list-style-type: none"> Sousa, JGM. Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará.
Indústria cimenteira	Resíduo de bauxita	<ul style="list-style-type: none"> Lourenço, Rafaela Roberta. Aplicação do resíduo de bauxita como fonte de Al₂O₃ e Fe₂O₃ na preparação de clínques de cimentos portland. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos.
	Rejeito magnético de fosfato	<ul style="list-style-type: none"> Ferreira, Belchiolina Flavia. Estudo do aproveitamento de rejeito magnético de fosfato em substituição parcial ao agregado miúdo em compósitos cimentícios. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
Produtos pré-moldados para construção civil	Rejeito e estéril de minério de ferro	<ul style="list-style-type: none"> SANT'ANA FILHO, J. N. Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos intertravados de uso em pátios industriais e alto tráfego. 2013. Dissertação de Mestrado. CEFET – Minas Gerais.
Matéria-prima para construção civil	Resíduo de bauxita	<ul style="list-style-type: none"> Souza, José Antônio da Silva et al. Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil. 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará.
	Rejeito de minério de tungstênio	<ul style="list-style-type: none"> Filho, Manoel Domiciano Dantas. Estudo do desempenho do concreto autoadensável com substituição do agregado natural e do aglomerante por resíduo da scheelita. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.

O uso dos rejeitos/resíduos de mineração, visando a aplicação em obras de pavimentos, pode caracterizar-se como uma alternativa sustentável, possibilitando possivelmente reduzir o consumo de agregados naturais, promover uma nova destinação para os materiais residuais, reduzir impactos ambientais e custos das obras. Com isso, o estudo da incorporação dos resíduos como produto alternativo é interessante e necessário para promover um desenvolvimento sustentável no país (Sá *et al.*, 2021).

Dos estudos já desenvolvidos que verificaram a aplicação de resíduos da na pavimentação destacam-se duas vertentes: composição de materiais para base e sub-base de pavimentos (Etim, Eberemu e Osinubi, 2017; Mukiza *et al.*, 2019; Sá *et al.*, 2023) e uso em misturas asfálticas, como agregado (Kato, 2016; De Souza *et al.*, 2020, Apaza *et al.*, 2021) ou fíler (Choudhary *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019a; Wei *et al.*, 2022). Entretanto, a análise de viabilidade desses materiais foi limitada, basicamente, ao desempenho técnico e, portanto, há uma carência de estudos que analisem os aspectos econômicos e ambientais dos materiais produzidos com a utilização desses materiais.

2.3 BENEFICIAMENTO DA BAUXITA E A PRODUÇÃO DE RESÍDUO

A bauxita é um dos recursos naturais mais importantes para a produção de alumínio – elemento de significativa utilização mundial e cuja obtenção em estado metálico não ocorre naturalmente na crosta terrestre (MME, 2022). Essa rocha normalmente é composta por gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boemita ($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$) e diásporo ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$), principais minerais de hidróxido de alumínio, além de impurezas como quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3). Para ser economicamente aproveitável, o minério deve conter tais hidróxidos em quantidade que varie entre 50 e 55%, sendo o teor mínimo para que seja aproveitável equivalente a 30% (Anjos e Silva, 1983).

O processo de mineração da bauxita envolve as seguintes etapas básicas: prospecção e pesquisa mineral por meio de exploração da área na qual foi detectada a presença da jazida; preparação do terreno com a retirada da vegetação e solo orgânico; remoção das camadas superficiais do solo dessas áreas (argilas e lateritas); e um primeiro beneficiamento que engloba a britagem do minério visando uma menor granulometria, lavagem com água para reduzir o teor de sílica presente e a secagem do material para transportá-lo até as estruturas de beneficiamento nas quais será obtida a alumina – matéria prima do alumínio (Figura 1).

Figura 1 – Mineração de bauxita

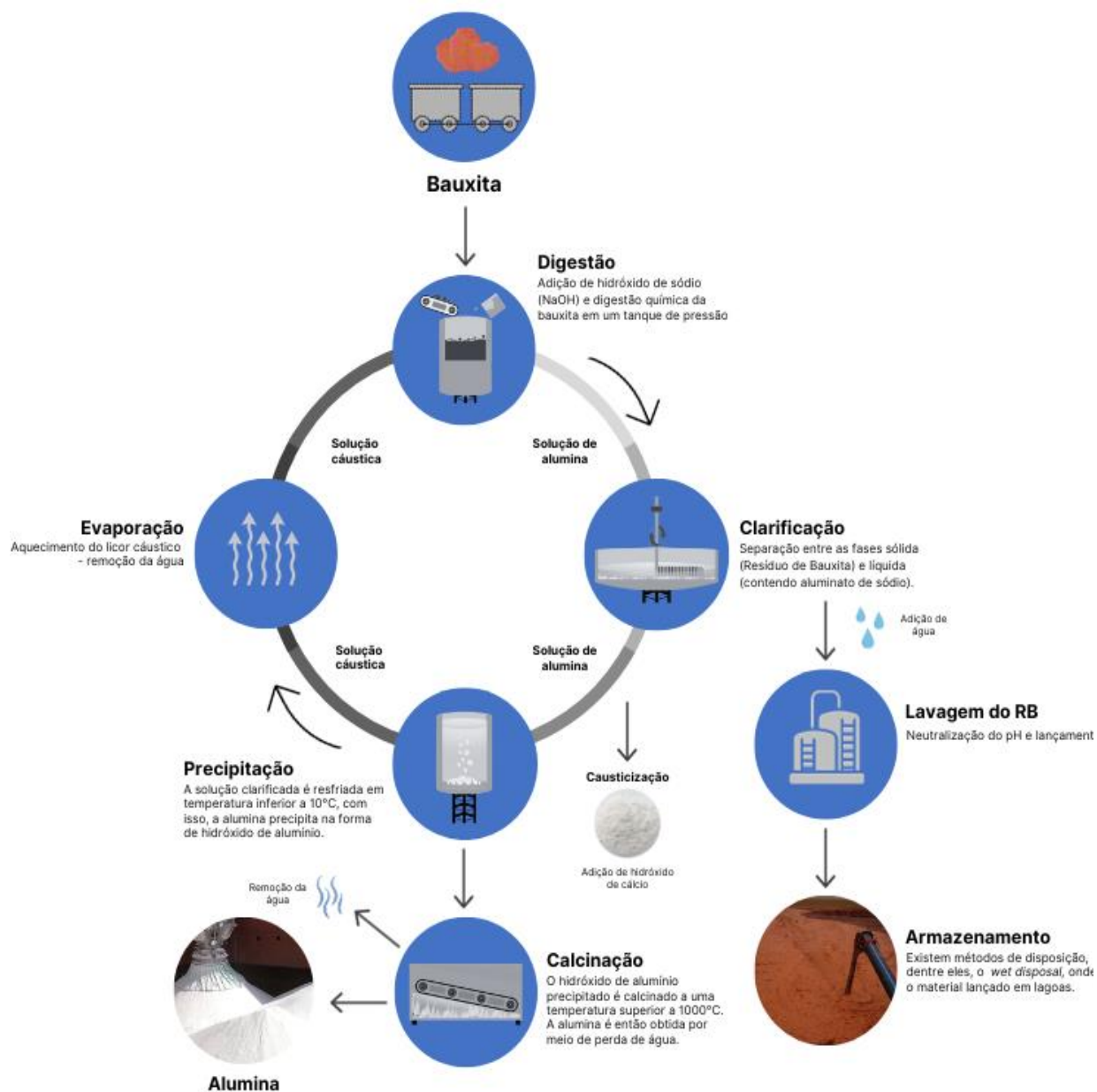
Fonte: Adaptado de ABAL (2017)

Após o fechamento da mina, a área explorada é recoberta pela vegetação típica do bioma onde está localizada, com o uso do solo orgânico removido durante a preparação do terreno e os estéreis para recomposição da área (ABAL, 2017).

Já no processo de beneficiamento da bauxita para obtenção da alumina, a depender do conteúdo mineral presente na rocha, diferentes métodos podem ser empregados, sendo eles o Processo Bayer, Processo de Sinterização (único na China e na Rússia, empregado em minérios de bauxita de teor relativamente baixo, com proporções $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ variando entre 3 e 6) e o processo combinado de ambos (Xue *et. al.*, 2016; Zhang *et. al.*, 2021).

O método Bayer, processo mais comumente utilizado para a produção comercial de alumínio, foi desenvolvido em 1888 por Karl Josef Bayer e atualmente é composto por quatro etapas: digestão, clarificação, precipitação e calcinação (Habashi, 2005), conforme pode-se visualizar na Figura 2.

Figura 2 – Processo Bayer



Fonte: Adaptado de Hydro (2013)

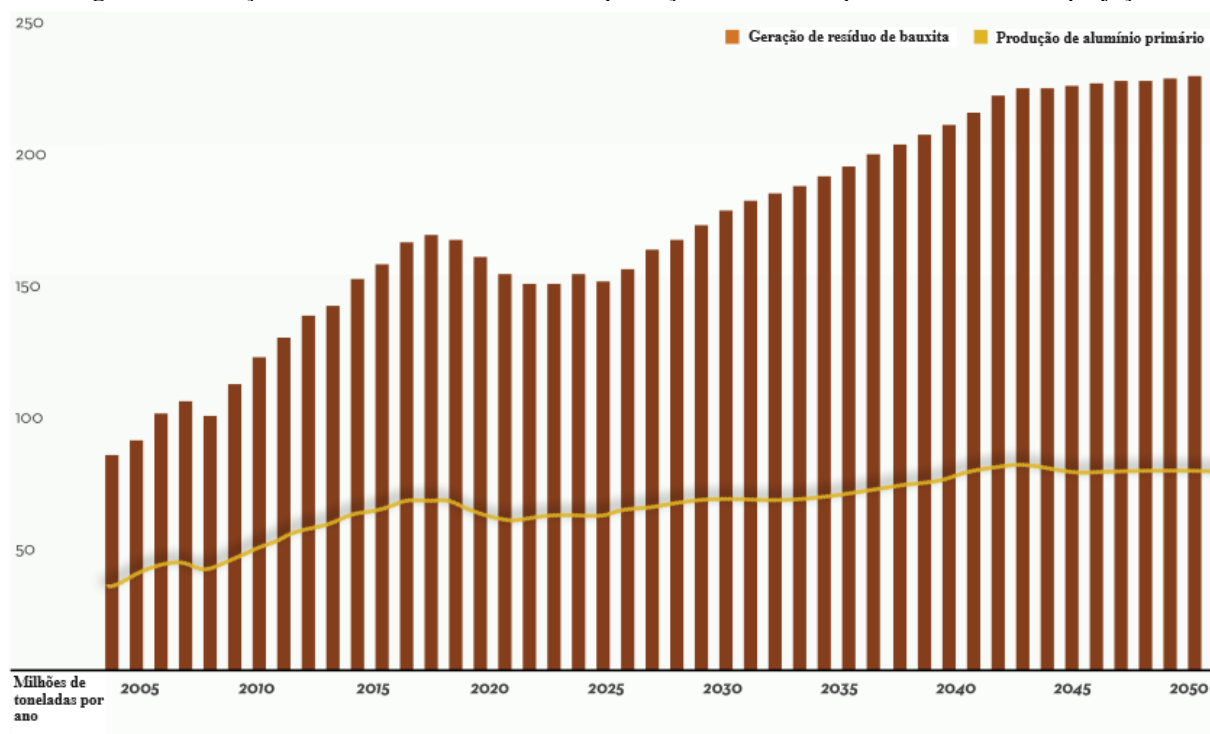
A bauxita adicionada ao sistema já passou por uma britagem inicial na mina, visando a obtenção de um produto abaixo da peneira nº 10 (abertura de 2,0 mm). Na refinaria, o minério é encaminhado ao moinho, o qual já contém alguma solução cáustica de forma a promover a dissolução e início de precipitação da sílica presente, que será removida para evitar a contaminação do produto final que deseja ser obtido, a alumina. A polpa oriunda dessa etapa é encaminhada para a digestão, fase na qual é adicionada mais soda cáustica sob alta temperatura, que varia com o tipo

de hidróxido de alumínio presente no minério, por um determinado intervalo de tempo, para então ser resfriado a diferentes pressões, que vão decrescendo a cada estágio (Villar, 2002). A próxima fase diz respeito à clarificação, na qual ocorre o processo de decantação da solução de alumina. Após isso, o material residual é separado de um licor rico em hidróxido de alumínio (sobrenadante) por meio das técnicas de espessamento e filtração com o auxílio de agentes flocculantes, passa por um processo de lavagem e, posteriormente, é encaminhado para ser armazenado (Villar, 2002; Silva Filho, Alves e Motta, 2007; Quaresma, 2012).

Já no processo de Sinterização, a bauxita é primeiramente sinterizada em fornos de sinterização rotativos, ou seja, a bauxita é aquecida a altas temperaturas, acima de 1200°C, promovendo a aglomeração das partículas e a formação da alumina alfa. Junto à bauxita é adicionado calcário e carbonato de sódio e, com isso, o processo resulta na solução de aluminato de sódio e silicato de cálcio (insolúvel). O aluminato de sódio é tratado com dióxido de carbono para obter hidróxido de alumínio, o qual é posteriormente submetido à etapa de calcinação para obtenção da alumina.

Logo, o resíduo de bauxita é um subproduto gerado no processo de refino da alumina (Al_2O_3), o qual se baseia na reação da bauxita com hidróxido de sódio sob alta temperatura e pressão, referindo-se ao Processo Bayer. As taxas de produção desse material, dependem da origem da bauxita - no Brasil o principal mineral de alumínio que compõem a bauxita é a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Quanto a isso, o IAI (2022) considera que para cada 1 tonelada de alumina são geradas em torno de 1–1,5 toneladas de resíduo. Em 2022, segundo o “Anuário Estatístico do Alumínio 2022”, editado pela Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), o Brasil produziu em torno de 10,87 milhões de toneladas de alumina.

Dessa forma, o IAI (2022) traz em seu relatório “*Sustainable bauxite residue management guidance*” o histórico e a projeção anual da geração de resíduo de bauxita e produção de alumínio primário a nível mundial, os quais encontram-se ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Geração anual de resíduo de bauxita e produção de alumínio primário: histórico e projeções

Fonte: IAI (2022)

Assim, ao considerar a razão entre a geração de bauxita e a produção de alumina apontada nesse guia, a qual equivale a 1,23, no ano de 2022 foram gerados no Brasil, aproximadamente, 13,37 milhões de toneladas de resíduo de bauxita.

2.3.1 Características do resíduo de bauxita

As características do resíduo de bauxita variam e dependem da natureza do minério que deu origem e da técnica empregada no processo de beneficiamento do minério. Além disso, o tratamento ao qual o RB é submetido antes de sua disposição também influencia nas suas características - em alguns casos o resíduo passa por um processo de neutralização, por exemplo, como a adição de ácido sulfúrico. E, ainda, os materiais flocculantes utilizados para acelerar o processo de separação na etapa de clarificação também exercem influência nas propriedades desse material (Villar, 2002).

De acordo com o IAI (2022), o RB comumente apresenta a composição química identificada na Tabela 2.

Tabela 2 – Faixa típica de composição química dos principais componentes do resíduo de bauxita.

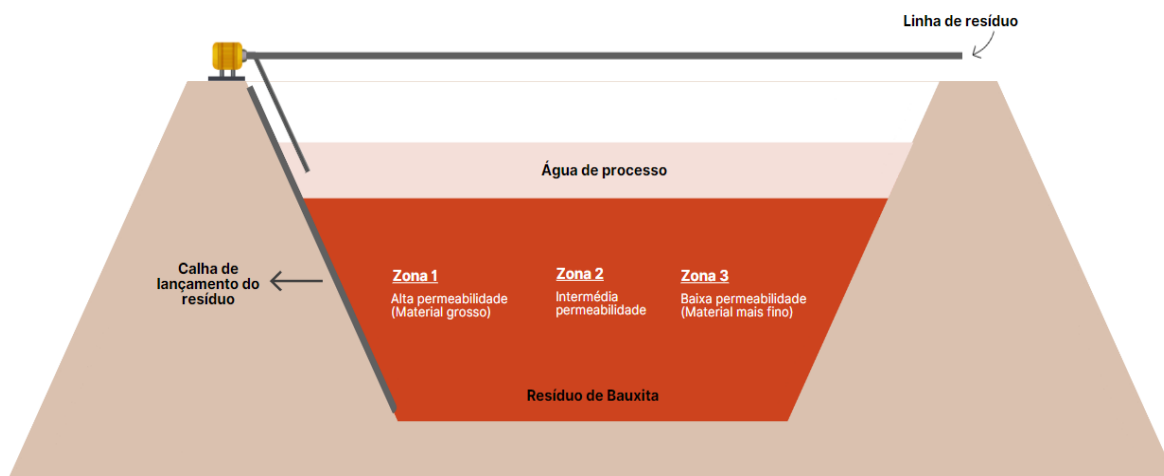
COMPONENTE	FAIXA TÍPICA (%)
Fe ₂ O ₃	5 – 60
Al ₂ O ₃	5 – 30
TiO ₂	0.3 – 15
CaO	2 – 14
SiO ₂	3 – 50
Na ₂ O	1 – 10

Fonte: Instituto Internacional do Alumínio (2022)

Conforme dito anteriormente, a composição química do resíduo de bauxita varia e depende da natureza do minério que o deu origem e da técnica empregada no Processo Bayer. Tais características, conforme Manfroi (2009), levam a diferentes classificações do RB. Ademais, essa composição pode variar de acordo com o tempo de deposição e o grau de exposição ao meio ambiente (Silva Filho, Alves e Motta, 2007; Quaresma, 2012).

As características geotécnicas, mineralógicas e físicas do resíduo também estão condicionadas ao tipo de mineral extraído e ao processo de beneficiamento e tratamento ao qual é submetido, além de estarem relacionadas ao método de disposição (Bedin, 2010; Gonçalves, 2021). Quanto a esse último, destaca-se o método de lançamento em diques de contenção por meio de disposição hidráulica, o qual, conforme Vick (1983), resulta no surgimento de três distintas zonas, uma zona de alta permeabilidade nas áreas próximas ao ponto de descarga (material mais granular), uma zona de baixa permeabilidade situada mais distante do ponto de lançamento (material mais fino), e, ainda uma zona de permeabilidade intermediária entre elas - tal situação encontra-se ilustrada na Figura 3. Esse processo diz respeito à segregação hidráulica, na qual partículas de diferentes tamanhos são dispostas a distâncias específicas em relação ao ponto de lançamento, sendo um fator influente na distribuição granulométrica do material depositado ao longo da lagoa de armazenamento (Bhering, 2006).

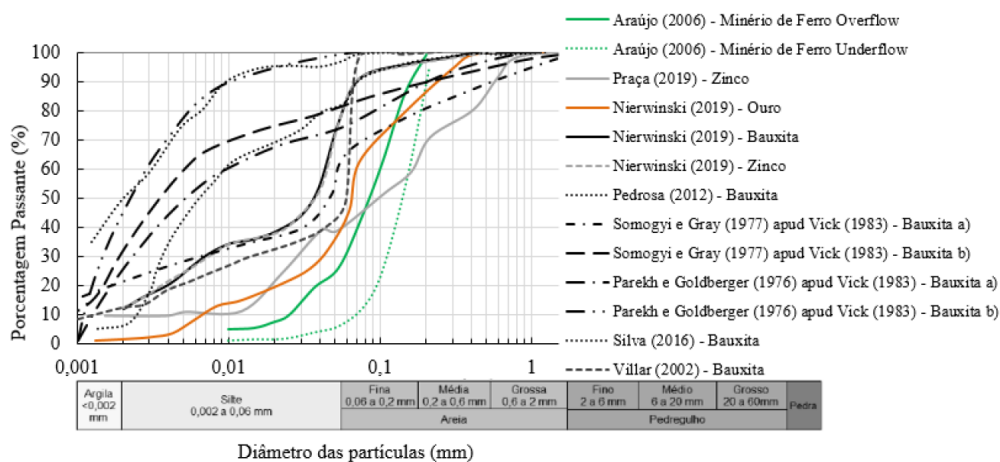
Figura 4 – Zonas de diferentes permeabilidades causadas por segregação hidráulica



Fonte: Adaptado de Vick (1983).

Em seu estudo, Gonçalves (2021) apresenta curvas granulométricas para diferentes tipos de rejeitos (Figura 4).

Figura 5 – Curvas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos associados as atividades da mineração



Fonte: Gonçalves (2021).

Destaca-se, assim, que não há uma curva granulométrica característica para esse tipo de material. Como observado na Figura 4, há uma grande heterogeneidade entre os rejeitos de mineração apresentados na literatura, pois podem apresentar desde granulometria fina, situação na qual recebem a denominação de lama, até uma granulometria mais grossa (acima de 0,074 mm), os quais são conhecidos como rejeitos granulares (Duarte, 2008).

A densidade dos grãos é uma outra característica física dos rejeitos, a qual varia entre as regiões onde o material é depositado e apresenta, normalmente, elevados valores devido à

mineralogia da rocha mãe e à presença significativa de teor de ferro – também responsável por aumentar a velocidade de sedimentação do material (Villar, 2002).

Quanto à morfologia do material, os estudos de Zhang *et al.* (2020) e Lima e Thives (2020) mencionam que o resíduo apresenta estrutura porosa, com partículas as quais apresentam formas irregulares, de formato arredondado, quase esférico. Ainda, a esse material, foi conferida uma elevada superfície específica (Samal, Ray e Bandopadhyay, 2015; Lima e Thives, 2020). Conforme Zhang *et al.* (2020) as partículas finas da lama vermelha tendem a se aglomerar formando agregados maiores.

2.3.2 Utilização de resíduo de bauxita

O Resíduo de Bauxita caracteriza-se por, normalmente, apresentar um alto teor de óxidos metálicos e presença de álcalis e, com isso, estudos vêm sendo realizados a fim de recuperar o percentual de alumina, soda, óxido férrico e titânio presentes em sua composição (Zhang *et al.*, 2011; De Freitas Marques Araújo *et al.*, 2020). Outro possível reaproveitamento apresentado na literatura é o uso desse material como condicionante de solos, como é o caso da aplicação em solos tropicais ácidos em busca de reter nutrientes e proporcionar o aumento da sua fertilidade. Nesse caso, é necessário a neutralização parcial da alcalinidade do RB, característica associada ao uso de hidróxido de sódio no processo de beneficiamento do minério para obtenção da alumina (Holanda *et al.*, 2020). Ademais, há a aplicação desse material na produção de cimento (Liberato *et al.*, 2012; Romano *et al.*, 2021; Von Paumgarten *et al.*, 2021), com destaque para o Roteiro de Tecnologia publicado pelo IAI em 2020 para maximizar o uso de resíduo de bauxita no cimento que aborda as oportunidades e desafios desse mercado, além do uso em cerâmicas à base de argila e tijolos (Sglavo *et al.*, 2000; Senff *et al.*, 2011; Hajjaji *et al.*, 2013).

Entre os fatores que limitam a utilização do resíduo de bauxita, destaca-se questões relacionadas à logística, isto é, a distância de transporte entre o local de disposição e os locais de produção onde será utilizado, ao qual são atribuídos custos adicionais para quem irá fornecê-lo (Zhang *et al.*, 2018b; Zhang *et al.*, 2020). Por isso, apesar do desenvolvimento de diversos estudos para aplicação do resíduo de bauxita ainda não há uma comercialização desse material em volumes significativos, limitando-se a 3-4% das toneladas geradas por ano mundialmente (Persaud e You, 2022).

Com relação à utilização do RB em misturas asfálticas à quente, a maioria das pesquisas encontradas nas bases de dados - dentre elas *SciELO* e *ScienceDirect* -, investigam a influência do resíduo no mástique - formado pela junção do fíler e ligante -, por meio de ensaios de caracterização física e reológica no ligante modificado. Em algumas, como apresentado na Tabela 3, é verificado o uso do RB nas características mecânicas da própria mistura. A Tabela 3 apresenta alguns estudos a respeito dessa aplicação.

Tabela 3 – Exemplos de pesquisas acerca da aplicação de resíduo da bauxita em misturas asfálticas à quente

AUTORES	TÍTULO	ANÁLISE	RESULTADOS RELEVANTES
Zhang et al. (2018b)	Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture.	Resíduos de dois tipos de processo de refino (Bayer e Sinterização) foram analisados para serem incorporados em misturas asfálticas por meio da substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do fíler de referência.	<ul style="list-style-type: none"> As misturas com resíduo em substituição ao pó de pedra como fíler apresentaram maior rigidez e indicaram melhorias na resistência à formação de sulcos.
Zhang et al. (2019)	Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute	Analisaram o comportamento do mástique asfáltico com o resíduo da bauxita sendo utilizado como fíler, comparando-o com outros materiais, sendo eles o pó de calcário, a cal hidratada e cinza volante.	<ul style="list-style-type: none"> Os resultados obtidos indicaram que o RB proporcionou o aumento da rigidez e do comportamento elástico do mástique asfáltico. Ao mesmo tempo que pode aumentar a degradação quando em condições úmidas, devido à redução na resistência da ligação agregado-mástique.
(Lima & Thieves, 2020)	Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures.	Três misturas contendo 3%, 5% e 7% de RB como material de enchimento, em substituição ao fíler de pó de pedra, foram verificadas por meio de dano por umidade induzida e deformação permanente.	<ul style="list-style-type: none"> O uso do resíduo de bauxita proporcionou maior resistência à deformação permanente e ao dano por umidade induzida, isso foi constatado pelo comparativo dos testes mecânicos das misturas com RB e de referência (sem resíduo).
Zhang et al. (2020)	Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder.	Analisaram o comportamento do mástique asfáltico com o resíduo da bauxita com o fíler em substituição ao pó de calcário. Verificando a incorporação do resíduo em conjunto com outros	<ul style="list-style-type: none"> O RB proporcionou redução da penetração e da ductibilidade do mástique, aumento do ponto de amolecimento e do módulo complexo e menor ângulo de fase quando comparado ao mástique com pó de calcário (material de referência). Além disso, proporcionou uma redução da resistência à fissuração em baixas

		materiais (cal hidratada e lama branca).	temperaturas e maior perda de resistência à degradação por umidade.
(Zhang <i>et al.</i> 2021)	Adhesive behavior and pavement performance of asphalt mixtures incorporating red mud as a filler substitute.	Analisaram o resíduo de bauxita como substituto do pó de calcário (fíler da mistura).	<ul style="list-style-type: none"> • O resíduo melhorou a rigidez e a recuperação elástica dos mástique asfáltico; • Quanto às misturas asfálticas observou-se melhora da resistência à desagregação em condições secas e efeito negativo na resistência à umidade.

Zhang *et al.* (2018b) investigaram a possibilidade do resíduo de bauxita proveniente de dois tipos de processo de beneficiamento como substituinte ao fíler em misturas asfálticas: o Processo Bayer (Bayer RM) e o Processo de Sinterização (Sintering RM) – dentre as diferenças no resíduo gerado por esses dois métodos, Zhang *et al.* (2021) aponta que o material proveniente do processo de sinterização apresenta um maior teor de CaO. Para isso, avaliaram as propriedades físicas e reológicas do mástique asfáltico, com testes que incluíram ponto de amolecimento e penetração, efetuados conforme a norma JTG E20:2011, reômetro de cisalhamento dinâmico (medição dos parâmetros módulo de cisalhamento complexo e ângulo de fase) e *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), realizado segundo a AASHTO TP 70:2009.

Os autores relataram que as partículas do resíduo tendem a se agregar quando expostas ao ar, característica associadas aos hidróxidos presentes na composição do material, os quais são materiais hidrofílicos. Além disso, o resíduo apresentou área superficial específica (35, 419 m²/g – Sintering RM – e 30,996 m²/g – Bayer RM) e volume de poros superior ao pó de pedra (9,988 m²/g). No mástique, as amostras com resíduo de bauxita apresentaram maior ponto de amolecimento, com o aumento em percentuais equivalentes a, aproximadamente, 46% e 12% para a amostra Sintering e Bayer RM, respectivamente, em relação à amostra com pó de pedra. Ademais, verificaram redução na penetração, indicando o aumento da viscosidade do ligante. O índice de penetração (IP), calculado a partir desses dois parâmetros, indicou que o RB pode melhorar o comportamento elástico do mástique, contribuindo com a resistência a formação de sulcos – para substituição em 100%, aumentou de - 1,04 para 2,25, Sintering RM, e 0,03 com a substituição pelo Bayer RM.

No estudo também realizaram a caracterização reológica das amostras, o módulo complexo e ângulo de fase a 60°C foram equivalentes a 8445 Pa e 15,041° para a amostra referência, 19845 Pa e 13,946° para substituição de 100% por Sintering RM e 13502 Pa e 14,822° para substituição

de 100% por Bayer RM, indicando, segundo os autores, aumento no comportamento elástico do mástique com a adição de resíduo de bauxita, especialmente para aquele oriundo do processo de Sinterização.

Por fim, buscaram avaliar a deformação por fluência acumulada e a resposta elástica do material com testes MSCR realizados a 60°C sob dois níveis de tensão equivalentes a 0,1 kPa e 3,2 kPa. Os resultados de deformação acumulada no tempo mostraram que, considerando o mesmo nível de tensão, a adição do resíduo de bauxita resultou em uma diminuição significativa, principalmente nas amostras com Sintering RM, o que pode indicar um melhor comportamento quanto à resistência à deformação permanente. No que diz respeito aos resultados de recuperação elástica, os autores observaram recuperação inferior das amostras preparadas com Bayer RM quando comparadas àquelas com Sintering RM -, com um aumento do valor de recuperação de 8%, amostra com 25% de resíduo, para quase 40%, amostra com substituição de 100% do pó de pedra por Sintering RM, para o nível de tensão de 0,1 kPa - e, com isso, inferiram que o Sintering RM apresenta uma maior contribuição com a recuperação elástica do mástique.

Lima e Thieves (2020) também exploraram o uso de resíduo como fíler em misturas asfálticas. As autoras verificaram a incorporação em três percentuais (3%, 5% e 7%), considerando 7% de fíler na proporção total da mistura e, portanto, complementando com 4, 2 e 0% de fíler de pó de pedra, além de uma mistura referência com 7% de pó de pedra. No estudo realizaram testes mecânicos para averiguar o comportamento das misturas produzidas, os quais incluíram dano por umidade induzida, realizado de acordo com a NBR 15617 (ABNT, 2011), e deformação permanente, cujo ensaio seguiu de acordo com a norma francesa NFP 98-253-1:1993 (simulador de tráfego).

Neste estudo, três corpos de prova foram condicionados com base em um protocolo de saturação térmica para simular o efeito da umidade. Inicialmente, foram saturados com um teor de água entre 55 e 80% e, em seguida, submetidos a uma temperatura de $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$ por, no mínimo, 16 horas. Após esse processo, foram imersos em um banho a 60°C por, no mínimo, 24 horas e, então, submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral utilizando uma prensa mecânica, após uma imersão de 2 a 3 horas em água à temperatura de 25°C. Enquanto isso, outros três corpos de prova não foram condicionados e foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral após 4 horas de condicionamento à temperatura de 25°C. A

razão entre a resistência à tração obtida para os corpos condicionados e não condicionados equivale à resistência retida à tração e, indica a suscetibilidade do material à umidade.

Com isso, os resultados mostraram que as misturas com resíduo de bauxita apresentaram uma maior média de resistência à tração por compressão diametral para os corpos não condicionados (0,65 MPa). No entanto, demonstraram uma menor resistência retida à tração (RRT) em comparação com as demais misturas produzidas com 0%, 3% e 7% de resíduo em substituição ao fíler de pó de pedra. Isso pode ser atribuído a um maior percentual de resíduo não encapsulado no processo de mistura, favorecendo a liberação dos metais solúveis com a penetração da água nos corpos de prova. Segundo os autores, os corpos de prova mantiveram percentuais de vazios equivalentes, portanto, não é possível afirmar que esse parâmetro volumétrico influenciou significativamente nos resultados de RRT. A mistura referência (com uma relação de 91,2%) apresentou um melhor comportamento em relação à mistura com 5% de resíduo (com uma relação equivalente a 87,7%). No entanto, as misturas com 3% e 7% obtiveram melhores resultados (com relações de 91,7% e 95,3%, respectivamente).

Quanto à deformação permanente, a mistura contendo 5% de resíduo de bauxita e 2% de pó de pedra apresentou uma maior redução na profundidade de sulco (42,63% após 30.000 ciclos), indicando uma maior resistência à deformação permanente. As reduções observadas nas demais misturas, com 3% e 7% de resíduo de bauxita, foram de 12,82% e 41,30%, respectivamente, após 30.000 ciclos de carregamento. Com isso, os autores concluíram que o resíduo de bauxita pode ser utilizado como fíler em misturas asfálticas, constituindo-se como uma alternativa técnica viável para aplicação desse material.

Zhang *et al.* (2020) avaliaram o comportamento do mástique asfáltico com o resíduo da bauxita, proveniente do processo de Sinterização, como substituto do pó de calcário, comparando seu desempenho com outras substituições, como a cal hidratada e a lama branca (subproduto da polpação e fabricação de papel).

Os resultados mostraram que a substituição do pó de calcário (material de referência) por esse resíduo proporcionou um aumento no ponto de amolecimento (14,64%), uma redução na penetração (28,87%) e na ductilidade (16,44%). Além disso, causou um aumento de até quatro vezes na viscosidade, quando comparado com os resultados do pó de calcário natural, indicando uma maior rigidez do mástique proporcionada pelo resíduo. Resultados negativos foram verificados em relação ao comportamento da resistência à fissuração em baixas temperaturas

(ensaio de tensão direta realizado a -12°C), que apresentou aproximadamente 53,46% de redução no alongamento e 7,56% na resistência à fratura.

A substituição do pó de calcário pelo resíduo de bauxita reduziu significativamente a resistência de ligação da interface agregado-mástique à umidade, com uma redução superior a 60% durante um período de 14 dias de condicionamento em comparação com o mástique contendo pó de calcário. Isso pode ser atribuído à química do material, que apresenta metais solúveis em sua composição. Nesse sentido, de acordo com *et al.* (2019), o resíduo tende a se separar do ligante com a presença de umidade devido a uma fraca adesão entre o ligante e o resíduo. O uso de cal hidratada e lama branca, material que apresenta carbonato de cálcio em sua composição, em conjunto com o resíduo de bauxita, proporcionou uma maior resistência ao mástique na condição úmida.

Por fim, com base nas curvas mestras dos mástiques com e sem o uso do resíduo apresentados no estudo, observou-se que o RB proporcionou um aumento no módulo complexo e uma redução no ângulo de fase do mástique. Sendo assim, os autores concluíram que o uso do resíduo em ligantes asfálticos torna-se viável desde que se adicione outro material como agente modificador, como a lama branca que foi investigada no estudo.

Por fim, conforme observado por Zhang *et al.* (2021), há uma escassez de estudos sobre as propriedades de resistência à fadiga e durabilidade a longo prazo de misturas asfálticas com RB. Além disso, há uma lacuna de estudos que explorem a incorporação desse material como agregado na mistura, considerando que o RB também possui partículas grosseiras. Nesse contexto, um estudo de caso conduzido por meio de uma parceria entre a Alcoa e a GMA *Garnet* visa extrair o percentual de material grosseiro (areia) do resíduo de bauxita, que na Austrália corresponde a aproximadamente 40% do resíduo produzido. O objetivo é utilizar esse material na construção de estradas, acabamentos e aterros industriais, substituindo materiais como a areia (IAI, 2022).

De maneira geral, pode-se constatar que os trabalhos analisados apresentaram resultados favoráveis à utilização do resíduo de bauxita na produção de misturas asfálticas. Nesse cenário, o RB proporciona a redução de materiais virgens a serem utilizados no modal rodoviário e surge a possibilidade de uma destinação ambientalmente adequada para esse material (Mendes, 2022).

2.3.3 Classificação ambiental do resíduo de bauxita

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em resíduos classe I – perigosos, resíduos classe II – não perigosos, resíduos classe II A – não inertes e resíduos classe II B – inertes. Essa norma, com base na identificação do processo ou atividade que deu origem ao material, os seus constituintes e características, estabelece a categoria a qual um determinado resíduo se enquadra, a partir da comparação entre os dados obtidos do respectivo material e os percentuais limites de substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Para tanto, os materiais constituintes a serem investigados devem ser estabelecidos conforme a matéria-prima, insumos e o processo que deu origem ao resíduo.

A principal preocupação ambiental associada ao resíduo de bauxita engloba a elevada alcalinidade, presença de metais pesados e elementos radioativos em sua composição. Dessa forma, nos diversos estudos que analisam o uso do RB os autores buscam avaliar os componentes que lixiviam desse material, de forma a garantir que a sua aplicação é segura e, portanto, não causará impactos ambientais devido à percolação de materiais que contaminarão solos ou águas superficiais e subterrâneas (Zhang *et al.*, 2018b; Zhang *et al.*, 2021).

Assim, com a finalidade de viabilizar a aplicação de RB como filler em misturas asfálticas, Zhang *et al.* (2018b) realizaram ensaios de toxicidade e radioatividade em amostras de material lixiviado do resíduo de bauxita oriundo do Processo Bayer fornecido pela *Shandong Aluminium Industry*, e concluíram que as concentrações de metais pesados (Cádmio, Chumbo, Crômio, Arsênio, Cobre, Zinco, Níquel) encontravam-se abaixo dos limites estabelecidos pela norma chinesa GB 5085.3:2007, o que demonstrou a possibilidade de sua utilização como material para construção de pavimentos. Além disso, analisaram os parâmetros de atividade específica dos seguintes radionuclídeos: ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , os quais, com base na norma chinesa GB 6566:2010 que estabelece os limites de índice de exposição interna (I_{Ra}) e índice de exposição externa (I_{r}), indicaram que o resíduo apresentou índices inferiores aos limites máximos determinados.

Ao seu alto valor de pH, normalmente entre 9 e 12,5, são atribuídos os principais impactos ambientais, configurando-se como um risco de contaminação das fontes hídricas superficiais e subterrâneas (Zhang *et al.*, 2021).

Bertocchi *et al.* (2006) e Ribeiro *et al.* (2011), em virtude da elevada alcalinidade e corrosividade do RB classificam-no como resíduo de caráter perigoso. Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), um material é caracterizado como corrosivo se apresentar uma solução com pH

superior ou igual a 12,5 e, de acordo com a bibliografia as características desse material, que incluem o seu teor de alcalinidade, variam com o tratamento ao qual é submetido antes de sua disposição e o tempo de exposição às intempéries do meio ambiente.

Manfroi (2009), em seu estudo, analisou amostras de RB secas e calcinadas. Nesse caso, ambas apresentaram pH inferior ao limite de 12,5, sendo classificadas como não corrosivas. Em relação aos resultados de caracterização do material lixiviado, que apresentou concentrações de cromo (11,371 mg/L) e selênio (4,251 mg/L) superiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) – limite máximo de 5,0 mg/L e 1,0 mg/L para cromo total e selênio, respectivamente –, o RB é classificado como resíduo de Classe I (perigoso).

Bruschi (2020) classificou o resíduo de bauxita utilizado em seu estudo como não inerte, Classe II A. O autor verificou os percentuais de metais presentes em solução aquosa proveniente de procedimentos de lixiviação e solubilização do material, utilizando Técnica de Espectrometria de Emissão Atômica. Por meio da análise da solução solubilizada foi identificada a presença de prata, alumínio, arsênio, cádmio, cromo, ferro, mercúrio, sódio, chumbo e selênio acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Essas diferentes classificações mostram que o RB não apresenta uma rotulação, evidenciando a necessidade de verificação ambiental desse material para estabelecer o seu potencial de utilização.

2.3.4 Custos relacionados a disposição do resíduo

A disposição do resíduo de bauxita compreende, estimadamente, entre 1 e 2% do custo de produção da alumina, devido à expressiva área demandada e aos sérios problemas ambientais associados (Tsakiridis, Agatzini-Leonardou e Oustadakis, 2004; Hildebrando, *et al.*, 2013). Dessa forma, tais custos dependerão da disponibilidade de um local para disposição adequada, da distância da planta até esse local e do método de transporte utilizado, o qual depende do método de disposição utilizado, as condições climáticas, requisitos de monitoramento e legislação local. O custo operacional pode compreender US\$ 4 a US\$ 12/t, e os custos relacionados à remediação do local são variáveis, uma vez que dependem da técnica adotada (Evans, 2016).

Como alternativas de disposição dos rejeitos oriundos do beneficiamento de minérios, o IBRAM (2016) aponta a utilização de minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, pilhas, empilhamento a seco (método “*dry stacking*”), disposição em pasta e barragens de contenção.

As lagoas de disposição, conhecidas normalmente como barragens de rejeitos, são estruturas construídas com aterros compactados, os quais têm como função principal conter resíduos sólidos e água oriundos do processo de beneficiamento dos minérios – sendo o resíduo bombeado com um teor de sólidos entre 15 e 30% (Rout; Sahoo, 2013). Tais estruturas são classificadas conforme o método de alteamento a qual são submetidas, podendo ser: a montante, a jusante ou de linha de centro. No entanto, devido à incerteza relacionada ao método de alteamento a montante, somado aos desastres que ocorreram com o rompimento de barragens de rejeito no Brasil – os quais resultaram em perdas de vida e significativos impactos ambientais –, com destaque ao incidente ocorrido em 2019, em Brumadinho (MG), a construção de barragens de rejeitos a montante está proibida no país. Tal cenário, somado às regulamentações locais e internacionais, com destaque para o GISTM – *Global Industry Standard on Tailings Management* (PADRÃO GLOBAL DA INDÚSTRIA PARA A GESTÃO DE REJEITO), levou as empresas da mineração a intensificarem suas buscas por técnicas mais seguras e sustentáveis de disposição de rejeito (Ulrich, 2019). Nesse contexto, as técnicas de empilhamento a seco e de armazenamento a seco destacam-se como uma alternativa mais sustentável por proporcionarem o aumento do volume de material a ser depositado, contribuindo para uma maior vida útil das estruturas de disposição, e apresentarem um menor potencial de vazamento (Zhang *et al.*, 2014).

Esses diferentes métodos de disposição envolvem custos relacionados ao projeto, planejamento, construção, operação, manutenção, fechamento e reabilitação. Além destes, devem ser considerados ainda os custos com monitoramento – com destaque para as barragens de rejeito, a qual faz-se necessária a instalação de equipamentos como piezômetros e medidores de nível d'água –, e custos para a caracterização do material, no caso do método de filtragem do material, o qual busca estabelecer o filtro que melhor atenderá a demanda da planta (Williams *et al.*, 2017).

Alves (2020), em seu estudo de empilhamento de rejeito filtrado em substituição a barragens, concluiu que o empilhamento mostrou ser mais oneroso que o método de armazenamento em barragens e que, portanto, sua viabilidade decorre dos aspectos ambientais e segurança quanto a possíveis rompimentos, mitigando desastres sociais e ambientais. Esse método de disposição é considerado mais seguro por possibilitar o descarte e armazenamento do resíduo com menor teor cáustico e maior teor de sólidos (< 65%), proporcionando um maior incentivo a reutilização desse material, uma vez que resulta em um cenário mais favorável ao transporte e manuseio do referido resíduo (Power, Gräfe e Klauber, 2011; Evans, 2016).

2.4 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS ASSOCIADOS AS ATIVIDADES DA MINERAÇÃO

As atividades de extração mineral causam impactos ao meio ambiente, assim como às comunidades vizinhas. Com isso, no Brasil, a fim de garantir a segurança e à minimização dos impactos associados, são estabelecidas algumas leis e normas a serem seguidas, entre elas:

- Lei Federal N° 6938/81 - estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e inclui, em seu Artigo 18, a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como parte integrante do processo de licenciamento de atividades e empreendimentos efetivo ou potencialmente poluidores ou causadores de degradação ambiental (BRASIL, 1981).
- Resolução CONAMA N° 01/86 – estabelece critérios básicos e diretrizes para o uso e implementação da AIA (CONAMA, 1986).
- Lei Federal N° 12334/10 – estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (BRASIL, 2010).

Além disso, conselhos e associações internacionais e nacionais, como é o caso do *Common Wealth of Australia*, *The Mining Association of Canada* e IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, têm proposto recomendações para o adequado gerenciamento dos rejeitos oriundos das atividades da mineração.

O termo impacto ambiental, conforme o Artigo 1° da Resolução CONAMA N° 001, de 23 de janeiro de 1986, está relacionado a:

(...) qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais.

Nesse contexto, a indústria extrativista mineral destaca-se por provocar uma série de impactos negativos, nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais, os quais se estendem ao longo das fases da exploração mineral. Estas fases incluem desde a extração inicial até o transporte e o beneficiamento do minério, e ainda, podem se prolongar após o fechamento ou encerramento das atividades (Araújo, Oliveira e Fernandes, 2014).

Assim, os riscos e impactos ambientais identificados englobam a saúde e segurança dos colaboradores e da comunidade do entorno – possibilidade de rompimento das estruturas de disposição dos resíduos, colapso da mina, uso indevido ou não uso dos EPIs, problemas

respiratórios ou de pele pela exposição a poeira e outros. Ao meio ambiente, essas atividades resultam na alteração do espaço, degradação da biodiversidade (alteração na fauna e flora local), do solo, do relevo, de atividades econômicas existentes, e expressiva geração de resíduos. Além disso, causam poluição de água superficiais e subterrâneas, do ar e do solo (erosão pela perda vegetal), contribuem com a emissão de GEE e, conseqüentemente, para as mudanças climáticas (Carvalho *et al.*, 2018).

O método de disposição em barragens de rejeito, além dos impactos acima citados, também causa impacto visual em todas as fases da vida útil dessas estruturas. Outrossim, como neste tipo de disposição o resíduo de bauxita encontra-se diluído e, normalmente, apresenta alta alcalinidade, o vazamento desse material está associado a sérios riscos ambientais e sociais para a área/comunidades situadas a jusante (Silva, 2007; Duarte, 2008; Zhang *et al.*, 2021).

Tais impactos socioambientais consistem em externalidades, as quais em síntese correspondem aos efeitos causados pelos processos de produção ou de consumo que afetam ou beneficiam terceiros que não participam da transação, ou seja, da troca comercial (Lavratti e Tejeiro, 2014). Nesse contexto, as externalidades podem ser positivas – quando cria um benefício – ou negativas – quando resulta em um custo (Kanda *et al.*, 2019).

Em termos de custos externos, a presença de duas condições resulta em uma externalidade negativa, sendo elas: situação na qual a atividade de um agente gera perda de bem-estar em outro agente; e a não compensação dessa perda de bem-estar (Ferreira, 2003).

Portanto, as externalidades surgem das diversas atividades desenvolvidas no ciclo de vida de um produto (produção, transporte, uso e descarte e são responsáveis por inúmeras aspectos ambientais globais, regionais e locais, entre eles: emissão de gases com efeito de estufa (GEE); poluição do ar, do solo e da água; produção de ruído, odor e intrusão visual. Nesse cenário, podem contribuir com alterações climáticas, desastres, afetar a saúde da população e dos animais, causar danos a culturas e edifícios (Eshet, Ayalon e Shechter, 2006).

2.4.1 Aproveitamento de resíduos como fator de redução de externalidades

Com o crescimento populacional exponencial e o subsequente aumento no consumo de recursos naturais, a geração de resíduos continuou a crescer seriamente (Tutunchian e Altınbaş, 2023). No âmbito do setor da mineração, em virtude do aumento significativo dos resíduos provenientes das suas atividades produtivas, cujo cenário foi impulsionado pelo crescimento da

demanda por minérios e os produtos deles derivados, conforme o Artigo 2º da Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986, as empresas devem buscar soluções que promovam a minimização do volume de material movimentado da mina e geração de materiais a serem descartados (estéreis e rejeitos); reduzir o consumo de água utilizada no processo; diminuir os riscos atrelados aos processos de beneficiamento e da deposição de rejeitos; mitigar os impactos da mina; e potencializar a satisfação social (Carvalho *et al.*, 2018).

Com essa perspectiva o IBRAM (2021) apontou em seu documento “Carta Compromisso do Setor Mineral”, metas relacionadas a gestão de resíduos cujas ações envolvem o fortalecimento da gestão com foco na redução do quantitativo gerado, o desenvolvimento de políticas e estudos de melhores práticas para a gestão desses materiais, visando a redução de impactos socioambientais e o fomento em novos negócios, transformando os resíduos em novos produtos.

Nesse cenário, a reciclagem e a reutilização dos resíduos provenientes do beneficiamento dos minérios como um coproduto de outros processos é visto como uma alternativa para manter o valor em potencial do material, e assim, gerar benefícios ambientais e econômicos, possibilitando minimização da degradação ambiental, redução dos custos relativos ao armazenamento e monitoramento dos resíduos, além da redução da exploração de agregados naturais para fabricação de novos produtos, abrangendo a perspectiva da economia circular – EC (Bastos *et al.*, 2016; Kefeni, Msagati e Mamba, 2017). A EC consiste em uma nova abordagem econômica, que contraria o atual sistema produtivo (sistema linear, cuja configuração abrange basicamente extrair recursos, produzir, consumir e descartar) e, portanto, considera o circuito fechado de recursos. Nesse sentido, a *Ellen MacArthur Foundation* - EMF - (2014) traz como objetivo da economia circular a manutenção em alto nível de todos os insumos de um processo produtivo com a desvinculação entre o desenvolvimento econômico e o consumo finito dos recursos.

Dessa forma, a reutilização de resíduos surge como uma forma viável de minimizar os efeitos ambientais negativos atrelados à sua disposição e armazenamento e, assim, reduzir as externalidades negativas associadas a essa atividade.

2.5 EXTERNALIDADES E VALORAÇÃO ECONÔMICA

Van den Bergh (2012) destaca que a internalização dos impactos ambientais causados pelas atividades produtivas deve ser realizada em termos monetários, de maneira que o “agressor” seja cobrado pelo custo da externalidade. Com isso, o processo de valoração econômica dos serviços

ecossistêmicos consiste em uma ferramenta que pode influenciar as decisões diárias dos consumidores, produtores, investidores e inovadores em direção à sustentabilidade.

O termo sustentável nesse cenário, segundo Romeiro (2003), não diz respeito a busca por um ecossistema estático, consiste na verdade em atribuir um equilíbrio, ou seja, busca um processo dinâmico de interações entre as diversas espécies nele contidas.

Mensurar os impactos da degradação ambiental, dos bens e serviços ambientais em termos monetários, conforme Oliveira (2021), contribui com a quantificação dos custos e benefícios relacionados à variação da qualidade e quantidade desses recursos. Para tanto, valorar economicamente um recurso ambiental corresponde ao processo de determinação do quanto melhor ou pior estará o bem-estar das pessoas devido a mudanças na quantidade de bens e serviços ambientais, seja na apropriação por uso ou não (Motta, 2011).

Dessa forma, o valor econômico total de um recurso ambiental abrange uma soma de valores, os quais compreendem valor de uso e valor de existência do recurso ambiental, ou simplesmente valor de não uso. Os valores de uso correspondem a soma dos valores de uso direto, utilização direta do recurso – podendo ser consumíveis ou não; uso indireto, utilização indireta do recurso, ou seja, advém das funções ecológicas do recurso ambiental, como por exemplo, a proteção a ventanias e as ondas por manguezais; e valores de opção, os quais correspondem a quantia que os indivíduos estariam dispostos a pagar para manter um recurso ambiental. E por fim, o valor de não uso, o qual está relacionado ao valor de existência, como por exemplo, contribuir com as organizações de proteção de animais em extinção, a satisfação em saber que o recurso existe (Ortiz, 2003; Gonçalves, 2006).

A quantificação monetária das externalidades e dos próprios recursos naturais pode ser realizada com o uso de métodos de valoração econômica dos recursos ambientais, os quais podem ser Métodos da Função de Produção - método da produtividade marginal e de mercados de bens substitutos - e Métodos da Função de Demanda - métodos que utilizam mercados de bens complementares e mercados hipotéticos (Matos *et al.*, 2010).

De acordo com Da Motta (2011) os métodos da função de produção, analisam casos nos quais o recurso ambiental está atrelado à produção de um recurso privado e normalmente assumem que as variações na oferta do dado recurso não alteram os preços de mercado, tais como dose resposta, custo de reposição, custos evitados, custos de controle e custo de oportunidade. Quanto aos métodos da função procura partem da percepção de que a variação da disponibilidade do

recurso modifica o bem-estar da população e, portanto, é possível identificar as medidas de disposição a pagar ou disposição a receber dos indivíduos em relação a estas variações, e incluem métodos como preços hedônicos, custo de viagem e valoração contingente. Características desses métodos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Características dos métodos de valoração

Método	Características
Dose resposta	Obtém o preço de um recurso a partir de uma função, relacionando o nível de provisão do recurso ambiental (dose) e o nível de provisão de um produto no mercado (resposta).
Custos de reposição	Gastos com substituto para repor ou reparar o dano ambiental.
Custos evitados	Gastos para manter um produto constante após variação do bem ou serviço ambiental.
Custos de controle	Gastos para manter a qualidade ou a disponibilidade de um bem ambiental.
Custo de oportunidade	Renda sacrificada para manter bem ou serviço ambiental no seu estado atual.
Preços hedônicos	Estabelece relação entre os atributos de um produto e seu preço no mercado.
Custo de viagem	Obtém a disposição adicional da população a pagar pelas visitas a um patrimônio natural a partir de uma função que relaciona a taxa de visitação ao custo de viagem (função demanda).

Fonte: Vélez (2015); Custódio (2017).

Segundo Ferreira (2003), computar os custos externos na análise econômica é importante e configura-se como um dos aspectos mais críticos do processo de contabilização. Quanto ao método, a NBR 14653:2008 que trata da avaliação de bens (recursos naturais e ambientais), estabelece que não é possível determinar, a priori, qual método ou critério de valoração de dano ambiental deve ser necessariamente aplicado. Como exemplo, tem-se a valoração dos danos decorrentes do consumo de água na mineração, o qual pode provocar alterações na dinâmica hídrica, resultando na redução do volume que abastece a região. Cenário este que causa custos sociais e, portanto, a população afetada pela falta de água e de que forma cada um foi prejudicado devem ser identificados para, assim, as técnicas de valoração serem aplicadas, as quais podem ser, por exemplo: o método de custos de reposição e o método de produtividade marginal.

Para tanto, os métodos de valoração econômica ambiental são instrumentos analíticos que contribuem para a avaliação de projetos mais abrangente e configuram-se como mecanismos que podem influenciar as decisões diárias dos consumidores, produtores, investidores e inovadores rumo à sustentabilidade (Angotti e Ferreira, 2016).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria de mineração de bauxita é uma importante fonte de alumínio, utilizado em diversos setores, incluindo construção, transporte e embalagens. No entanto, o beneficiamento da bauxita visando a extração dos óxidos de alumínio gera uma quantidade significativa de resíduos. Com isso, a gestão adequada desses resíduos consiste em um desafio ambiental e econômico significativo. A falta de disposição apropriada pode levar à contaminação do solo, da água e à degradação ambiental. Dessa forma, a utilização desse material em misturas asfálticas é uma estratégia sustentável que pode contribuir para a redução do impacto ambiental associado à disposição desses resíduos.

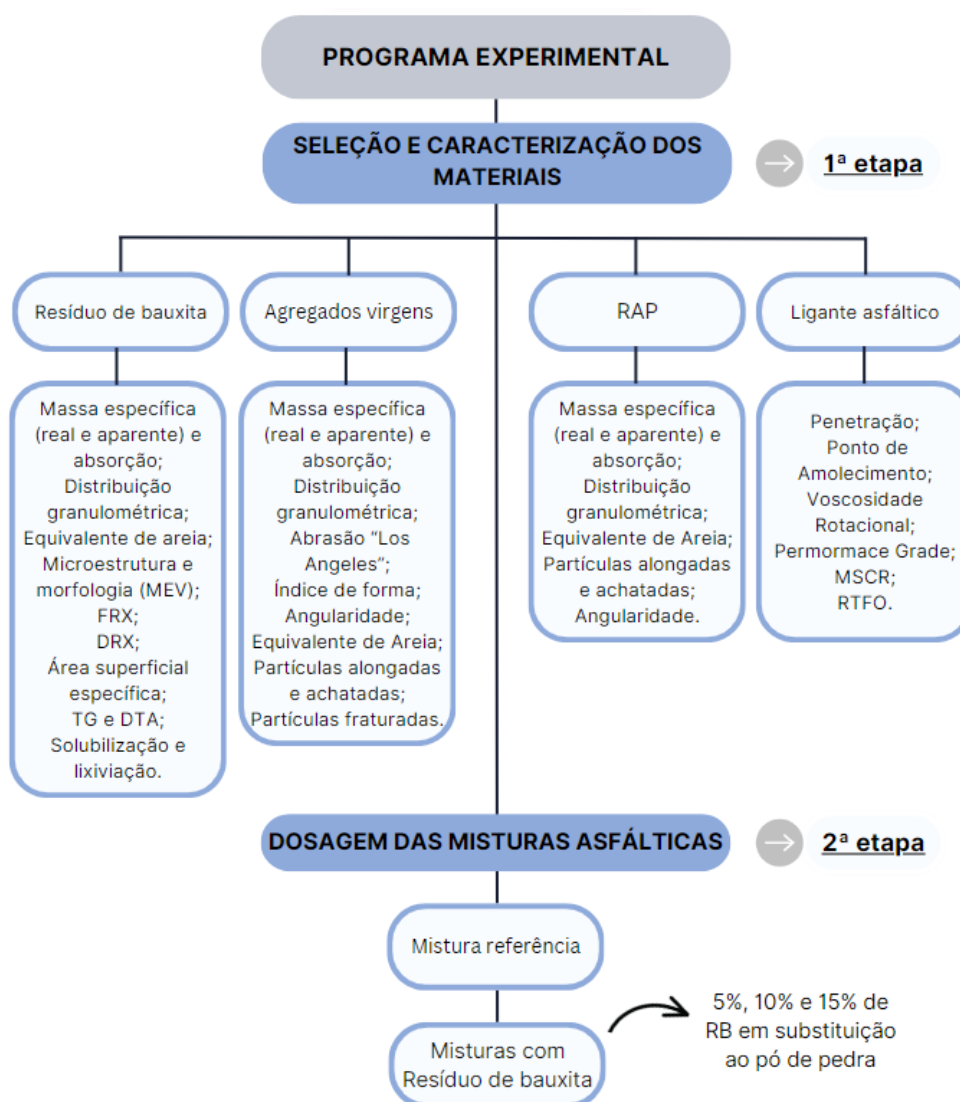
Os estudos já realizados acerca da utilização do resíduo de bauxita em misturas asfálticas mostraram resultados técnicos promissores quanto ao uso desse material nessas misturas. Assim, surge um possível cenário para destinação ambientalmente adequada desse resíduo, reduzindo os impactos ambientais associados ao seu armazenamento e de recursos naturais utilizados na pavimentação.

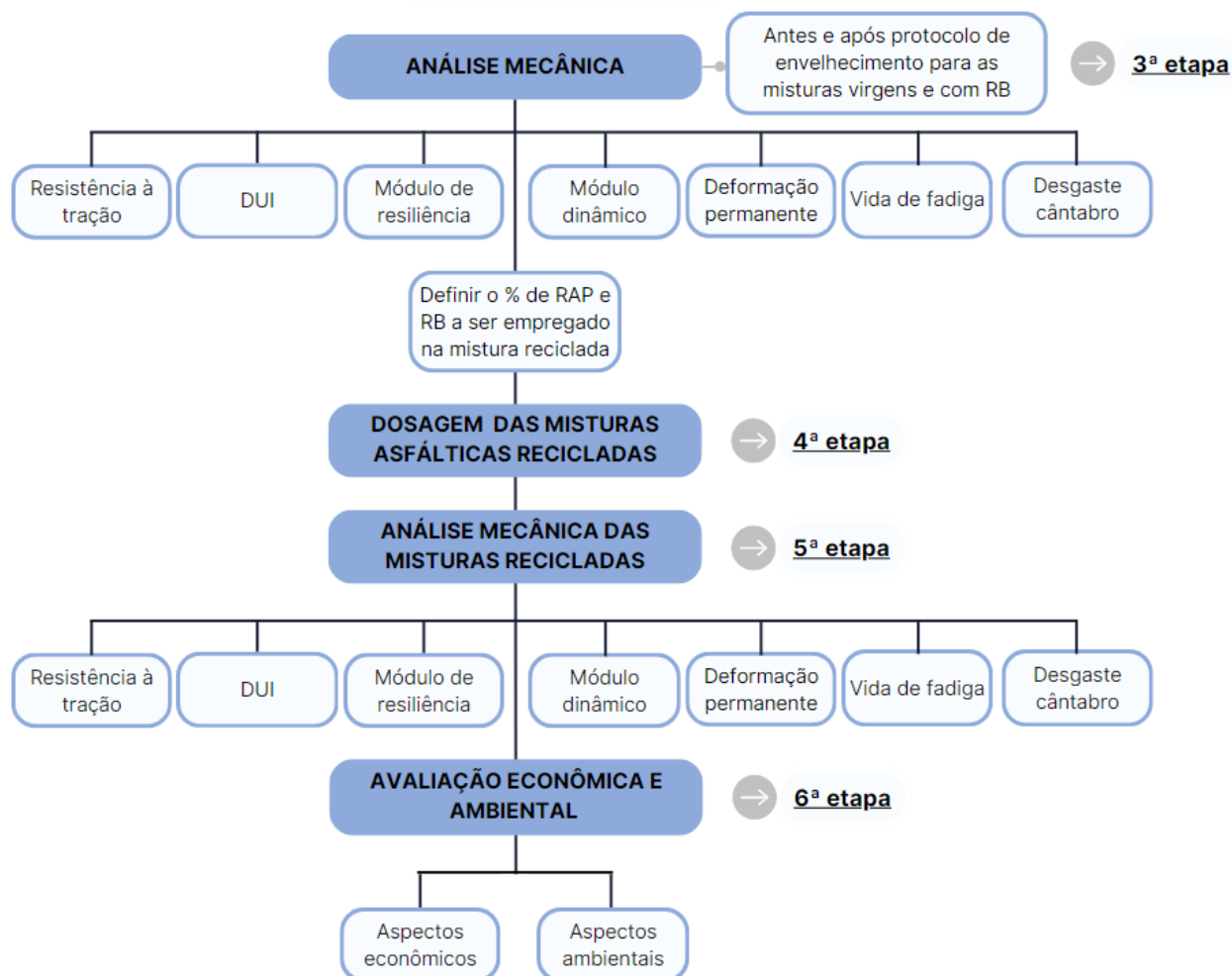
Logo, essa pesquisa teve o intuito de contribuir com o aprofundamento do estudo da utilização do resíduo de bauxita em misturas asfálticas virgens e com RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), de forma a preencher as lacunas observadas na literatura quanto aos aspectos mecânicos, econômicos e ambientais e contribuir com a busca do setor por uma abordagem circular. Além de avaliar o enclausuramento do material para verificar se a aplicação é eficaz em impossibilitar a percolação de alcalinidade e de metais pesados presentes no resíduo.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais utilizados neste estudo para produzir as misturas asfálticas com resíduo de bauxita, na condição virgem e reciclada, assim como os procedimentos realizados para caracterizar o resíduo de bauxita, avaliar o desempenho mecânico dessas misturas e os aspectos econômicos e redução das externalidades ambientais associados à utilização desse material na pavimentação. A Figura 9 apresenta o fluxograma com as etapas de realização deste estudo.

Figura 6 – Fluxograma referente às etapas da pesquisa.





A primeira etapa abrangeu a seleção dos materiais e caracterização, portanto, consistiu na caracterização dos agregados virgens, resíduo de bauxita (RB), RAP e ligante asfáltico virgem, conforme apresentado no fluxograma da Figura 5. A segunda etapa englobou a dosagem das misturas asfálticas virgens e com resíduo de bauxita, cujos percentuais foram estabelecidos com base na granulometria do RB. A terceira etapa abrangeu à análise mecânica das misturas por meio dos ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida (DUI), módulo de resiliência, módulo dinâmico, deformação permanente, via de fadiga e desgaste cântabro antes e após protocolo de envelhecimento a longo prazo. Já na quarta etapa foi realizada a dosagem das misturas recicladas com e sem resíduo de bauxita, cujo comportamento mecânico foi verificado na quinta etapa desse estudo. E por fim, na sexta etapa, foi verificada a viabilidade ambiental e econômica do uso do resíduo como produto para a pavimentação.

Assim, neste capítulo estão descritos os materiais utilizados no estudo para produzir as misturas asfálticas e os procedimentos realizados para caracterizá-los.

3.1 MATERIAIS:

3.1.1 Agregados naturais

Os agregados utilizados para compor as misturas asfálticas englobam agregados graúdos (Brita 19.0 mm e 12.5 mm) e miúdos (pó de pedra), caracterizados como de natureza granítica. A cal hidratada dolomítica foi usada como filer. Os agregados graúdos foram concedidos pela empresa Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande - PB, enquanto o filer foi adquirido no comércio local do mesmo município. A Tabela 5 apresenta a caracterização desses materiais realizada de acordo com as normativas vigentes.

Tabela 5 – Ensaio para caracterização dos agregados.

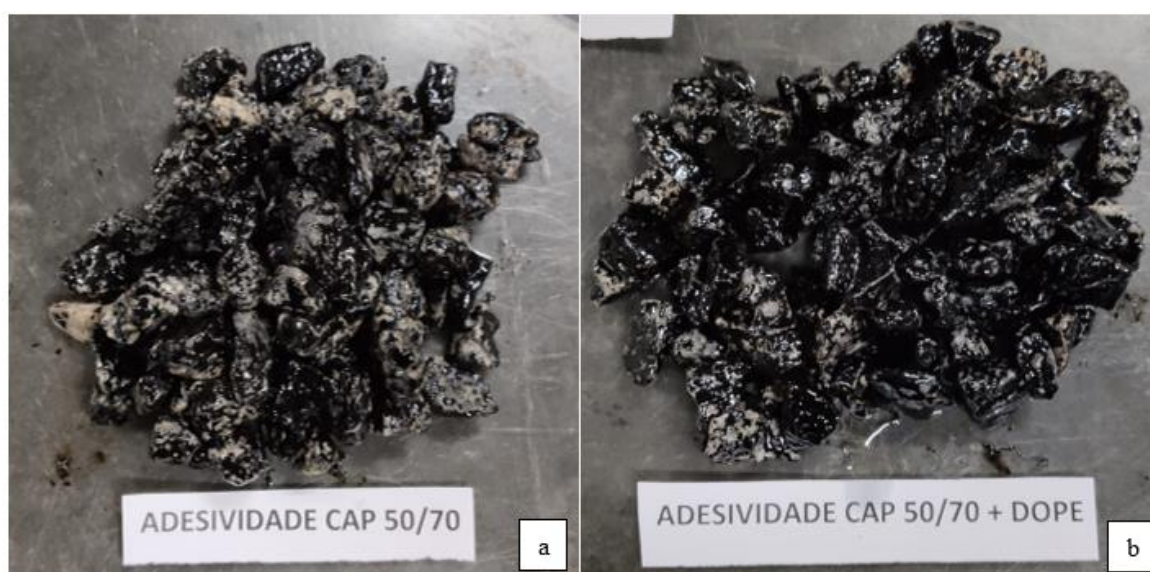
ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS		
			Brita 19.0 mm	Brita 12.5 mm	Pó de Pedra
Massa específica (g/cm ³)	DNIT 413:2021	-	2,723	2,722	2,757
Massa específica aparente (g/cm ³)	DNIT 413:2021	-	2,695	2,688	2,723
Absorção (%)	DNIT 413:2021	≤ 2	0,446	0,595	0,46
Índice de forma	DNIT 425:2020	≥ 0.5	0,653	0,649	-
Equivalente de Areia (%)	DNIT-ME 054:1997	≥ 55	-	-	67,3
Abrasão “Los Angeles” (%)	DNIT 035:1998	≤ 55	18,5	20,4	-
Partículas alongadas e achatadas (%)	DNIT-ME 429:2020	≤ 10	7,76	7,86	-
Partículas fraturadas (%)	DNIT-ME 430:2020	≥ 90	98,28	99,34	-
Angularidade (%)	DNIT-ME 415:2019	≥ 45	-	-	45,1

Como pode ser observado na tabela acima os parâmetros analisados estão dentro dos limites especificados pelas suas respectivas normas.

Além disso, foi determinada a adesividade do agregado graúdo conforme a norma DNIT 078:1994, que foi considerada insatisfatória, possivelmente devido à composição química deste material, que inclui dióxido de silício. Para mitigar esse efeito e promover uma melhor adesão

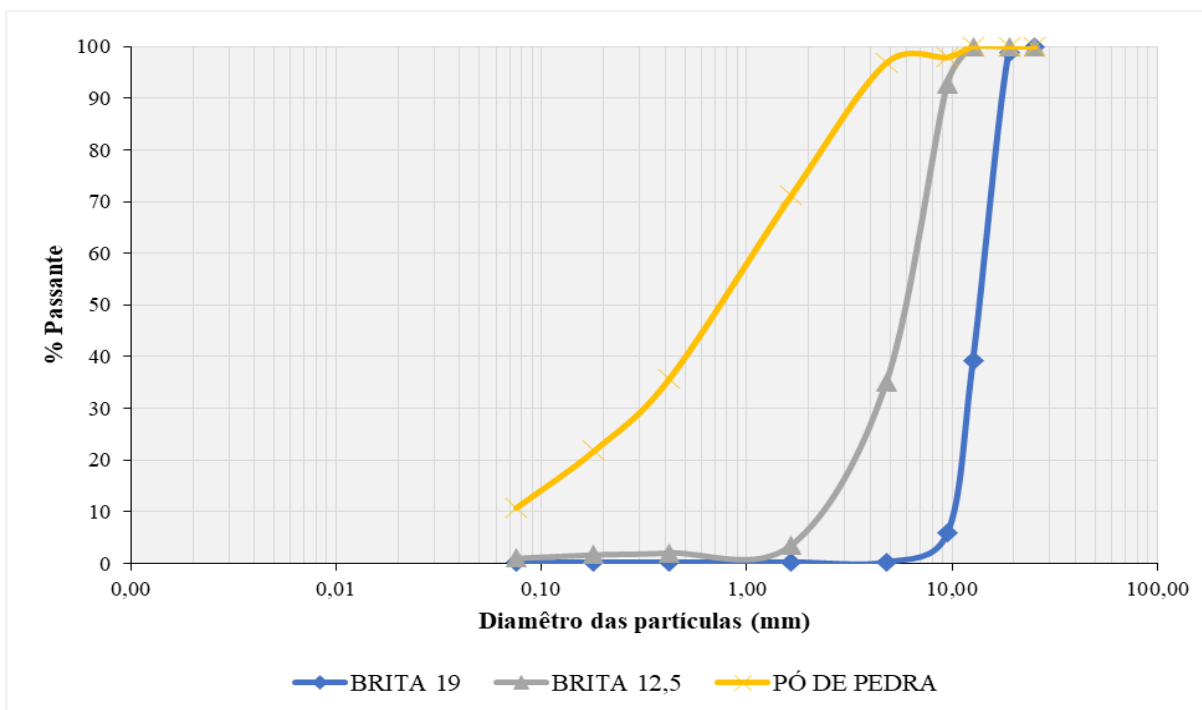
entre ligante asfáltico e os agregados, foi utilizada cal hidratada na composição das misturas, e um melhorador de adesividade foi adicionado ao ligante asfáltico. O melhorador de adesividade, conhecido como 'dope', foi utilizado conforme recomendado pelo fabricante, que sugere a adição de 0,1% ao ligante asfáltico e, corresponde a um produto que auxilia na afinidade físico/química da interface ligante/agregado, melhorando a adesão entre agregado e ligante (Shu *et al.*, 2022). Na Figura 7 está ilustrada a diferença da película de ligante aderida ao agregado graúdo antes e após adição do dope.

Figura 7 – Imagem da película de ligante aderida ao agregado antes (a) e após (b) adição de dope ao ligante asfáltico



A análise granulométrica dos agregados graúdo e miúdo foi realizada conforme estabelecido pela norma DNIT 412:2019, cuja configuração obtida encontra-se ilustrada na Figura 8.

Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados naturais



Dessa forma, pode-se concluir que os agregados graúdos apresentam graduação uniforme, enquanto o agregado miúdo possui graduação densa.

3.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 foi utilizado para compor as misturas asfálticas. A escolha deste tipo de ligante foi estabelecida por constituir-se como o ligante mais comumente utilizado no país, conforme RELATÓRIO TÉCNICO FINAL DE PESQUISA RDT CONCEPA/ANTT (2016).

Na Tabela 6 encontram-se os resultados de caracterização do CAP 50/70 quanto aos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, PG e MSCR antes e após RTFO, procedimento de envelhecimento a curto prazo. Os ensaios de viscosidade rotacional foram realizados utilizando um viscosímetro rotacional tipo *Brookfield* e os ensaios de reologia em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) da série *Discovery Hybrid Rheometer* (DHR-1).

Tabela 6 – Ensaios para caracterização do ligante asfáltico

ENSAIOS		RESULTADOS	NORMA
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)		50	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)		46	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	376,65	ASTM D4402/D4402M: 2015
	150°C	187,86	
	177°C	69,29	
Temperatura máxima de PG (°C)		66,3	ASTM D6373:2021
RTFO			ASTM D2872: 2019
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	500	ASTM D4402/D4402M: 2015
	150°C	241	
	177°C	85	
Temperatura máxima de PG (°C)		64.5	ASTM D6373:2021
MSCR	Jnr a 0,1 kPa	3,21	ASTM D7405:2020
	Jnr a 3,2 kPa	3,64	
	Jnr diff (%)	13,27	
	% de recuperação a 0,1 kPa	6,10	
	% de recuperação a 3,2 kPa	0,60	

O ensaio de PG para temperatura inferior não foi investigado, uma vez que, em países com clima tropical, como o Brasil, a probabilidade de ocorrência de temperaturas negativas é mínima.

O ligante asfáltico atendeu as especificações da Agência Nacional de Petróleo (ANP) conforme apresentado na Tabela 6. A temperatura de usinagem foi 155°C (máximo) e 151°C (mínimo) e a temperatura de compactação foi de, no máximo, 141°C e de, no mínimo, 137°C. Esses valores foram determinados dentro da faixa de viscosidade Brookfield de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, para usinagem, e de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s para compactação.

3.1.3 RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

Neste tópico foram apresentados os procedimentos realizados para recuperação e caracterização do ligante envelhecido extraído da mistura a ser reciclada. Além disso, abordou as características dos agregados antes e após extração do ligante asfáltico, denominados *black RAP* e *white RAP*.

3.1.3.1 Ligante asfáltico envelhecido

A fim de verificar as propriedades do ligante envelhecido, foi realizada inicialmente a extração do ligante asfáltico presente no asfalto fresado para caracterizá-lo física e reologicamente.

A extração foi realizada conforme recomendação da norma ASTM D2172:2017. O solvente utilizado foi o tricloroetileno (temperatura de ebulição de 87°C), como indicado pela ASTM D2172:2017 e DNIT 158:2011-ME. Após a realização do procedimento de extração, verificou-se que o teor de ligante presente no RAP correspondeu a 5,49%. Em seguida, o ligante envelhecido foi recuperado. Nesse processo, foi utilizado um evaporador rotativo a uma temperatura de aproximadamente 60°C por cerca de 2 horas, com um vácuo de 0,035 mmHg. Após a recuperação do ligante, este foi inserido em uma estufa a vácuo para remover possíveis resquícios de tricloroetileno.

O ligante asfáltico oxidado foi caracterizado por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional, *performance grade* (PG) e MSCR, cujos resultados estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Ensaios para caracterização do ligante asfáltico envelhecido

ENSAIOS	RESULTADOS	NORMA
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	29	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de Amolecimento (°C)	68	ASTM D36/D36M – 14: 2020
Viscosidade Rotacional (cP)	135°C	ASTM D4402/D4402M: 2015
	142°C	
	150°C	
	165°C	
	177°C	1215

Temperatura máxima de PG (°C)	82	ASTM D6373:2021
Jnr a 0,1 kPa	1,82	
Jnr a 3,2 kPa	2,30	
Jnr diff (%)	26,57	
MSCR		ASTM D7405:2020
% de recuperação a 0,1 kPa	7,03	
% de recuperação a 3,2 kPa	2,5	

O ligante asfáltico apresentou uma temperatura máxima de PG de 82 °C. A elevada rigidez, conforme relatado na literatura, foi comprovada pelos elevados valores de viscosidade e o baixo valor de penetração, além da redução do Jnr (Carrion, 2017; Arambula *et al.*, 2018; Pires, 2018; Singh, Showkat e Sawant, 2019).

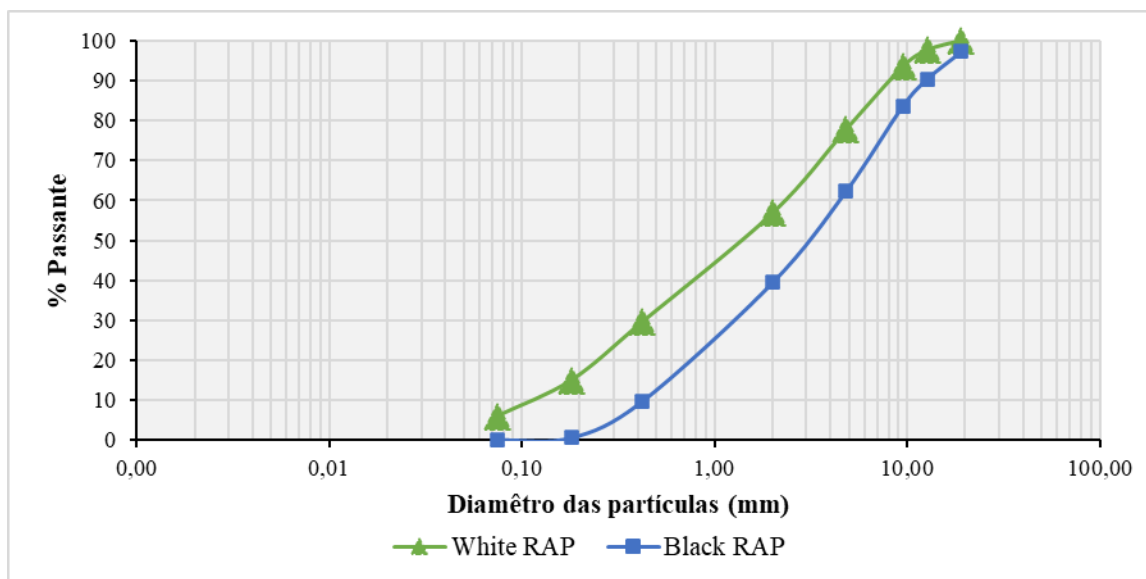
3.1.3.2 Agregado RAP

Os ensaios de caracterização física também foram realizados no RAP, tanto para o *Black* RAP (RAP com o ligante asfáltico envelhecido aderido aos agregados) quanto para o *White* RAP (RAP sem o ligante asfáltico envelhecido aderido aos agregados) - Tabela 8.

Tabela 8 – Ensaios para caracterização do RAP.

ENSAIO	NORMA	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	
			Black RAP	White RAP
Massa específica (g/cm ³)	ASTM C127:2015	-	2,464	2,466
Massa específica aparente (g/cm ³)	ASTM C127:2015	-	2,374	2,378
Absorção (%)	ASTM C127:2015	≤ 2	0,50	0,89
Equivalente Areia (%)	ASTM D2419:2014	≥ 55	86,59	68,56
Partículas alongadas e achatadas (%)	ASTM D4791:2019	≤ 10	-	9,34
Angularidade (%)	ASTM C1252:2017	≥ 45	52,62	45,43

Além disso, foi realizada a análise granulométrica desse material, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Curva granulométrica do RAP

Os parâmetros analisados encontraram-se dentro dos limites apresentados nas especificações apontadas na Tabela 8. Quanto à distribuição granulométrica dos grãos, os agregados RAP apresentam graduação uniforme.

3.1.4 Resíduo de bauxita

Neste tópico serão apresentados os dados de caracterização da área de coleta do resíduo de bauxita, assim como sua caracterização física.

3.1.4.1 Caracterização da área de estocagem do resíduo

O resíduo de bauxita utilizado na realização desse estudo é proveniente de uma das barragens de resíduo pertencentes a uma Empresa Multinacional localizada no Município de São Luís – MA. Esse material foi retirado da ARB 06 (Área de Resíduo de Bauxita), que parou de operar em 2019 e apresenta configuração ilustrada na Figura 8.

Figura 10 – Imagem de satélite da ARB 06.



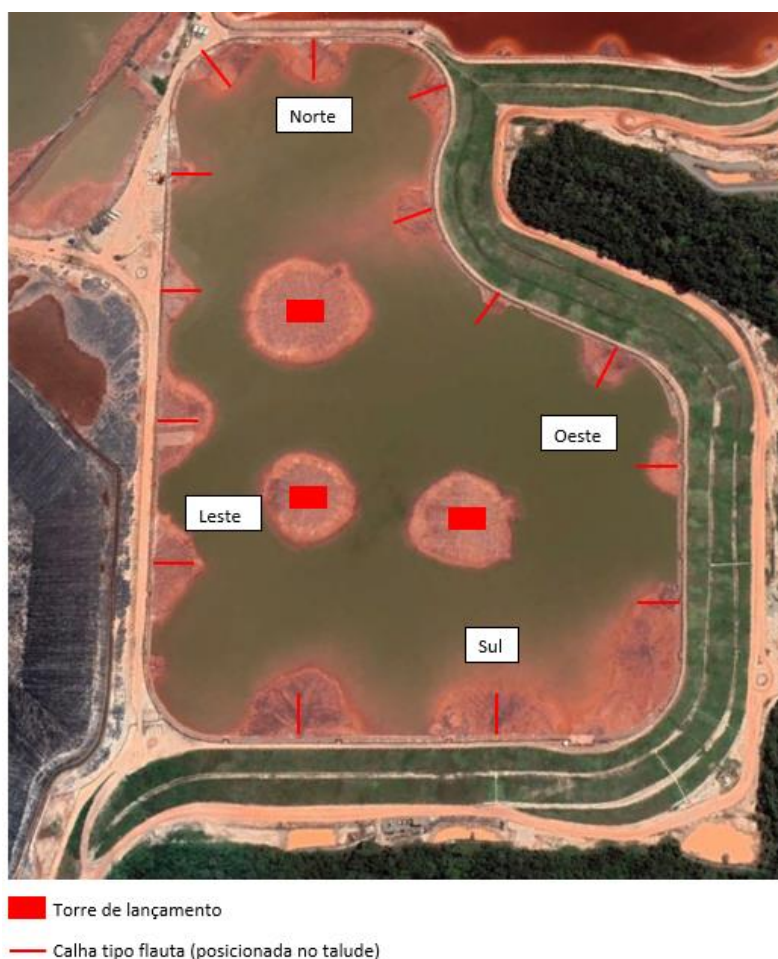
Fonte: Google Earth (2022)

Essas áreas configuram-se como lagoas de disposição e são, normalmente, adotadas como método de disposição devido ao menor custo de transporte e tratamento quando comparadas a outros métodos de disposição, como é o caso do método de pilhas de resíduo, para o qual o material é previamente filtrado para, em seguida, ser encaminhado à área na qual será depositado.

As lagoas, ou simplesmente barragens, ficam próximas à fábrica para facilitar o bombeamento do material. Elas são projetadas com um sistema de impermeabilização em toda a parte interna para evitar problemas de contaminação, como lixiviação de metais pesados para o meio externo.

A coleta do resíduo seguiu os procedimentos estabelecidos na NBR 10007 (ABNT, 2004). Essa norma estipula que, para lagoas e tanques abertos, a área superficial deve ser dividida em uma rede quadriculada imaginária, e amostras devem ser retiradas de cada quadrícula para representar as variações do perfil. Com isso, foram estabelecidas quatro alas conforme mostrado na Figura 9.

Figura 11 – Distribuição do Resíduo na ARB 06 (lagoa de onde foram retiradas as amostras)



Fonte: Google Earth (2022)

Desses pontos (Norte, Sul, Leste e Oeste), foram coletadas amostras a duas profundidades: 0.5 m e 1 m. Tais coletas foram realizadas próximas aos pontos de lançamento do resíduo e, como discutido no referencial, a granulometria do material distribuído nos diferentes pontos da lagoa está condicionada à segregação hidráulica, a qual ocorre em função da disposição hidráulica do resíduo que, nesse caso, ocorre por meio de calhas do tipo flauta e torres.

A análise granulométrica das amostras obtidas foi realizada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016), sendo as amostras preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986).

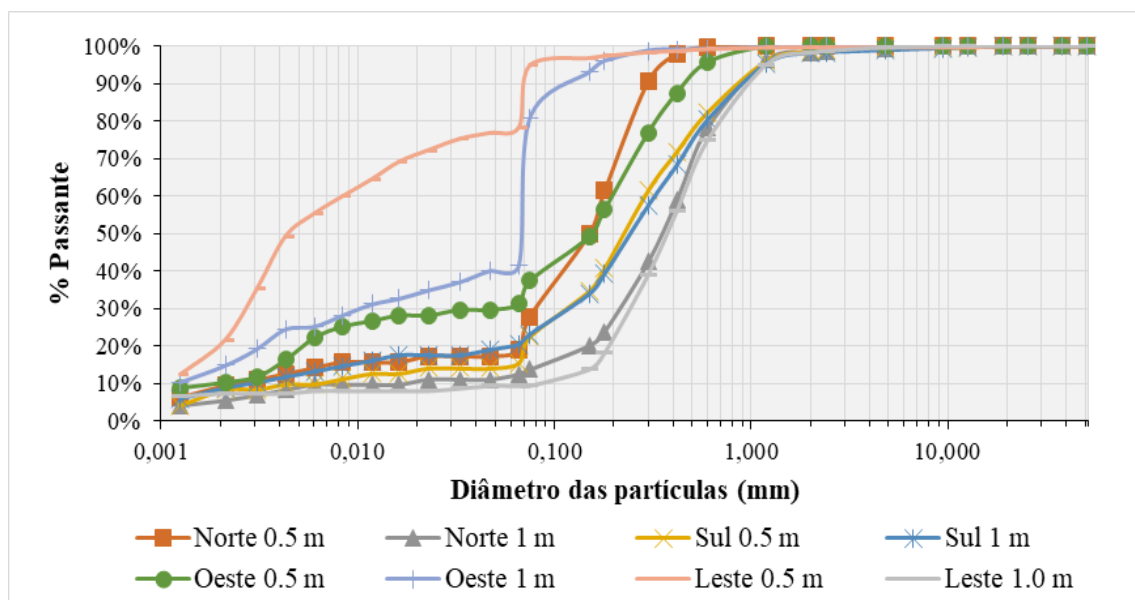
Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a aproximadamente 105°C e quarteadas até a obtenção de uma amostra representativa equivalente a 1 kg. Com isso, foi realizado o peneiramento da amostra obtida (1 kg) na peneira nº10 (2 mm), e o material retido foi lavado e seco em estufa – após seco foi feito o peneiramento grosso (peso do material retido nas peneiras

50, 38, 25, 19, 9.5, 4.75 e 2 mm). Do material passante na peneira nº10, foram retirados 120 g para a execução do ensaio de sedimentação, 100 g para o peneiramento fino e mais 100 g para a determinação da umidade higroscópica. Esta última amostra foi dividida em três cápsulas, pesadas após descontar o peso da cápsula correspondente. Em seguida, as cápsulas foram colocadas em estufa e, após 24 horas, foram pesadas novamente. Com base nos pesos úmidos e secos, foi determinada a umidade da amostra.

Quanto à amostra de 100 g, ela foi lavada na peneira 0,075 mm e seca em estufa. Posteriormente, foi realizado o peneiramento fino, onde se determinou o peso do material retido nas peneiras com aberturas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,3 mm, 0,18 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. Com a amostra de 120 g obtida do material passante na peneira nº10 foi realizado o ensaio de sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016) e estabelecido o percentual e os diâmetros dos grãos com tamanho inferior a 0,075 mm.

Este procedimento foi realizado para cada uma das 8 amostras de resíduo obtidas (Norte 0.5 m, Norte 1 m, Sul 0.5 m, Sul 1 m, Leste 0.5 m, Leste 1 m, Oeste 0.5 m, Oeste 1 m). Os resultados de distribuição granulométrica são mostrados na Figura 10.

Figura 12 – Curvas granulométricas das amostras de Resíduo de Bauxita fornecidas por Empresa Multinacional localizada no Município de São Luís – MA



A partir dos diâmetros das partículas, foram determinados os percentuais correspondentes aos diferentes tamanhos de agregados, conforme especificado na NBR 6502 (ABNT, 1995 - Tabela 9).

Tabela 9 – Percentuais granulométricos do RB.

Ponto de coleta	Pedregulho (%) $2 \leq d < 60$ mm	Areia grossa (%) $0,6 \leq d < 2$ mm	Areia média (%) $0,2 \leq d < 0,6$ mm	Areia fina (%) $0,06 \leq d < 0,2$ mm	Silte (%) $0,002 \leq d < 0,06$ mm	Argila (%) $d < 0,002$ mm
Norte 0,5 m	0,08	0,12	32,80	49,00	8,57	9,43
Norte 1 m	1,66	20,19	51,14	14,48	6,96	5,57
Sul 0,5 m	1,37	16,34	37,28	29,48	7,05	8,46
Sul 1 m	1,81	17,90	37,29	22,61	11,65	8,74
Leste 0,5 m	0,38	0,44	1,68	9,00	66,99	21,51
Leste 1 m	1,82	23,35	51,83	13,60	2,01	7,39
Oeste 0,5 m	0,00	4,36	35,64	28,82	20,79	10,39
Oeste 1 m	0,04	0,68	2,28	55,44	26,71	14,84

Também foram conduzidos ensaios de massa específica dos grãos, seguindo as diretrizes da NBR 6458 (ABNT, 2015). Este ensaio determina a massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos grãos que passam pela peneira 4,8 mm, cujos resultados estão detalhados na Tabela 10.

Tabela 10 – Massa específica, massa específica aparente e absorção de água das amostras de Resíduo de Bauxita

Ponto de coleta	Massa específica real (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Absorção (%)
Norte 0,5 m	2,74	1,90	6,69
Norte 1 m	3,41	2,06	0,47
Sul 0,5 m	3,33	2,03	0,41
Sul 1 m	3,09	1,93	0,21
Leste 0,5 m	2,84	1,87	2,20
Leste 1 m	3,72	2,21	0,82
Oeste 0,5 m	3,06	2,03	2,01
Oeste 1 m	2,74	1,86	5,3

Como previsto, as amostras apresentaram elevados valores de massa específica, em função dos minerais presentes em sua composição, com destaque para o óxido de ferro, e apresentaram variações ao longo do perfil (profundidades superficiais de 0.5 m e 1 m) e dos pontos de coleta.

Com base na análise granulométrica do material, foi selecionado o material para compor as misturas asfálticas, de modo a representar os diferentes pontos de coleta. Dessa forma, as amostras Sul 0.5 m e Sul 1 m foram escolhidas devido à sua distribuição granulométrica intermediária em comparação com as demais amostras caracterizadas, para serem utilizadas na composição das misturas asfálticas analisadas neste estudo.

3.1.4.2 Caracterização da amostra a ser utilizada no estudo

Com o objetivo de utilizar o resíduo de bauxita como agregado miúdo nas misturas asfálticas de forma bruta, ou seja, sem a realização de beneficiamento, substituindo materiais não renováveis e proporcionando a redução da quantidade estocada desse material, foi realizado o ensaio de Equivalente de Areia (%) conforme a norma DNIT 054:1997, uma vez que as amostras coletadas na Área de Resíduo de Bauxita (ARB 06) apresentaram granulometria mais grosseira do que a retratada na literatura e não enquadram-se como fíler, material que apresenta mais de 65% de partículas passante na peneira 0,075 mm.

O teste resultou em percentuais equivalentes a 45% e 41% para as amostras Sul 0,5 m e Sul 1,0 m, respectivamente. Apesar do ensaio de Equivalente de Areia do resíduo não corresponder ao mínimo estabelecido pela norma DNIT 054:1997, equivalente a 55%, esse material foi analisado nesse estudo como um possível agregado miúdo para produção de misturas asfálticas, tendo em vista que esse limite mínimo visa proporcionar que materiais argilosos não prejudiquem a mistura asfáltica e o resíduo, apesar de apresentar um valor abaixo, tem comportamento de material arenoso, não apresentando plasticidade. Esse percentual mínimo, para o *Asphalt Institute* (2007), considerando um nível de tráfego médio a elevado, corresponde a 45%, percentual atendido pela amostra do Sul 0,5 m.

Além disso, o resíduo não se configura como um fíler e, com isso, seria necessário o beneficiamento desse material, o que corresponde a custos que inviabilizariam a sua utilização.

3.1.4.3 Composição química

O ensaio de Espectrometria Fluorescência de Raio-X fornece uma análise qualitativa e quantitativa dos componentes de um material, identificando os elementos presentes no material e em qual proporção eles ocorrem. Junto ao ensaio é necessário que se determine a perda ao rubro (ao fogo), que pode ser obtida por meio da análise termogravimétrica, e corresponde à perda de massa do material quando submetido a temperaturas elevadas. A partir dessa perda é realizado o ajuste dos percentuais dos elementos presentes na amostra. Dessa forma, com base nesse teste, o resíduo de bauxita correspondente às amostras do Sul 0.5 m e Sul 1 m apresentaram a composição química indicada na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição química e percentuais dos componentes presentes no resíduo de bauxita.

COMPONENTE	(%) Sul 0.5 m	(%) Sul 1 m
PR	12,73	18,63
Al ₂ O ₃	22,47	32,64
Fe ₂ O ₃	23,44	19,60
Na ₂ O	28,01	17,47
SiO ₂	10,65	9,16
TiO ₂	1,80	1,49
ZrO ₂	0,40	0,48

As amostras do resíduo mostram valores significativos de óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), e óxido de sódio (Na₂O). O Na₂O presente no resíduo é proveniente do beneficiamento da bauxita com soda cáustica para obtenção da alumina. Além disso, um valor médio de óxido de silício e traços de dióxido de zircônio (ZrO₂), pentóxido de fósforo (P₂O₅), pentóxido de vanádio (V₂O₅), óxido sulfúrico (SO₃), óxido de cromo (Cr₂O₃), óxido de manganês (MnO), óxido de háfnio (HfO₂) e óxido de ítrio (Y₂O₃).

Diferente de estudos como o de Villar (2002), o qual analisou a composição do resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita lavada extraída de uma mina localizada no estado do Pará, não foi constatada a presença de óxido de cálcio (CaO) nas amostras desse estudo. Esse elemento é proveniente do processo de beneficiamento, o qual é adicionado para favorecer a

causticização - processo químico que envolve a conversão de carbonato de sódio (Na_2CO_3) em soda cáustica por meio da reação com hidróxido de cálcio.

De maneira geral, corroborando com a literatura, a composição do resíduo varia com o minério de origem e o processo que o derivou, apresentando alto valor de ferro e alumínio. Nesse sentido, destaca-se o estudo de Zhang *et al.* (2021), o qual apresentou um compilado de composições químicas do resíduo gerado a partir de diferentes fábricas de alumínio, incluindo a empresa Alunorte localizada no Brasil, assim como os estudos de Villar (2002) e Bedin (2006), que apresentaram composições de resíduos provenientes do beneficiamento de bauxitas da região do Pará, cujo processamento é realizado no Maranhão, e de duas regiões do estado de Minas Gerais, sendo elas Poços de Caldas e Ouro Preto.

Além do mais, as diferentes composições dos agregados podem interferir nas misturas. A presença de CaO, por exemplo, pode ser benéfica para a adesividade da mistura, conforme relatado no estudo de Xavier, Ferreira e Branco (2020), para o qual o aumento no teor de CaO na composição química dos fíleres utilizados na produção de misturas asfálticas foi o responsável pela maior resistência ao dano por umidade induzida. Esse componente pode reagir quimicamente com os componentes ácidos do ligante asfáltico, contribuindo para uma ligação estável entre o ligante e os agregados, mesmo na presença da umidade. Outrossim, de acordo com Lucas Júnior *et al.* (2019) o alto teor de SiO_2 resulta em baixa adesividade com tendência de perda da interface.

Cala *et al.* (2019), com base em ensaios e análises estatísticas, concluíram que agregados com a presença de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , e MnO auxiliam no desenvolvimento da resistência à degradação por umidade, enquanto os agregados com a presença de SiO_2 proporcionam um efeito de intensificação deste dano.

Grupos silanol (Si-OH) polares presentes na superfície do agregado reagem com a água e liberam íons de hidrogênio (H^+), tornando-os carregados negativamente. Essas cargas negativas geram uma força de repulsão com o ligante asfáltico, apolar e de caráter ácido, e uma força de atração com a água, enquanto minerais como alumínio, ferro, magnésio apresentam carga positiva (Bagampadde; Isacson; Kiggundu, 2005; Harnish, 2010; Dong *et al.*, 2017).

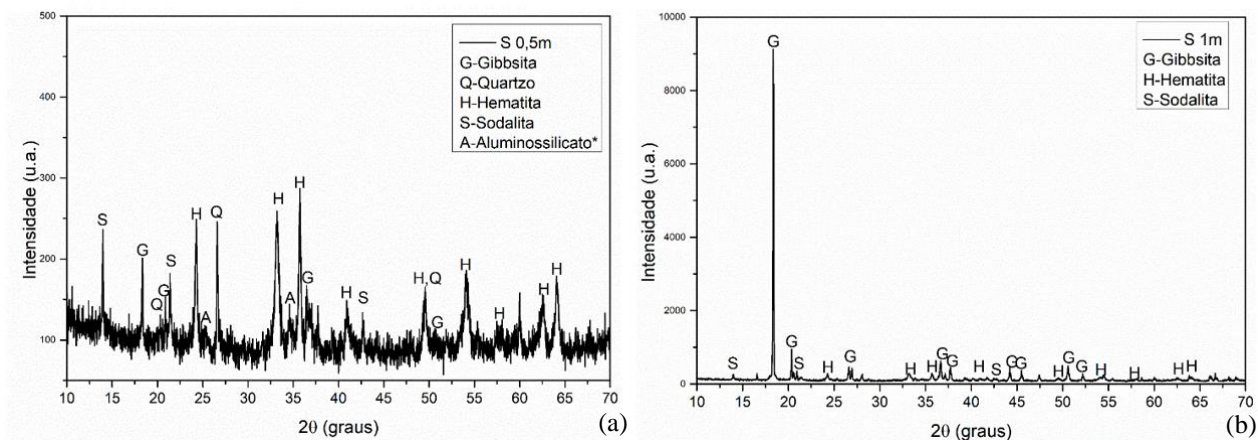
3.1.4.4 Composição mineralógica

O Difratoograma de Raio-X permite identificar as fases cristalinas da amostra submetida à análise. Nesse ensaio o feixe difratado é normalmente expresso por meio de picos (caso, de

materiais cristalinos) e, como cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, é possível a identificação da amostra com base nas posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados.

A Figura 11 ilustra o resultado do Difratoograma de Raio-X, realizado no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanocompositos da UFRN, obtido para a amostra Sul 0,5 m e Sul 1,0 m.

Figura 13 – Análise mineralógica do resíduo de bauxita (a) amostra Sul 0,5 m e (b) amostra Sul 1,0 m



Nas amostras foram identificados picos de gibbsita, hematita, sodalita e quartzo. Para a amostra S 0,5 m os picos de hematita (estrutura cristalina trigonal) e gibbsita (estrutura cristalina monoclinica) são os mais frequentes, enquanto a sodalita (estrutura cristalina cúbica) e o quartzo (estrutura cristalina hexagonal) são fases minoritárias. Na amostra S 1m o maior pico foi registrado para a gibbsita e apresenta ausência de quartzo.

A sodalita, um produto de dessilicação (DSP) presente em ambas as amostras, não ocorre no minério de bauxita, sendo, portanto, formada pela reação da caulinita presente no minério com o hidróxido de sódio durante a etapa de digestão. A concentração de sílica reativa na bauxita, na forma de caulinita, e a temperatura de reação determinam a quantidade de produtos de dessilicação. A formação de DSP resulta na perda de alumina e de hidróxido de sódio, com uma maior relação $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, e atuam como importantes tampões de pH alcalinos sólidos, ou seja, resistem à variações de pH (Power, Gräfe e Klauber, 2011; Melo, 2017).

3.1.4.5 Área superficial específica

Com o objetivo de estabelecer a área superficial específica do resíduo de bauxita foi realizado o ensaio de adsorção de azul de metileno.

O ensaio, baseado na norma ASTM C 837 (ASTM, 1984), foi realizado adicionando-se a solução de azul de metileno – em proporções equivalentes a 1 mL, para o qual nos primeiros 5 minutos o material é submetido ao processo de mistura utilizando agitador com 600 rotações/minuto e, nas demais, 400 rotações/minuto – a um béquer contendo 250 mL de água e 1g de resíduo de bauxita, avaliando-se continuamente a adsorção da solução de azul de metileno pelo material, retirando uma gota em suspensão com a ajuda de uma pipeta e depositando-a num papel filtro. O ensaio termina quando se detecta a presença de corante livre na mancha observada, ou seja, quando existe um excesso de azul de metileno que não foi absorvido pelo material.

Ao fim do ensaio, utilizando a Equação 1 calculou-se o valor de azul de metileno:

$$AM = \frac{V_1}{M_1} \times 10$$

Equação 1

Sendo,

M_1 a massa da amostra em gramas;

V_1 é o volume total de solução corante injetada, em mililitros.

Dessa forma, para o resíduo de bauxita o valor de azul de metileno, calculado pela expressão acima, foi de 20 mL/g.

Para a determinação da superfície específica, foi utilizada a seguinte equação (Beaulieu, 1979):

$$SE = \frac{A \times N \times C}{M} \times 10$$

Equação 2

Sendo,

A a área da face do azul de metileno que é adsorvido pelo argilo-mineral, (130 Å²);

N a constante (número) de Avogrado, (6,022 x 10²³);

C a concentração da solução padrão de azul de metileno, (1g/l);

M a massa molecular do azul de metileno, (319.85 g).

Com isso, a área superficial específica do resíduo de bauxita foi equivalente a aproximadamente 48,79 m²/g. Esse mesmo ensaio foi realizado com o pó de pedra, para o qual foi obtido superfície específica igual a 4,88 m²/g. Tal propriedade pode influenciar no teor de ligante das misturas, causando uma maior absorção.

3.1.4.6 Análise térmica

A análise termogravimétrica (TGA) e a análise térmica diferencial (DTA) foram realizadas para estabelecer as mudanças nas propriedades físicas e químicas do resíduo com o aumento da temperatura.

A análise termogravimétrica consiste em uma técnica pela qual a massa de uma amostra é medida em função da temperatura quando a amostra é submetida a um programa controlado de temperatura. Enquanto na análise térmica diferencial a amostra em estudo é aquecida a velocidade constante, juntamente com uma substância termicamente inerte (geralmente o óxido de alumínio-alfa), registrando as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e o material em estudo, em função da temperatura.

As Figuras 12 e 13 ilustram os resultados obtidos para a análise termogravimétrica e termodiferencial das amostras Sul 0,5 m e Sul 1,0 m.

Figura 14 –Análise termogravimétrica e termodiferencial da amostra de resíduo Sul 0,5 m

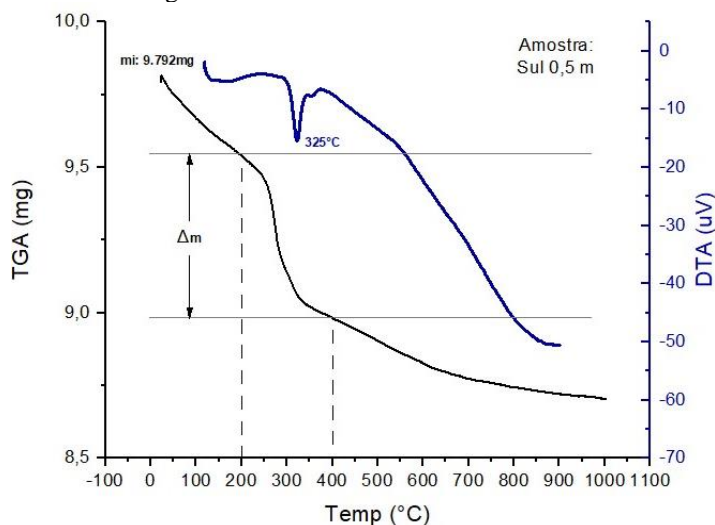
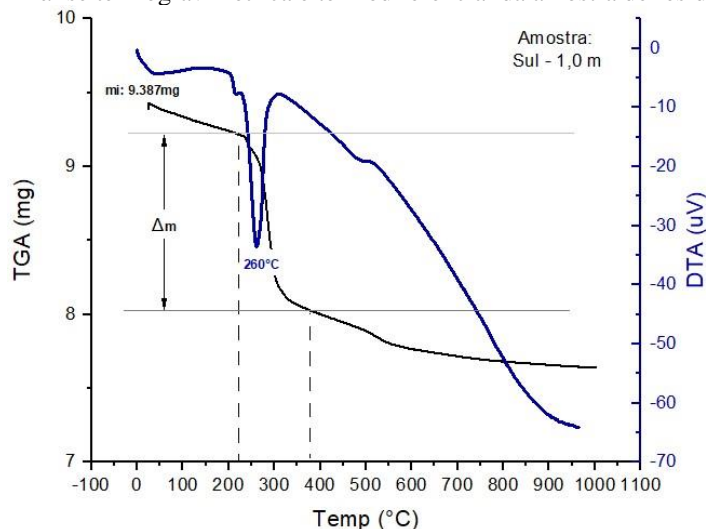


Figura 15 – Análise termogravimétrica e termodiferencial da amostra de resíduo Sul 1,0 m



A análise termogravimétrica mostrou que ao se aquecer o rejeito até 1001 °C ocorreu uma perda de massa de cerca de 18,63% para a amostra Sul 1,0 m e 12,73% para a amostra Sul 0,5 m. Verifica-se que os fenômenos ocorreram nos seguintes intervalos de temperatura:

- Para a amostra Sul 0,5 m:
Perda de 3,40% - entre 23°C e 200°C;
Perda de 4,37% - entre 200°C e 400°C;
Perda de 4,96% - entre 400°C e 1001°C;
- Para a amostra Sul 1,0 m:
Perda de 2,33% - entre 23°C e 225°C;
Perda de 10,97% - entre 225°C e 375°C;
Perda de 5,33% - entre 375°C e 1001°C;

A redução de massa inicial pode ser atribuída à perda de água superficial. A segunda perda ocorre em decorrência da decomposição da gibbsita, a qual ocorre entre 250 e 270°C segundo Atasoy (2011). Nesse intervalo de temperatura, como exposto por Antunes *et al.* (2011), ocorre a decomposição da gibbsita em alumina.

De acordo com Mercury *et al.* (2010), a perda que ocorre entre 300 e 850° é resultado de uma sequência de eventos térmicos, dentre esses a descarbonatação da sodalita. Outros autores, como Viegas *et al.* (2020) e Garcia (2012), associam o intervalo de perda entre 200 e 400°C à decomposição da gibbsita e da goethita com formação de hematita, no entanto, esse mineral não foi identificado no material em estudo.

Quanto à análise térmica diferencial, o aumento volumétrico que ocorre em ambas as amostras em aproximadamente 100 e 250° C coincide com o limite entre a primeira e segunda perda de massa verificada na curva de TGA, podendo ser atribuído à decomposição da gibbsita com a formação de uma alumina de transição (Garcia, 2012; Mercury *et al.*, 2010). Os picos endotérmicos observados, nos quais verifica-se uma redução de volume seguida de um aumento de aproximadamente mesma proporção, pode ser associado à reidratação, característica de materiais que contêm água de hidratação.

Dessa forma, no processo de usinagem os agregados são submetidos a uma temperatura máxima de 165°C, e a perda de massa a esse nível de aquecimento no resíduo é atribuído basicamente à perda de água superficial. Nessa temperatura pode ocorrer decomposição da gibbsita em alumina de transição, influenciando na composição química do resíduo.

3.1.4.7 Classificação ambiental do Resíduo de Bauxita

Para a correta classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade, é necessário o uso do compêndio das normas ABNT para resíduos sólidos, assim foram realizados os ensaios indicados na Tabela 12.

Tabela 12 – Ensaio para classificação do resíduo de bauxita.

ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO	NORMA
Ensaio de lixiviação	NBR 10005 (2004)
Ensaio de solubilização	NBR 10006 (2004)

A NBR 10005 (ABNT, 2004) estabelece os procedimentos para classificação de resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, em virtude da presença de substâncias químicas tóxicas, corrosivas, inflamáveis ou reativas. Enquanto a NBR 10006 (ABNT, 2004) dispõe os critérios para a classificação de resíduos sólidos quanto à sua biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Dessa forma, segundo Ramos (2007), a solubilização simula o desprendimento de constituintes em uma situação de chuva não ácida, indicando a potencial liberação desses no ambiente, o que pode ocasionar na contaminação do solo ou de recursos hídricos.

Com base na análise da solução obtida nesses ensaios e utilizando a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos são classificados em resíduos classe I – perigosos, resíduos classe II – não perigosos, resíduos classe II A – não inertes e resíduos classe II B – inertes.

Após a obtenção do líquido nos ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados os ensaios de: determinação do pH e presença de metais pesados por meio do ensaio de Espectroscopia de Absorção Atômica. As concentrações de diferentes elementos de metais foram comparadas com os requisitos limites estabelecidos NBR 10004 (ABNT, 2004), a fim de avaliar a segurança do material residual.

Para a análise de pH, a amostra foi preparada de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) misturando o resíduo com água na proporção de 1:1 em peso, e foi utilizado um pHmetro, constituído por um eletrodo e um circuito potenciométrico. Os resultados obtidos constam na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultado das análises de pH.

Amostra	Sul 0.5 m	Sul 1 m
Resíduo	10,48	10,29
Lixiviado	7,33	4,83
Solubilizado	10,50	9,76

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) o material é considerado corrosivo quando o valor de pH estiver abaixo de 2 e acima de 12,5. Dessa forma, as amostras são classificadas como não corrosivas. Ainda, conforme os valores apresentados, cujo pH é superior a 7, o resíduo apresenta carácter básico, o que confere ao material superfície eletricamente negativa, característica que pode influenciar na adesividade ligante/agregado.

No entanto, esses valores elevados, $\text{pH} > 10$, indicam a necessidade de cuidados na manipulação, armazenamento e transporte do RB, pois, apesar de não ser classificado como corrosivo, é altamente agressivo, por apresentar limite próximo ao superior estabelecido NBR 10004 (ABNT, 2004), $\text{pH} = 12,5$.

A Tabela 14 apresenta os metais que foram identificados nas amostras lixiviadas do resíduo de bauxita.

Tabela 14 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras lixiviadas de resíduo de bauxita.

Amostras	METAIS (mg/L)								
	As	Ba	Cd	Pb	Cr	Hg	Ag	Se	As
Sul 0,5 m	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Sul 1,0 m	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Metais como cromo, titânio, mercúrio, ródio, ítrio, bromo, vanádio, prata, urânio, cobre, cádmio, boro e bário apresentaram valores inferiores aos limites de quantificação. As concentrações de metais identificadas são inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

A Tabela 15 apresenta concentrações de metais na solução proveniente do ensaio de lixiviação que não são analisados na NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 15 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras lixiviadas de resíduo de bauxita – metais sem limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

Amostras	METAIS (mg/L)							
	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	K	Si	Na
Sul 0,5 m	-	12,3	-	6,45	-	12,79	5,90	21,15
Sul 1,0 m	7,60	35,2	0,58	24,60	0,09	24,83	14,27	138,6

As concentrações dos metais identificados nas amostras solubilizadas estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras solubilizadas de resíduo de bauxita.

Amostras	METAIS (mg/L)							
	Al	Ca	Cr	Fe	Mg	K	Si	Na
Sul 0,5 m	11,37	0,95	0,26	0,40	0,51	6,88	1,12	171,7
Sul 1,0 m	12,27	0,95	0,26	1,775	1,07	12,97	2,73	191,4

Metais como cromo, titânio, manganês, níquel, mercúrio, ródio, ítrio, bromo, vanádio, prata, urânio, cobre, cádmio, boro e bário apresentaram valores inferiores aos limites de quantificação. Conforme os limites padrões para o ensaio de solubilização da NBR 10004 (ABNT,

2004) os percentuais de alumínio, cromo total, ferro e manganês encontram-se acima do limite máximo estabelecido no extrato em mg/L, os quais correspondem a 0,2 mg/L, 0,05 mg/L, 0,3 mg/L e 0,1 mg/L, respectivamente. Dessa forma, o resíduo foi classificado como resíduo não-inerte classe II A, o qual pode ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Essa classificação corrobora com a estabelecida no estudo de Bruschi (2020).

Os resíduos Classe II A podem causar riscos à saúde humana e/ou ao meio ambiente, uma vez possuem a capacidade de se solubilizar e modificar os parâmetros físicos ou químicos, acima das concentrações estabelecidas pelos padrões de potabilidade da água (Zanta e Ferreira, 2003).

3.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

3.2.1 Dosagem da mistura asfáltica de referência

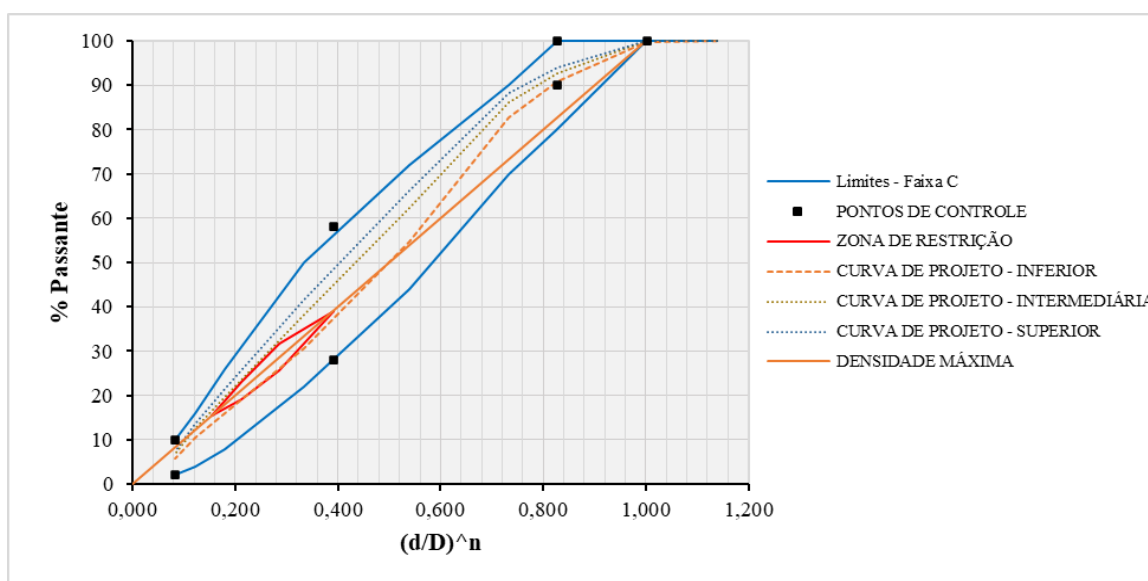
A dosagem da mistura asfáltica à quente foi realizada conforme a metodologia SUPERPAVE, a qual consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto com base na fixação de vazios e granulometria dos agregados a serem utilizados.

Nesta pesquisa foi considerado um nível de tráfego médio a alto (vias principais, rodovias rurais) – característica levada em conta para estabelecer o número de giros ($N_{projeto}$). Quanto à metodologia de dosagem, encontram-se normatizada pela ASTM D6925/2015 e apresenta o seguinte passo a passo:

- Primeiro passo do procedimento SUPERPAVE: escolher três composições granulométricas com os materiais que serão utilizados na mistura - nesse caso, brita 19.0 mm, brita 12.5 mm, pó de pedra. Nesse processo, ocorre a ponderação da granulometria dos agregados em uma única curva, denominada curva de projeto, estabelecida com base nos percentuais pré-determinados desses materiais. Quanto aos percentuais dos agregados do ligante asfáltico, encontram-se estabelecidos na norma DNIT 031/2006 – ES no item 5.2, e as proporções escolhidas para cada uma das três composições estudadas são apresentadas na Tabela 17. Em relação às respectivas curvas granulométricas, referidas como Inferior, Intermediária e Superior, estão apresentadas graficamente na Figura 16.

Tabela 17 – Proporções de agregados para a mistura asfáltica de referência

COMPOSIÇÃO	MATERIAIS			
	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)
Inferior	15	45	39	1
Intermediária	12	37	50	1
Superior	10	34	55	1

Figura 16 – Composição de curvas granulométricas (TMN = 12.5 mm)

Os limites superior e inferior referem-se aos estabelecidos pela Faixa C do DNIT para misturas asfálticas e o tamanho máximo nominal dos agregados foi equivalente a 12,5 mm – determinado com base na composição da mistura.

- Segundo passo: compactar os corpos de prova (CP's) com um teor de tentativa para cada mistura, o qual foi obtido por meio de estimativa usando a massa específica efetiva dos agregados – assim foram compactos dois CP's por mistura com 4,35% de ligante. Dessas misturas, foram obtidas as propriedades volumétricas - Volume de Vazios (V_v), Vazios no Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume/Vazios (RBV) – conforme apresentado na Tabela 18. As amostras foram compactadas no Compactador Giratório Superpave (SGC, do inglês *Superpave Giratory Compactor*) seguindo a norma ASTM D6925:2015 para cada um dos três esforços de compactação diferentes: $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$ – para a pesquisa em questão foi considerado nível de tráfego médio e os esforços citados anteriormente corresponde a 8 giros, 100 giros e 160 giros,

respectivamente. O $N_{projeto}$ foi usado para selecionar o teor de ligante de projeto, enquanto o $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ foram usados para avaliar a compactação da mistura, simulando o início e fim da vida útil do pavimento.

Tabela 18 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial

MISTURA TENTATIVA	% LIGANTE ESTIMADO	%Gmm @ $N_{inicial}$ (N=8)	%Gmm @ $N_{projeto}$ (N=100)	%Gmm @ $N_{máximo}$ (N=160)	VAM (%)	Vv (%)
Curva Inferior	4.35	84.72	93.40	94.14	14.51	6.60
Curva Intermediária	4.35	84.94	93.07	93.56	14.98	6.72
Curva Superior	4.35	85.09	92.98	93.54	15.21	7.02
Critério SUPERPAVE	-	<89	96	<98	≥13	4

Além disso, com base nos dados volumétricos estabelecidos acima foi determinado o teor de ligante estimado para atingir 4% de vazios no número de giros de projeto (Tabela 19).

Tabela 19 – Teor de ligante estimado

MISTURA TENTATIVA	% LIGANTE ESTIMADO
Curva Inferior	5.391
Curva Intermediária	5.438
Curva Superior	5.558

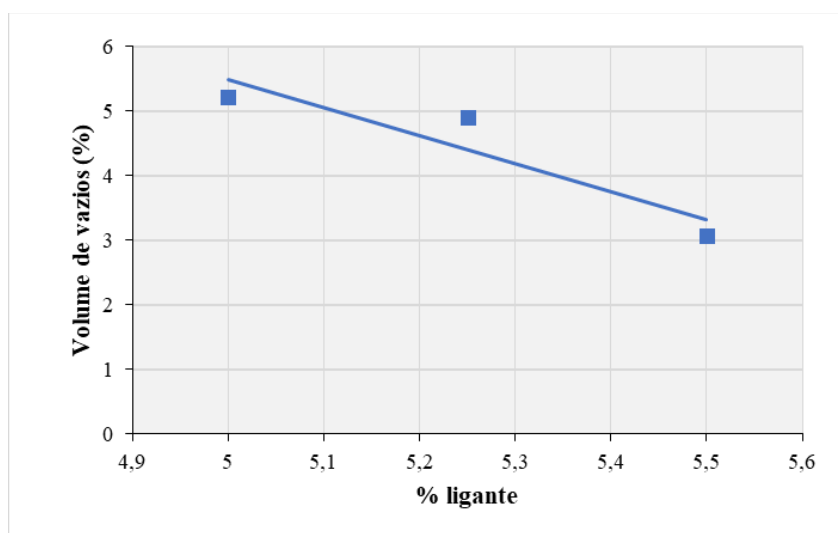
- Terceiro passo: em detrimento do menor percentual de ligante a ser implementado para se atingir o volume de vazios de 4% no número de giros de projeto, a curva inferior foi escolhida para ser utilizada na produção das misturas asfálticas. Dessa forma, seguiu-se o procedimento a ser executado para seleção do teor de ligante de projeto, onde foram confeccionados dois CP's no teor de ligante estimado (5,4%) e em outros dois teores, sendo eles: o teor estimado $\pm 0,5\%$ (4,9% e 5,9%). A metodologia ainda recomenda outro teor, que equivale o teor estimado +1,0%, no entanto, seria uma quantidade de ligante alta quando comparada a inicial para o qual obteve-se 6,6% de vazios.

A Tabela 20 apresenta os parâmetros volumétricos para os teores de ligante testados, incluindo a relação pó/ligante asfáltico (P/A).

Tabela 20 – Parâmetros volumétricos da mistura referência com $\pm 0,5\%$ do teor estimado.

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	P/A (%)
4.90%	94.51	13.99	4.42	68.41	1.20
5.40%	97.35	13.60	2.65	80.59	1.09
5.90%	98.27	13.25	0.55	96.55	1.00

O gráfico da Figura 17 apresenta a relação entre volume de vazios e teor de ligante da mistura. A partir dela, para que os CP's apresentassem um volume de vazios de 4% foi necessário um teor de projeto de ligante de aproximadamente 5%. Dessa forma, para comprovar esse comportamento foram confeccionados 2 CP's para esse teor de ligante, cujos parâmetros obtidos podem ser observados na Tabela 21.

Figura 17 – Volume de vazios x teor de ligante da mistura de referência**Tabela 21** – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	P/A (%)
5.0%	95.95	14.12	4.05	71.28	1.18

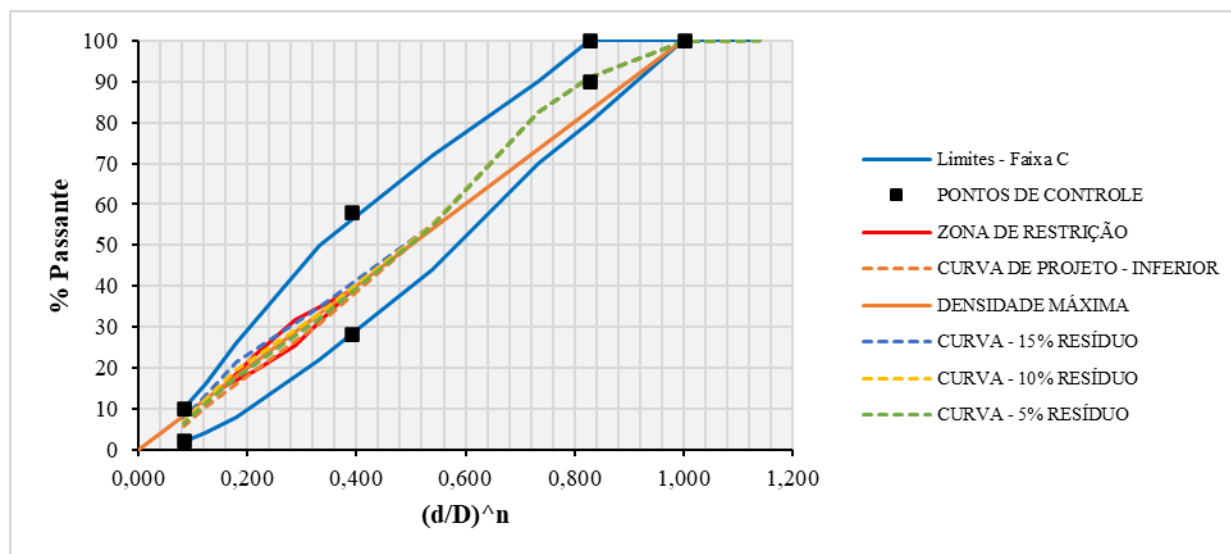
Para o teor de ligante de 5% foi obtido volume de vazios equivalente a 4% sendo, portanto, foi adotado como teor de projeto para essa composição. Dessa forma, os percentuais dos materiais foram ajustados de acordo com os valores estabelecidos na Tabela 22, garantindo uma proporção adequada para atender aos requisitos de projeto específicos.

Tabela 22 – Proporção dos materiais da mistura asfáltica de referência

MATERIAIS				
Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)	Ligante (%)
14,25	42,75	37,05	0,95	5,00

3.2.2 Dosagem das misturas com resíduo de bauxita

Com base na composição granulométrica do resíduo de bauxita e agregados, a qual foi determinada de maneira a adequar-se na faixa da norma DNIT 031/2006, foram estabelecidos diferentes percentuais de resíduo – 5%, 10% e 15% em substituição ao pó de pedra (Figura 18).

Figura 18 – Composição de curvas granulométricas das misturas com resíduo de bauxita (TMN = 12.5 mm)

Em detrimento da granulometria do resíduo há um aumento do percentual de finos na mistura. Para tanto, foi estabelecido o percentual máximo de 15% para verificar a viabilidade do uso do resíduo. Conforme análise de variância, substituir o pó de pedra por resíduo nos percentuais de 5%, 10% e 15% não gera uma diferença significativa entre as médias de curvas granulométricas das misturas com e sem resíduo. (Tabela 23).

Tabela 23 – Análise de variância entre a curva de projeto referência e as curvas com resíduo de bauxita.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13,00615681	3	4,335385602	0,002867643	0,999783462	2,901119584
Dentro dos grupos	48378,53338	32	1511,829168			
Total	48391,53953	35				

Nota-se, assim, que o Fcrit (2,90) é superior ao Fcalculado (0,0028). Dessa forma, nos percentuais estabelecidos, não há evidências suficientes para afirmar que a substituição do pó de pedra por resíduo influencia significativamente na composição da mistura.

Desse modo, a composição das misturas com resíduo seguiu conforme a Tabela 24.

Tabela 24 - Resumo do quantitativo de materiais das misturas com resíduo de bauxita

COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	MATERIAIS				
	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de pedra (%)	Resíduo de bauxita (%)	Cal (%)
5%RB	15	45	34	5	1
10%RB	15	45	29	10	1
15%RB	15	45	24	15	1

Determinados os percentuais de RB a serem utilizados e partindo do teor de projeto estabelecido para mistura de referência, seguiu-se com a dosagem das misturas.

Inicialmente, foram preparadas misturas contendo 5% de resíduo de bauxita, devido à pequena alteração promovida na curva por esse percentual, e estimados os seguintes teores a serem analisados: o teor de projeto da mistura de referência, esse mesmo teor $\pm 0,25\%$ (4,75% e 5,25%) e $+0,5\%$ (5,5%).

A Tabela 25 apresenta os parâmetros volumétricos para os teores de ligante testados, incluindo a relação pó/ligante asfáltico (P/A).

Tabela 25 – Parâmetros volumétricos da mistura com 5% de RB

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	Vv (%)
4.75%	94.62	5.54
5.00%	95.93	4.11
5.25%	96.46	3.49
5.50%	96.87	2.29

O volume de vazios de 4% foi obtido para o percentual de ligante equivalente a 5%, sendo esse o teor de projeto adotado para a mistura com 5% de RB.

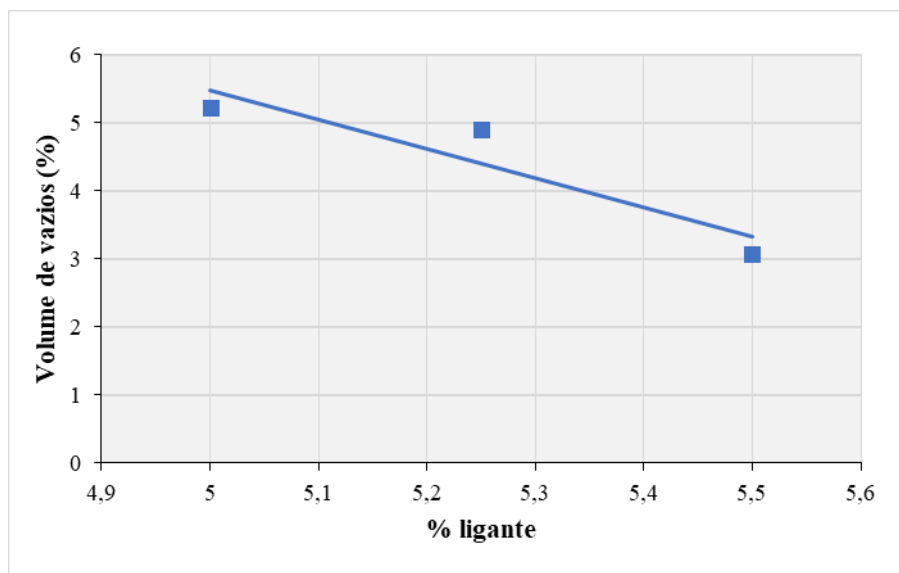
A Tabela 26 apresenta os parâmetros volumétricos das misturas com 10% de RB e diferentes teores de ligante.

Tabela 26 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante inicial

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	Vv (%)
5.00%	94.78	5.22
5.25%	95.20	4.80
5.50%	96.93	3.07

Para os mesmos teores de ligante asfáltico que foram analisados na mistura com 5% de RB, a mistura com 10% de RB apresentou volume de vazios superior, o que mostra que o resíduo promoveu um aumento no quantitativo de ligante.

O gráfico da Figura 19 apresenta a relação entre volume de vazios e teor de ligante da mistura das misturas com 10% de RB. A partir dela, para que os CP's apresentassem um volume de vazios de 4% foi necessário um teor de projeto de ligante entre 5,3% e 5,4%. Dessa forma, para comprovar esse comportamento foram confeccionados 2 CP's para cada um desses teores de ligante, cujos parâmetros obtidos podem ser observados na Tabela 27.

Figura 19 – Volume de vazios x teor de ligante da mistura com 10% de RB.**Tabela 27** – Parâmetros volumétricos da mistura com 10% RB com dois teores de ligante

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	Vv (%)
5.30%	95.88	4.12
5.40%	96.16	3.84

Para os dois teores analisados foram obtidos volume de vazios próximo ao estabelecido pela metodologia SUPERPAVE. No entanto, como o percentual de ligante equivalente a 5,3% representa um teor inferior a 5,4%, esse foi o teor de projeto escolhido para a mistura com 10% de resíduo de bauxita.

Por fim, foi realizada a dosagem da mistura com 15% de RB, sendo estimados os seguintes teores: o teor de projeto da mistura de referência, esse mesmo teor + 0,25% (5,25%) e +0,5% (5,5%). Os parâmetros volumétricos estão apresentados na Tabela 28 e cujo teor de 5,5% foi o que atendeu ao volume de vazios estipulado.

Tabela 28 – Parâmetros volumétricos da mistura com 15% RB

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	Vv (%)
5.00%	92.91	7.09
5.25%	95.26	5.98
5.50%	95.86	4.14

A partir da definição do teor de ligante que garanta a proporção adequada para atender aos requisitos de projeto específicos, os percentuais dos materiais para cada uma das composições foram ajustados de acordo com os valores estabelecidos na Tabela 29.

Tabela 29 – Proporção dos materiais das misturas com resíduo de bauxita

MISTURA	MATERIAIS					
	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Pó de pedra (%)	Resíduo de bauxita (%)	Cal (%)	Ligante (%)
5%RB	14,25	42,75	32,30	4,75	0,95	5,00
10%RB	14,21	42,62	27,46	9,47	0,95	5,30
15%RB	14,18	42,53	22,68	14,18	0,95	5,50

3.2.3 Dosagem da mistura reciclada

O quantitativo de RAP empregado nessa pesquisa foi compatível com os percentuais atualmente empregados nas usinas asfálticas, o qual não ultrapassa dos teores de 20 ou 25% (Torres *et al.*, 2022). Esse percentual reduzido está relacionado às limitações legislativas e questões técnicas, como a variabilidade das propriedades do material fresado, a falta de certeza sobre o desempenho da mistura e a falta de conhecimento acerca dos mecanismos que ocorrem durante a produção da mistura asfáltica (Lo Presti *et al.*, 2016).

O procedimento de dosagem adotado para a mistura contendo material fresado seguiu de forma análoga a dosagem das misturas asfálticas virgens, sendo que, primeiramente, foi estipulada e fixada a porcentagem deste material reciclado com base na caracterização física e reológica do ligante.

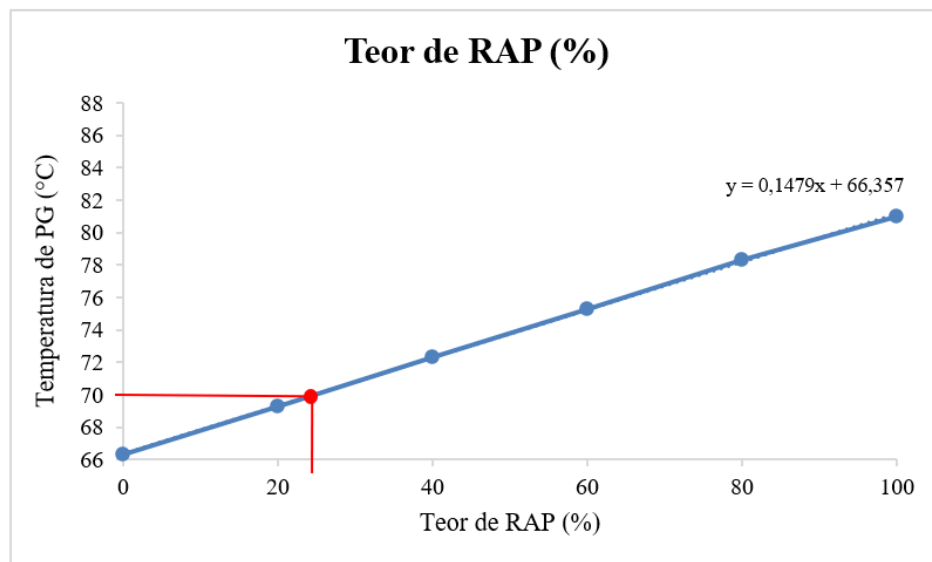
De acordo com a literatura, para teores em torno de no máximo 20%, o RAP pode ser contabilizado apenas como um agregado na mistura, não havendo necessidade de caracterização das propriedades aglutinantes recuperadas. No entanto, para determinação do percentual a ser utilizado neste estudo, o ligante asfáltico presente no RAP foi extraído, recuperado e caracterizado conforme exposto no item 3.1.2 do tópico de materiais e métodos.

O método *Blending Chart* (método B) da NCHRP Report 452:2001 foi utilizado para determinar o teor ideal de RAP a ser incorporado na dosagem da mistura asfáltica reciclada. Nestes são utilizados os PG's dos dois ligantes: o ligante virgem e o ligante envelhecido.

foi determinado utilizando o método *Blending Chart* (método B), ligante asfáltico virgem conhecido e teor de RAP desconhecido, da NCHRP Report 452:2001.

Dessa forma, a Figura 18 foi produzida para definir o teor de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada com base na temperatura de PG do ligante asfáltico virgem (66,3°C) e do ligante recuperado (82°C).

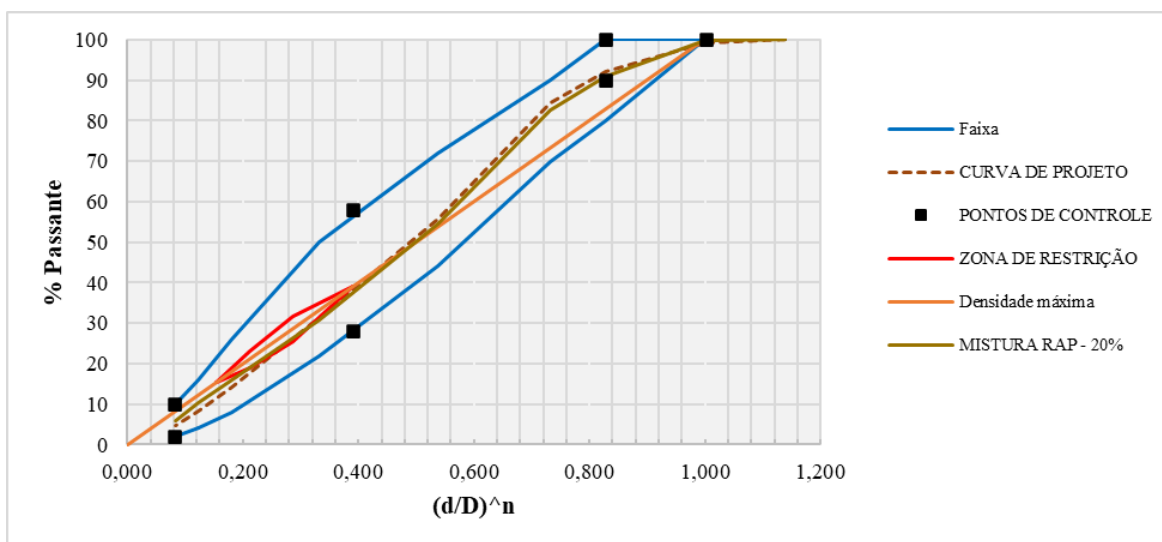
Figura 20 – Definição do teor ideal de RAP a ser adicionado na mistura asfáltica reciclada



De acordo com o gráfico, o teor de RAP recomendado para uma temperatura de PG de trabalho de 70°C, adotado considerando a aplicação desse material em regiões de clima quente, é de cerca de 25%. No entanto, neste estudo específico, optou-se por utilizar 20% de RAP para compor as misturas recicladas. A Tabela 30 apresenta as porcentagens dos agregados que se enquadraram na curva inferior da mistura, uma vez que a mistura de referência foi dosada por essa curva. Na Figura 21 consta a curva da composição da mistura reciclada que atende aos limites da faixa C do DNIT.

Tabela 30 – Proporções de agregados da mistura asfáltica reciclada

COMPOSIÇÃO	MATERIAIS				
	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	RAP (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)
Inferior - RAP	15	40	20	24	1

Figura 21 - Faixa granulométrica da mistura asfáltica com 20%RAP, TMN = 12,5 mm

O teor de ligante obtido no RAP foi de 5,5%, no entanto, o ligante presente no RAP atua como “*partial blending*”, ou seja, apenas uma parcela parcial do ligante RAP interage com o ligante asfáltico virgem. Para verificar o teor de projeto da mistura asfáltica partiu-se do teor da mistura referência (5,0%) e variou-se - 0,5 % (4,5% de ligante) e -1% (4,0% de ligante). Com base nos parâmetros volumétricos apresentados por esses teores e de forma análoga ao realizado anteriormente, plotou-se um gráfico de teor de ligante x volume de vazios e de acordo com a linha de tendência foi estipulado o teor de 4,4% de ligante para obter um volume de vazios equivalente a 4% para o número de giros de projeto. Dessa forma, a mistura apresentou os parâmetros volumétricos apresentados na Tabela 29.

Tabela 31 – Parâmetros volumétricos da mistura reciclada com 4,4% de ligante.

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	P/A (%)
4.40%	96.13	12.30	4.09	68.52	1.22

Com base nos valores obtidos, o teor de ligante de projeto determinado para a mistura asfáltica reciclada foi de 4,40%, pois foi o teor que se adequou às especificações do critério SUPERPAVE, com exceção do VAM, possibilitando a redução de 0,6% de ligante asfáltico virgem na composição das misturas recicladas. Assim, os percentuais dos materiais foram ajustados com base nesse teor de ligante (Tabela 32).

Tabela 32 – Proporção dos materiais da mistura asfáltica reciclada

MATERIAIS					
Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 m (%)	RAP (%)	Pó de pedra (%)	Cal (%)	Ligante
14,34	38,24	19,12	22,94	0,96	4,40

3.2.4 Dosagem da mistura reciclada com resíduo de bauxita

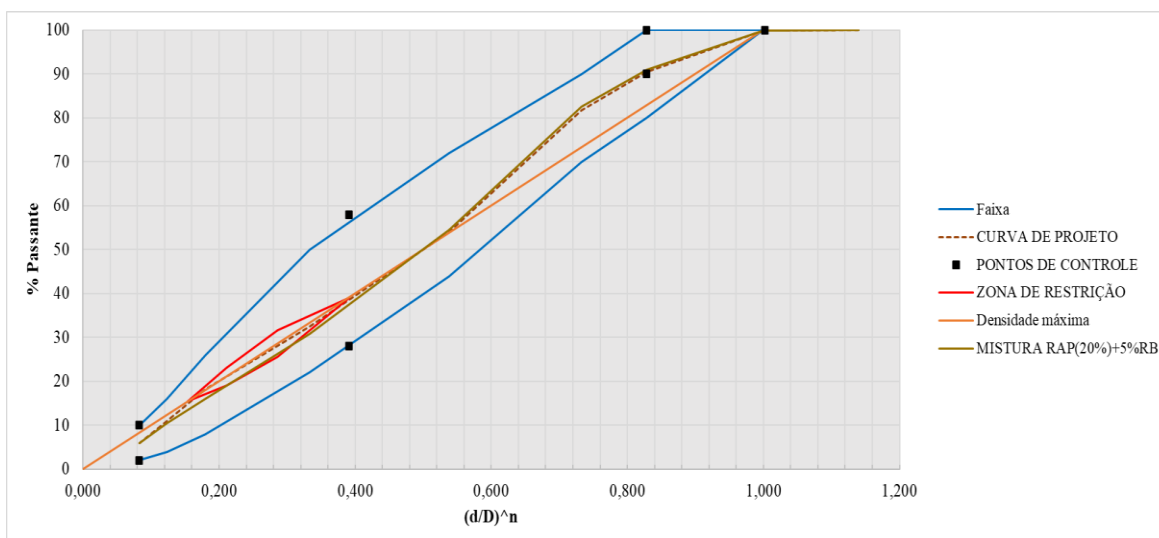
Conforme apresentado no tópico anterior, foi estabelecido o percentual de 20% de RAP para ser utilizado na mistura asfáltica reciclada com teor de projeto de ligante asfáltico equivalente a 4,4% para obtenção de parâmetros volumétricos dentro dos critérios da metodologia SUPERPAVE.

Para o presente estudo decidiu-se limitar a quantidade de material reciclado a ser empregada na mistura em 25%, por isso optou-se por adicionar 5% de resíduo de bauxita na mistura asfáltica reciclada. Os resultados mecânicos que serão apresentados 4.2 corroboram com esse valor, uma vez que para esse percentual as misturas com resíduo apresentaram comportamento análogo a mistura referência.

A Tabela 33 apresenta as percentagens dos agregados que se enquadraram na curva inferior da mistura, uma vez que a mistura de referência foi dosada por essa curva. Na Figura 22 consta a curva da composição da mistura reciclada com RB que atende aos limites da faixa C do DNIT.

Tabela 33 – Proporções de agregados da mistura asfáltica reciclada

COMPOSIÇÃO	MATERIAIS					
	Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	RAP (%)	Pó de pedra (%)	Resíduo de bauxita (%)	Cal (%)
Inferior - RAP	15	40	20	19	5	1

Figura 22 - Faixa granulométrica da mistura asfáltica com 20%RAP e 5% de RB, TMN = 12,5 mm

Para verificar o teor de projeto dessa mistura partiu-se do teor da mistura reciclada (4,4%), visto que na dosagem das misturas virgens, a mistura referência e com 5%RB apresentaram o mesmo teor de projeto. A Tabela 34 apresenta os parâmetros volumétricos encontrados com os teores de ligantes definidos.

Tabela 34 – Parâmetros volumétricos da mistura reciclada com resíduo de bauxita com 4,4% de ligante.

TEOR DE LIGANTE	%Gmm @projeto (N=100)	VAM (%)	V _v (%)	RBV (%)	P/A (%)
4.40%	96.00	10.14	4.05	60.23	1.35

Com base nos valores obtidos, o teor de ligante de projeto determinado para a mistura asfáltica reciclada foi de 4,40%, uma vez que foi obtido volume de vazios de 4% com esse quantitativo. Os percentuais de materiais ajustados a partir desse teor de ligante estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Proporção dos materiais da mistura asfáltica reciclada com resíduo de bauxita

MATERIAIS						
Brita 19,0 mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	RAP (%)	Pó de pedra (%)	Resíduo de bauxita (%)	Cal (%)	Ligante (%)
14,34	38,24	19,12	18,16	4,78	0,96	4,40

3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Neste tópico serão apresentados os ensaios realizados para determinar o comportamento mecânico das misturas asfálticas antes e após protocolo de envelhecimento. Assim como as características mecânicas das misturas asfálticas recicladas.

3.3.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT 136/2018. Como estabelecido pela normativa, duas forças diametralmente opostas são aplicadas a um corpo de prova cilíndrico, por meio de frisos metálicos que geram tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. O carregamento estático crescente será aplicado por meio de uma prensa mecânica, à velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. A leitura da carga de ruptura é realizada por meio de um anel dinamométrico que fica acoplado à prensa. Três corpos de prova (CP's) – com diâmetro de 100 ± 2 mm e altura de 35 a 65 mm –, condicionados durante 4 horas à temperatura de 25°C , foram submetidos a esse ensaio, de tal forma que o resultado do ensaio é equivalente ao valor da média obtida.

3.3.2 Dano por umidade induzida (Lottman)

Este teste foi realizado de acordo com a norma DNIT 180/2018 de forma a avaliar o potencial de deslocamento da película de ligante asfáltico em misturas asfálticas sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo.

Seis corpos de prova de cada grupo de mistura asfáltica foram moldados no Compactador Giratório SUPERPAVE - CGS, apresentando altura de 50 mm a 70 mm e diâmetro de $100 \text{ mm} \pm 2$ mm. A norma preconiza que os corpos de prova apresentem volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$ para esse ensaio. Os CPs foram divididos em dois grupos de três CPs cada, onde o primeiro grupo foi submetido a um procedimento de saturação térmica para simular o efeito da umidade; e um segundo grupo não foi condicionado. Determinou-se a média de resistência à tração dos dois grupos e com a razão entre eles foi estabelecido a razão de resistência à tração retida (RRT).

Os CP's condicionados foram, primeiramente, saturados por meio de sistema de bomba de vácuo e dessecador até atingir um teor de água entre 55 e 80% e, em seguida, submetidos ao resfriamento em uma temperatura de $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por, no mínimo, 16 horas. Após esse processo,

foram imersos em um banho a 60°C por, no mínimo, 24 horas. Após uma imersão de 2 a 3 horas em água à temperatura de 25°C, os CP's condicionados e não condicionados foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral utilizando prensa mecânica. A razão entre a resistência à tração obtida para os corpos condicionados (RTc) e não condicionados (RT) equivale à resistência retida à tração (RRT) e, indica a suscetibilidade do material à umidade. A RRT foi calculada conforme a Equação 3.

$$RRT = \frac{RT_c}{RT} \times 100\%$$

Equação 3

Sendo,

RRT a razão de resistência à tração retida;

RTc a média da resistência à tração por compressão diametral dos três corpos de prova que sofreram o condicionamento;

e RT a média da resistência à tração por compressão diametral dos três corpos de prova que não sofreram condicionamento.

3.3.3 Módulo de resiliência

Este ensaio visa medir a rigidez das misturas asfáltica e foi realizado de acordo com a norma DNIT 135/2018. Este parâmetro está relacionado às propriedades mecânicas intrínsecas ao comportamento "elástico" dos materiais utilizados em camadas de pavimentos flexíveis. Para a realização do ensaio, no mínimo, 3 CPs (diâmetro de 101,6 mm ± 3,8 mm e altura entre 35 mm e 70 mm) de cada um dos grupos de mistura asfáltica analisados foram condicionados por um mínimo de 4 horas à temperatura ambiente de 25°C.

Para a realização do teste, uma carga no formato de onda *haversine* foi aplicada no plano diametral vertical de cada corpo de prova, utilizando a UTM-25. A força máxima aplicada correspondeu a 10% da força obtida na ruptura pelo ensaio de tração por compressão diametral. A frequência de carregamento utilizada é 1Hz, sendo um ciclo corresponde a 0.10 s de aplicação da carga seguido de 0.9 s de repouso. A carga aplicada gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, resultando em um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Para medição do deslocamento horizontal dos corpos de prova

foram utilizados dois transdutores mecânicos eletromagnéticos tipos LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) presos ao corpo de prova por alças de referência. Com isso, o módulo de resiliência resultante corresponde à relação entre a tensão de tração (σ) indireta, aplicada repetidamente no plano diametral vertical do CP, e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, sendo calculado conforme a Equação 4.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu)$$

Equação 4

Sendo,

MR o módulo de resiliência, expresso em MPa;

P é a carga cíclica, expressa em N;

ΔH é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente), expresso em mm;

t é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm;

μ é o coeficiente de Poisson, assumido como sendo equivalente a 0,3 seguindo o valor comumente utilizado no banco de dados brasileiros.

3.3.4 Módulo dinâmico

Este ensaio, realizado conforme o método DNIT 416/2019, buscou determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares da mistura asfáltica. Dessa forma, corresponde ao valor normal do módulo complexo, calculado dividindo-se a máxima tensão (pico a pico) pela deformação axial recuperável (pico a pico) para um material sujeito a uma carga senoidal.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento uniaxial de compressão semi-senoidal harmônico sobre um corpo de prova (CP) cilíndrico de $150 \pm 2,5$ mm de altura por $100 \pm 2,0$ mm de diâmetro, utilizando a AMPT, em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. O ensaio foi realizado mediante deformação controlada, a qual foi limitada entre 50 e 75 *microstrains*, com o objetivo de obter as propriedades da mistura no regime viscoelástico linear. Essas propriedades correspondem ao módulo dinâmico, que mede a rigidez da mistura; e ao ângulo de fase, equivalente a defasagem da deformação em relação à tensão aplicada.

Dessa forma, dois CPs de cada grupo de mistura foram ensaiados a 4°, 20° e 40° nas frequências 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz, conforme especificado pela norma. No relatório obtido deste ensaio, consta o módulo dinâmico para cada uma das frequências nas 3 temperaturas, que são convertidos em uma única curva, denominada curva mestra, plotada como função de uma frequência reduzida, após a transladação horizontal dos dados. Para a construção da curva mestra, os valores de $|E^*|$ provenientes do ensaio laboratorial são plotados no espaço logarítmico como função da frequência, para cada uma das temperaturas testadas. A temperatura de 20°C foi definida como temperatura de referência e, então, os dados das demais temperaturas ensaiadas foram transladados horizontalmente, sendo obtida uma curva contínua.

3.3.5 Resistência à deformação permanente

Para a determinação da deformação permanente, realizada conforme a norma DNIT 184/2018, foram utilizados 3 CPs moldados no CGS apresentado altura de $150,0 \pm 2,5$ mm e o diâmetro de $102,0 \pm 2,0$ mm e volume de vazios de $7\% \pm 1$.

Previamente, os corpos de prova foram aquecidos em estufa a 60°C durante um período de, no mínimo, 3 horas, e, em seguida, foram sujeitos a um carregamento uniaxial cíclico. Tal carregamento foi realizado em duas etapas: a primeira, um pré-carregamento para o qual aplica-se uma carga de contato de compressão de $10,2 \pm 0,5$ kPa por 60 segundos; em seguida, aplica-se o carregamento cíclico de compressão, com duração de 1 segundo, dividido em duas partes: pulso de carga de 0,1 segundo, o mais próximo possível da forma $P = (1 - \cos \theta) / 2$, com magnitude variando desde a carga de contato até a carga máxima de $204,0 \pm 4,0$ kPa; e o período de repouso, com duração de 0,9 segundo, onde deve ser mantida a carga de contato.

O critério de parada do ensaio é o alcance de 7.200 ciclos de carregamento (aproximadamente 2 horas de ensaio) ou uma deformação de 50.000 *microstrains*, na qual as amostras invariavelmente já atingiram a ruptura.

3.3.6 Vida de fadiga

A vida de fadiga foi analisada de acordo com o ensaio DNIT 183/2018. Os corpos de prova cilíndricos foram compactados no CGS, possuindo dimensões que compreendem diâmetro de $101,6 \text{ mm} \pm 3,8 \text{ mm}$ e altura entre 35 mm e 70 mm. Estes foram submetidos à compressão diametral, que gera um estado biaxial de tensão de tração perpendicular à direção da carga

aplicada. A aplicação da carga foi realizada à frequência de 1 Hz por meio de equipamento pneumático. No decorrer do ensaio, a deformação da tração aumenta até o rompimento completo do CP ao longo da parte central do plano diametral vertical.

Assim, registra-se o número ciclos de carregamento (N) que provoca a ruptura do CP a cada nível de tensão, a fim de estabelecer a vida de fadiga da mistura. De acordo com a normativa que rege esse teste, o ensaio foi realizado com quatro cargas diferentes de forma a gerar quatro níveis de tensão cujos valores compreenderam entre 5% e 40% da resistência à tração indireta da mistura asfáltica. Com isso, 12 corpos de prova foram ensaiados a 40%, 37,5%, 35 e 32,5% da carga suportada pelos CP's no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Com base nos resultados foi obtida a curva que relaciona os níveis de tensão aplicados com o N das amostras, conhecida como curva de Wöhler. Determinado o N das amostras, plotou-se a curva desses valores versus a diferença de tensões no centro da amostra ($\Delta\sigma$) e a deformação específica resiliente (ϵ_r). Por meio de regressão linear, ajustou-se uma linha de tendência aos dados de cada mistura, a qual segue o modelo de previsão de fadiga (Equação 5 e Equação 6), cujo R^2 mínimo é equivalente a 0,8.

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2}$$

Equação 5

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\epsilon_i} \right)^{n_3}$$

Equação 6

Sendo,

N é o número de ciclos de carregamento que leva a amostra à ruptura;

ϵ_i é a deformação resiliente inicial;

$\Delta\sigma$ é a diferença das tensões no centro do CP (ϵPa);

k_i e n_i são constantes obtidas na regressão linear dos pares N; e

ϵ_i , N e $\Delta\sigma$ são características da mistura asfáltica estudada.

A norma também aponta o módulo de resiliência (MR) como inversamente proporcional a deformação inicial do corpo de prova.

3.3.7 Desgaste cântabro

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 383/1999 e buscou estabelecer o desgaste por abrasão da mistura asfáltica – simulando o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento. Para isso, 3 CPs foram necessários, sendo eles previamente pesados e, em seguida, submetidos, um por vez, a 300 revoluções sem carga abrasiva (esferas de aço). Após completar o ciclo, foram novamente pesados e verificou-se a perda de massa.

3.3.8 Durabilidade a longo prazo

O processo de envelhecimento de misturas asfálticas em laboratório a longo prazo busca simular o dano que ocorre ao longo da vida útil do pavimento. A fim de verificar esse comportamento das misturas com resíduo de bauxita produzidas neste estudo, adotou-se o método estabelecido pela norma AASHTO R30:2010. Para tanto, as amostras compactadas foram levadas à estufa por $120 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$ (5 dias) à temperatura de $85^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, de forma a representar a etapa de oxidação que ocorre ao longo da vida útil do pavimento, simulando um período de 7 a 10 anos de serviço. Após esse período, foram realizados os ensaios mecânicos supracitados (resistência à tração por compressão diametral, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico, resistência à deformação permanente, fadiga e desgaste cântabro) para verificar as propriedades das misturas após esse procedimento.

3.4 ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL

A viabilidade de adoção de um novo produto/material requer, além da análise técnica, que se analisem os aspectos econômicos e ambientais. Na presente pesquisa buscou-se verificar a viabilidade de utilização do resíduo de bauxita em misturas asfálticas como estratégia de sustentabilidade.

3.4.1 Aspectos ambientais

O resíduo de bauxita corresponde a um material residual oriundo do processo de beneficiamento do minério de bauxita para obtenção da alumina, o qual é separado do licor rico em hidróxido de alumínio na etapa de clarificação e então lavado para redução do teor cáustico e

em seguida encaminhado para as áreas de disposição. Para essa pesquisa, foram considerados os aspectos ambientais associados ao resíduo de bauxita relativos ao seu processo de disposição. Portanto, por limitações da pesquisa, não foi considerado os aspectos relacionados ao processo de beneficiamento da bauxita que resulta na produção do RB.

Além disso, como o resíduo é um material que apresenta metais pesados em sua composição foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização em amostras de solução obtidas das misturas com resíduo nos diferentes percentuais verificados tecnicamente a fim de avaliar a segurança das misturas asfálticas e verificar se ocorreu o enclausuramento do resíduo quando utilizado na produção de misturas asfálticas.

3.4.1.1 Impactos ambientais associados à disposição do RB

A lixiviação de metais do RB e a sua elevada alcalinidade estão associados a impactos ambientais, os quais de acordo com Joyce e Björklund (2019) englobam alterações climáticas, eutrofização da água, ecotoxicidade da água e alcalinização dos solos, sendo este o único estudo encontrado na literatura que aponta os aspectos ambientais relacionados ao processo de disposição do resíduo de bauxita em termos quantitativos. Os indicadores levantados por esses autores, obtidos na base de dados *Ecoinvent*, foram utilizados para quantificar as externalidades ambientais atreladas a disposição do resíduo nesse estudo, os quais estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Impactos associados a disposição de 1 tonelada de resíduo de bauxita e seus indicadores

Impacto ambiental	Unidade	Quantidade
Mudanças climáticas	kgCOeq/t	8,1
Eutrofização de água	kgPeq/t	0,34
Ecotoxicidade de água	CTUe	67,774
Acidificação/alcalinização	mol H+ eq	0,08

Fonte: Adaptado de Joyce e Björklund (2019)

As quantidades apresentadas na Tabela 36 foram obtidas por meio de uma análise de ciclo de vida e, apontam a redução dos impactos ambientais com a utilização de 1 t de RB.

Assim, ao considerar a utilização desse material na produção de misturas asfálticas, as externalidades ambientais evitadas - isto é, os impactos reduzidos com a diminuição do material

que seria depositado e, conseqüentemente, a minimização da necessidade de novas áreas para armazenamento do RB - foram calculadas com base no percentual de RB a ser utilizado para compor a malha asfáltica. Nesse caso, foram analisados três diferentes percentuais (5%, 10% e 15%) para compor as misturas asfálticas como substituto do pó de pedra.

A extensão de malha rodoviária considerada foi estabelecida segundo os dados de relatórios da CNT, que aponta o quantitativo de vias degradadas nas diferentes regiões do Brasil, e, com isso, foi estabelecido o quantitativo de RB a ser utilizado e a redução de externalidades, associadas ao seu processo de disposição do resíduo, com a sua utilização.

3.4.1.2 Avaliação ambiental das misturas

A incorporação do RB como produto na cadeia produtiva de outros materiais reduz a necessidade de eliminação desse material residual em barragens e, com isso, a quantidade estocada e os impactos associados à sua disposição. Ademais, reduz a necessidade de extração de matérias-primas, transporte e processamento para obtenção do material a ser substituído, evitando, por exemplo, os encargos ambientais decorrentes dessas atividades para os setores nos quais o resíduo será utilizado.

No entanto, essa aplicação deve ser segura e não causar impactos devido, por exemplo, a percolação de metais pesados para lençóis freáticos, e, portanto, faz-se necessário a análise de classificação ambiental do novo material produzido de modo a verificar frações que lixiviam e/ou solubilizam para o meio. No tópico 3.1.4.7 foi realizada a classificação do RB e observou-se percentuais de alumínio, cromo total, ferro e manganês acima dos limites máximos estabelecidos pela normativa na amostra solubilizada.

Dessa forma, além de analisar tecnicamente a utilização do RB em misturas asfálticas, a fim de proporcionar uma destinação ambientalmente adequada a esse material, o qual autores como Bertochi *et al.* (2006) e Ribeiro *et. al.* (2011) classificaram como resíduo perigoso, buscou-se nesse estudo verificar a segurança de utilização do RB nas misturas asfálticas produzidas com 5%, 10% e 15% de resíduo. Com isso, as misturas foram submetidas a ensaios de lixiviação e solubilização realizados de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), para ensaios de classificação ambiental da mistura. Desse modo, o fluido lixiviado e solubilizado foi caracterizado quanto à presença de metais pesados, por meio do ensaio de Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) – utilizado na determinação quantitativa da concentração de metais em

amostras com base na absorção da radiação por átomos livres no estado gasoso (Cadore, Matoso e Santos, 2008).

Com o objetivo de avaliar a percolação de elementos do RB e possíveis contaminações em virtude da sua elevada alcalinidade ($\text{pH} \geq 10$), foi realizada a análise da qualidade da água proveniente do condicionamento de corpos de prova asfálticos a 60°C no ensaio de dano por umidade induzida pelo pHmetro, para comparativo com o pH da mistura referência. Esse mesmo procedimento foi realizado no estudo de Lima (2015).

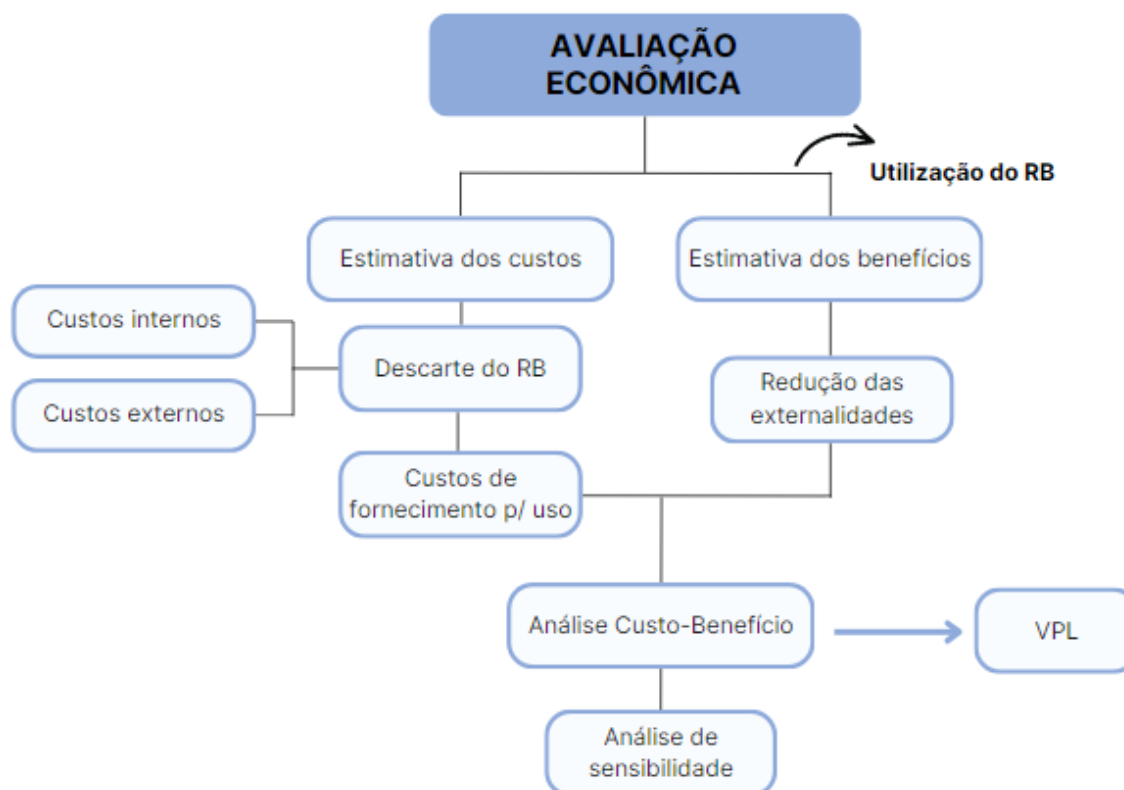
Essas análises buscam verificar se a utilização do resíduo de bauxita em misturas asfálticas é viável do ponto de vista ambiental, ou seja, reduz a possibilidade de contaminação pelo material por meio do enclausuramento.

3.4.2 Aspectos econômicos

O objetivo da avaliação econômica foi verificar se o uso do resíduo de bauxita em misturas asfálticas como estratégia de redução do volume de resíduos armazenados é viável para a empresa de mineração. Para isso, foram considerados os aspectos econômicos relacionados à disposição do resíduo – visto que a análise se limitou à disposição final desse material, o qual ocupa extensas áreas – e a sua aplicação no modal rodoviário, considerando os impactos ambientais associados a esse processo.

A análise envolveu a definição dos custos associados à disposição do resíduo de bauxita em barragens e os benefícios decorrentes do retorno do material ao ciclo produtivo ao compor a cadeia produtiva da indústria da pavimentação, utilizando-o na produção de misturas asfálticas. A metodologia empregada nessa etapa é apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Etapa da Avaliação Econômica



Os dados utilizados no estudo foram retirados de informações divulgadas publicamente e disponíveis no site das empresas, além de informações apresentadas na literatura.

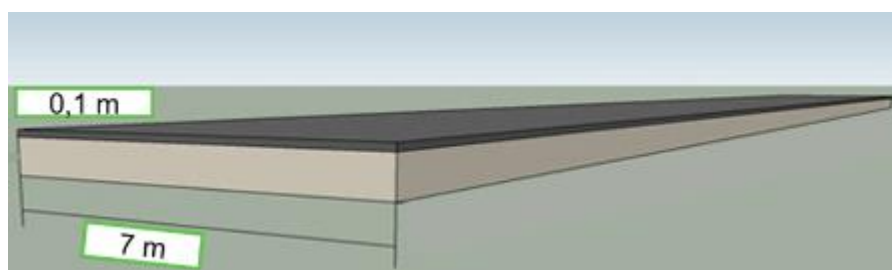
3.4.2.1 Pressupostos

O estudo foi conduzido considerando os seguintes pressupostos:

- Horizonte de planejamento: 5 anos (busca pela consolidação do resíduo como produto para pavimentação e geração de receita);
- Taxa de Mínima Atratividade (TMA): a taxa utilizada nessa análise foi de 11,25%, que foi a taxa média ajustada dos financiamentos apurados pelo Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (Selic) no período de análise deste trabalho, que tem como data base janeiro de 2024, por representar a taxa básica de juros da economia brasileira;
- Custos internos e externos associados ao processo de disposição do resíduo em barragens;
- Custos de utilização do RB nas misturas: custos internos para disponibilização do resíduo com distância média de transporte equivalente a 50 km, adotada com base no Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT, 2019);

- Benefícios: os benefícios derivados da redução das externalidades ambientais com a utilização do RB;
- Utilização do RB: o fornecimento do resíduo de bauxita para a produção de misturas asfálticas representa uma oportunidade de retorno desse material para a cadeia produtiva, reduzindo o quantitativo estocado anualmente. A fim de determinar o quantitativo a ser empregado, considerou-se a utilização em pavimento com 7 m de largura e 10 cm de espessura (Figura 24).

Figura 24 – Configuração do revestimento asfáltico do pavimento



- Percentual aplicado: para quantificar o total de resíduo a ser utilizado foi realizado o levantamento das vias degradadas no estado do Maranhão, uma vez que a planta de resíduo em estudo está localizada nessa região, com base nos dados fornecidos pela CNT – Confederação Nacional de Transportes.

3.4.2.2 Estimativa dos custos de disposição do RB

Neste tópico foi explanado o método de determinação e as características consideradas dos custos do processo de disposição do resíduo de bauxita nas barragens de contenção, os quais envolvem custos internos, diretamente associados às atividades internas da empresa, e custos externos, aqueles associados às externalidades negativas da atividade de disposição do RB.

3.4.2.2.1 Custos internos

Os custos internos estão associados aos custos de armazenamento do resíduo em lagoas de disposição, os quais envolvem a construção, manutenção, operação e reabilitação das barragens ao fim da vida útil, e aos custos de fornecimento do material para aplicação na malha asfáltica.

- Custos associados à disposição do RB:

O IAI, em seu documento “*Maximising the use of bauxite residue in cement*”, aponta que o custo de disposição do resíduo de bauxita equivale de 1 a 3% do custo total de produção da alumina, o que representa um custo operacional de 5 US\$ a 15 US\$/t de alumina produzida.

Dessa forma, os custos relacionados à produção de alumina, foram quantificados com base nos dados extraídos do Relatório Anual de 2022 publicado no site oficial da Alcoa Corporation. Na Tabela 37 foram apresentados os insumos necessários para a produção de 1,0 tonelada de alumina.

Tabela 37 – Insumos utilizados para a produção de 1 tonelada métrica de alumina

Matéria prima	Unidade	Consumo por t de Alumina
Bauxita	T	2.2 – 4.1
Soda cáustica	Kg	60 - 100
Eletricidade	kWh	170 a 260 do consumo total
Óleo combustível e gás natural	GJ	6 – 13.5
Cal (CaO)	Kg	6 – 60

Fonte: Relatório Anual Alcoa Corporation (2022)

Os custos desses materiais foram estabelecidos com base no preço de mercado dos insumos e matérias-primas consumidos.

Dessa forma, o custo de disposição anual considerado na análise foi quantificado utilizando a Equação 7.

$$C_i = 0,02 C_a \times p$$

Equação 7

Sendo,

C_i os custos internos da disposição do resíduo;

C_a o custo de produção de 1 tonelada de alumina.

p o quantitativo estimado de resíduo de bauxita gerado anualmente.

Para tanto, foi considerado que o custo de disposição do RB equivale a um custo médio de 2% do custo total da produção da alumina.

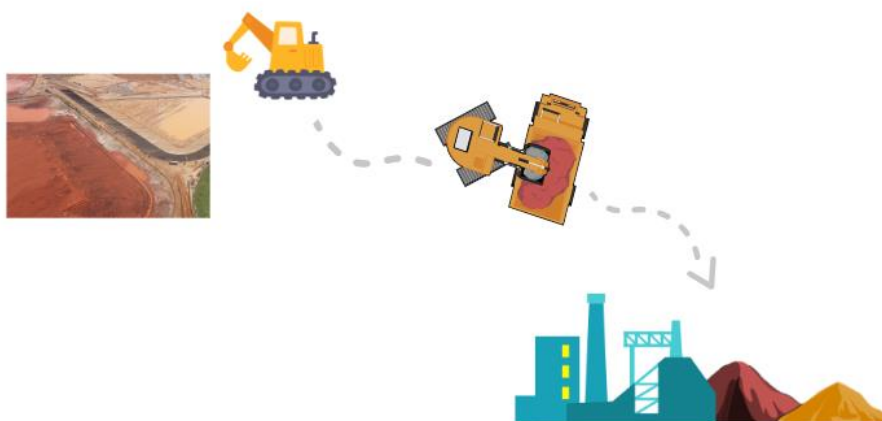
- Custos de fornecimento do resíduo para aplicação na pavimentação:

O custo de fornecimento do resíduo para aplicação na camada de revestimento do pavimento é determinado pelo custo de transporte do material até seu destino. Tais custos são variáveis e compreendem combustível, carga e descarga, manutenção dos equipamentos, tempo/distância de transporte, além de gastos fixos como salário do motorista, seguro do transporte, licenciamento. No estudo foram contabilizados custos com equipamentos, materiais e mão de obra.

Para determinação dos custos de transporte considerou-se a retirada do resíduo nas barragens por meio de escavadeira, a qual abastece os caminhões que transportarão o resíduo até a unidade asfáltica.

Nesse sentido o seguinte sistema logístico foi considerado (Figura 25):

Figura 25 – Sistema logístico



Dessa forma, para a análise em questão, foram considerados os custos referentes à operação de escavadeira e caminhão basculante de 10 m³. Considerando uma massa específica real do resíduo de bauxita equivalente a aproximadamente 3 t/m³, tem-se que em uma viagem o caminhão basculante consegue transportar 30 toneladas de resíduo de bauxita.

Os custos referentes ao transporte e carga do resíduo utilizando caminhão e escavadeira foram retirados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2023) e estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Custos de transporte conforme o SINAPI

Código	Descrição da atividade	Unidade	Preço (R\$)
93590	Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ , em via urbana pavimentada, adicional para DMT excedente a 30 km	m ³ xkm	0,99
100978	Carga, manobra e descarga de solos e materiais granulares em caminhão basculante 10 m ³ - carga com escavadeira hidráulica (caçamba de 1,20 m ³ /155 hp) e descarga livre	m ³	7,00

A distância de transporte (DMT) adotada para análise foi de 50 km, sendo embasada no Manual de Custos Médios Gerenciais (DNIT, 2019), em que se adota 50 km como sendo a distância entre o canteiro e os centros fornecedores.

Dessa forma, o custo de fornecimento de 1 tonelada de RB foi calculado utilizando a Equação 8.

$$C_f = B \times d + E$$

Equação 8

Sendo,

C_f o custo do fornecimento do RB;

B é o custo do transporte com caminhão basculante para 1 tonelada de RB, considerando que a cada 1 m³ de RB corresponde a 3 toneladas de material, determinado com base nos custos apresentados na Tabela 34;

d é a distância de transporte;

e E é o custo de retirada do material com escavadeira hidráulica.

- Custo total:

Para o cálculo do custo interno foi utilizada a Equação 9.

$$C = C_i + C_f$$

Equação 9

Sendo,

C_i os custos internos associados à disposição do RB;

C_f o custo de fornecimento do RB.

3.4.2.2.2 Custos externos

Os custos externos, de acordo com Edwards *et al.* (2018), englobam recursos que não são comercializados e caracterizam-se por atingir o bem-estar das populações por meio das alterações na saúde, meio ambiente, comodidade e lazer.

Dessa forma, a metodologia utilizada para determinação desses custos envolveu a identificação e mensuração em termos monetários dos impactos causados ao meio ambiente. Assim, foram utilizados os dados apresentados por Joyce e Björklund (2019).

- Mudanças climáticas:

A emissão de gases contribuintes com as mudanças climáticas foi valorada utilizando o método de Produtividade Marginal (dose resposta), sendo a estimativa monetária dos danos executada por meio do Custo Social do Carbono (CSC). O Ipea (2022) realizou uma análise do preço do carbono para projetos de investimento em infraestrutura no Brasil, o qual abrangeu fatores apontados como relevantes na literatura de políticas ambientais, conforme estabelecido em modelos computacionais determinísticos, para estimar o CSC que englobam: PIB, superfície territorial, emissões de CO₂ per capita e participação do setor industrial no PIB. No estudo em questão, os autores concluíram com sua análise um preço estimado para o Brasil de US\$ 7,12 a preços de 2010 (US\$ 8,45/tCO₂eq a preços de 2020). O valor em moeda nacional depende da cotação diária do dólar, com isso, a taxa de câmbio foi de 4,96 R\$/US\$ (cotação de fevereiro/2024).

Dessa forma, a valoração monetária dos impactos relacionados à mudança climática foi determinada por meio da Equação 10.

$$C_m = I_m \times CSC \times t$$

Equação 10

Sendo,

C_m o custo da mudança climática causada pelo armazenamento do RB em barragens;

I_m o indicador atribuído a mudança climática no estudo de custo de Joyce e Björklund (2019);

CSC o custo social do carbono;

e t a taxa de câmbio.

- Eutrofização de água, ecotoxicidade de água e acidificação do solo:

Para determinação dos custos referentes à eutrofização e ecotoxicidade de águas superficiais e subterrâneas, assim como a acidificação de solos, o método de custos de controle evitados foi adotado, isto é, o custo ambiental de cada um desses impactos foi contabilizado considerando os custos a serem investidos na restauração ecológica de ecossistemas degradados como resultado das consequências desses impactos.

Na literatura brasileira não foram encontradas taxas de custos para os impactos em questão (eutrofização, ecotoxicidade e acidificação). Dessa forma, foram utilizados na presente pesquisa os *Eco-costs* estabelecidos pela *Sustainability Impact Metrics*, a qual aponta que os custos dos impactos ambientais nas diferentes categorias relatados foram calculados com base no cenário econômico da União Europeia e que, no entanto, podem servir como uma indicação dos custos marginais de prevenção para outras regiões, sob a condição de concorrência equitativa entre as empresas de produção. Essas taxas estão apresentadas na Tabela 39.

Tabela 39 – Taxa de custos estabelecida pelos *Eco-costs*

Impacto	Unidade	Taxa de custo (€)
Eutrofização de água	kgPeq	16,46
Ecotoxicidade de água	CTUe	$2,89 \times 10^{-3}$
Acidificação/alcalinização	mol H+ eq	7,65

Dessa forma, os custos dos impactos relacionados às categorias em questão foram determinados por meio da Equação 11.

$$C_{im} = I_m \times C \times t$$

Equação 11

Sendo,

C_{im} o custo dos impactos ambientais referentes aos indicadores de eutrofização, ecotoxicidade e acidificação para cada 1 tonelada de RB armazenado em barragens;

I_m o indicador atribuído a mudança climática no estudo de custo de Joyce e Björklund (2019);

C o custo marginal de prevenção apontado pela *Sustainability Impact Metrics* em euros;

e t a taxa de câmbio do euro – 5,40 R\$/€ (cotação de fevereiro/2024).

Com a valoração monetária desses impactos (emissão de CO₂eq, eutrofização, ecotoxicidade e acidificação) foi estabelecido o custo externo total referente a 1 tonelada de RB e, assim, o quanto é reduzido com a utilização desse material na pavimentação asfáltica com base no percentual a ser empregado.

- Emissão de CO₂ com o transporte do RB:

De acordo com De Carvalho (2011) para veículos pesados as emissões quilométricas de CO₂ (kg de CO₂/km) equivalem a 1,28, em toneladas esse valor é igual 0,00128. Dessa forma, o custo relacionado a essa emissão associada ao transporte do RB para as usinas asfálticas foi calculado utilizando a Equação 12.

$$C_e = 0,00128 \times d \times CSC$$

Equação 12

Sendo,

C_e o custo externo da emissão de CO₂ pelo transporte do RB;

0,00128 é a quantidade de CO₂ emitida por veículos pesados segundo De carvalho (2011);

d é a distância de transporte;

E CSC é o Custo Social do Carbono, estimado pelo Ipea (2022) em US\$ 8,45/tCO₂eq. Para a conversão em moeda nacional multiplica-se esse valor pela da cotação diária do dólar, com isso, a taxa de câmbio foi de 4,96 R\$/US\$ (cotação de fevereiro/2024).

3.4.2.3 Estimativa dos benefícios: redução das externalidades

Para a estimativa do benefício com a utilização do RB foi considerado que este equivale à redução das externalidades com a aplicação do RB. Dessa forma, com a quantificação dos custos externos associados ao armazenamento do resíduo de bauxita estimaram-se os benefícios atrelados à aplicação desse material na produção de misturas asfálticas nos percentuais analisados nesse estudo utilizando a Equação 13.

$$B = R_{ce} + R_{ci}$$

Equação 13

Sendo,

B os benefícios;

R_{ce} a redução dos custos externos associados à utilização de 1 tonelada de RB, determinado com base nos impactos evitados com a sua utilização;

e R_{ci} é a redução dos custos internos (aumento da vida útil da barragem) para cada 1 tonelada de RB utilizada;

Os benefícios obtidos com os impactos evitados pela utilização do RB foram estimados considerando o quantitativo de material a ser utilizado no modal rodoviário (Equação 14).

$$B_t = (R_{ce} + R_{ci}) \times Q_t$$

Equação 14

Sendo,

B_t são os benefícios totais;

e Q_t o quantitativo de RB utilizado na pavimentação.

3.4.2.4 Análise Custo-Benefício

A análise custo-benefício (ACB) apresenta a premissa básica de que as alternativas devem ser selecionadas de acordo com comparações sistemáticas de suas vantagens (benefícios) e desvantagens (custos). Para a realização desse tipo de análise são utilizados métodos como: Valor Presente Líquido, Razão Benefício-Custo, Razão Benefício-Custo Incremental e Taxa Interna de Retorno.

Nesse estudo foi adotado o método do Valor Presente Líquido (VPL), um método de análise econômico-financeira que possibilita avaliar a viabilidade financeira de uma proposta de investimento, por meio do desconto dos benefícios e custos, trazidos ao valor presente (Ross, Westerfield e Jordan, 2010).

A Equação 15 apresenta a formulação matemática utilizada para determinar o VPL. Para qualquer alternativa x , o valor presente líquido (VPL) dos fluxos para um período de tempo n , considerando-se uma taxa de desconto i , é:

$$[VPL_{x,n}]_i = \sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t} - C_{x,t}}{(1+i)^t}$$

Equação 15

Sendo,

$B_{x,t}$ os benefícios esperados para o projeto x durante o ano t;

$C_{x,t}$ os custos esperados para o projeto x durante o ano t;

i a taxa de juro (taxa de mínima atratividade);

t é o período monitorado;

e x é a alternativa adotada.

Logo, corresponde ao somatório dos valores gerados em um determinado tempo, sendo corrigido de acordo com uma determinada taxa, a taxa de mínima atratividade (Gitman, 2002).

3.4.2.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade, consiste em uma técnica utilizada para medir o efeito de variáveis de entrada no custo-benefício do projeto, ou seja, consiste em estudar o efeito que a variação de um dado de entrada pode ocasionar nos resultados. Assim, caso uma pequena variação num parâmetro altere drasticamente a rentabilidade de um projeto, diz-se que o projeto é muito sensível a este parâmetro (Casarotto Filho e Koppitke, 2000).

Nesse caso, serão consideradas diferentes distâncias de fornecimento do RB, conforme a Tabela 40, de modo a verificar a influência da distância a ser percorrida no transporte do resíduo na análise custo-benefício da alternativa adotada (utilizar o RB na produção de misturas asfálticas).

Tabela 40 – Distâncias verificadas na Análise de Sensibilidade

Distância transportada (km)
50 km
100 km
150 km
200 km

Para o cálculo foi utilizada a Equação 16 referente ao custo de fornecimento do RB para a pavimentação variando as distâncias de forma a verificar o aumento dos custos com o aumento das distâncias de transporte do resíduo de bauxita.

$$C_t = C_f + C_e$$

Equação 16

Sendo,

C_t o custo do fornecimento do RB;

C_f o custo do fornecimento do RB;

C_e o custo externo da emissão de CO₂ pelo transporte do RB

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico apresenta os resultados e discussões dos ensaios mecânicos e da análise econômica e ambiental das misturas asfálticas com resíduo de bauxita. Este também apresenta os resultados de durabilidade a longo prazo das misturas virgens produzidas com o RB, considerando um período de 7 a 10 anos de serviço. Além das análises mecânicas da mistura reciclada contendo 20% de asfalto fresado e da mistura reciclada com resíduo de bauxita.

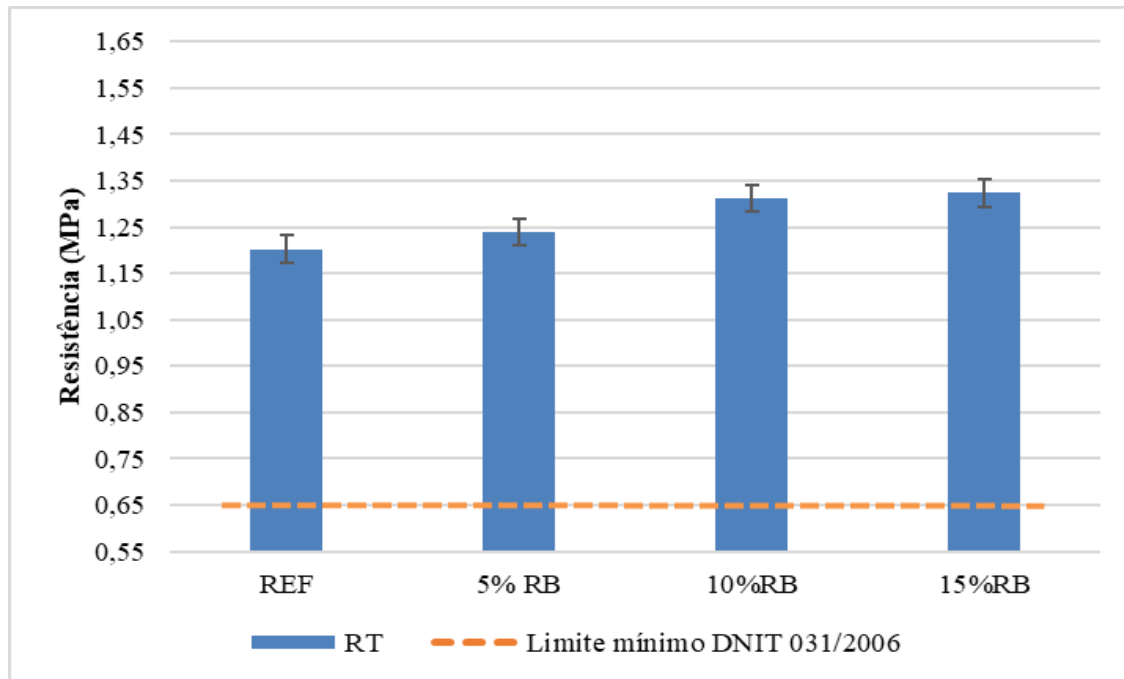
4.1 ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS COM RESÍDUO DE BAUXITA ANTES E APÓS PROTOCOLO DE ENVELHECIMENTO (LTOA)

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões dos ensaios mecânicos realizados nas misturas asfálticas com materiais virgens produzidas com 5%, 10% e 15% de resíduo de bauxita em substituição ao pó de pedra antes e após protocolo de envelhecimento, visando simular a durabilidade a longo prazo das misturas para um período de 7 a 10 anos de serviço conforme protocolo estabelecido pela AASHTO R30:2010.

4.1.1 Resistência à tração por compressão diametral

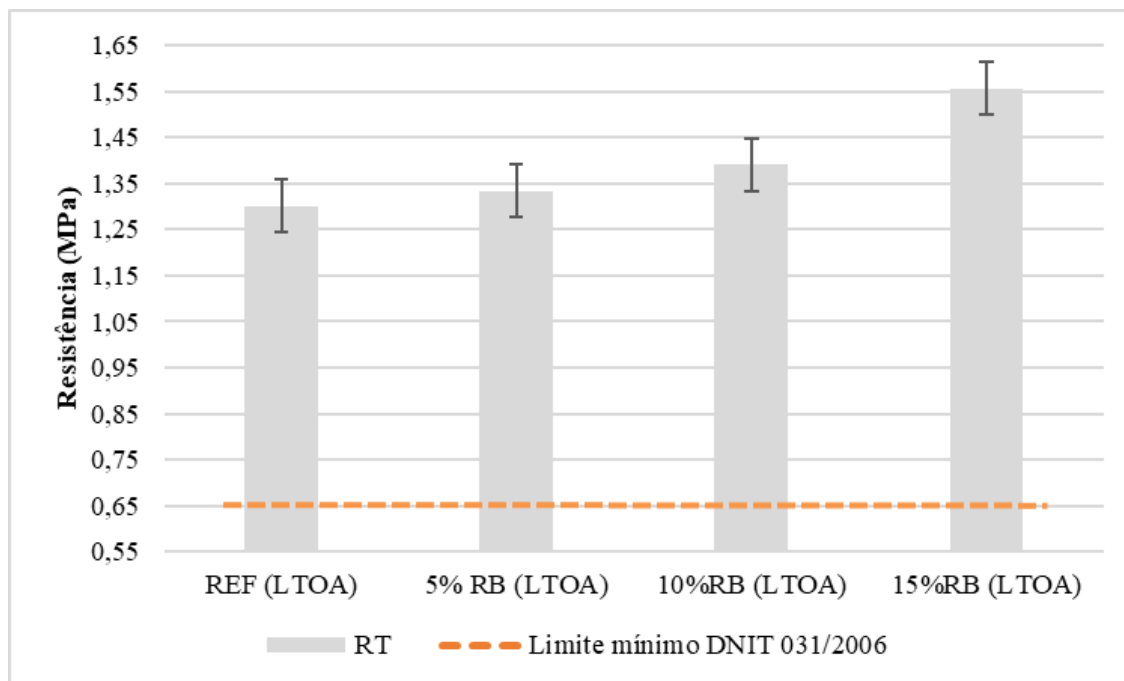
A Figura 26 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) dos 4 grupos de misturas asfálticas analisados, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 26 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB.



A Figura 27 ilustra os resultados após protocolo de envelhecimento a longo prazo.

Figura 27 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento.



As amostras analisadas, antes e após envelhecimento térmico, apresentaram valores de RT que atendem à resistência à tração mínima de 0.65 MPa de acordo com a especificação de serviço DNIT 031/2006 para misturas asfálticas convencionais.

Na Figura 25 verifica-se que a amostra com 15% de resíduo de bauxita apresentou um aumento de resistência à tração por compressão diametral equivalente a 10,09%, enquanto as amostras com 5% e 10% de RB proporcionaram aumento de 3,03% e 9,06%, respectivamente, em relação à mistura de referência (REF), comportamento atribuído ao aumento teor de finos na mistura. Após o protocolo de envelhecimento, esse acréscimo elevou-se para 19,63% referindo-se à amostra 15%RB, enquanto as demais (5%RB e 10%RB) apresentaram valores de acréscimo aproximados àqueles proporcionados na primeira situação (antes do processo de envelhecimento), conforme ilustrado na Figura 27.

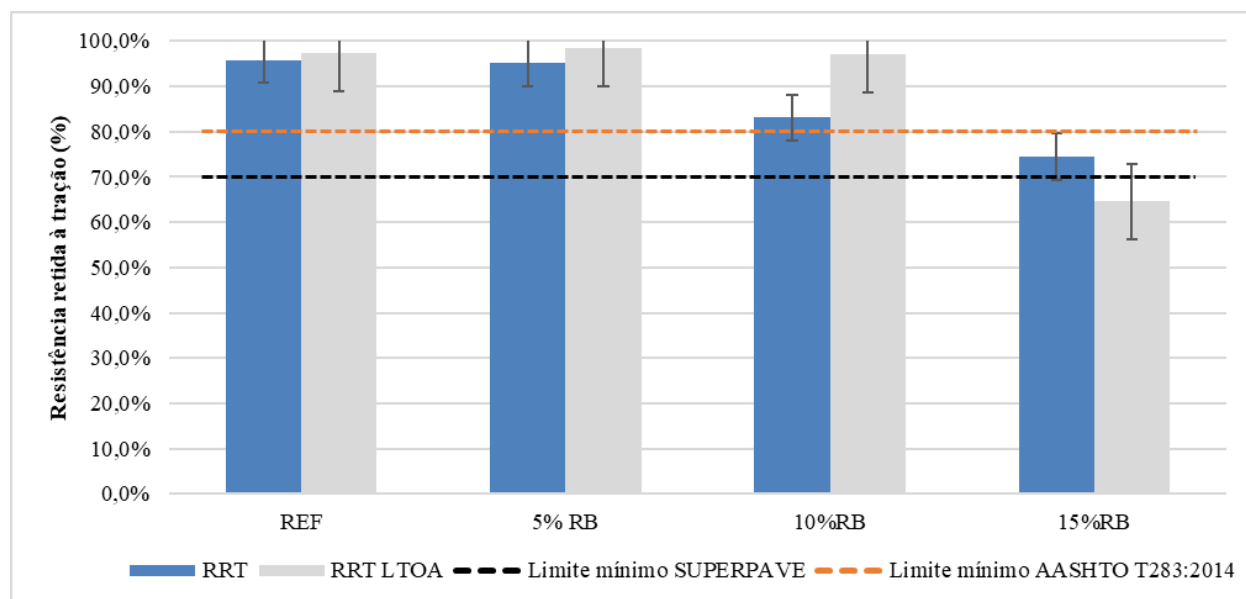
Esse aumento na rigidez corrobora com o aumento do módulo complexo do ligante preparado com resíduo apresentado em estudo como o de Zhang *et al.* (2018b) e Zhang *et al.* (2019). E com a química do material, que apresenta óxidos de ferro em sua composição e elevada massa específica.

Após o envelhecimento, a amostra REF apresentou um aumento de aproximadamente 8,33%, enquanto as misturas com 5%, 10% e 15% de resíduo de bauxita apresentaram acréscimos de 7,12%, 6,10% e 17,52%, respectivamente. Esse aumento dos valores de RT em detrimento do enrijecimento do material após o processo de oxidação também foi observado nos estudos de Arruda (2021), no qual as amostras foram submetidas ao envelhecimento a longo prazo por 5 dias a 85°C, conforme estabelecido pela AASHTO R30 (2010), que corresponde ao mesmo protocolo adotado nesse estudo; e no estudo de Siqueira (2023), que verificou o envelhecimento térmico submetendo as amostras a um confinamento de 9 dias em estufa a 95°C.

4.1.2 Resistência ao dano por umidade induzida – DUI

A Figura 28 apresenta os valores médios da resistência retida à tração diametral (RRT) dos 4 grupos de misturas asfálticas analisados antes e após protocolo de envelhecimento, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 28 -Resultados do ensaio de dano por umidade induzida da mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB antes e após protocolo de envelhecimento.



A metodologia SUPERPAVE considera o valor de 80% como o valor de RRT mínimo para uma suscetibilidade à umidade da mistura asfáltica aceitável. No entanto, a norma AASHTO T 283:2014 e a norma DNIT 031/2006 adotam 70% como valor mínimo de RRT para as misturas asfálticas. A amostra referência e com 5% e 10% antes e após envelhecimento (situação na qual apresentaram praticamente o mesmo percentual de resistência retida à tração) satisfizeram os critérios estabelecidos por ambas as vertentes. Com exceção para a mistura com 15% de resíduo de bauxita, a qual antes do envelhecimento térmico atendeu ao critério estabelecido pelas normas AASHTO T 283:2014 e DNIT 031/2006, entretanto, após protocolo de envelhecimento apresentou valores inferiores aos valores mínimos estabelecidos.

De acordo com Zhang *et al.* (2015) após o condicionamento com umidade as superfícies de falha tendem a se transformar de coesivas em adesivas. E, com isso, a resistência das misturas asfálticas nessa condição tem sido relacionada à mineralogia do agregado, à textura superficial do agregado, à química do ligante asfáltico e à compatibilidade entre ligante/agregado (Terrel e Al-Swailmi, 1994; Abo-Qudais e Al-Shweily, 2007; Zhang *et al.*, 2015).

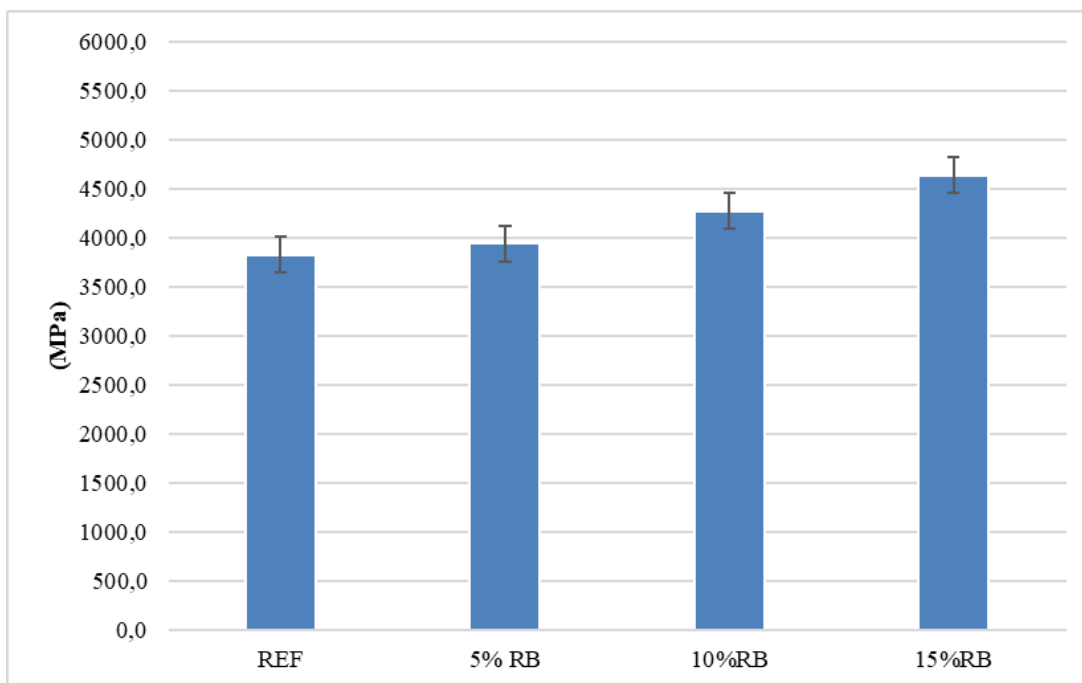
A perda de resistência foi maior para maiores quantitativos de resíduo na mistura. Essa redução da resistência à umidade pode ser atribuída ao alto teor de metais alcalinos presentes no resíduo, no qual as ligações formadas entre metais alcalinos e ligantes asfáltico são solúveis com a presença de umidade (Zhang *et al.*, 2019).

De acordo com Lima (2015) o resíduo de bauxita é composto por substâncias hidrófobas e hidrófilas, sendo capaz de ser dissolvido em solventes polares e apolares. Com isso, ao mesmo tempo em que se adequa a mistura, sendo envolvido pelo ligante, parte de seus componentes tendem a ser dissolvidos quando em contato com água, favorecendo a liberação do resíduo de bauxita não encapsulado.

4.1.3 Módulo de resiliência

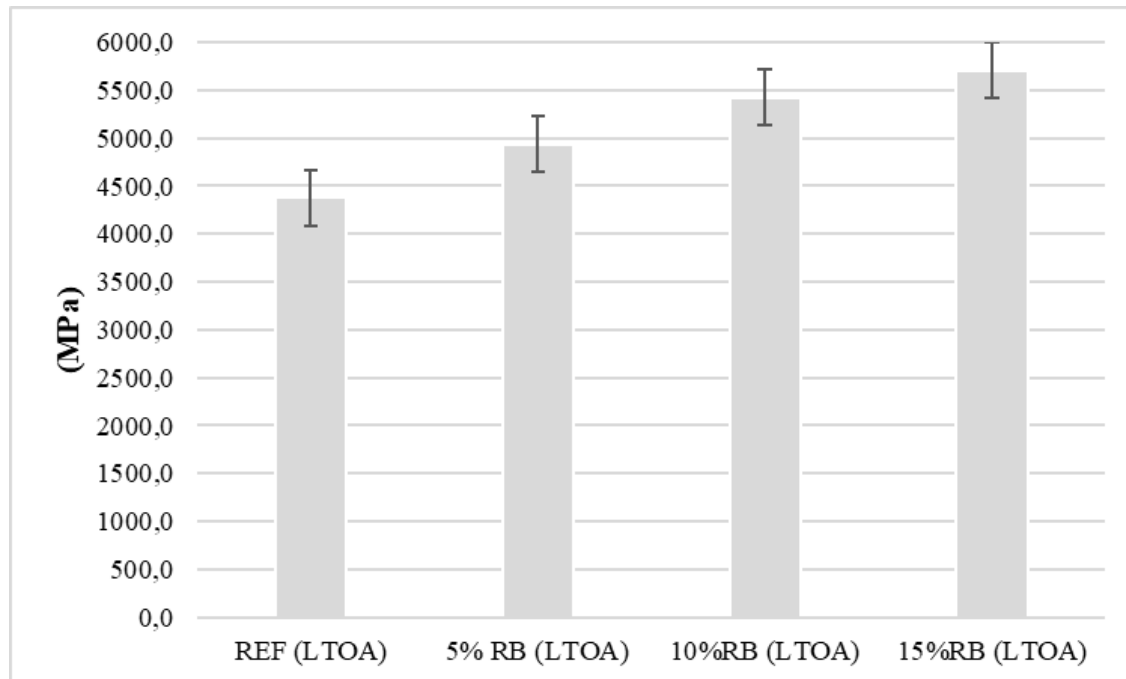
A Figura 29 apresenta os valores médios de módulo de resiliência dos 4 grupos de misturas asfálticas analisados, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 29 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB.



Na Figura 30 estão ilustrados os resultados após protocolo de envelhecimento a longo prazo.

Figura 30 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento



O aumento nos valores de MR nas misturas asfálticas com resíduo em relação à mistura asfáltica de referência – aproximadamente 21,28% para a mistura com 15% de RB, 11,62% para a mistura com 10% de RB e 3,09% para a mistura com 5% de RB, antes do processo de envelhecimento a longo prazo; após procedimento LTOA houve um aumento da rigidez para as quatro composições de mistura e nessas condições as misturas com 5%, 10% e 15% de RB apresentaram valores de MR superiores a mistura referência em magnitudes equivalentes a 12,63%, 23,75% e 30,32%, respectivamente – pode ser explicado pelo aumento da rigidez das amostras com o aumento do quantitativo de resíduo de bauxita, corroborando com o aumento dos valores de resistência à tração apresentados pelas amostras com resíduo.

Esse aumento do módulo de resiliência também foi observado no estudo de De Souza *et al.* (2020), no qual os autores analisaram a incorporação de rejeito de minério de ferro como agregado miúdo na mistura asfáltica.

Em termos de aplicação em campo, o aumento da rigidez retrata um maior coeficiente angular na curva tensão-deformação (MELO, 2014). Para tanto, as misturas com maior rigidez quando comparadas à mistura referência sob um mesmo estado de tensões, seriam menos sensíveis às deformações de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.

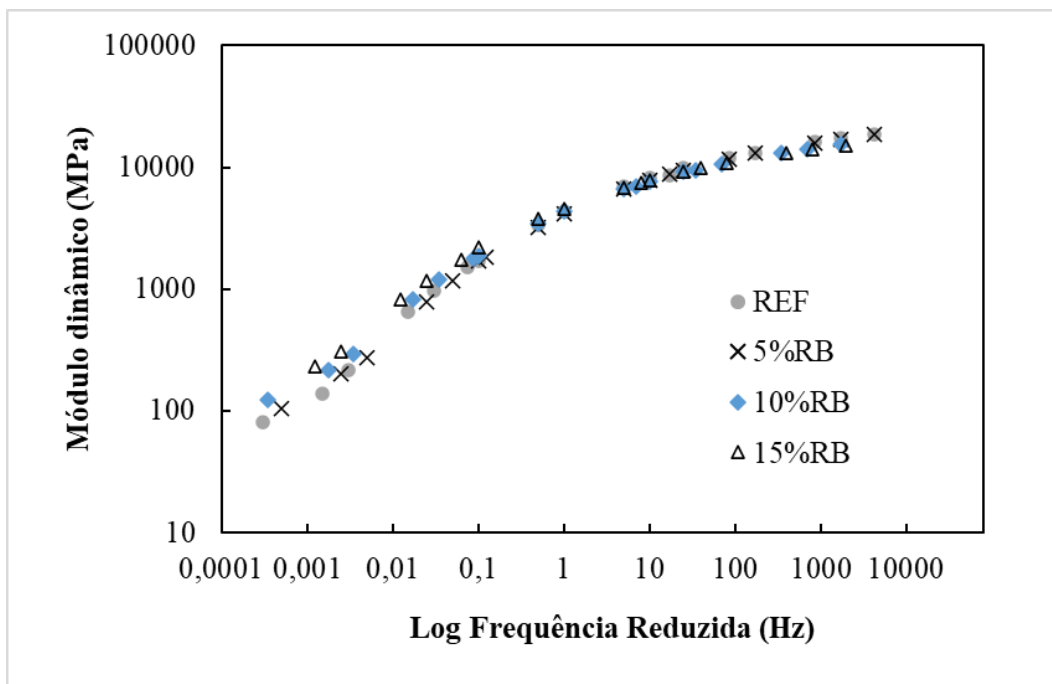
O processo de envelhecimento térmico promoveu aumento de rigidez para as quatro amostras analisadas. Com o condicionamento, o percentual de aumento das amostras LTOA com resíduo em relação a mistura REF foram superiores à situação em que não houve envelhecimento a longo prazo. De acordo com Siqueira (2023) esse comportamento está associado à formação de frações asfálticas.

4.1.4 Módulo dinâmico

O módulo dinâmico corresponde ao valor absoluto do módulo complexo, tendo por objetivo caracterizar as propriedades viscoelásticas lineares da mistura, estabelecendo os efeitos de diferentes climas e tráfegos com base na variação de temperatura e frequência desse ensaio.

A Figura 31 apresenta as curvas mestras, geradas a partir do Princípio da Superposição frequência (tempo)-temperatura, determinadas no ensaio de módulo dinâmico para temperatura de referência de 20°C, utilizando três temperaturas (4, 20 e 40°C) e seis frequências (0.1; 0.5; 1; 5; 10 e 25Hz).

Figura 31 - Resultados do ensaio de módulo dinâmico para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB – Temperatura referência: 20°C



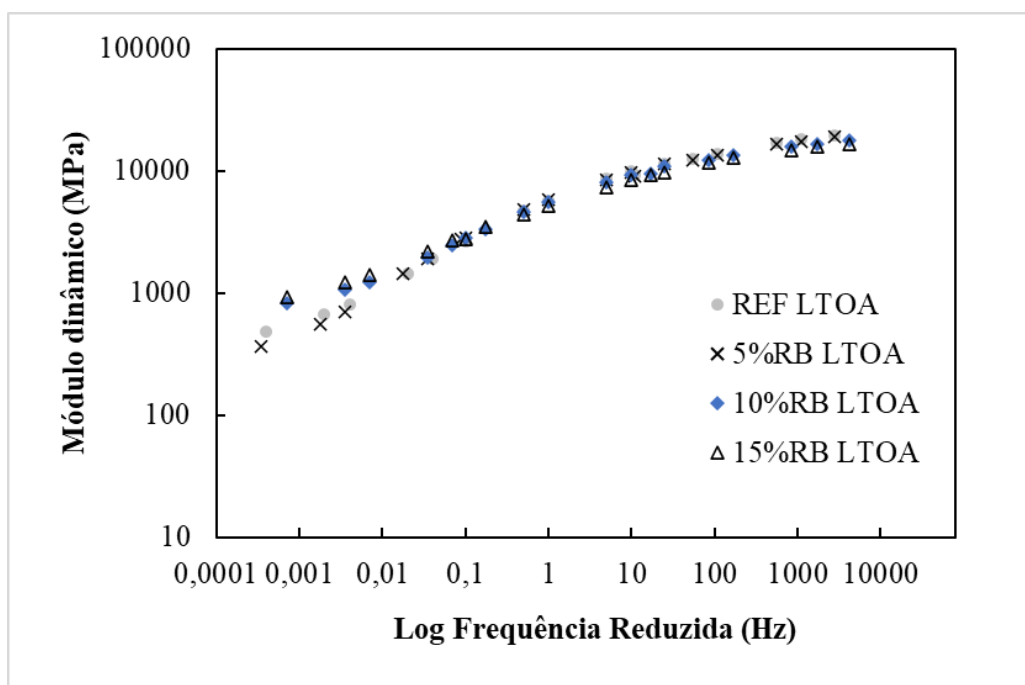
Com base na curva obtida observa-se que em altas temperaturas e baixas frequências as misturas com 10% e 15% de resíduo apresentam maior módulo dinâmico. Enquanto para baixas

temperaturas e maiores frequências as misturas referência e com 5% de RB apresentam valores mais elevados de rigidez.

De maneira geral, as curvas mestras das misturas analisadas mostraram, visualmente, uma mesma tendência de variação, magnitudes aproximadamente equivalentes. Portanto, pode-se apontar que a rigidez das misturas foi pouco afetada pela variação da composição com a incorporação do resíduo de bauxita.

A Figura 32 ilustra as curvas mestras das misturas após protocolo de envelhecimento a longo prazo, procedimento que visou estabelecer a durabilidade das misturas.

Figura 32 - Resultados do ensaio de módulo dinâmico para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento – Temperatura referência: 20°C



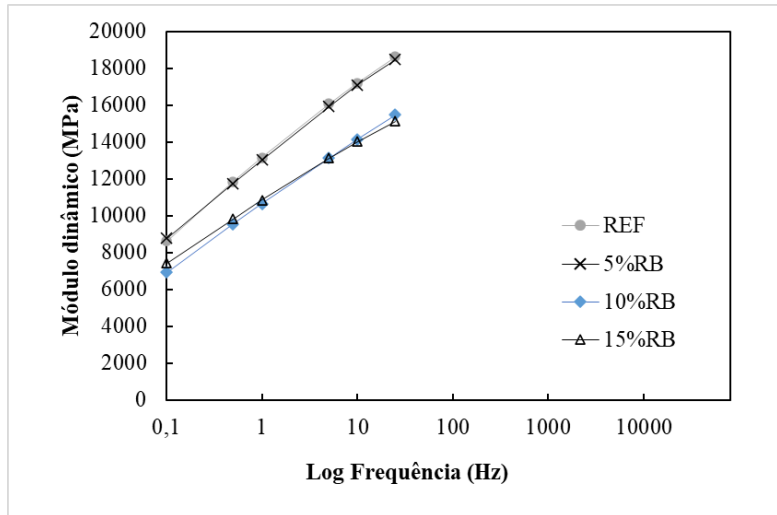
Como esperado, após o protocolo de envelhecimento, houve aumento da rigidez do material e, com isso, aumento no módulo dinâmico das misturas. No mais, o comportamento foi semelhante à condição de envelhecimento a curto prazo, para o qual, em altas temperaturas e baixas frequências, as misturas com 10% e 15% de resíduo apresentam maior módulo dinâmico, e, na situação contrária, em baixas temperaturas e maiores frequências, as misturas referência e com 5% de RB apresentam valores mais elevados de rigidez.

Tal comportamento, mistura mais rígida nas faixas de temperatura mais altas (melhor resistência ao sulco), e menos rígida que as demais nas faixas de temperaturas mais baixas (melhor

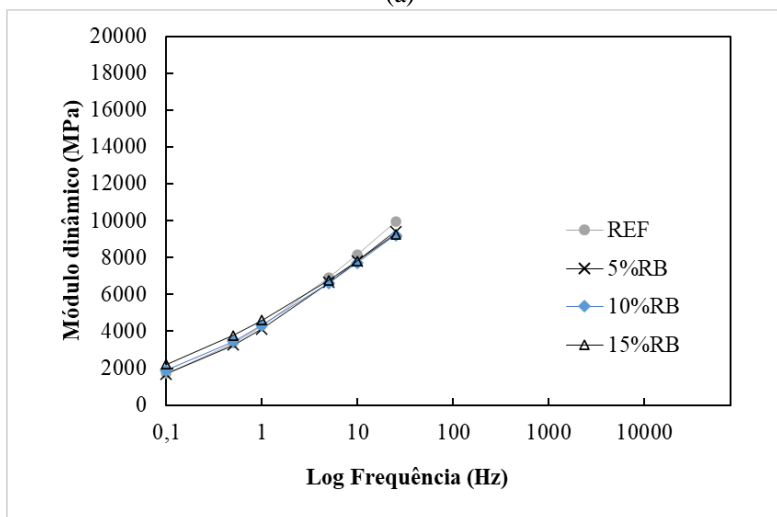
resistência a fissuração), indicam que o material obtido pode apresentar um melhor comportamento em campo no que se refere à deformação permanente e à fadiga (Xie *et al.*, 2015; Gouveia, 2016).

A Figura 33 apresenta os resultados do ensaio de módulo dinâmico, parâmetro que caracteriza a rigidez da mistura e corresponde à relação entre os picos de tensão aplicada e os picos de deformação medida, em cada temperatura de ensaio.

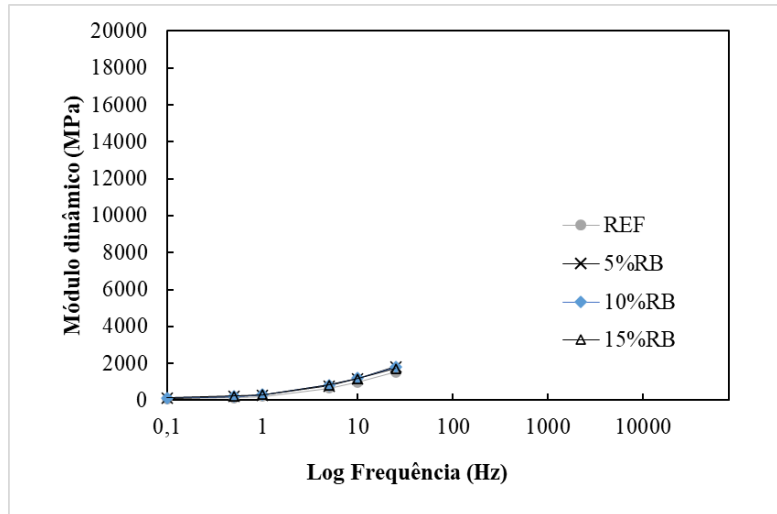
Figura 33 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).



(a)



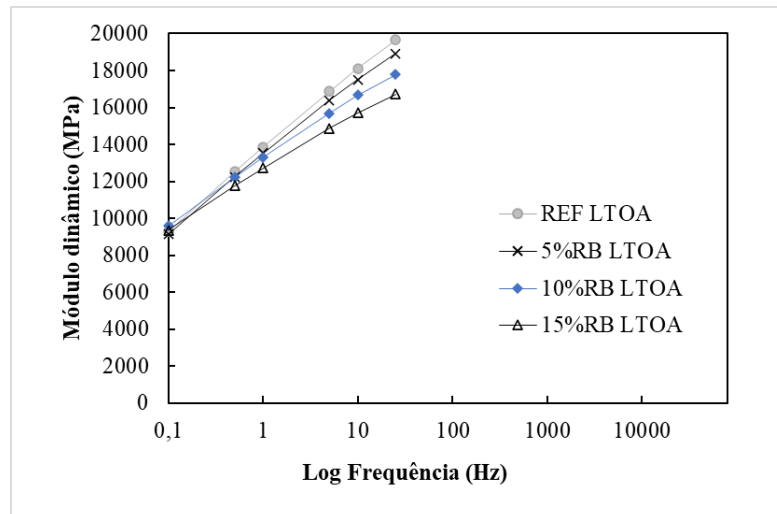
(b)



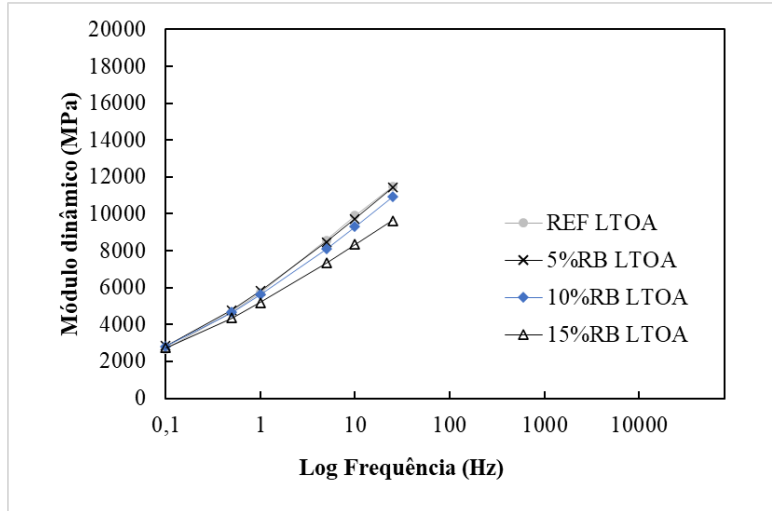
(c)

A Figura 34 apresenta os resultados do ensaio de módulo dinâmico em cada temperatura de ensaio para as quatro misturas analisada após protocolo de envelhecimento.

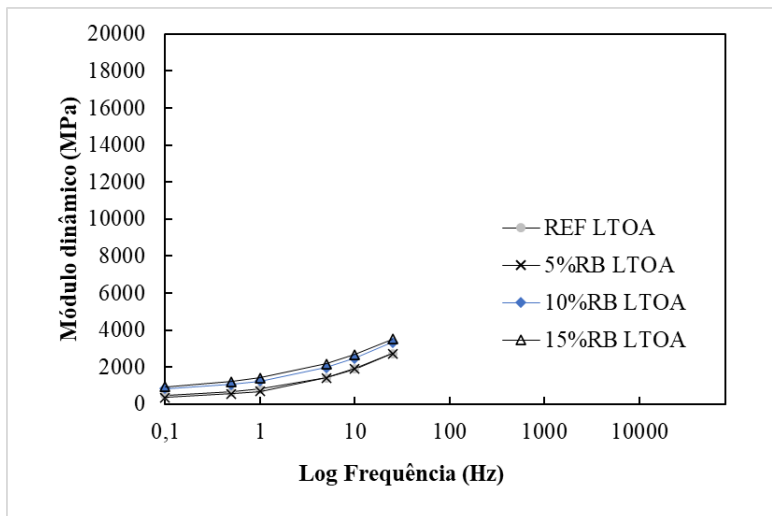
Figura 34 - Módulo dinâmicos das misturas asfálticas 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c) para as misturas após envelhecimento a longo prazo.



(a)



(b)



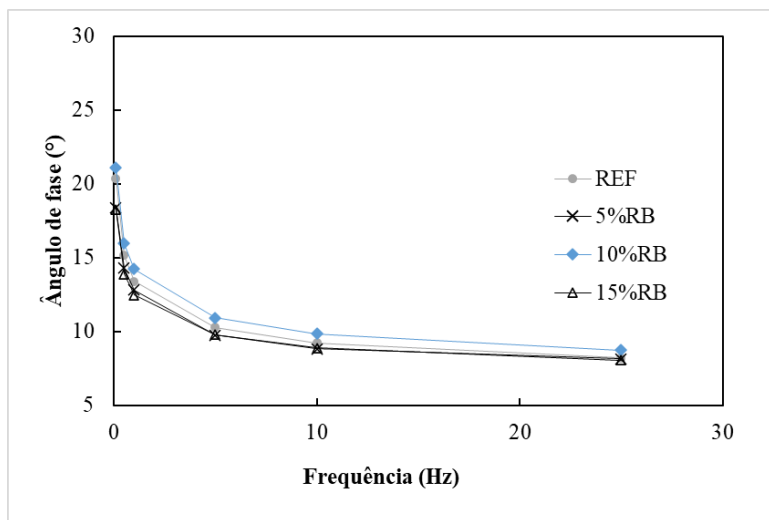
(c)

Em ambas as situações, ilustradas nas Figuras 33 e 34, pode-se analisar valores mais elevados de módulo em baixas temperaturas - 4°C (a) - para as misturas REF/REF LTOA e 5%/5%RB LTOA quando comparadas às misturas 10%RB/10%RB LTOA e 15%RB/15%RB LTOA, nessa condição, a elevada rigidez acentua a formação de trincas pelo impacto térmico, sendo desejável módulos mais baixos (COSTA, 2018). Quanto à segunda situação, altas temperaturas e baixas frequências – gráfico (c) das figuras – é preferível módulos mais elevados. Tal comportamento foi observado para as misturas com 10 e 15%, com maior magnitude após envelhecimento a longo prazo, condição que torna a mistura mais rígida como pode ser analisado nos resultados dos ensaios de módulo de resiliência. Esses resultados ainda corroboram com os

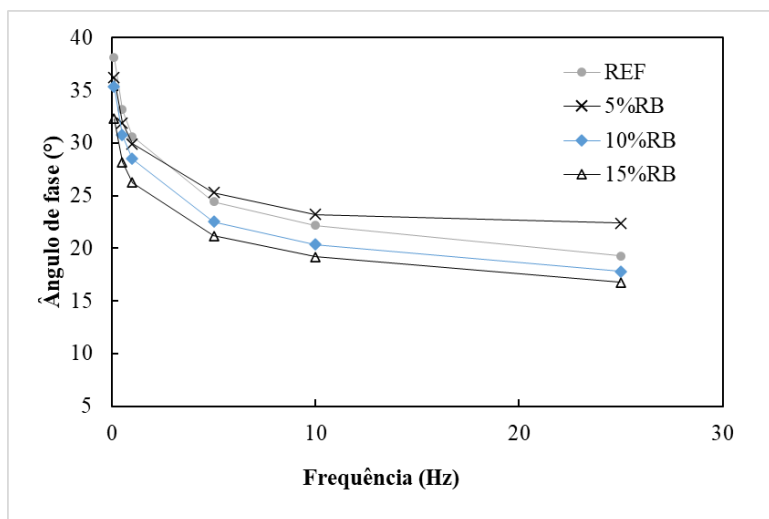
dados obtidos no ensaio de deformação permanente, para o qual o aumento do quantitativo de resíduo proporcionou o aumento do *flow point*.

A Figura 35 apresenta os ângulos de fase (defasagem da deformação em relação à tensão) referentes às frequências de carregamento de todas as misturas asfálticas sem envelhecimento analisadas nesse estudo, em cada temperatura de ensaio.

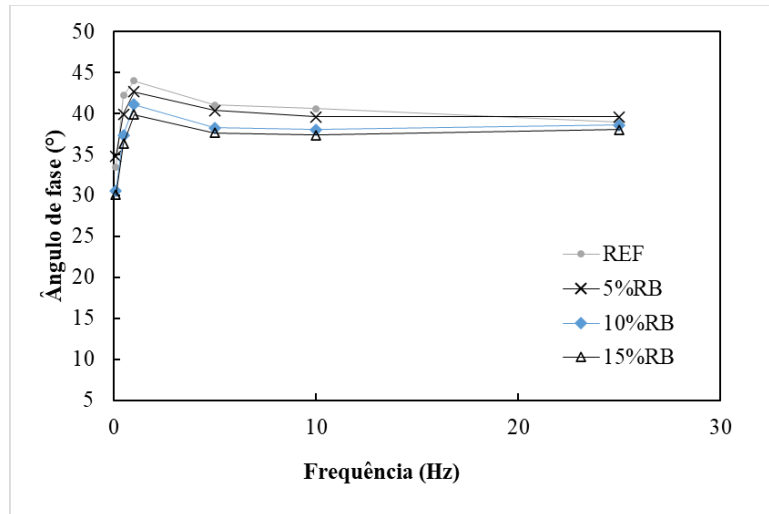
Figura 35 - Ângulos de fase das misturas asfálticas a 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).



(a)



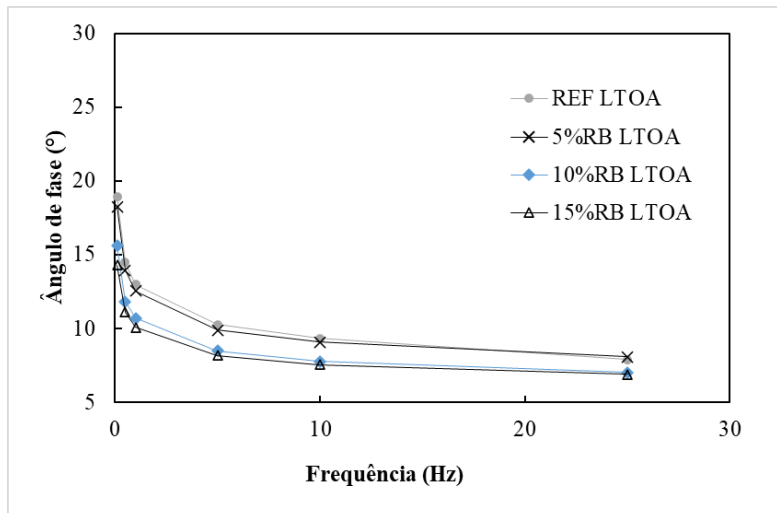
(b)



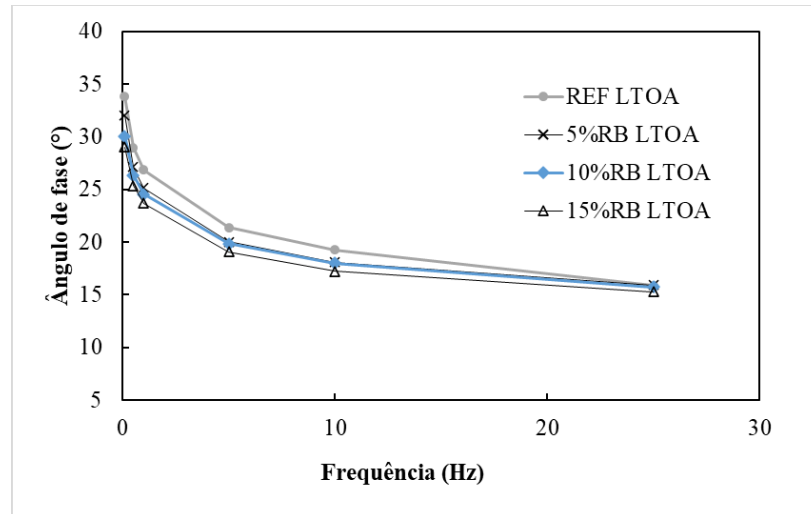
(c)

A Figura 36 apresenta os ângulos de fase (defasagem da deformação em relação à tensão) referentes às frequências de carregamento de todas as misturas asfálticas analisadas nesse estudo após o protocolo de envelhecimento a longo prazo, em cada temperatura de ensaio.

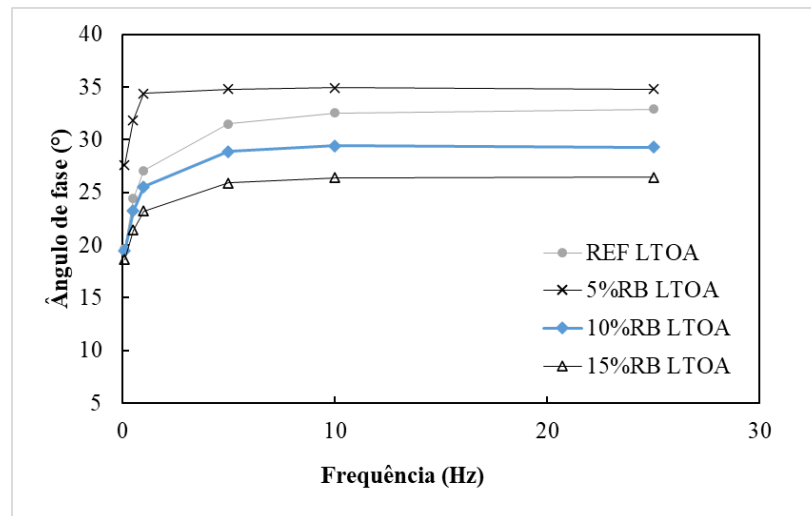
Figura 36 - Ângulos de fase das misturas asfálticas após protocolo envelhecimento a longo prazo a 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).



(a)



(b)



(c)

Segundo Gouveia (2016), no que se refere ao comportamento da mistura asfáltica, para carregamentos mais rápidos, de maior frequência, observa-se uma resposta mais próxima da elástica. Enquanto carregamentos mais lentos, de menor frequência, resultam em uma resposta mais próxima da viscosa. Dessa forma, o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência, conforme observado nas curvas ilustradas nas Figuras 35 e 36, com exceção para a temperatura de 40°C, na qual o ângulo de fase diminuiu em baixas frequências para essa temperatura mais elevada.

Ensaio de módulo dinâmico realizados em altas temperaturas mostram uma maior influência do esqueleto mineral, uma vez que o ligante passa a estar em um estado menos viscoso (mais fluido), reduzindo sua parcela na capacidade estrutural da mistura, ou seja, o ligante deixa

de resistir e o esqueleto mineral passa a suportar o carregamento, isso pode ser verificado pela redução do ângulo de fase nessa situação, conforme ilustrado nos resultados para a temperatura de 40°C (c) nas Figuras 35 e 36 (Nemati e Dave, 2017).

O ângulo de fase comporta-se da seguinte maneira: se o material é puramente elástico, equivale a zero, pois não há dissipação da energia, ou seja, não há parcelas não recuperáveis. Por outro lado, se o mesmo for igual a 90°, o material é puramente viscoso, não existe armazenagem de energia (Witczak, 2005). Essa armazenagem de energia corresponde à componente elástica do módulo complexo, o qual deriva-se em duas componentes: a parte real ou módulo de armazenamento (E') e a parte imaginária ou módulo de perda (E'').

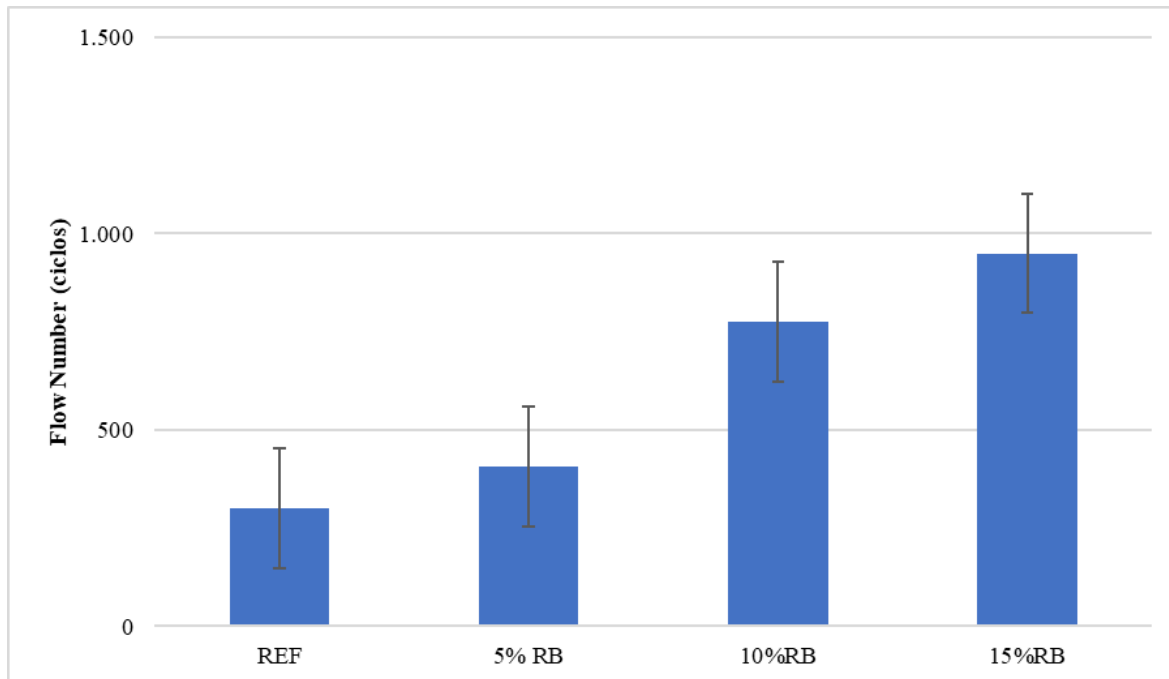
Dessa forma, quanto menor o ângulo de fase, maior é o comportamento elástico da mistura. De maneira geral, a composição das misturas 10%RB/10%RB LTOA e 15%RB/15%RB LTOA resultaram em ângulos de fase com menor magnitude, maior comportamento elástico da mistura, com exceção da mistura 10%RB a 4°C (a), a qual apresentou ângulo de fase de maior magnitude para todas as frequências analisadas.

Entre os fatores que influenciam o módulo de fase encontra-se características, como distribuição granulométrica (Birgisson *et al.*, 2004; Bari e Witczak, 2006; Almeida Junior, 2016), percentual de finos (Christensen *et al.*, 2003; Bari e Witczak, 2006), propriedades de forma dos agregados (Singh *et al.*, 2012; Pazos, 2015), teor de ligante (Christensen *et al.*, 2003; Bari e Witczak, 2006) e envelhecimento (Babadopulos, 2014). Portanto, nessa condição, o percentual de finos - o qual influencia na distribuição granulométrica - e a forma do agregado para as misturas contendo resíduo de bauxita podem ser apontados como aspectos que influenciaram na mudança de comportamento das misturas, sendo mais acentuada conforme houve o aumento do quantitativo de resíduo na mistura, auxiliando na fase elástica da mistura asfáltica.

4.1.5 Resistência à deformação permanente

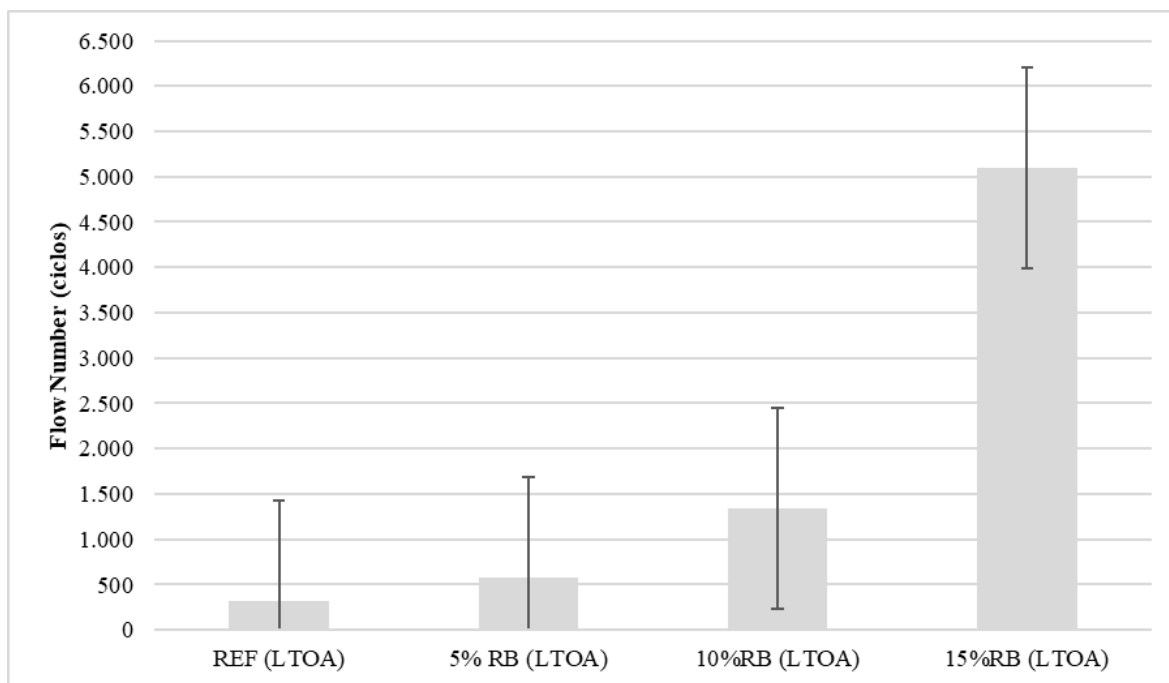
A Figura 37 apresenta os valores médios de resistência à deformação permanente dos 4 grupos de misturas asfálticas analisados, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 37 - Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB.



A Figura 38 apresenta os resultados após protocolo de envelhecimento a longo prazo.

Figura 38 - Resultados do ensaio de resistência à deformação permanente para a mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB após protocolo de envelhecimento



As misturas asfálticas compostas por resíduo apresentaram, para ambas as situações (antes e após envelhecimento), valores superiores à amostra referência. Esse comportamento está de acordo com o apresentado por Lima e Thives (2020), no qual as misturas com RB apresentaram maior resistência à deformação, assim como exposto por Zhang *et al.* (2019), cujo estudo analisou que o RB utilizado como fíler para compor o mástique aumentou a rigidez e o comportamento elástico do material, apresentando potencial de melhorar a resistência à deformação permanente (sulco) das misturas asfálticas.

Após o envelhecimento a longo prazo, que promoveu aumento da rigidez, as misturas apresentaram maior resistência à deformação permanente. Segundo Nascimento (2008), essa propriedade em revestimentos asfálticos depende de fatores que incluem granulometria, absorção, adesividade, tamanho, textura e forma dos agregados, característica do fíler, percentual de asfalto e grau de desempenho, além da presença de finos plásticos nos agregados miúdos.

Os critérios de *Flow Number* para os níveis de tráfego, expressos em equivalente de carga por eixo padrão, indicados por Nascimento (2014) são apresentados na Tabela 41. Para as misturas estudadas, foi considerado um nível de tráfego de médio a pesado (vias principais, rodovias rurais).

Tabela 41 - Classes das misturas asfálticas determinadas em virtude do Flow Number

CLASSE	FN (CICLOS)	NÍVEL DE TRÁFEGO (condições normais)	NÍVEL DE TRÁFEGO (condições severas)
1	≤ 100	$N < 1 \times 10^6$ (leve)	Não recomendado
2	$100 \leq FN \leq 300$	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$ (médio)	$N < 1 \times 10^6$ (leve)
3	$300 \leq FN \leq 750$	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$ (pesado)	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$ (médio)
4	$750 \leq FN \leq 2000$	$N \geq 1 \times 10^8$ (extremamente pesado)	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$ (pesado)
5	≥ 2000	-	$N \geq 1 \times 10^8$ (extremamente pesado)

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014)

De acordo com essa classificação a mistura asfáltica referência atenderia ao tráfego médio, enquanto a mistura com 5% de RB apresentou valores que suportam tráfego pesado e, as misturas com 10% e 15% de RB atendem a condição de tráfego extremamente pesado, para as condições de tráfego normais. Conforme o DNIT (2018) as condições de tráfego normais englobam velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do

revestimento asfáltico moderada (estabelecida conforme a norma AASHTO M 323 como sendo a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, igual ou inferior a 64°C).

Após procedimento de envelhecimento térmico, o qual promove aumento da rigidez da mistura, as misturas referência e com 5%RB continuam a suportar tráfego pesado, assim como a mistura com 10%RB enquadra-se na classe 4, atendendo a condição de tráfego extremamente pesado. Enquanto a mistura com 15%RB nas condições normais de tráfego mostrou-se não suscetível a deformação permanente.

4.1.6 Vida de fadiga

As Figuras 39 e 40 apresentam os resultados obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em um diagrama log-log de N versus diferença de tensões ($\Delta\sigma$) e N versus deformação específica resiliente (ϵ_r), respectivamente, para as misturas sob envelhecimento a curto prazo. Nesses diagramas também são apresentadas as linhas de tendência, as quais representam o modelo de fadiga das misturas asfálticas.

Figura 39 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP

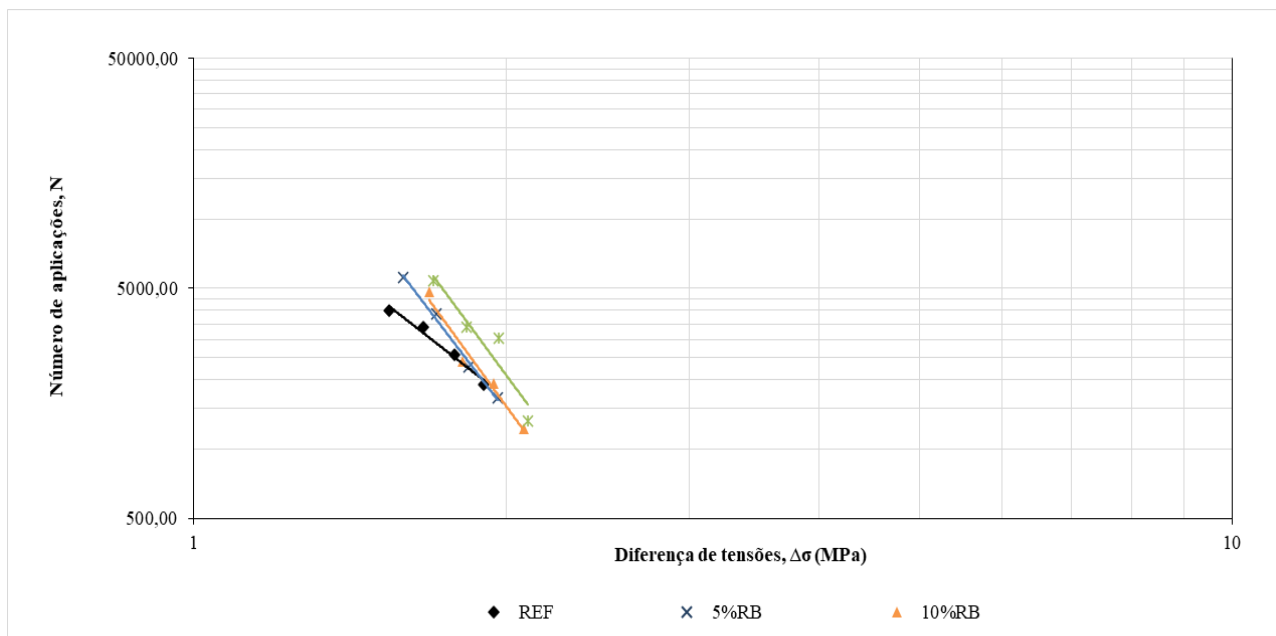
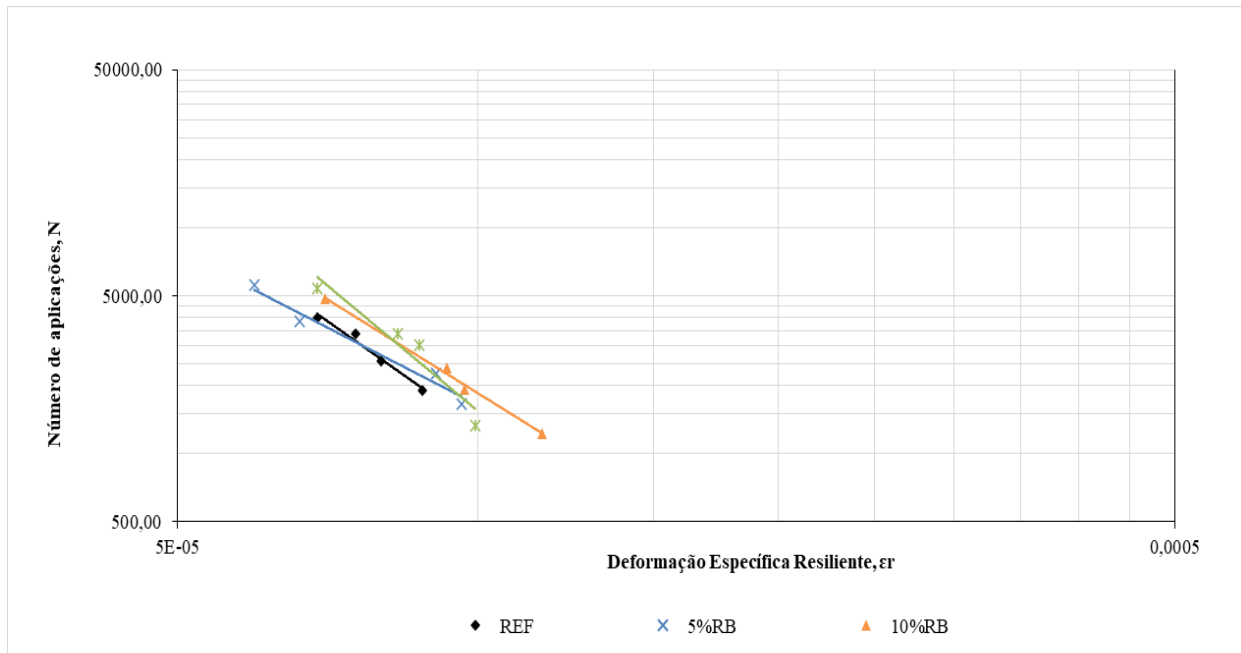


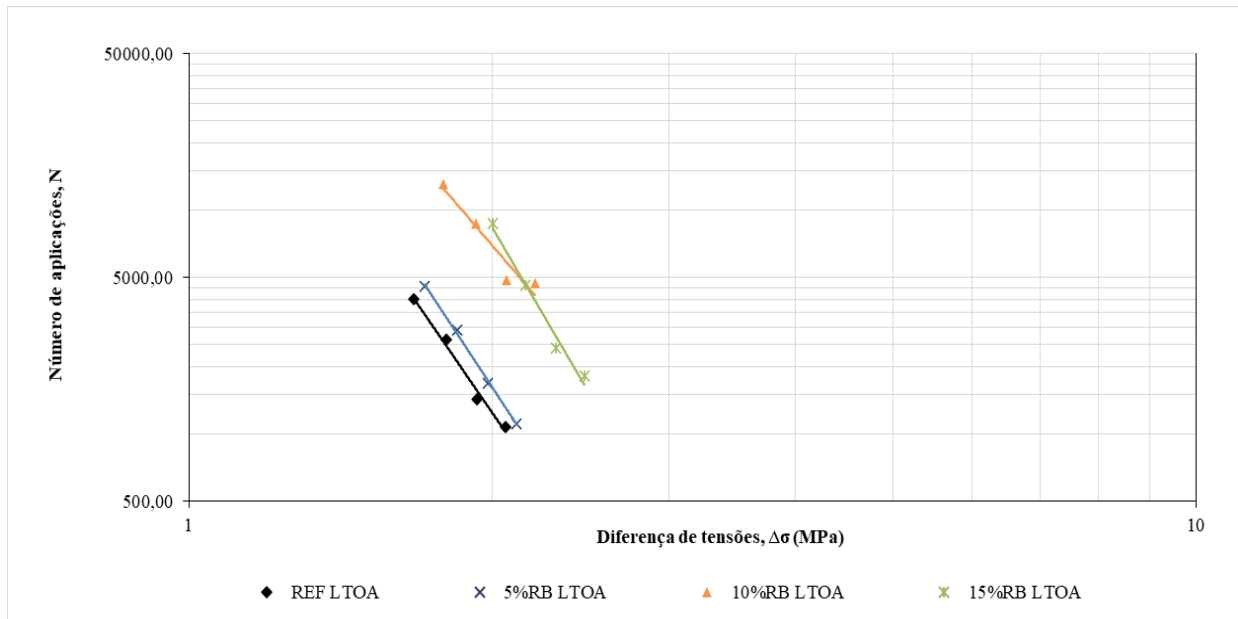
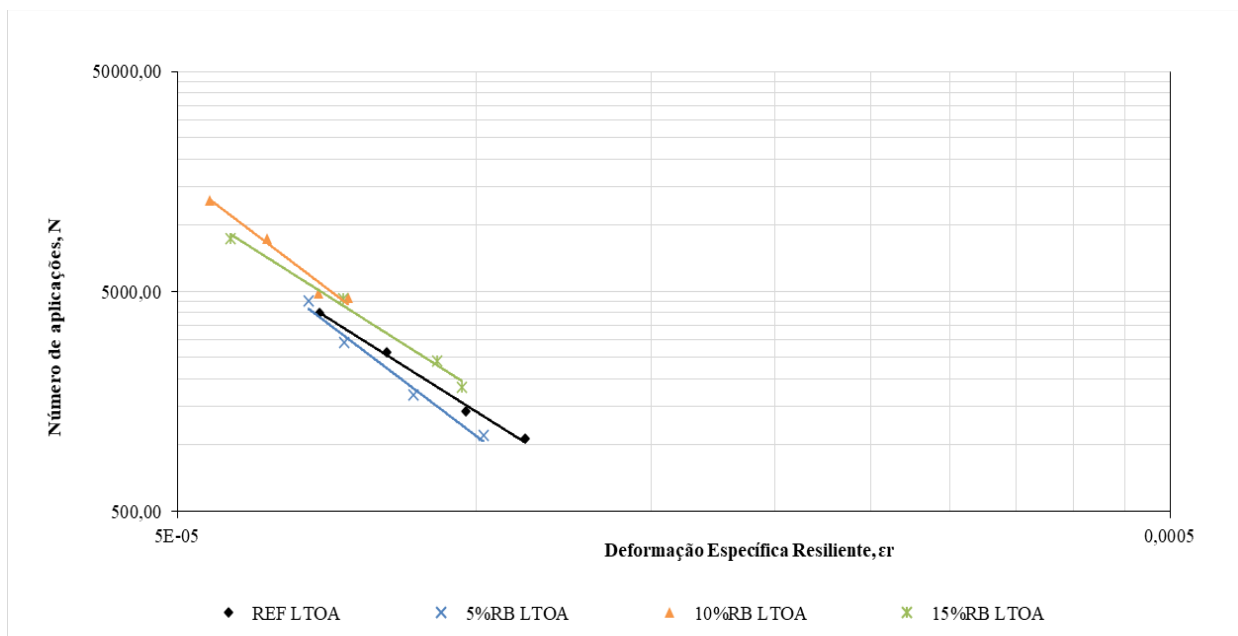
Figura 40 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente

A partir das equações das linhas de tendência, obtiveram-se os parâmetros k_2 e n_2 e k_3 e n_3 , apresentados no item 3.3.6, bem como seus R^2 , conforme apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga das misturas

MISTURA	Equação	R^2	Coeficientes	
REF	$N = 19253 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{3,528}$	0,9704	k_2	n_2
	$N = 3 \times 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{2,674}$	0,8324	k_3	n_3
5%RB	$N = 87538 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{5,929}$	0,8246	k_2	n_2
	$N = 3 \times 10^{-5} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{1,959}$	0,8315	k_3	n_3
10%RB	$N = 113145 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{6,204}$	0,9544	k_2	n_2
	$N = 3 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{2,436}$	0,8206	k_3	n_3
15%RB	$N = 152615 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{6,207}$	0,8366	k_2	n_2
	$N = 7 \times 10^{-11} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{3,344}$	0,8092	k_3	n_3

Abaixo, as Figuras 41 e 42 apresentam os resultados obtidos para as misturas sob envelhecimento a longo prazo.

Figura 41 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP (Misturas LTOA)**Figura 42** - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente (Misturas LTOA)

A partir das equações das linhas de tendência, obtiveram-se os parâmetros k_2 e n_2 e k_3 e n_3 , apresentados no item 3.3.6, bem como seus R^2 , conforme apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga das misturas após envelhecimento a longo prazo

MISTURA	Equação	R ²	Coeficientes	
REF LTOA	$N = 106637 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,427}$	0,8124	k₂ 106637	n₂ 6,427
	$N = 4 \times 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{2,639}$	0,811	k₃ 4x10 ⁻⁸	n₃ 2,639
5%RB LTOA	$N = 192712 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,906}$	0,9604	k₂ 192712	n₂ 6,906
	$N = 3 \times 10^{-10} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{3,147}$	0,8368	k₃ 3x10 ⁻¹⁰	n₃ 3,157
10%RB LTOA	$N = 607581 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,606}$	0,8028	k₂ 607581	n₂ 6,606
	$N = 7 \times 10^{-12} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{3,572}$	0,8063	k₃ 7x10 ⁻¹²	n₃ 3,572
15%RB LTOA	$N = 2000000 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{7,842}$	0,962	k₂ 2000000	n₂ 7,842
	$N = 1 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{2,563}$	0,8842	k₃ 1x10 ⁻⁷	n₃ 2,563

Conforme apresentado nas Tabelas 42 e 43, as misturas analisadas, antes e após envelhecimento a longo prazo, apresentaram coeficientes de correlação (R²) superiores a 0,80, mínimo estabelecido pela norma DNIT 183/2018.

O valor de n₂, que indica a inclinação das linhas na Figura 39 (N x Δσ), corresponde à seguinte sequência, quando se considera o maior valor: 15%RB, 10%RB, 5%RB e REF. Quanto maior o valor desse coeficiente, maior a sensibilidade das misturas à variação de diferença de tensões.

Com relação aos resultados apresentados nas Figuras 39, as misturas com resíduo, em baixos níveis de diferença de tensões, apresentaram maior resistência à fadiga, sendo a mistura com 5%RB a que apresentou melhor comportamento, em seguida, a mistura com 15%RB e a mistura com 10%RB, respectivamente; em altos níveis de diferença de tensão, entretanto, apresentaram resistência à fadiga inferior à da mistura de referência (REF), com exceção da mistura com 15%RB.

Quanto ao valor de n₂ das misturas após envelhecimento a longo prazo, que indica a inclinação das linhas na Figura 41 (N x Δσ), corresponde à seguinte sequência, quando se considera o maior valor: 15%RB LTOA, 5%RB LTOA, 10%RB LTOA, REF LTOA.

Nessa situação, tanto para baixos quanto altos níveis de diferença de tensões, as misturas 10%RB LTOA e 15%RB LTOA apresentaram resistência à fadiga superior às misturas 5%RB

LTOA e REF. No caso dessas duas últimas, apresentaram número de ciclos equivalentes, mas a mistura 5%RB LTOA apresentou maior suscetibilidade à variação de diferença de tensões.

Tal comportamento corrobora com o estudo de Melo Neto (2022), no qual as misturas que apresentaram maior rigidez obtiveram maior vida de fadiga. Afirmção apontada no estudo de Santos (2005) como comportamento tendencioso de misturas para ensaios à tensão controlada.

A composição granulométrica das misturas com resíduo de bauxita, com maior teor de finos, pôde contribuir com o melhor desempenho da mistura à fadiga, tal como apontado no estudo de Soares *et al.* (2000) – comparou composições de misturas que englobaram às faixas A, B e C do DNER/ES 313/97, sendo as da Faixa C (mais finas), aquelas que apresentaram melhor desempenho à fadiga. Assim como apontado por Pinto e Preussler (2010), que observaram uma menor taxa de propagação de fissuras das misturas com granulometria mais fina quando comparadas àquelas com granulometria mais grossas.

O valor de n_3 , que indica a inclinação das linhas na Figura 40 ($N \times \epsilon_r$), corresponde à seguinte sequência, quando se considera o maior valor: 15%RB, REF, 10%RB e 5%RB. Quanto maior o valor desse coeficiente, maior a sensibilidade das misturas à variação de deformação.

Ao analisar as curvas obtidas a partir dos ensaios de fadiga realizados nas misturas estudadas sem protocolo de envelhecimento (Figura 40), conclui-se que, para deformações específicas resilientes altas, as misturas com resíduo indicam que suportam mais ciclos de carga sob determinado nível de deformação do que a referência. No entanto, com a diminuição das deformações resilientes, a mistura REF tende a suportar maior número de aplicações de carga (N) do que a mistura com 5%RB e, ainda, apresentou menor suscetibilidade à variação de diferença de deformação, seguida da mistura 5%RB, 15%RB e 10%RB.

Quanto ao valor de n_3 das misturas após envelhecimento a longo prazo, que indica a inclinação das linhas na Figura 42 ($N \times \epsilon_r$), corresponde à seguinte sequência, quando se considera o maior valor: 10%RB LTOA, 5%RB LTOA, REF LTOA, 15%RB LTOA. Quanto maior o valor desse coeficiente, maior a sensibilidade das misturas à variação de deformação.

Após envelhecimento a longo prazo, tanto para altas e baixas deformações específicas resilientes, as misturas 10%RB LTOA e 15%RB LTOA apresentaram melhor comportamento, suportando um maior número de aplicações de carga (N) do que as misturas 5%RB LTOA e REF LTOA. Quanto a essas duas últimas, apresentaram número de ciclos equivalentes, mas a mistura 5%RB LTOA apresentou menor suscetibilidade à variação de diferença de deformação,

posicionando-se mais à esquerda do gráfico da Figura 40 e indicando que a mistura REF LTOA suporta um maior número de ciclos de carga sob determinado nível de deformação.

Para verificar o desempenho à fadiga das misturas analisadas, foi considerado nesse estudo o conceito de Fator de Fadiga da Mistura (FFM), integrado ao MeDiNa, e proposto por Fritzen *et al.* (2019).

O FFM corresponde a uma ferramenta de classificação da mistura quanto ao esforço de fadiga, que resulta da propagação de microfissuras devido aos esforços aplicados no pavimento, as quais devido ao carregamento contínuo e cíclico, eventualmente, convergem em trincas de maiores dimensões e causam a falha estrutural e/ou funcional do revestimento (Pivetta, Nascimento e Brito, 2020).

Esse fator considera o módulo de resiliência da mistura e a curva obtida no ensaio de fadiga para estimar o desempenho da mistura. Os resultados de FFM obtidos estão apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 – Classes de fadiga de misturas asfálticas.

MISTURA	CLASSE	FFM
REF	2	1,06
5%RB	3	1,17
10%RB	2	1,09
15%RB	2	1,04
REF LTOA	2	1,05
5%RB LTOA	2	0,99
10%RB LTOA	2	0,93
15%RB LTOA	3	1,09

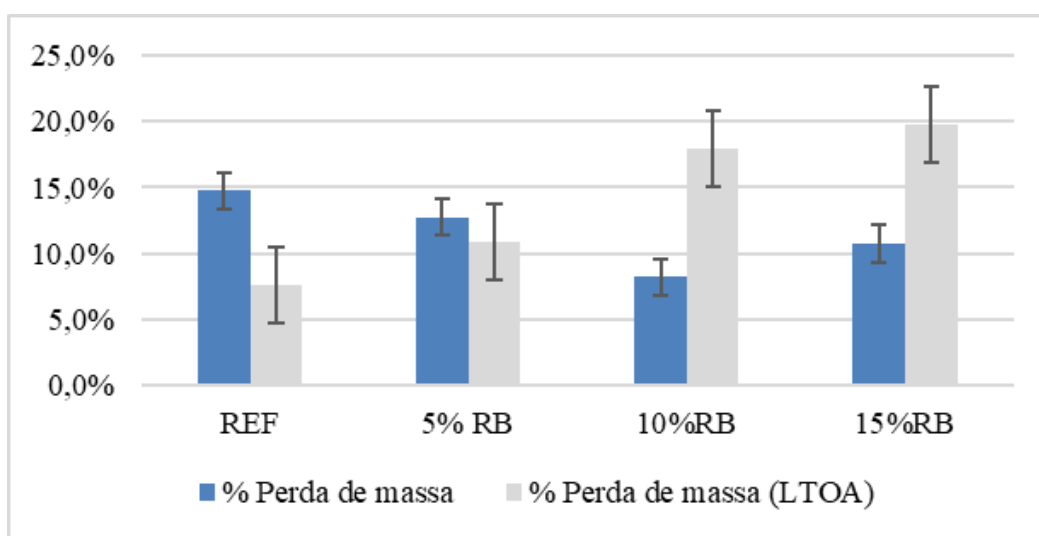
De acordo com esse critério, as misturas asfálticas estudadas apresentaram um bom desempenho quanto à fadiga. De acordo com Fritzen *et al.* (2019) com base na definição da classe de fadiga, utilizar uma mistura que atenda a essa classificação atenderá os requisitos de dimensionamento em relação à fadiga. No entanto, tal avaliação é válida para pavimentos flexíveis, onde as deformações de tração variam de 100 *microstrains* a 250 *microstrains*.

Na análise das misturas em questão, o módulo de resiliência das misturas com resíduo foi bem mais elevado que o da mistura referência, conforme apresentado no tópico 4.1.3, o que conferem em campo maior rigidez da camada, propriedade que altera o nível das deformações de tração e, conseqüentemente, a vida de fadiga do material.

4.1.7 Desgaste cântabro

A Figura 43 apresenta os valores médios de perda de massa das amostras asfálticas quando sujeitas ao desgaste por abrasão.

Figura 43 -Resultados do ensaio de dano por umidade induzida da mistura virgem referência e com 5, 10 e 15% de RB antes e após protocolo de envelhecimento.



O ligante asfáltico é ligeiramente ácido, dessa forma, a alcalinidade do RB ($\text{pH} \geq 10$) é benéfica para melhorar a adesão entre o asfalto e o agregado (Yao *et al.*, 2020).

No presente estudo, inicialmente, as amostras com RB apresentaram perda inferior à mistura referência. O uso de 10% de RB proporcionou o melhor comportamento com uma redução de 44,28% em relação à mistura referência, enquanto as demais (5%RB e 15%RB), resultaram em uma redução de 13,37% e 27,21% de perda de massa em relação à mistura REF, respectivamente.

No entanto, após envelhecimento térmico, as misturas com resíduo de bauxita apresentaram perda de massa superiores à mistura referência. Nessa condição, os resultados obtidos inferem que as misturas com resíduo apresentam desempenho inferior ao atrito pneu-pavimento, podendo se desagregar com maior facilidade, situação que pode estar relacionada a

perda de coesão da mistura e a redução das ligações ligante e agregado (Oliveira, 2020). Destaca-se, ainda, que essa perda aumentou conforme houve aumento do quantitativo de resíduo.

Enquanto isso, na condição de envelhecimento a curto prazo, os resultados foram positivos para o aumento do quantitativo de resíduo na mistura. Apesar que a mistura com 15% apresentou uma perda superior a mistura com 10%RB (equivalente a 10,72%), mas ainda inferior à mistura referência (redução de aproximadamente 27,21%).

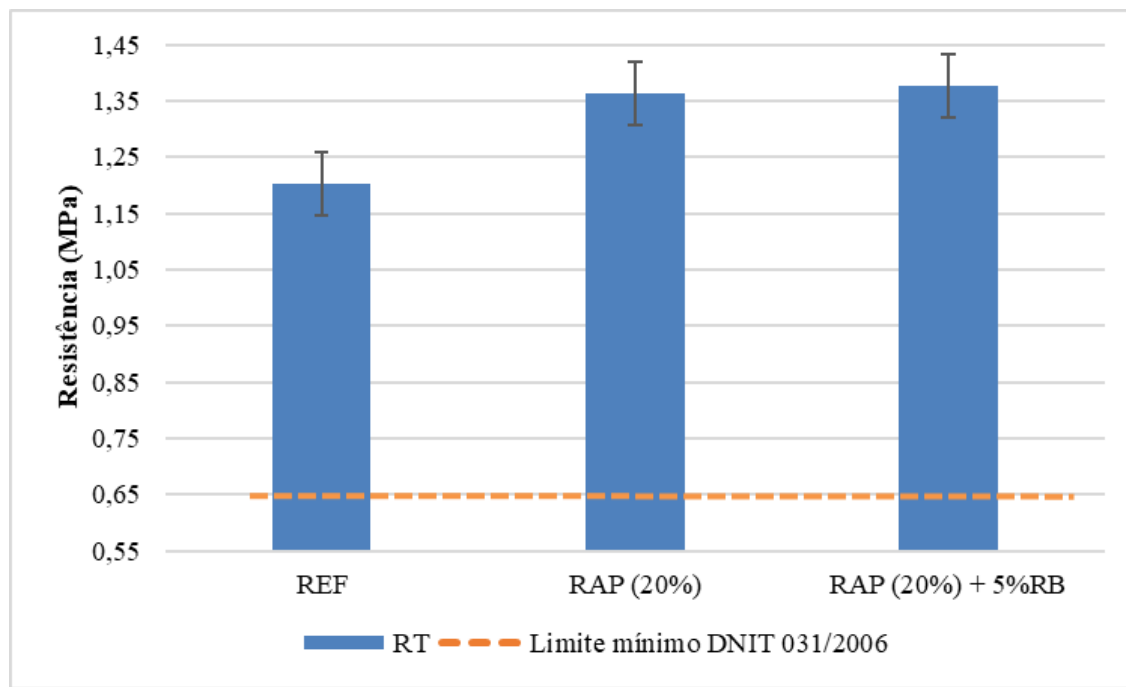
4.2 ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS RECICLADAS

Este tópico apresenta os resultados e discussões dos ensaios mecânicos referentes à mistura asfáltica reciclada com 20% de asfalto fresado e com 20% de fresado e 5% de resíduo de bauxita, comparando-os com os valores obtidos para a mistura referência.

4.2.1 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 44 apresenta os valores médios da resistência à tração por compressão diametral (RT) dos 3 grupos de misturas asfálticas analisados, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 44 - Resultados do ensaio de tração por compressão diametral para a mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.



As amostras apresentaram valores de RT que atendem à resistência à tração mínima de 0,65 MPa conforme especificação de serviço DNIT 031/2006 para misturas asfálticas convencionais.

Conforme ilustrado na Figura 44, a mistura reciclada com 5% de resíduo de resíduo de bauxita apresentou um aumento de resistência à tração por compressão diametral equivalente à 14,56%, enquanto a mistura RAP (20%) proporcionou um aumento de 13,33% em relação à mistura de referência (REF).

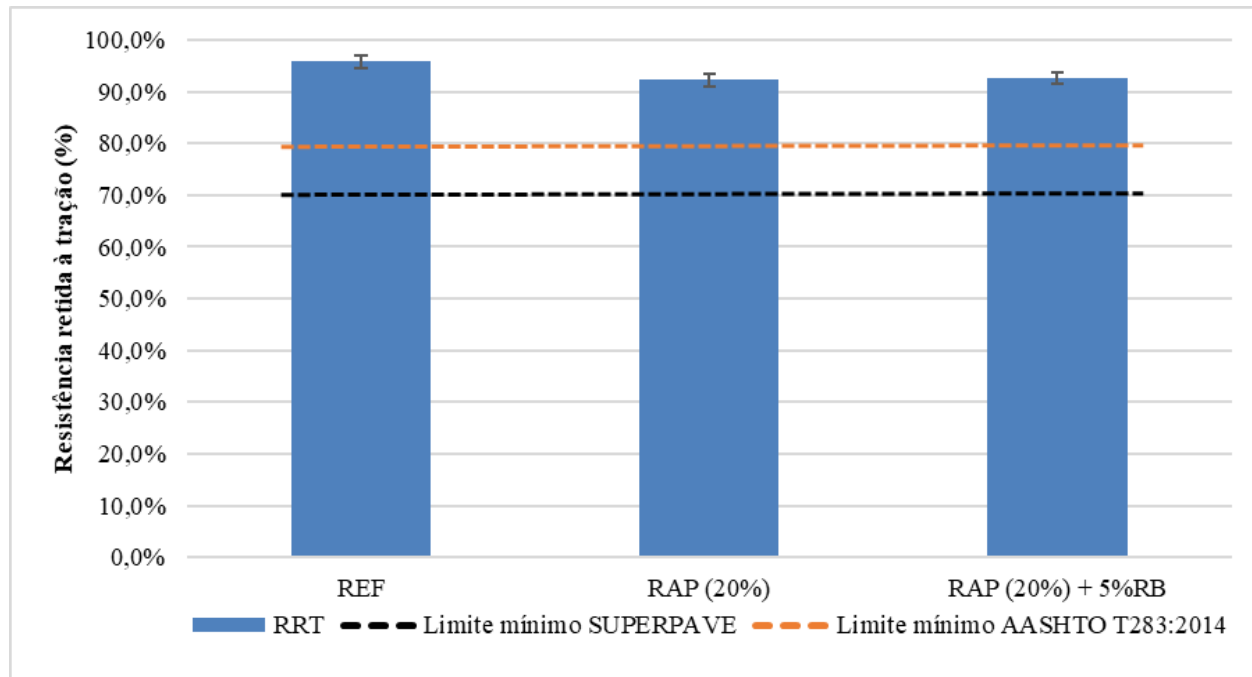
Os maiores valores de resistência à tração, em detrimento com o aumento da rigidez das misturas proporcionada pela incorporação de RAP à mistura, corrobora com a literatura (Hu *et al.*, 2020; Melo Neto, 2022; Oliveira, Farias e Silva, 2022; Suzuki, 2019), sendo atribuído à ação do ligante oxidativo presente no RAP.

A mistura reciclada com resíduo de bauxita apresentou resistência praticamente equivalente a em relação a mistura reciclada sem resíduo, com uma diferença de, aproximadamente, 1,09%, a qual pode ser associada ao maior teor de finos atribuído a mistura pela incorporação do RB.

4.2.2 Resistência ao dano por umidade induzida – DUI

A Figura 45 apresenta os valores médios da resistência retida à tração diametral (RRT) dos 3 grupos de misturas asfálticas analisados com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 45 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida da mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.



De mesmo modo à análise das misturas virgens com resíduo, foi considerada nesta análise os percentuais mínimos de resistência retida à tração estabelecidos pela metodologia SUPERPAVE (80%) e normas AASHTO T 283:2014 e DNIT 031/2006 (70%). As amostras recicladas atenderam aos critérios estabelecidos, com percentuais quase equivalentes.

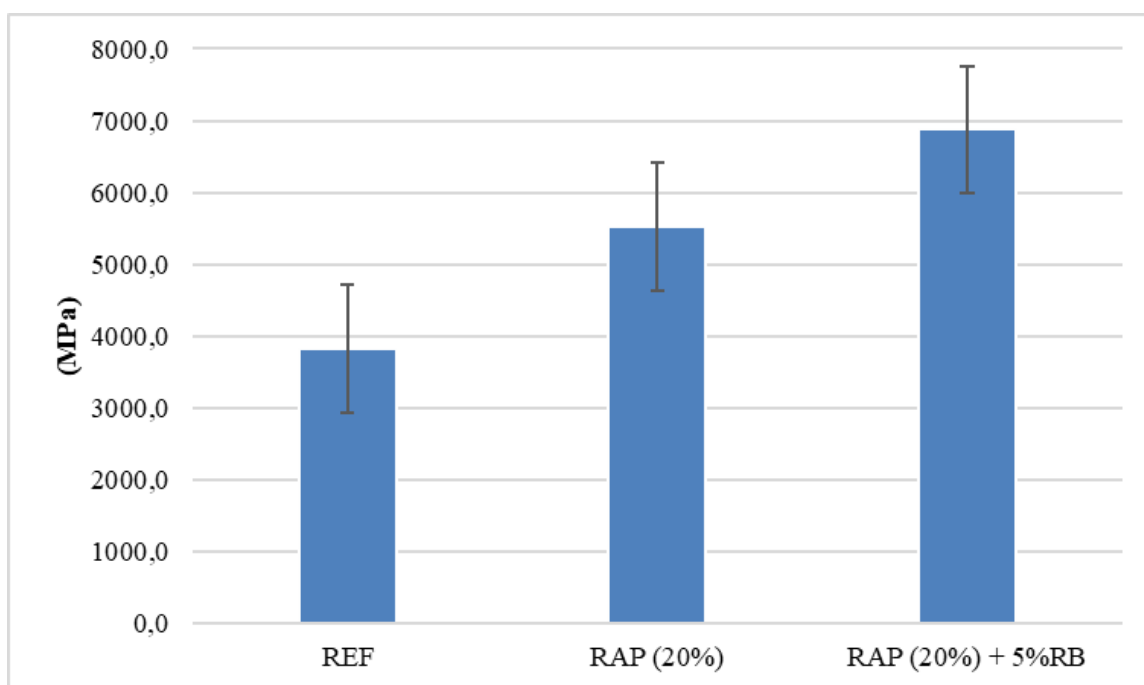
A resistência aos danos causados pela umidade está associada à coesão da mistura e à adesão do ligante aos agregados, a água percola na mistura e gera o desprendimento do filme de ligante aderido ao agregado (Gao *et al.*, 2018). Han *et al.* (2019) e Guo *et al.* (2014) sugerem que a adição de RAP é benéfica, reduzindo a suscetibilidade da mistura à umidade, devido à forte ligação entre o ligante envelhecido e os agregados RAP. Suzuki (2019) apresentou em seu estudo o comportamento de misturas com 0%, 10%, 20%, 25%, 35%, 50% e 65%, e as misturas com baixos teores de RAP (20 e 25%) apresentaram perda de resistência à umidade superiores à mistura controle (sem RAP), enquanto as misturas com maiores teores de RAP apresentaram resistência inferiores. Já no presente estudo, as misturas com e sem RAP apresentaram valores semelhantes de resistência retida à tração, cuja redução em relação a mistura referência foi de 3,75% e 3,39% para as misturas RAP (20%) e RAP (20%)+5%RB, respectivamente.

De acordo com Arruda (2021) a elevada viscosidade atribuída ao ligante envelhecido pode dificultar a sua penetração nos poros do agregado, resultando na formação de pontos de susceptibilidade à ação da água e favorecendo a perda de adesividade ligante-agregado.

4.2.3 Módulo de resiliência

A Figura 46 apresenta os valores médios de módulo de resiliência dos 3 grupos de misturas asfálticas analisados, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 46 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência da mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.



A adição do RAP aumentou o módulo de resiliência da mistura asfáltica em um percentual de 44,49% em relação à mistura referência, enquanto a mistura reciclada com resíduo proporcionou um aumento de 79,79% em relação à mesma mistura. A adição de resíduo de bauxita na mistura reciclada resultou no aumento de 24,43% do módulo de resiliência em comparação com a mistura reciclada sem resíduo. O aumento desses valores pode ser explicado devido à elevada rigidez que o RAP apresenta e pela maior quantidade de finos atribuída à mistura por meio da incorporação do resíduo de bauxita.

A discrepância observada entre as misturas recicladas com e sem resíduo mostra uma resposta mais elástica do material com resíduo. O MR corresponde a um parâmetro de rigidez e

representa a resposta elástica do material com base na relação entre a tensão vertical desviadora e deformação resiliente correspondente.

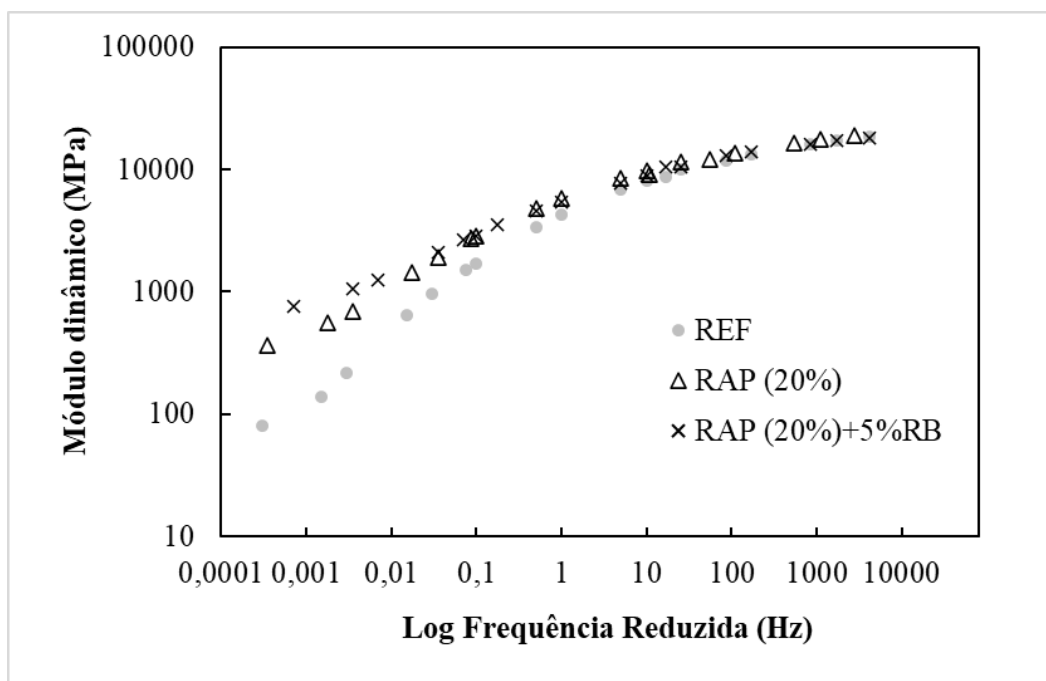
Os dados obtidos corroboram com os valores de resistência à tração, para o qual misturas mais rígidas tendem a apresentar valores de módulo mais elevados (Oliveira, Farias e Silva, 2022). Condizem com o estudo de Centofante *et al.* (2018), o qual analisou misturas com 10, 20 e 30% de RAP e observou aumento da rigidez com o aumento da quantidade de material fresado, atribuindo tal comportamento a presença de ligante envelhecido.

No entanto, valores elevados de módulo de resiliência podem corresponder a um aspecto negativo da mistura, pois indicam uma elevada rigidez da camada de revestimento, a qual pode ser de difícil compatibilização com as demais camadas do pavimento.

4.2.4 Módulo dinâmico

A Figura 47 apresenta as curvas mestras, geradas a partir do Princípio da Superposição frequência (tempo)-temperatura, com os dados de módulo dinâmico sendo transladados por meio do *shift factor* para se adequar a temperatura de referência de 20°C, utilizando três temperaturas (4, 20 e 40°C) e seis frequências (0.1; 0.5; 1; 5; 10 e 25Hz).

Figura 47 - Resultados do ensaio de módulo dinâmico para a mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB – Temperatura referência: 20°C

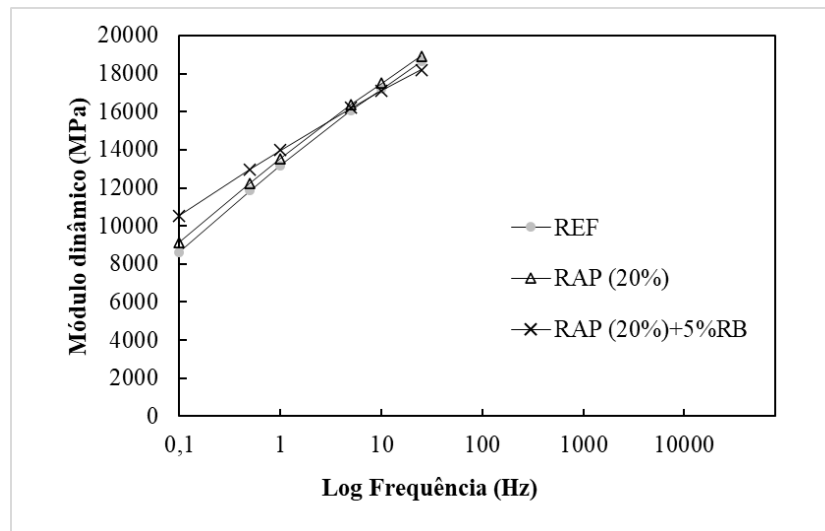


Com base na curva obtida, observa-se que, em altas temperaturas e baixas frequências, as misturas recicladas apresentaram maior módulo dinâmico, enquanto, em baixas temperaturas e maiores frequências, apresentaram comportamento análogo à mistura referência.

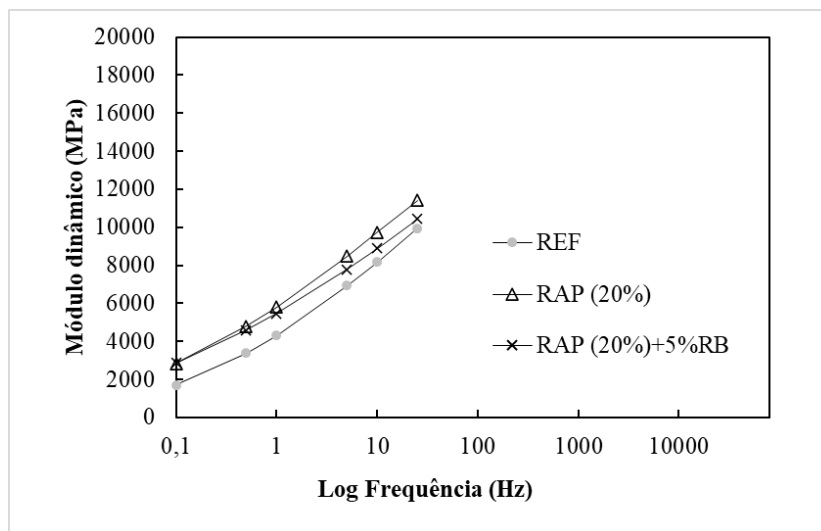
De maneira geral, as curvas mestras das misturas analisadas mostraram, visualmente, uma mesma tendência de variação em baixas temperaturas, com magnitudes praticamente equivalentes. No entanto, para altas temperaturas as misturas apresentaram um melhor comportamento, principalmente a mistura com RAP e RB.

A Figura 48 apresenta os resultados do ensaio de módulo dinâmico, parâmetro que caracteriza a rigidez da mistura e corresponde à relação entre a tensão aplicada e a deformação medida, em cada temperatura de ensaio.

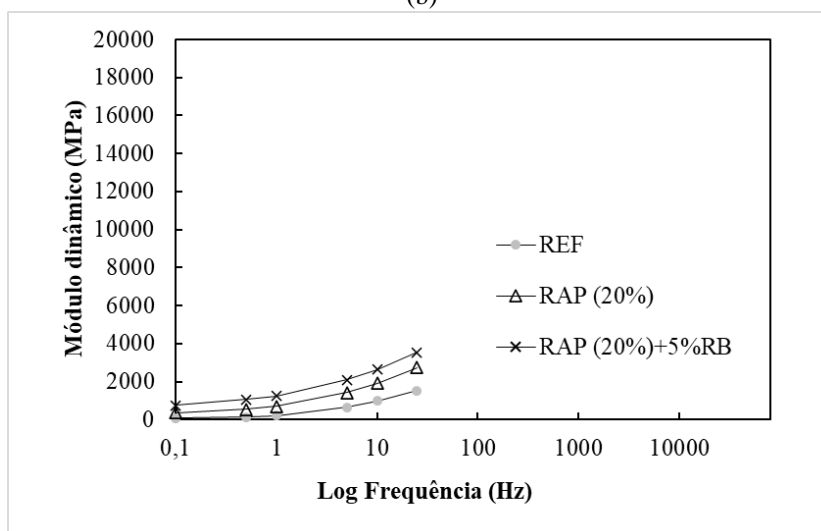
Figura 48 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas virgem, reciclada e reciclada com 5%RB 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).



(a)



(b)



(c)

Na Figura 48 verifica-se valores mais elevados de módulo em baixas temperaturas e alta frequência - 4°C (a) - para a mistura REF e RAP (20%) quando comparadas à mistura RAP (20%)+5%RB. Nessa condição, a elevada rigidez acentua a formação de trincas pelo impacto térmico, sendo desejável módulos mais baixos (COSTA, 2018). Nessa temperatura, para baixas frequências as misturas recicladas apresentaram módulo superior a referência. Para carregamentos mais rápidos, de maior frequência, observa-se uma resposta mais próxima da elástica e, para carregamentos mais lentos, observa-se uma resposta mais próxima da viscoelástica (Gouveia, 2016).

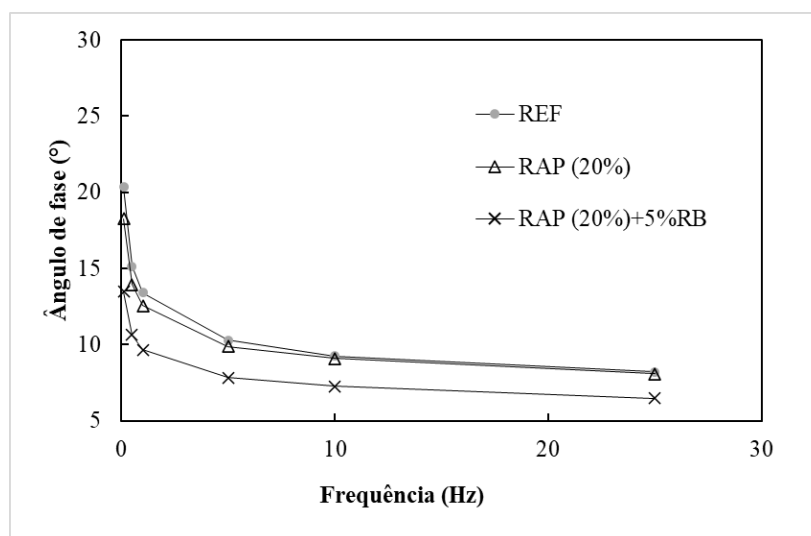
Quanto à segunda situação, altas temperaturas e baixas frequências – gráfico (c) da figura – é preferível módulos mais elevados. Tal comportamento foi observado para as misturas

recicladas, com maior magnitude para a mistura com resíduo de bauxita, condição que torna a mistura mais rígida como pode ser analisado nos resultados dos ensaios de módulo de resiliência. Esses resultados ainda estão alinhados com os dados obtidos no ensaio de deformação permanente, para o qual a incorporação de RAP em conjunto com a adição de RB proporcionou um maior aumento do *flow point* em relação à mistura referência quando comparada à mistura com RAP.

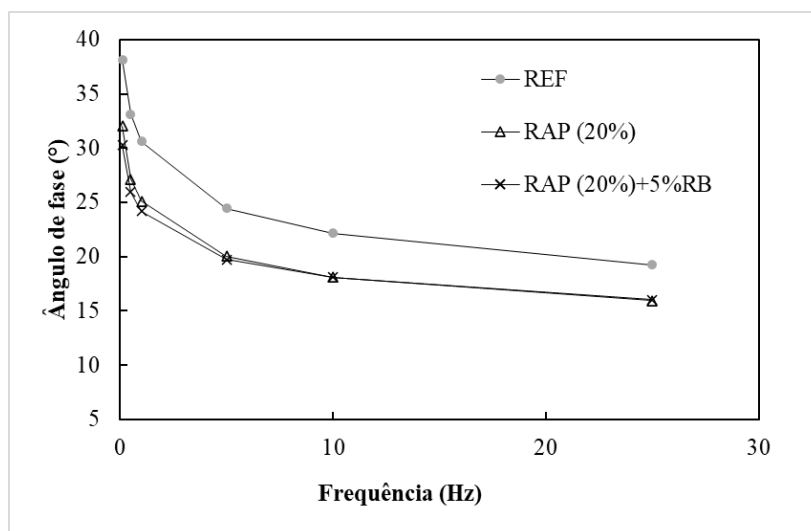
Esses resultados corroboram com o estudo de Oliveira, Farias e Silva (2022), que observaram o aumento do módulo da mistura com o aumento dos teores de RAP na mistura, estando de acordo com aumento da rigidez para elevados níveis de RAP.

A Figura 49 apresenta os ângulos de fase referentes às frequências de carregamento, em cada temperatura de ensaio - parâmetro que representa a viscoelasticidade das misturas asfálticas.

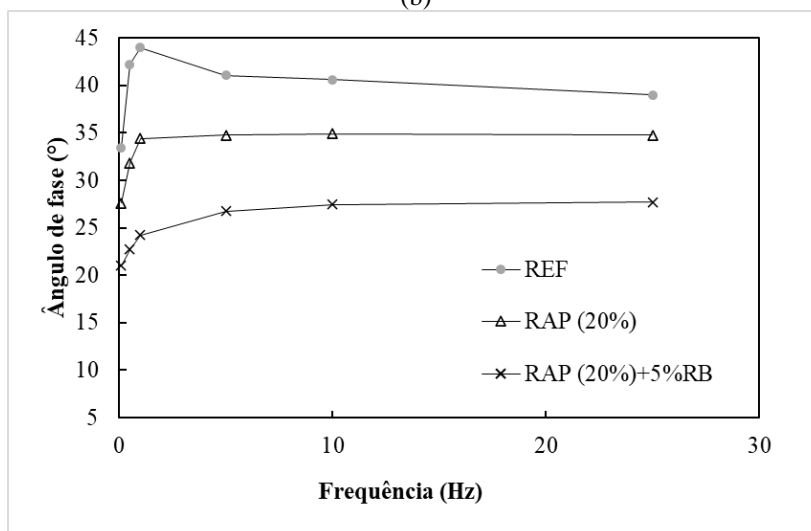
Figura 49 – Ângulo de fase das misturas asfálticas virgem, reciclada e reciclada com 5%RB referentes às frequências de carregamento 4°C (a), 20°C (b), 40°C (c).



(a)



(b)



(c)

A Figura 49 mostra o aumento dos valores do ângulo de fase das misturas asfálticas com o aumento da temperatura e com a diminuição da frequência – isso ocorre em virtude da perda de suas características elásticas quando submetida a elevadas temperaturas, aproximando-se de um material com comportamento viscoso –, com exceção da temperatura de 40°C a baixas frequências, em que observa-se a redução do ângulo de fase, para a qual, conforme discutido no tópico 4.1.4, o ligante perde a resistência e o esqueleto pétreo passa a suportar o carregamento.

Esse parâmetro, caracterizado pelas propriedades elásticas e viscosas das misturas asfálticas, indica um maior comportamento elástico da mistura quanto menor for os seus valores. Nesse sentido, os resultados dos ensaios nas misturas recicladas com e sem resíduo de bauxita

mostram ângulos de fase com menor magnitude e, assim, pode-se inferir que apresentam maior comportamento elástico nas três temperaturas analisadas.

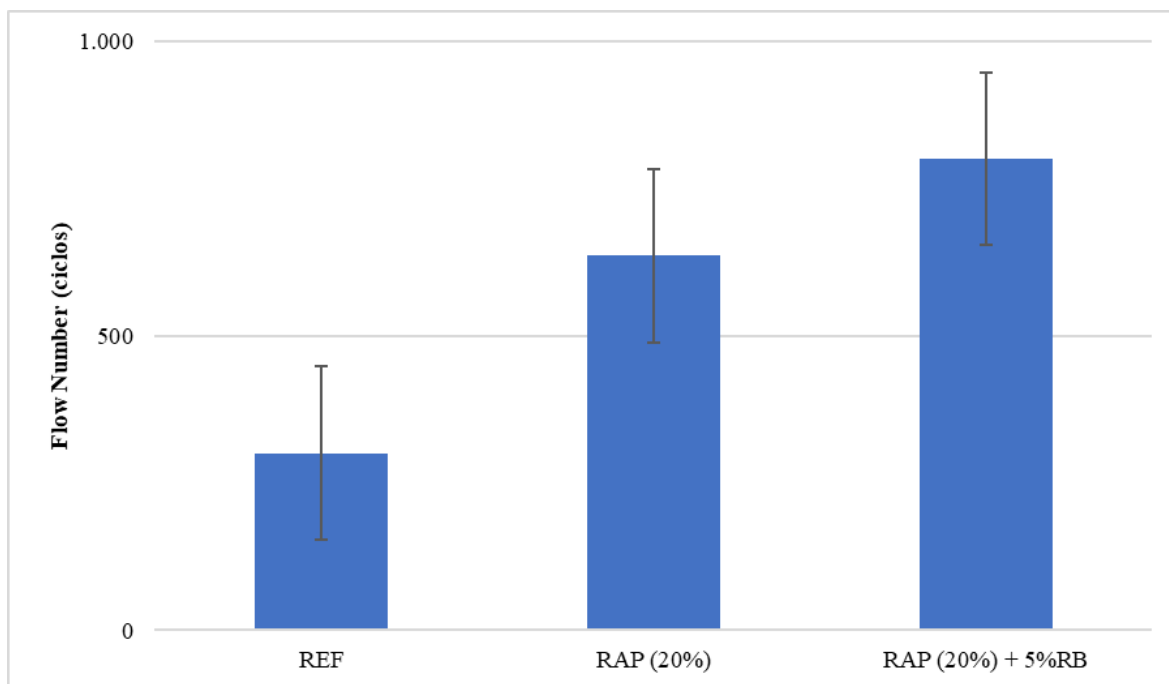
De acordo com Suzuki (2019) a rigidez da mistura reciclada está relacionada a fatores que envolvem o aumento da viscosidade do ligante oxidado presente no RAP, à ativação deste ligante, e à forma como o RAP foi condicionado antes do processo de dosagem e compactação, o que contribui para o ganho do módulo. Misturas mais rígidas em temperaturas elevadas podem ser favoráveis à resistência à deformação permanente, enquanto aquelas com menor rigidez em baixas e médias temperaturas podem apresentar melhor desempenho quanto à vida de fadiga.

Conforme Melo Neto (2022) a incorporação de RAP na mistura pode aumentar a rigidez e elasticidade de misturas asfálticas em temperaturas de serviço moderadas e altas, tal comportamento está de acordo com o observado nesse estudo.

4.2.5 Resistência à deformação permanente

A Figura 48 apresenta os valores médios de resistência à deformação permanente dos 3 grupos de misturas asfálticas analisados, com os seus respectivos desvios-padrão.

Figura 50 - Resultados do ensaio de deformação permanente da mistura virgem referência e a mistura reciclada sem RB e com 5%RB.



As misturas asfálticas recicladas, com e sem resíduo de bauxita, apresentaram valores superiores à amostra referência. A deformação permanente corresponde a um dos parâmetros essenciais na determinação da capacidade da mistura asfáltica suportar cargas de tráfego, particularmente em regiões quentes. Esses resultados estão alinhados com os valores de módulo dinâmico, para o qual em altas temperaturas as misturas recicladas apresentaram maiores valores de módulo e, portanto, maior rigidez.

Como apresentado no tópico 4.1.5, a incorporação de RB a mistura proporcionou maior resistência a deformação permanente quando comparada à mistura referência, como também foi observado para a mistura reciclada contendo esse material, com um aumento de aproximadamente 25,92% em relação à mistura reciclada sem resíduo. A maior magnitude da resistência à deformação permanente, quando comparada à mistura virgem com 5% de RB, pode ser justificada pelo efeito do enrijecimento do RAP.

Onofre (2012) analisou em seu estudo 17 misturas asfálticas – dosadas de acordo com a metodologia SUPERPAVE, com 4% de volume de vazios –, contendo o mesmo tipo de agregado e diferentes tipos de ligantes asfálticos e misturas com o mesmo tipo de ligante e diferentes tipos de agregados, por meio do ensaio uniaxial de carga repetida. Desse modo, com os resultados obtidos, o autor concluiu que o tipo de agregado exerce forte influência na resistência à deformação permanente das misturas, porém não verificou a influência da granulometria, como também a influência do percentual de ligante no comportamento das misturas.

Suzuki (2019) obteve valores de FN para as misturas com 10% e 20% de RAP superiores à mistura referência, estando de acordo com os resultados obtidos nesse estudo, para o qual a incorporação de asfalto fresado resultou na maior resistência da mistura à deformação permanente. Oliveira, Farias e Silva (2022) verificaram o comportamento de misturas com 25%, 45% e 100% de RAP, no entanto, não produziram uma mistura controle (sem RAP) para comparar o comportamento mecânico das misturas recicladas em relação a uma mistura convencional. Para tanto, a partir do ensaio de módulo dinâmico, no qual o aumento do teor de RAP resultou em maiores valores de módulo, inferiram que as misturas com RAP tendem a apresentar bom comportamento à deformação permanente.

Nascimento (2014) classificou, e acordo com o resultado de Flow Number, o nível de tráfego suportado pelas misturas asfálticas (Tabela 45).

Tabela 45 - Classes das misturas asfálticas determinadas em virtude do Flow Number

CLASSE	FN (CICLOS)	NÍVEL DE TRÁFEGO (condições normais)	NÍVEL DE TRÁFEGO (condições severas)
1	≤ 100	$N < 1 \times 10^6$ (leve)	Não recomendado
2	$100 \leq FN \leq 300$	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$ (médio)	$N < 1 \times 10^6$ (leve)
3	$300 \leq FN \leq 750$	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$ (pesado)	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$ (médio)
4	$750 \leq FN \leq 2000$	$N \geq 1 \times 10^8$ (extremamente pesado)	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$ (pesado)
5	≥ 2000	-	$N \geq 1 \times 10^8$ (extremamente pesado)

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014)

De acordo com essa classificação a mistura asfáltica referência atenderia ao tráfego médio, enquanto a mistura reciclada apresentou valores que suportam tráfego pesado. A mistura reciclada com resíduo de bauxita atende a condição de tráfego extremamente pesado, para as condições de tráfego normais. Segundo o DNIT (2018) as condições de tráfego normais englobam velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada (estabelecida conforme a norma AASHTO M 323 como sendo a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, igual ou inferior a 64°C).

4.2.6 Vida de fadiga

As Figuras 51 e 52 apresentam os resultados obtidos no ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em um diagrama log-log de N versus diferença de tensões ($\Delta\sigma$) e N versus deformação específica resiliente (ϵ_r), respectivamente, para as misturas recicladas, assim como a mistura referência. Nesses diagramas também são apresentadas as linhas de tendência, as quais representam o modelo de fadiga das misturas asfálticas.

Figura 51 - Número de ciclos até a ruptura versus diferença de tensões no centro do CP (Mistura referência, reciclada e reciclada com 5% de RB)

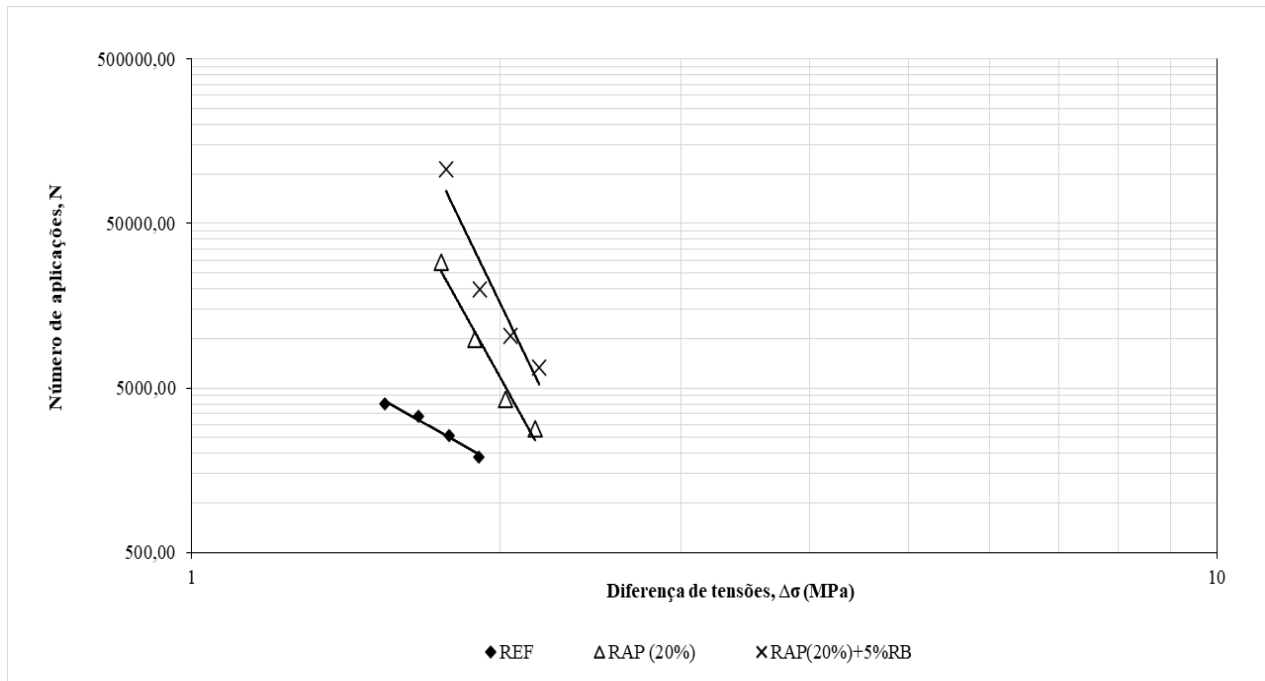
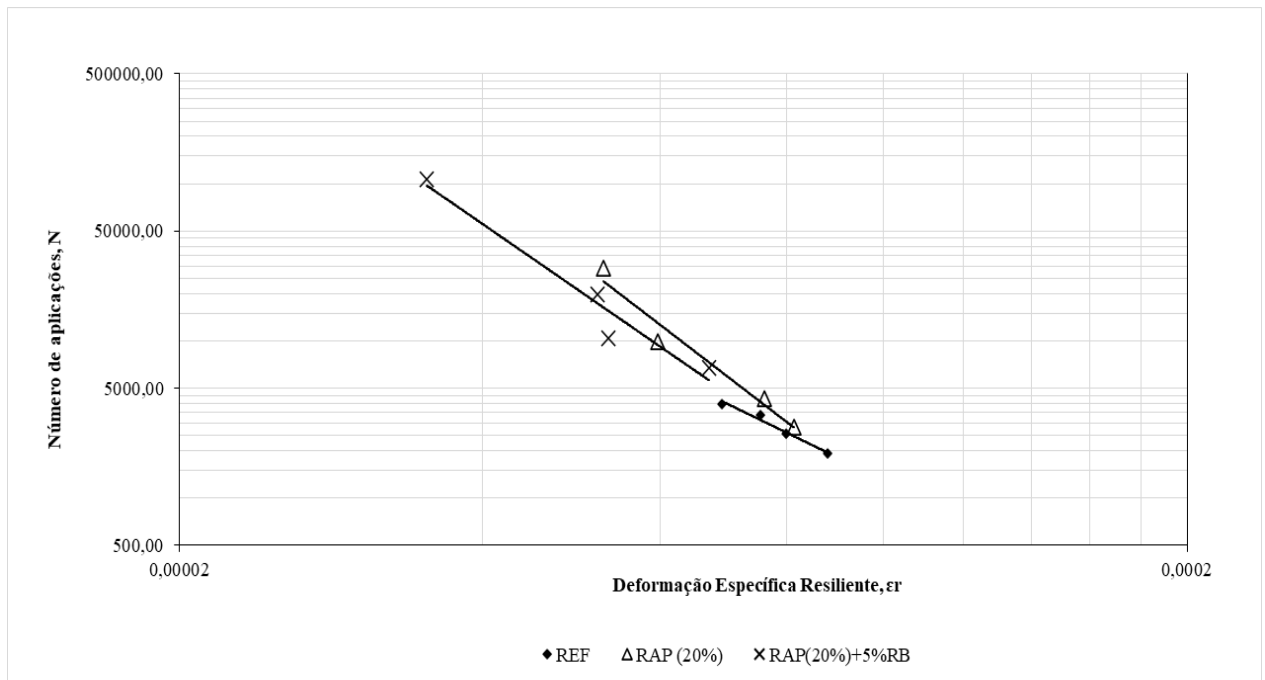


Figura 52 - Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente (Mistura referência, reciclada e reciclada com 5% de RB)



A partir das equações das linhas de tendência, obtiveram-se os parâmetros k_2 e n_2 e k_3 e n_3 , apresentados no item 3.3.6, bem como seus R^2 , conforme apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 – Parâmetros das curvas de vida de fadiga das misturas

MISTURA	Equação	R ²	Coeficientes	
REF	$N = 19253 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{3,528}$	0,9704	k₂ 19253	n₂ 3,528
	$N = 3 \times 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{2,674}$	0,8324	k₃ 3×10^{-8}	n₃ 2,674
RAP(20%)	$N = 10000000 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{11,31}$	0,877	k₂ 1×10^7	n₂ 11,31
	$N = 6 \times 10^{-16} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{4,575}$	0,8328	k₃ 6×10^{-16}	n₃ 4,575
RAP(20%)+5%RB	$N = 80000000 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{12,29}$	0,8564	k₂ 8×10^7	n₂ 12,29
	$N = 2 \times 10^{-13} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{3,934}$	0,8419	k₃ 2×10^{-13}	n₃ 3,934

Conforme apresentado na Tabela 46, as misturas analisadas (referência, reciclada e reciclada com resíduo de bauxita) apresentaram coeficientes de correlação (R²) superiores a 0,80, mínimo estabelecido pela norma DNIT 183/2018.

O valor de n₂, que indica a inclinação das linhas na Figura 51 (N x Δσ), corresponde à seguinte sequência, quando se considera o maior valor: RAP(20%)+5%RB, RAP(20%) e REF. Quanto maior o valor desse coeficiente, maior a sensibilidade das misturas à variação de diferença de tensões.

Com relação aos resultados apresentados na Figura 51, as misturas recicladas, tanto em baixos como alto níveis de diferença de tensões, apresentaram maior resistência à fadiga (maior número de ciclos considerando um mesmo nível de diferença de tensões).

O valor de n₃, que indica a inclinação das linhas na Figura 52 (N x ε_i), corresponde à seguinte sequência, quando se considera o maior valor: RAP(20%), RAP(20%)+5%RB e REF. Quanto maior o valor desse coeficiente, maior a sensibilidade das misturas à variação de deformação.

Ao analisar as curvas obtidas a partir dos ensaios de fadiga realizados (Figura 52), conclui-se que: para deformações específicas resilientes altas, as misturas recicladas com resíduo de bauxita e sem RB indicam que suportam mais ciclos de carga sob determinado nível de deformação do que a referência; no entanto, com a diminuição das deformações resilientes, a mistura reciclada com resíduo de bauxita tende a suportar maior número de aplicações de carga (N) do que a mistura reciclada sem resíduo e referência.

Para verificar o desempenho à fadiga das misturas analisadas, foi considerado nesse estudo o conceito de Fator de Fadiga da Mistura (FFM) – calculado a partir da equação obtida no gráfico que relaciona número de ciclos e deformação específica resiliente –, integrado ao MeDiNa, e proposto por Fritzen *et al.* (2019) como uma ferramenta para classificação da mistura quanto a esse esforço.

Esse fator considera o módulo de resiliência da mistura e a curva obtida no ensaio de fadiga para estimar a performance da mistura. Os resultados de FFM obtidos estão apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 – Classes de fadiga de misturas asfálticas.

MISTURA	CLASSE	FFM
REF	2	1,06
RAP(20%)	1	0,87
RAP(20%)+5%RB	2	0,90

De acordo com esse critério, as misturas asfálticas estudadas apresentaram um bom desempenho quanto à fadiga. Apesar da mistura reciclada apresentar rigidez superior à mistura referência, seu fator de fadiga foi menor e, por isso, apresentou uma menor classe de fadiga. A elevada rigidez atribuída a mistura reciclada com resíduo proporcionou a esse material uma classe de fadiga equivalente a mistura referência, no entanto, fator de fadiga inferior.

Suzuki (2019) analisou a vida de fadiga de misturas com 25% de RAP e, para esse percentual, a mistura asfáltica referência apresentou comportamento superior, indicando uma maior vida de fadiga, comportamento análogo ao obtido neste estudo.

Oliveira, Farias e Silva (2022) concluíram a partir da análise de 3 composições de misturas com RAP (25%, 45% e 100%) que a mistura com o menor teor de asfalto reciclado, mistura com 25% de RAP, que apresenta menor rigidez, apresentou melhor comportamento à fadiga. Portanto, concluíram que quanto maior a rigidez da mistura, menor sua vida à fadiga e, conseqüentemente, maior seu desempenho à deformação permanente.

No que diz respeito ao comportamento de deformação até a ruptura por fadiga, Huang *et al.* (2004) afirmam que as misturas são, normalmente, mais capazes de absorver energia de deformação antes de apresentarem falhas de tração, porém ao modo que as trincas surgirem, as

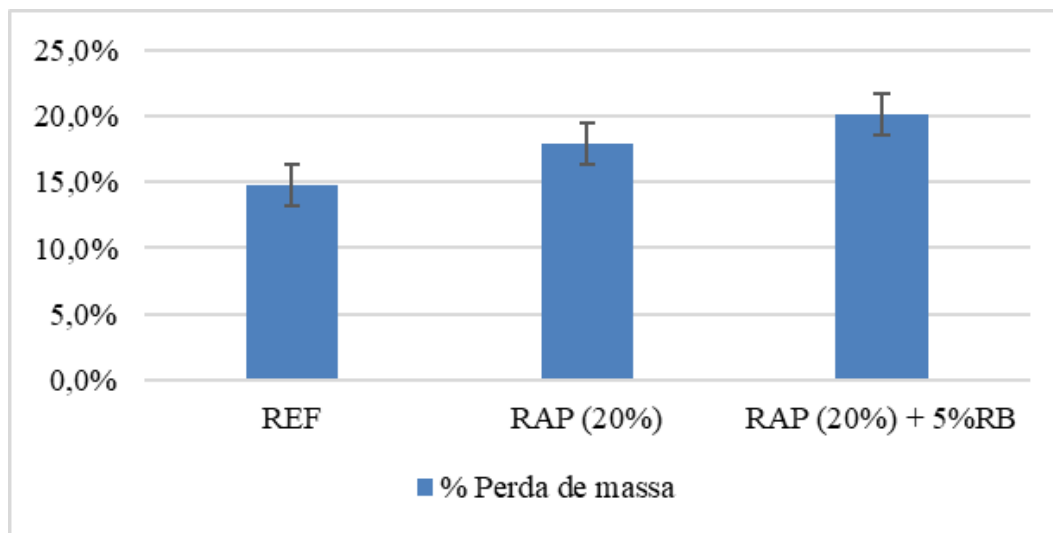
misturas com RAP tendem a romper com maior rapidez que as misturas sem RAP, em virtude da redução na tenacidade pós-falha. Esse comportamento foi observado durante a realização dos ensaios que ocorrem à tensão controlada.

Como apontado na análise dos resultados das misturas virgens com resíduo de bauxita, a composição granulométrica mais fina proporcionada pela incorporação de RB na mistura pode ter contribuído para um melhor comportamento da mistura em relação à vida de fadiga, visto que a utilização de 5% na mistura reciclada proporcionou classe de fadiga superior à referência e FFM quase equivalentes. Conforme Wang *et al.* (2018) o desempenho das misturas com RAP é dependente da estrutura global do pavimento, além do projeto de mistura.

4.2.7 Desgaste cântabro

A Figura 53 apresenta os valores médios de perda de massa das amostras asfálticas recicladas e referência quando sujeitas ao desgaste por abrasão.

Figura 53 -Resultados do ensaio de desgaste cântabro nas misturas reciclada e reciclada com 5% de RB.



Os resultados do ensaio de resistência ao desgaste por perda de massa evidenciam que as amostras recicladas apresentaram percentual de perda superior à mistura referência, com um aumento de 21,52% e 36,89% para as misturas RAP (20%) e RAP(20%) + 5%RB.

Centofante *et al.* (2018) observou a mesma condição em suas misturas, para os quais o aumento do teor de fresado nas misturas resultou em um aumento dos valores de perda de massa, e, com isso, concluíram que o RAP aumenta a tendência ao desgaste.

De acordo com Oliveira (2020) tal situação sugere que as misturas com RAP possuem desempenho inferior quanto ao atrito pneu-pavimento, situação essa associada a perda de coesão da mistura e adesão (redução das ligações ligante-agregados). A mistura reciclada com resíduo ainda apresentou perda superior a mistura sem RB, em percentual igual a cerca de 12,65%. Essa situação não era esperada, visto que no dano por umidade induzida as misturas recicladas apresentaram praticamente o mesmo percentual de resistência retida à tração, sendo esse ensaio um indicador de perda de adesão e coesão das misturas quando submetidos à ação degradante da umidade.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Este tópico abrange a análise de viabilidade do uso do resíduo de bauxita na produção de misturas asfálticas considerando os aspectos econômicos e ambientais. Dessa forma, apresenta os custos internos e externos associados a disposição do RB em barragens e a redução dos impactos da disposição, considerado como os benefícios, com a aplicação desse material no modal rodoviário, além da sensibilidade dessa aplicação em relação à distância de transporte do RB. Dentro dos aspectos ambientais, abrange a classificação ambiental das misturas asfálticas produzidas com o resíduo de bauxita.

4.3.1 Aspectos ambientais

Neste tópico foi apresentada a quantificação do impacto de cada alteração ambiental associada ao processo de disposição do resíduo de bauxita em barragens. Assim como a análise ambiental das misturas relacionada à classificação dessas por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização em amostras de solução obtidas das misturas com resíduo nos diferentes percentuais (5%, 10% e 15%).

4.3.1.1 Quantificação dos impactos ambientais

Os impactos ambientais englobam alterações climáticas, eutrofização da água, ecotoxicidade da água e alcalinização do solo cujos indicadores apontados no tópico 3.4.1 foram utilizados para quantificar as externalidades ambientais atreladas ao processo de disposição e

armazenamento do resíduo nesse estudo. Para a realização dessa estimativa foi considerado que a cada 1 tonelada de alumina é gerada 1 tonelada de RB e, como produção total anual, conforme relatado no *Fact Sheet* da Alumar, no ano de 2022 foram produzidas 3,85 milhões de toneladas alumina, sendo este o valor adotado para os cálculos de custo.

Com base nesse quantitativo foram obtidos os resultados de quantificação de impactos apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 – Quantificação dos impactos ambientais associados a disposição do RB

Impacto ambiental	Unidade	Quantidade anual
Mudanças climáticas	kgCOeq	$31,18 \times 10^6$
Eutrofização de água	kgPeq	$1,31 \times 10^6$
Ecotoxicidade de água	CTUe	$260,93 \times 10^6$
Acidificação/alcalinização	mol H+ eq	$0,31 \times 10^6$

A liberação de GEE afeta o meio ambiente e provoca mudanças climáticas (Mohamad *et al.*, 2021). O processo de eutrofização, segundo Smith e Schindler (2009), pode promover alteração no sabor, no odor, na turbidez e na cor da água, e ainda a redução do oxigênio dissolvido, provocando crescimento excessivo de plantas aquáticas, mortandade de peixes e outras espécies aquáticas. Quanto ao processo de ecotoxicidade, diz respeito a liberação de metais pesados nos corpos hídricos, podendo torná-los tóxicos. Ao referir-se à alcalinização do solo, o RB pode aumentar o pH do solo tornando-o mais alcalino. Isso pode resultar em efeitos adversos no solo e na vegetação, como alterações na disponibilidade de nutrientes para as plantas e potencial interferência nos processos biológicos do solo.

4.3.1.2 Classificação ambiental das misturas asfálticas

Neste tópico são apresentados os resultados da análise de pH e liberação de metais das misturas asfálticas produzidas com 5%, 10% e 15% de resíduo de bauxita, a qual buscou verificar a segurança ambiental do produto final, isto é, o enclausuramento do RB, uma vez que esse material possui a capacidade de se solubilizar e modificar os parâmetros físicos ou químicos, acima das concentrações estabelecidas pelos padrões de potabilidade da água.

Na análise de pH foram verificadas as amostras de água proveniente do condicionamento dos corpos de prova asfálticos a 60°C no ensaio de dano por umidade induzida das amostras com resíduo e referência, cuja água destilada utilizada apresentava pH equivalente a 5,85.

Tabela 49 – Resultado das análises de pH das misturas asfálticas.

Amostra	pH
Referência	7,91
5% de RB	8,71
10% de RB	9,25
15% de RB	9,75

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), o material é considerado corrosivo quando o valor de pH estiver abaixo de 2 e acima de 12,5, portanto, considerando os resultados apresentados na Tabela 49, ambientalmente as amostras são classificadas como não corrosivas, e os valores de pH apresentados conferem ao material carácter básico.

Os seguintes metais foram identificados nas amostras lixiviadas provenientes das misturas com 5, 10 e 15% de resíduo de bauxita (Tabela 50):

Tabela 50 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras lixiviadas das misturas com resíduo de bauxita.

Amostras	METAIS (mg/L)							
	As	Ba	Cd	Pb	Cr	Hg	Ag	Se
5% RB	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,01
10% RB	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,01
15% RB	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,03	< 0,001	< 0,01	< 0,01

Metais como cromo, titânio, mercúrio, ródio, ítrio, bromo, vanádio, prata, urânio, cobre, cádmio, boro e bário apresentaram valores inferiores aos limites de quantificação. As concentrações de metais identificadas são inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

As seguintes concentrações de metais foram identificadas, os quais não apresentam limites estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004) – Tabela 51.

Tabela 51 – Resultado da análise de metais nas amostras lixiviadas das misturas com resíduo de bauxita: metais sem limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

Amostras	METAIS (mg/L)										
	Al	Ca	Sn	Sr	Fe	Mg	Mn	K	Si	Na	Zn
5% RB	17	90,6	0,16	0,25	2,09	7,44	0,10	22,63	19,64	47,81	0,23
10% RB	-	162	0,24	0,35	3,89	12,9	-	22,74	39,38	73,55	0,43
15% RB	29,13	70,3	0,16	0,19	1,22	5,08	0,29	18,40	32,22	63,73	0,17

Quanto ao ensaio nas amostras solubilizadas, foram identificados os percentuais de metais apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 – Resultado da análise de metais pesados nas amostras solubilizadas das misturas com resíduo de bauxita.

Amostras	METAIS (mg/L)								
	Al	Ca	Cr	Fe	Mg	K	Si	Na	
5% RB	0,40	4,45	< 0,03	0,09	3,91	6,46	0,32	15,48	
10% RB	0,47	6,47	< 0,03	0,07	3,80	9,31	0,39	9,19	
15% RB	0,61	4,07	< 0,03	< 0,06	3,86	8,38	0,40	9,33	

Metais como arsênio, bário, berílio, boro, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, estanho, estrôncio, lítio, manganês, níquel, prata, selênio, urânio, vanádio, zinco, titânio, tálio, bromo, ítrio, ródio e tungstênio apresentaram valores inferiores aos limites de quantificação do ensaio. Para as amostras analisadas do próprio resíduo foi observado que os percentuais de alumínio, cromo total, ferro e manganês encontravam-se acima do limite máximo estabelecido no extrato pela normativa, com a incorporação desse material na mistura observa-se uma redução significativa desses metais no extrato solubilizado e destaca-se que apenas os percentuais de alumínio e manganês encontram-se acima do estabelecido pela norma, os quais equivalem a 0,2 mg/L e 0,1 mg/L, respectivamente.

Com isso, as amostras foram classificadas como resíduo não inerte Classe II A. Apesar disso, considerando a significativa redução nos percentuais de concentração de metais presentes na amostra solubilizada pode-se confirmar um enclausuramento do resíduo ao ser incorporado nas misturas asfálticas. E, portanto, faz-se necessário avaliar o impacto ambiental a longo prazo da utilização de resíduo de bauxita nos pavimentos asfálticos.

4.3.2 Aspectos econômicos: determinação dos custos

Neste tópico foi explanado os custos internos e externos do processo de armazenamento do resíduo de bauxita, assim como os custos de fornecimento do RB.

4.3.2.1 Custos internos

Os custos internos corresponderam a soma dos custos de disposição do RB e os custos de fornecimento do material para aplicação – nessa análise não foram considerados possíveis custos de adaptação ou investimentos necessários nas instalações existentes para incorporar o resíduo de bauxita ao processo de produção de misturas asfálticas.

- Custos associados à disposição do RB:

Os custos de armazenamento foram estabelecidos considerando o percentual médio equivalente a 2% dos custos de produção da alumina – determinado com base no intervalo de custos apontado pelo IAI –, adotando o cenário no qual a cada 1,0 tonelada de alumina é gerada 1,0 tonelada de resíduo de bauxita.

Assim, considerando o consumo médio apresentado na Tabela 37 do tópico 3.4.2.2.1 e os preços dos insumos no mercado foram obtidos os resultados da Tabela 53.

Tabela 53 – Custos de armazenamento do resíduo de bauxita

Matéria prima	Unidade	Consumo médio por t de Alumina	Preço (R\$)	Custo total (R\$)
Bauxita	T	3,15	1011,84	3.187,296
Soda cáustica	Kg	80	16,00	1280
Eletricidade	kWh	130,5	0,71881	93,80
Óleo combustível	L	227,6	5,29	1204,004
Cal (CaO)	Kg	33	0,95	31,35

*Considerando o diesel como óleo combustível e adotando 1 GJ como equivalente a 24,87 L

Considerando uma produção anual de 3,85 milhões de toneladas de resíduo de alumina, conforme relatado no *Fact Sheet* da Alumar atualizado em abril de 2023, foi obtido o seguinte resultado:

$$C_a = 5796,45 \text{ R\$/t de alumina}$$

$$C_i = 0,02 \times 5796,45 \times 3,85 \times 10^6 \times 1,0 = 446,33 \text{ milhões de reais/ano}$$

Por tonelada de resíduo de bauxita, o custo de disposição equivale a:

$$C \text{ tonelada de RB} = 0,02 \times 5796,45 \text{ R\$/t de alumina} = 115,93 \text{ R\$/t de RB}$$

- Custos de fornecimento do resíduo para aplicação na pavimentação:

Este tópico apresenta os custos oriundos do sistema logístico responsável por transportar o rejeito armazenado em uma barragem até o local em que será utilizado como matéria prima na construção de um pavimento, foi considerado o transporte de 1 t de resíduo de bauxita para uma distância média de 50 km.

Tabela 54 – Custos de operação dos equipamentos por t de RB a ser transportada

Atividade	Custo R\$/t
Transporte com caminhão basculante de 10 m ³ , em via urbana pavimentada, adicional para DMT excedente a 30 km	0,33
Carga, manobra e descarga de solos e materiais granulares em caminhão basculante 10 m ³ - carga com escavadeira hidráulica (caçamba de 1,20 m ³ /155 hp) e descarga livre	2,33

Com os custos da Tabela 54 calculou-se os custos internos de fornecimento de 1,0 tonelada de resíduo de bauxita utilizando a Equação 8 do item 3.4.2.2.1:

$$C_f = 0,33 \times 50 + 2,33 = 18,83 \text{ R\$/t de RB}$$

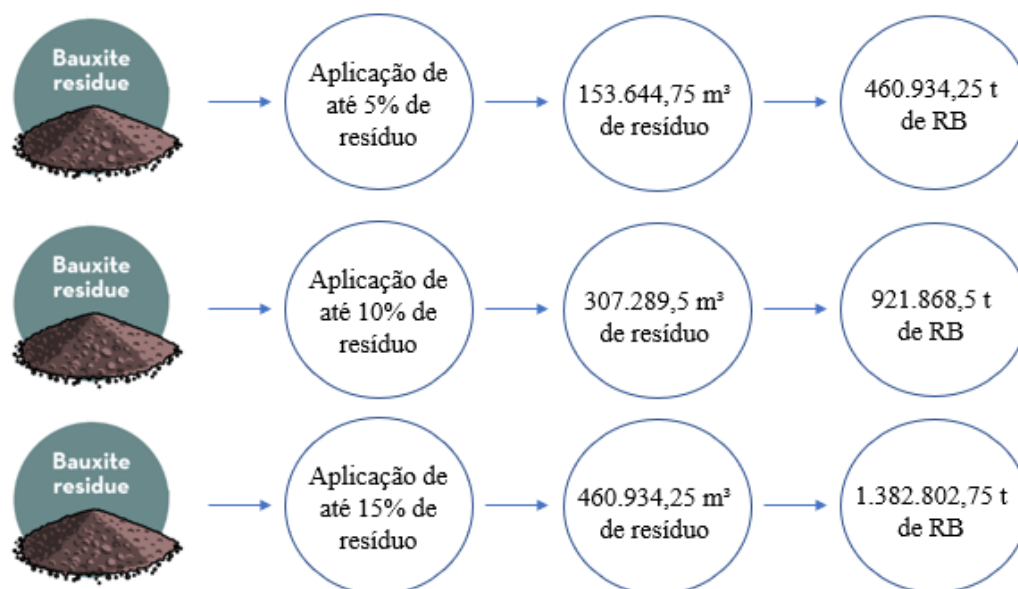
Esse custo depende da quantidade de material a ser transportado. Para essa determinação foi calculada uma aplicação anual considerando os percentuais de 5%, 10% e 15% de resíduo a serem utilizados na produção das misturas asfálticas, os quais foram verificados tecnicamente nesse estudo.

Para determinação da extensão de malha asfáltica na qual o resíduo será utilizado foi considerado como local de aplicação a região onde está localizada a planta, nesse caso, o estado do Maranhão e os dados de vias degradadas apontados pela CNT. Para tanto, conforme a Pesquisa CNT de Rodovias (2023), elaborado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), o Brasil

apresenta malha rodoviária composta por 1.720.909,0 km, das quais 213.500 km (12,4% do total) constituem-se de rodovias pavimentadas, 1.350.100,0 km (78,5%) correspondem a rodovias não pavimentadas e 157.309,0 km (9,1%) são de rodovias planejadas. Nessa pesquisa foi analisado um total de 110.333 km de malha rodoviária, para o qual 4,2% correspondem ao total analisado no Maranhão. Nessa região observou-se que 69,7% da via asfáltica apresenta algum tipo de deficiência. No que diz respeito à condição da superfície do pavimento tem-se que: 34,7% do total encontra-se desgastada, 46,8% apresenta trincas e remendos, 9,2% conta com afundamentos, ondulações ou buracos e 2,4% está totalmente destruída, um equivalente a 4389,85 km das vias apresentam problemas. Essa situação proporciona desde custos operacionais até custos ambientais, destacando a contribuição com a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) através da emissão de dióxido de carbono (CO₂) e gás metano (CH₄). No ano de 2022, a situação foi similar: 66,0% da malha rodoviária do Maranhão apresentou algum tipo de deficiência conforme a CNT (2022), referindo-se a condição da superfície do pavimento tinha-se que 50,5% do total encontra-se desgastada, 35,0% apresentava trincas, 5% contava com afundamentos, trincas ou buracos e 0,6% estava totalmente destruída.

Considerando a recuperação dessas vias, equivalente a 4389,85 km, e que elas apresentam a estrutura proposta na Figura 24 com uma aplicação de 5%, 10% e 15% de resíduo de bauxita nas misturas asfálticas, obtêm-se os seguintes resultados anuais de uso de RB (Figura 54).

Figura 54 – Aplicação de RB anual na produção de misturas asfálticas para recuperação das vias degradadas no Maranhão.



- Custo total por tonelada de resíduo:

$$C = 115,93 + 18,83 = 134,76 \text{ R\$/t de RB}$$

O custo interno para cada 1,0 tonelada de RB equivale a aproximadamente 135,0 R\$.

4.3.2.2 Custos externos

Os custos externos corresponderam a soma dos custos dos impactos causados ao meio ambiente pela disposição do RB.

- Mudanças climáticas:

A emissão de GEE contribui para as mudanças climáticas, as quais resultam no aquecimento global. Com as preocupações ambientais, são crescentes as buscas por iniciativas de abatimento de emissões de GEE. No âmbito do setor de mineração, as entidades adotam práticas para reduzir essa contribuição, como é o caso da reutilização de resíduos.

Dessa forma, considerando os dados de custos externos evitados apresentados por Joyce e Björklund (2019) foi estimado a quantidade de CO₂ equivalente emitido a cada 1,0 tonelada de resíduo, partindo da perspectiva de custo evitado (Tabela 55).

Tabela 55 - Custo externo da emissão de CO₂ equivalente

Emissão de CO ₂ (t)	Custo social do carbono (US\$/t)	Custo (R\$/t de RB)	Custo total (R\$/ano)
0,0081	8,45	0,34	1.307.025,72

O custo ambiental referente à contribuição com GEE atribuída ao armazenamento do resíduo de bauxita, considerando uma geração anual de 3,85 Mt, é R\$ 1.307.025,15 (0,34 R\$/t de RB). Ressalta-se que o valor obtido está diretamente relacionado com o valor adotado do CSC, e, quanto a isso, o setor de mineração defende a precificação de carbono como mecanismo econômico para viabilizar a transição para a economia de baixo carbono (IBRAM, 2021).

No transporte do RB, o custo foi determinado considerando o preço por km, conforme a Tabela 56.

Tabela 56 - Custo externo da emissão de CO₂ equivalente associado ao transporte do RB

Emissão de CO ₂ (t)	Custo social do carbono (US\$/t)	Custo total (R\$/km)
0,00128	8,45	0,05

- Eutrofização de água, ecotoxicidade de água e alcalinização do solo:

Os custos dos impactos de eutrofização, ecotoxicidade de águas superficiais e subterrâneas, assim como a alcalinização do solo foram quantificados utilizando as taxas de custos atribuídas pelo *Eco-costs*, os quais correspondem aos custos necessários para reduzir a poluição ambiental e o esgotamento de recursos naturais para um nível que esteja em linha com a capacidade de carga do planeta. Os custos para cada 1,0 tonelada de resíduo estão apresentados na Tabela 57, cuja quantidade foi apresentada na Tabela 36 do item 3.4.1.1.

Tabela 57 - Custo externo associado à eutrofização, ecotoxicidade e alcalinização.

Impacto	Taxa de custo (€)	Custo (R\$/t de RB)	Custo total (R\$/ano)
Eutrofização de água	16,46/kgP _{eq}	30,22	116.347.000,00
Ecotoxicidade de água	$2,89 \times 10^{-3}/CTU_e$	1,06	4.081.000,00
Acidificação/alcalinização	7,65/mol H ⁺ eq	3,30	12.705.000,00

O custo ambiental total relacionado à 1,0 tonelada de RB equivale a soma dos custos apresentados na Tabela 56 e 57 e, portanto, é igual a 34,92 R\$.

4.3.2.3 Custos totais

Neste tópico foi apresentado o somatório dos custos internos e externos associados ao processo de disposição do RB, considerando duas situações: a primeira, na qual nos custos não é considerado nenhuma aplicação para o RB; e a segunda, que considera os custos de disposição internos e externos sem a destinação do RB para qualquer tipo de aplicação. Além dessas, três situações que consideram a aplicação do RB na pavimentação, em três diferentes percentuais (5%, 10% e 15%) utilizados em misturas asfálticas como substituintes ao pó de pedra. Esses casos contam com o somatório dos custos considerando a aplicação do RB na pavimentação, ou seja, custos internos e externos com incremento dos custos de transporte do material ao ser considerada

a sua utilização para compor as misturas asfálticas como uma estratégia de sustentabilidade, para os três percentuais de RB verificados mecanicamente.

A Tabela 58 apresenta o fluxo dos custos ajustados para a inflação observada e projetada para os anos subsequentes, considerando como referência inicial o ano de 2022, com base nos dados do IBGE e Banco Central.

Tabela 58 – Fluxo de custos internos da disposição do RB

Item	Período (ano)				
	1	2	3	4	5
Situação 1: não há utilização do RB, custos externos não contabilizados					
Custos Internos (disposição)	R\$ 446.330.000,00	R\$ 466.861.180,00	R\$ 461.951.550,00	R\$ 460.612.560,00	R\$ 460.612.560,00
Custos Externos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Total	R\$ 446.330.000,00	R\$ 466.861.180,00	R\$ 461.951.550,00	R\$ 460.612.560,00	R\$ 460.612.560,00
Situação 2: não há utilização do RB, custos externos contabilizados					
Custos Internos (disposição)	R\$ 446.330.000,00	R\$ 466.861.180,00	R\$ 461.951.550,00	R\$ 460.612.560,00	R\$ 460.612.560,00
Custos Externos	R\$ 134.442.000,00	R\$ 134.442.000,00	R\$ 134.442.000,00	R\$ 134.442.000,00	R\$ 134.442.000,00
Total	R\$ 580.772.000,00	R\$ 601.303.180,00	R\$ 596.393.550,00	R\$ 595.054.560,00	R\$ 595.054.560,00
Situação 3: utilização de 5% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)					
Custos Internos (disposição) + custos de transporte	R\$ 455.009.391,93	R\$ 475.939.823,96	R\$ 470.934.720,64	R\$ 469.569.692,47	R\$ 469.569.692,47
Custos Externos	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50
Total	R\$ 589.451.394,43	R\$ 610.381.826,46	R\$ 605.376.723,14	R\$ 604.011.694,97	R\$ 604.011.694,97
Situação 4: utilização de 10% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)					
Custos Internos (disposição) + custos de transporte	R\$ 463.688.783,86	R\$ 485.018.467,91	R\$ 479.917.891,29	R\$ 478.526.824,94	R\$ 478.526.824,94
Custos Externos	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50	R\$ 134.442.002,50
Total	R\$ 598.130.786,36	R\$ 619.460.470,41	R\$ 614.359.893,79	R\$ 612.968.827,44	R\$ 612.968.827,44
Situação 5: utilização de 15% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)					
Custos Internos (disposição) +	R\$ 472.368.175,78	R\$ 494.097.111,87	R\$ 488.901.061,93	R\$ 487.483.957,41	R\$ 487.483.957,41

custos de transporte					
Custos Externos	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$
	134.442.002,50	134.442.002,50	134.442.002,50	134.442.002,50	134.442.002,50
Total	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$
	606.810.178,28	628.539.114,37	623.343.064,43	621.925.959,91	621.925.959,91

Nos custos de transporte foi considerado o percentual de recuperação das vias degradadas do estado do Maranhão como relatado anteriormente, cujos quantitativos encontram-se ilustrados na Figura 54.

4.3.2.4 Determinação dos benefícios

A redução das externalidades foi estabelecida considerando está sendo equivalente à anulação dos custos externos associados à disposição do RB com o seu retorno para a cadeia produtiva.

Logo,

$$B_e = R_{ce} + R_{ci}$$

$$= (34,92 \text{ R\$/t de RB} + 115,93 \text{ R\$/t de RB}) \times \text{quantitativo utilizado}$$

A cada 1,0 tonelada de RB utilizada é gerada uma redução de R\$ 34,92, com base no tópico anterior no qual foi estabelecido o custo externo associado à disposição do RB, assim como uma redução de custos interno de armazenamento igual a 115,93 R\$.

Anualmente, a redução de material estocado foi calculada considerando a aplicação dos percentuais de 5%, 10% e 15% de resíduo na pavimentação, os quais foram analisados tecnicamente como matéria-prima na produção de misturas asfálticas, o quantitativo de RB a ser utilizado foi apresentado na Figura 54 (Tabela 59).

Tabela 59 – Fluxo de benefícios com a utilização de resíduo em misturas asfálticas

Item	Período (ano)				
	1	2	3	4	5
5% de resíduo na composição de misturas asfálticas					
Redução de impacto	R\$ 16.095.824,01	R\$ 16.095.824,01	R\$ 16.095.824,01	R\$ 16.095.824,01	R\$ 16.095.824,01
Redução de custo de disposição	R\$ 53.436.107,60	R\$ 55.894.168,55	R\$ 55.306.371,37	R\$ 55.146.063,05	R\$ 55.146.063,05
Total	R\$ 69.531.931,61	R\$ 71.989.992,56	R\$ 71.402.195,38	R\$ 71.241.887,06	R\$ 71.241.887,06
10% de resíduo na composição de misturas asfálticas					
Redução de impacto	R\$ 32.191.648,02	R\$ 32.191.648,02	R\$ 32.191.648,02	R\$ 32.191.648,02	R\$ 32.191.648,02
Redução de custo de disposição	R\$ 106.872.215,21	R\$ 111.788.337,10	R\$ 110.612.742,74	R\$ 110.292.126,09	R\$ 110.292.126,09
Total	R\$ 139.063.863,23	R\$ 143.979.985,12	R\$ 142.804.390,76	R\$ 142.483.774,11	R\$ 142.483.774,11
15% de resíduo na composição de misturas asfálticas					
Redução de impacto	R\$ 48.287.472,03	R\$ 48.287.472,03	R\$ 48.287.472,03	R\$ 48.287.472,03	R\$ 48.287.472,03
Redução de custo de disposição	R\$ 160.308.322,81	R\$ 167.682.505,66	R\$ 165.919.114,11	R\$ 165.438.189,14	R\$ 165.438.189,14
Total	R\$ 208.595.794,84	R\$ 215.969.977,69	R\$ 214.206.586,14	R\$ 213.725.661,17	R\$ 213.725.661,17

Aproveitar o resíduo de bauxita incentiva reutilização de materiais, reduzindo o consumo de recursos naturais na produção das misturas asfálticas e ainda, a quantidade estocada.

4.3.2.5 Análise de custo-benefício: utilização do RB em misturas asfálticas

A análise de custo-benefício considerou os custos associados à disposição do resíduo em uma abordagem na qual a utilização do RB não é considerada, assim como os custos externos, uma segunda situação na qual a utilização do RB não é considerada, no entanto, os custos externos são contabilizados, e demais condições nas quais os custos internos e externos e benefícios da utilização de RB, em termos de redução dos impactos e de custos internos com estocagem, sendo nesse caso também considerado os custos de transporte desse material até as unidades asfálticas.

Tabela 60 – Análise de custo-benefício – resultados do VPL

Condição analisada	VPL
Situação 1: não há utilização do RB, custos externos não contabilizados	-R\$ 1.347.539.051,04
Situação 2: não há utilização do RB, custos externos contabilizados	-R\$ 1.742.000.776,98
Situação 3: utilização de 5% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)	-R\$ 1.559.647.149,59
Situação 4: utilização de 10% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)	-R\$ 1.377.293.514,86
Situação 5: utilização de 15% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)	-R\$ 1.194.939.880,14

A variação entre adotar a utilização do RB em misturas asfálticas e continuar apenas depositando-o em barragens equivale a seguinte relação:

Figura 55 – Relação entre o VPL da situação 1 (sem utilizar o RB e sem considerar os custos externos) e as situações 3,4 e 5 com a utilização de 5%, 10% e 15% de RB no percentual das misturas asfálticas para recuperação das vias do Maranhão

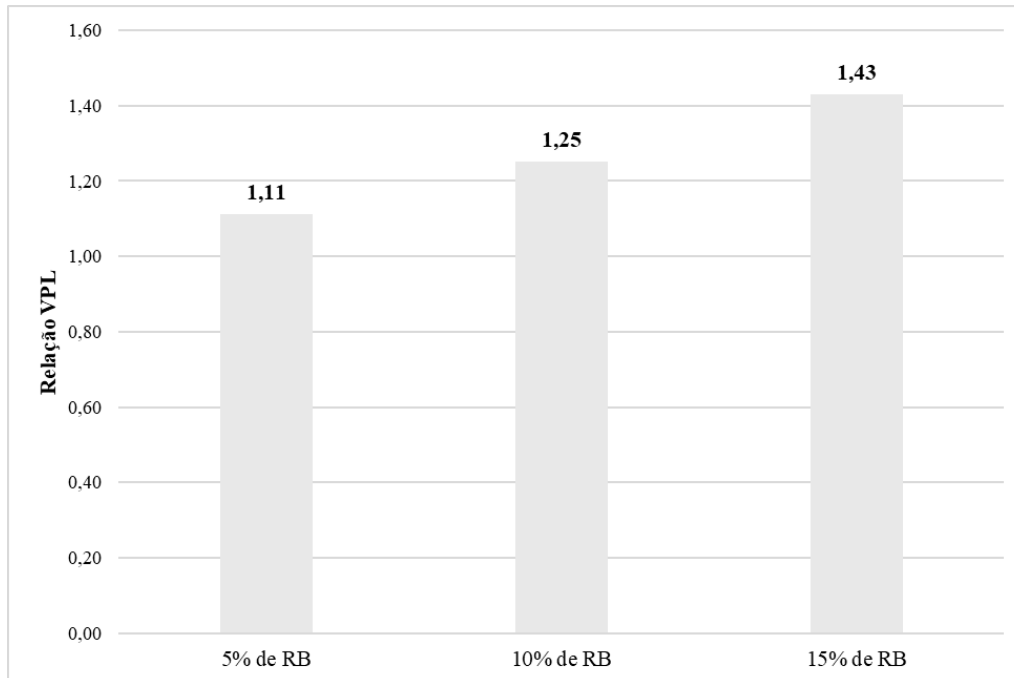
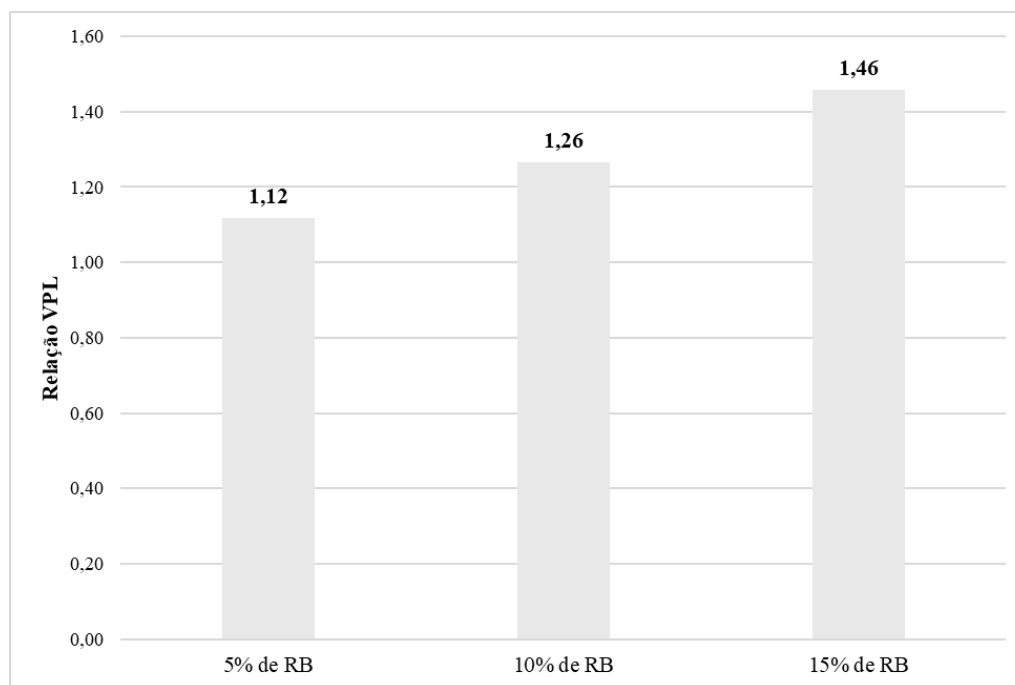


Figura 56 – Relação entre o VPL da situação 2 (sem utilizar o RB e considerando os custos externos) e as situações 3,4 e 5 com a utilização de 5%, 10% e 15% de RB no percentual das misturas asfálticas para recuperação das vias do Maranhão



Com o aumento do quantitativo de RB utilizado para compor as misturas asfálticas ocorre o aumento dos benefícios com a redução dos impactos de sua disposição assim como a redução dos custos da disposição do resíduo de bauxita, no entanto, também se soma aos custos aqueles referentes ao transporte do material. A partir dos resultados obtidos foi possível observar aumento do VPL com o aumento quantitativo de RB utilizado, o que mostra a viabilidade de aplicação para compor a cadeia produtiva de outros materiais para a empresa responsável pela geração desse resíduo, visto que os maiores custos observados estão associados aos custos operacionais de armazenamento seguro desse material. É importante destacar que a aplicação do RB, em busca do seu retorno ao sistema produtivo, está alinhada com o desenvolvimento sustentável do setor, contribuindo com aspectos financeiros, econômicos e sociais.

Ademais, apesar de tecnicamente a mistura com 15% de RB, quando analisada sua durabilidade a longo prazo, ter apresentado resistência à umidade inferior ao mínimo estabelecido pelas normativas, os custos e benefícios desse quantitativo foi verificado em virtude da possibilidade de serem aplicados mecanismo, como uma maior quantidade de fileres que melhorem a adesão ligante/agregado, para possibilitar a aplicação desse percentual na composição de misturas asfálticas.

4.3.2.6 Análise de sensibilidade: custos associados ao fornecimento do RB

Este tópico apresenta a análise de sensibilidade do uso do resíduo para compor as misturas asfálticas considerando diferentes distâncias de transporte para fornecimento do material.

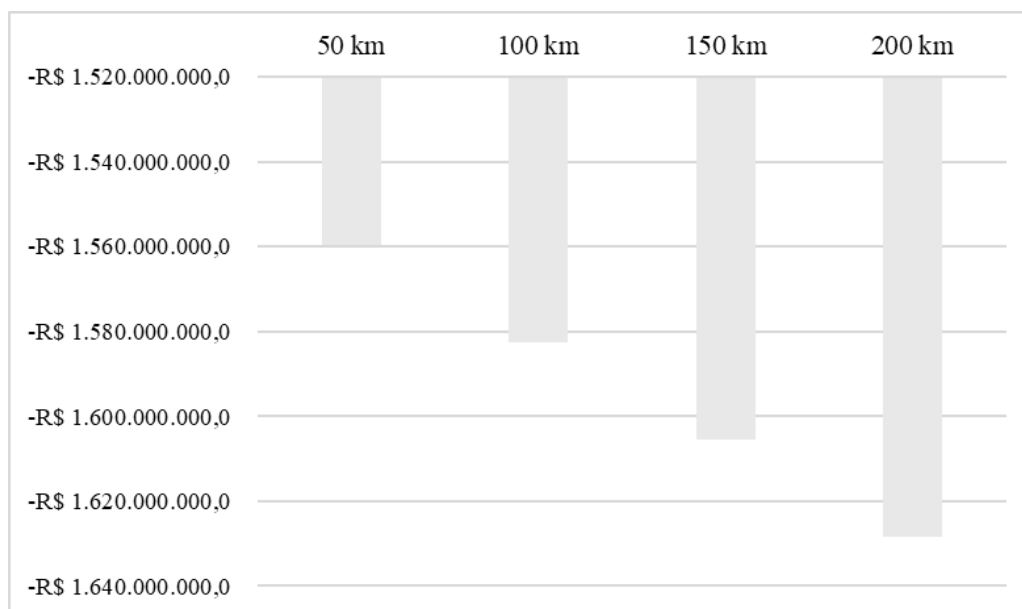
Com base nos dados de custos de fornecimento do tópico 4.3.2.1 e diferentes simulações de distância de transporte, obteve-se os resultados da Tabela 61.

Tabela 61 – Variação dos custos de transporte por t de RB para diferentes distâncias

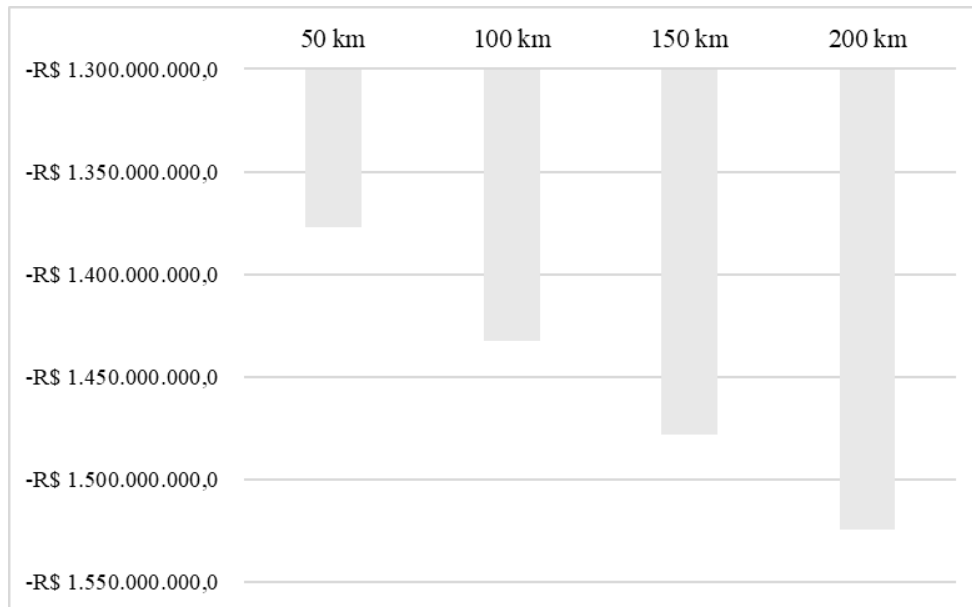
Distância transportada (km)	Custo R\$/t
50 km	18,83
100 km	35,33
150 km	51,83
200 km	68,33

Com essas variações, o VLP da análise considerando a aplicação de 5%, 10% e 15% de RB apresentou as variações com as diferentes distâncias ilustradas na Figura 57.

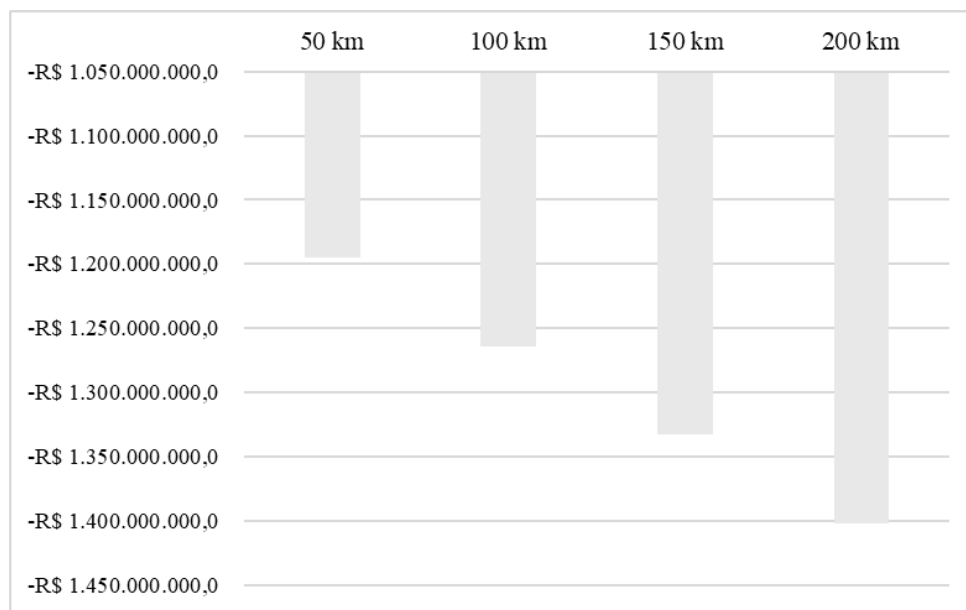
Figura 57 – Análise de sensibilidade quanto as distâncias de transporte do VPL das alternativas de utilização do RB em misturas asfálticas nos percentuais 5% (a), 10% (b), 15% (c).



(a)



(b)



(c)

Esses resultados mostram a sensibilidade da alternativa de utilização do RB em misturas asfálticas aos custos de transporte. A cada 50 km há um aumento no custo de transporte de aproximadamente 88%, promovendo variação no VPL de aproximadamente 2% para percentual de utilização equivalente a 5% de RB na mistura, 4% para 10% de RB e 5% para 15% de RB a cada 50 km. No entanto, considerando uma distância de transporte de até 200 km, o VPL dos três percentuais de aplicação é superior ao VPL da situação na qual não é adotada nenhuma utilização para o RB.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta seção foram apresentadas as conclusões a respeito dos resultados obtidos nessa pesquisa, assim como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o tema em estudo.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios mecânicos das misturas asfálticas mostraram que o resíduo de bauxita conferiu ao material maior rigidez, resultando em maior resistência à deformação permanente, maior resistência à tração, maiores módulos dinâmicos em baixas frequências e altas temperaturas e maior módulo de resiliência. Quanto ao dano por umidade induzida as amostras com resíduo não condicionadas, as quais apresentam uma estrutura pétreia mais densa pelo maior teor de finos presente, apresentaram elevada resistência à tração e ao serem condicionadas parte de seus elementos solubilizam – tal característica pode ser observada na análise de pH da água utilizada no condicionamento das misturas, cujo pH das misturas com RB foi superior ao da amostra referência – e promovem uma perda maior, resultando em uma resistência retida à tração inferior a mistura referência, perda essa que aumenta com o aumento do percentual de RB nas misturas.

Quanto às misturas recicladas, a utilização de RAP associada com o RB resultou em uma amostra mais rígida. Dessa forma a mistura reciclada com RB apresentou comportamento superior a mistura reciclada sem resíduo nos ensaios de deformação permanente e módulo de resiliência, indicando nesse último um comportamento mais elástico. No ensaio de módulo dinâmico as misturas recicladas e referência em baixas temperaturas e altas frequências apresentaram comportamento equivalente, condição que indica o comportamento do material quanto à fadiga. No ensaio de vida de fadiga as misturas recicladas apresentaram fator de fadiga inferior a mistura referência, comportamento já esperado visto que a literatura aponta a menor resistência à fissuração das misturas contendo RAP, no entanto, a mistura com RB apresentou a mesma classe de fadiga da mistura referência, devido a sua maior rigidez.

O envelhecimento térmico resultou no aumento da resistência à tração, módulo de resiliência, resistência à deformação permanente e módulo dinâmico das quatro amostras analisadas. No quesito comportamento à fadiga o envelhecimento térmico promoveu redução do fator de fadiga, isto é, as misturas foram mais suscetíveis a fissuração quando comparadas as

misturas sem envelhecimento, principalmente as misturas com resíduo. No entanto, devido a maior rigidez proporcionada pelo envelhecimento térmico as misturas apresentaram classe equivalente nas duas condições (antes e após protocolo de envelhecimento), com exceção das misturas com 5% de RB, a qual apresentou classe inferior, e a mistura com 15%, cuja elevado módulo de resiliência resultou em uma classe de fadiga superior.

A análise econômica mostrou a redução dos custos para a planta responsável pela geração desse material com o seu retorno ao sistema produtivo, nesse caso, para compor misturas asfálticas, e, portanto, a viabilidade em direcionar esse material para aplicação. Com a aplicação de 5%, 10% e 15% de RB foi observado um aumento no VPL de 11,70%, 26,48% e 42,78% em relação a situação na qual não é considerada nenhuma aplicação para esse material.

Ambientalmente, utilizar o resíduo minimiza os impactos associados ao seu processo de disposição e no estudo em questão, utilizar o material para compor misturas asfálticas possibilitou enclausuramento do RB, com redução significativa nos percentuais de metais liberados ao serem comparadas com as análises de solubilizado do próprio resíduo. Apesar disso, na análise do solubilizado, metais de alumínio e manganês são liberados pela mistura em percentuais acima do máximo estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Ainda, considerando a Resolução CONAMA 430, a qual trata do lançamento de efluentes em corpos hídricos, é estabelecido que os efluentes apresentem pH entre 5 e 9, de forma a garantir que não ocorra contaminações, dentro dessa perspectiva apenas a mistura com 5% de RB apresentou pH dentro do intervalo determinado. Dessa forma, os resultados mostram que é necessária uma análise a longo prazo dos impactos da utilização do resíduo de bauxita em misturas asfálticas.

De maneira geral, o resíduo de bauxita se mostrou um material com potencial de aplicação na indústria da pavimentação, promovendo comportamento igual e/ou superior a mistura referência, com destaque para os percentuais equivalentes a 5% e 10% de RB, uma vez que o material com maiores quantitativos de RB mostrou-se mais suscetível ao dano por umidade induzida. Quanto aos aspectos econômicos e ambientais, as misturas mostram-se como uma alternativa sustentável do ponto de vista da empresa que fornecerá o material, e quanto maior o percentual de RB na produção de misturas asfálticas menores são os custos de dispor esse material, devendo seu impacto ser analisado a longo prazo. Portanto, o resíduo de bauxita apresenta potencial para ser utilizado na indústria da pavimentação asfáltica, entretanto sua aplicação deve ser analisada a longo prazo com testes em campo que validem os resultados obtidos em laboratório.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a finalidade de aprofundar os resultados encontrados nessa pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas com maiores percentuais de RAP;
- Conduzir estudos para avaliar o desempenho das misturas em condições reais, incluindo tráfego e condições climáticas;
- Avaliar a suscetibilidade das misturas com resíduo à umidade sem fíler e com outros aditivos, como cimento;
- Avaliar o impacto ambiental e econômico da incorporação do resíduo de bauxita em misturas asfálticas, incluindo análise do ciclo de vida.
- Verificar o impacto do uso de RB em misturas asfálticas na performance ESG (*Environmental, Social, Governance*) das empresas de mineração responsáveis pela geração de resíduo.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 9935: Agregados - Terminologia.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2011.

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

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

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

ABNT. **NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

ABO-QUDAIS, S.; AL-SHWEILY, H. Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 9, p. 1886-1898, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas.** Brasília: ANM, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **RAL (Relatório Anual de Lavra).** ANM, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeitos de minério de ferro em pavimentos rodoviários**. ANTT, 2018.

AGUIRRE, M. Recuperação de metais a partir da lama vermelha. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2015.

ALMEIDA JUNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 115 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2172**: Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 36M-14**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4402M**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5M**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6373**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Estados Unidos, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6925**: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor. Estados Unidos, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7405**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. Estados Unidos, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7653**: Standard Test

Method for Determination of Trace Gaseous Contaminants in Hydrogen Fuel by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Estados Unidos, 2018.

ANGOTTI, M. AND FERREIRA, A.C.S. Contribuições dos anos 1970 à Contabilidade Socioambiental e reflexões para pesquisas futuras: um survey com pesquisadores brasileiros. **In: VI GECAMB**. Barcelos, Portugal, p.1–19, 2016.

ANJOS, F. V., SILVA, J. B. As usinas de produção de alumínio da ALCAN no Brasil - processo Bayer para produção de alumina e os processos eletrolíticos para a produção de alumínio. **As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos, ABM, São Paulo**, 1983.

ANTUNES, M. L. P., CONCEIÇÃO, FT DA, NAVARRO, G. R. B. Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações. **In: International Workshop Advances in Cleaner Production**. 2011.

APAZA, F. R. A., GUIMARÃES, A. C. R., VIVONI, A. M., SCHRODER, R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121020, 2021.

APOLINARIO, R. H. P. **Economia circular na indústria de mineração: barreiras para difusão da inovação ambiental**. 2020. 197 f. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) - Centro Universitário FEI, São Paulo, 2020.

ARAUJO, E. R., OLIVIERI, R. D., FERNANDES, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. p. 1-12. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

ARMSTRONG, M., LANGRENÉ, N., PETTER, R., CHEN, W., & PETTER, C. Accounting for tailings dam failures in the valuation of mining projects. **Resources Policy**, v. 63, p. 101461, 2019.

ARRUDA, S. M. **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Hot-Mix Recycling. Manual Series N°. 20 (MS-20)**, Second Edition. 1986.

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt binder handbook. Manual Series N° 26 (MS-26)**, First Edition. March. 2011.

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt handbook. Manual Series, N° 4 (MS-4)**, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017. **Bauxita no Brasil, Mineração Responsável e Competitividade**. ABAL, São Paulo, 61p. Disponível em: http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf. Acesso em 30/07/2023.

ASSUNÇÃO, G. M. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 2, p. 223-231, 2019.

ATASOY, A. Reduction of ferric oxides in the red mud by the aluminum thermic process. In: **6th International Advanced Technologies Symposium (IATS '11)**. 2011. p. 16-18.

AURANGZEB, Q., AL-QADI, I. L., OZER, H., YANG, R. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 83, p. 77-86, 2014.

BABADOPULOS, L. F. de A. L. **A Contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BAGAMPADDE, U., ISACSSON, U., KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. **The international journal of pavement engineering**, v. 6, n. 4, p. 229-239, 2005.

BARI, J., WITCZAK, M. W. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, 2006.

BARROS, A. G. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

BASTOS, L. A. D. C., SILVA, G. C., MENDES, J. C., PEIXOTO, R. A. F. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 10, p. 1–9, 2016.

- BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos e bauxita**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- BENACHIO, G. L. F., FREITAS, M. D. C. D., TAVARES, S. F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, 121046, 2020.
- BENARCHID, Y., TAHA, Y., ARGANE, R., TAGNIT-HAMOU, A., BENZAAZOUA, M. Concrete containing low-sulphide waste rocks as fine and coarse aggregates: Preliminary assessment of materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 419-429, 2019.
- BERTOCCHI, A. F., GHIANI, M., PERETTI, R., Z. A. Red mud and fly ash for remediation of mines sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb e Zn. **Journal Hazard Mater**, v. 134, p. 112 -119, 2006.
- BHERING, C. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- BIRGISSON, B., ROQUE, R., KIM, J., PHAM, L. V. **THE use of complex modulus to characterize the performance of asphalt mixtures and pavements in Florida**. Final Report, p. 4910-4501, 2004.
- BONA, A. C. D., SILVEIRA, V. L., GUIMARÃES, A. C. R., SILVA, C. N. P. Estudo sobre reciclagem da escória de aciaria em camadas de pavimentos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 11(3), 167-183, 2020.
- BRASIL, CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama**, v. 237, p. 97, 1997. Disponível em:
https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237. Acesso em: 07/08/2023.
- BRASIL. Lei Federal Nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Institui a Política Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938compilada.htm
Acesso em: 31/08/2023.
- BRASIL. Lei Nº 12305, de 02 ago. 2012. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm Acesso em: 14/09/2023.

BRUSCHI, G. J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

CADORE, S., MATOSO, É., SANTOS, M. C. A espectrometria atômica e a determinação de elementos metálicos em material polimérico. **Química Nova**, v. 31, p. 1533-1542, 2008.

CALA, A., CARO, S., LLERAS, M., ROJAS-AGRAMONTE, Y. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 661-672, 2019.

CAMPOLI, J. S., FEIJÓ, J. R. **Preço do carbono para projetos de investimentos de infraestrutura no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11449>. Acesso em: 02/02/2024.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B.H. **Análise de investimentos: Matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão**. Vertice, 1987.

CELAURO, C., CORRIERE, F., GUERRIERI, M., LO CASTO, B. Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 34, p. 41-51, 2015.

CENTOFANTE, R., SPECHT, L. P., ALMEIDA JUNIOR, P. O. B. D., PINHEIRO, R. J. B., & PEREIRA, D. D. S. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12178, 2018.

CHOUDHARY, J., KUMAR, B., GUPTA, A. Application of waste materials as fillers in bituminous mixes. **Waste Management**, v. 78, p. 417-425, 2018.

CHOUDHARY, R., KUMAR, A., RAHMAN, G. Rheological and mechanical properties of bauxite residue as hot mix asphalt filler. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 12, n. 6, p. 623-631, 2019.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Report No. FHWA-HRT-11-021**. Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2011.

COSTA, D. B. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de Mohr Coulomb**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

CHRISTENSEN JR, D. W., PELLINEN, T., BONAQUIST, R. F. Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 72, 2003.

CUNHA, C. B., BUDNY, J., KLAMT, R. A., CENTOFANTE, R., BARONI, M. Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

DA MOTTA, R. S. Valoração e precificação dos recursos ambientais para uma economia verde. **Ambiental**, v.8, p.179, 2011.

DE CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Texto para Discussão, 2011.

DE FREITAS MARQUES ARAÚJO, P., SILVA, P. M. P., DO CARMO, A. L. V., GOMES, F. G., DOS SANTOS, A. M., DA COSTA, R. V., MONTINI, M. Bayer process towards the circular economy—Metal recovery from bauxite residue. **Light Metals 2020**. Springer International Publishing, 2020. p. 98-106.

DE OLIVEIRA, I. C. S.; FAXINA, A. L. Rejeito de minério de ferro como agregado mineral fino em misturas asfálticas. **Transportes**, v. 29, n. 3, p. 2391-2391, 2021.

DE SÁ FERNANDEZ, S. D., SÁ, T. S. W., ODA, S..Análise da viabilidade técnica da adição de rejeito de mineração em materiais para pavimentos rodoviários. **Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana**, v. 4, n. 00, 2023.

DE SOUZA, T. D., DE ALBUQUERQUE, B. H., GUIMARÃES, A. C. R., MESQUITA, A. R. Propriedades mecânicas de concretos asfálticos dosados com rejeitos do beneficiamento magnético a seco do minério de ferro. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031**: Concreto asfáltico - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 033**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 035:** Agregados- determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 078:** Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 180:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 183:** Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 184:** Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 367:** Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 412:** Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 413:** Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 415:** Pavimentação – Mistura asfáltica – Teor de vazios de agregados miúdos não compactados – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 416:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 424:** Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 429:** Agregados – Determinação da porcentagem de partículas achatadas e alongadas em agregados graúdos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 430:** Agregados – Determinação da porcentagem de partículas fraturadas em agregados graúdos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Resolução Nº14, de 08 de julho de 2021.** Dispõe sobre o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Diário Oficial da União, nº 129, 12 de julho de 2021.

DONG, Z., LIU, Z., WANG, P., GONG, X. Nanostructure characterization of asphalt-aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy. **Fuel**, v. 189, p. 155-163, 2017.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

EDWARDS, J., BURN, S., CROSSIN, E., & OTHMAN, M. (2018). Life cycle costing of municipal food waste management systems: The effect of environmental externalities and transfer costs using local government case studies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 118-129, 2018.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: accelerating the scale-up across global supply chains**. Isle of Wight: EMF, v. 1, 2014.

ESHET, T., AYALON, O., SHECHTER, M. Valuation of externalities of selected waste management alternatives: A comparative review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, n. 4, p. 335-364, 2006.

ETIM, R. K.; EBEREMU, A. O.; OSINUBI, K. J. Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture. **Transportation Geotechnics**, v. 10, p. 85-95, 2017.

EVANS, K. The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 2, n. 4, p. 316-331, 2016.

FLORES, G., GALLEGO, J., MIRANDA, L., MARCOBAL, J. R. Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content. **Construction and Building Materials**, v. 250, 2020.

FONSECA, J. F.; GÓIS, T. S.; DOMINICINI, W. K.; TEIXEIRA, J. E. S. L. O estado da arte sobre o uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo. **Congresso de Pesquisas e Ensino em Transportes, Curitiba, PR**. 2014.

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, p. 541, 2009.

FRITZEN, M. A., FRANCO, F. A. C. P., MOTTA, L. M. G., UBALDO, M. O., NASCIMENTO, L. A. H. Classificação de misturas asfálticas quanto a performance à fadiga. In: **Congresso Rodoviário Português**. 2019.

GABRIEL BASTIDAS-MARTÍNEZ, J., CAMAPUM DE CARVALHO, J., LUCENA CRISTHIANE, L., MUNIZ DE FARIAS, M., & ALEXANDER RONDÓN-QUINTANA, H. Effects of iron ore tailing on performance of hot-mix asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 1, p. 04021405, 2022.

GAO, Y., ZHANG, Y., GU, F., XU, T., & WANG, H. Impact of minerals and water on bitumen-mineral adhesion and debonding behaviours using molecular dynamics simulations. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 214-222, 2018.

GARCIA, M. C. S. **Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo Bayer por tratamento térmico**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GENG, Y.; FU, J., SARKIS, J., XUE, B. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. **Journal of cleaner production**, v. 23, n. 1, p. 216-224, 2012.

GITMAN, Lawrence J. **Princípios de Administração Financeira**, 7ª ed. São Paulo, 2010.

GONÇALVES, R. R. S. **Comportamento Geomecânico de Rejeito de Bauxita sob Diferentes Condições de Confinamento e Carregamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

GOUVEIA, B. C. S. **Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2016.

GUO, M., TAN, Y., HOU, Y., WANG, L., WANG, Y. Improvement of evaluation indicator of interfacial interaction between asphalt binder and mineral fillers. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 236-245, 2017.

GUO, N., YOU, Z., ZHAO, Y., TAN, Y., & DIAB, A. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 141-149, 2014.

GUO, T., YANG, H., LIU, Q., GU, H., WANG, N., YU, W., & DAI, Y. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud. **Water Sci. Technol.** 2018.

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

HAJJAJI, W., ANDREJKOVIČOVÁ, S., ZANELLI, C., ALSHAAER, M., DONDI, M., LABRINCHA, J. A., & ROCHA, F. Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 52, p. 648-654, 2013.

HAN, S., CHENG, X., LIU, Y., & ZHANG, Y. Laboratory performance of hot mix asphalt with high Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Fine Reclaimed Asphalt Pavement (FRAP) content. **Materials**, v. 12, n. 16, p. 2536, 2019.

HARNISH, I. C. Liquid anti-strip technology & best practices. **ArrMaz Custom Chemicals**, 2010.

HILDEBRANDO, E. A., SOUZA, J. A. D. S., ANGÉLICA, R. S., & NEVES, R. D. F. Application of bauxite waste from Amazon region in the heavy clay industry. **Materials Research**, v. 16, p. 1418-1422, 2013.

HOLANDA, R. B., SILVA, P. M. P., DO CARMO, A. L. V., CARDOSO, A. F., DA COSTA, R. V., DE MELO, C. C. A., & MONTINI, M. Bayer process towards the circular economy—Soil conditioners from bauxite residue. **Light Metals 2020**. Cham: Springer International Publishing, p. 107-114, 2020.

HU, L.; WU, H.; ZHANG, L.; ZHANG, P.; WEN, Q. Geotechnical properties of mine tailings. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016220, 2017.

HUANG, B.; ZHANG, Z.; KINGERY, W.; ZUO, G. Fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP. In: **Fifth Int RILEM Conf Reflective Crack Pavements**. 2004. p. 631-638.

HYDRO. **Annual Report**. Norsk Hydro. Oslo, Noruega, p. 220, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. IPEA, 2012.

INSTITUTO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO (IAI). **Sustainable bauxite residue management guidance**. International Aluminium Institute. World Aluminium. 2022.

JIANG, H., ZHANG, J., SUN, C., LIU, S., LIANG, M., & YAO, Z. Experimental assessment on engineering properties of aged bitumen incorporating a developed rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 1-10, 2018.

JOYCE, P. J.; BJÖRKLUND, A. Using life cycle thinking to assess the sustainability benefits of complex valorization pathways for bauxite residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 5, n. 1, p. 69-84, 2019.

KATO, R.B. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 147f. 2016.

KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 475–493, 2017.

LAGOS-VARAS, M.; MOVILLAQUESADA, D.; RAPOSEIRAS, A. C.; ARENAS, J. P.; CALZADA-PÉREZ, M. A.; VEGA-ZAMANILLO, A.; LASTRA-GONZÁLEZ, P. Influence of limestone filler on the rheological properties of bituminous mastics through susceptibility master curves. **Construction and Building Materials**, v. 231, 2020.

LEMOUGNA, P.N.; WANG, K.T.; TANG, Q.; CUI, X. Synthesis and characterization of low temperature (<800 °C) ceramics from red mud geopolymer precursor. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 564-573, 2017.

LI, R., ZHANG, T., LIU, Y., LV, G., & XIE, L. Calcification–carbonation method for red mud processing. **Journal of Hazardous Materials**, v. 316, p. 94-101, 2016.

LIBERATO, C. C., ROMANO, R. C. D. O., MONTINI, M., GALLO, J. B., GOUVEA, D., & PILEGGI, R. G. Effect of bauxite residue calcination on rheological and hardened properties of suspensions with Portland cement. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 53-61, 2012.

LIMA, M. S. S. **Avaliação do emprego de lama vermelha no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas a quente**. Dissertação, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2015.

LIMA, M. S.S; THIVES, L. P. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119894, 2020.

LIU, G., YANG, T., LI, J., JIA, Y., ZHAO, Y., & ZHANG, J. Effects of aging on rheological properties of asphalt materials and asphalt-filler interaction ability. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 501-511, 2018.

LO PRESTI, D.; JIMÉNEZ DEL BARCO CARRIÓN, A.; AIREY, G.; HAJJ, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. **Journal of cleaner production**, v. 131, p. 43-51, 2016.

LOURENÇO, R. R. **Aplicação do resíduo de bauxita como fonte de Al₂O₃ e Fe₂O₃ na preparação de clínqueres de cimentos portland**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2013.

LUCAS JUNIOR, J. L.; BABADOPULOS, L. F.; SOARES, J. B. Aggregate–binder adhesiveness assessment and investigation of the influence of morphological and physico-chemical properties of mineral aggregates. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. sup1, p. S79-S94, 2019.

MANFROI, E. P. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassa.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis/SC, p. 151 p. 2009.

MANTALOVAS, K.; DI MINO, G. Integrating Circularity in the Sustainability Assessment of Asphalt Mixtures. **Sustainability**, v. 12, 2020.

MARIYAPPAN, R., PALAMMAL, J. S., BALU, S. Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 16, p. 45587-45606, 2023.

MCDANIEL, R.; ANDERSON, M.R. **NCHRP REPORT 452 - Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual.** National Research Council (US). Transportation Research Board, 2001.

MELO NETO, O. M. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja.** (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MELO, C. C. A., PAZ, S. P. A., & ANGÉLICA, R. S Sodalite phases formed from kaolinite under bayer-type conditions. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 2017.

MENDES, L. P. T., BEZERRA, A. L. R., VARELA, G. G. T., GUEDES, L. R., & DE SOUZA, M. C. R. **UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA PAVIMENTAÇÃO: UMA REVISÃO DE LITERATURA.** 6° ConReSol, v-004.

MERCURY, J. M., GALDINO, L. G., VASCONCELOS, N. D. S. L. S., PAIVA, A. E. M., CABRAL, A. A., ANGÉLICA, R. S. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 15, p. 445-460, 2010.

MERCURY, J.M.R.; CABRAL, A.A.; PAIVA, A.E.M., ANGELICA, R.S.; NEVES, R.F.; SCHELLER, T. Thermal behavior and evolution of the mineral phases of Brazilian red mud. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 104, n. 2, p. 635-643, 2011.

MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A. H., PÉREZ-JIMÉNEZ, F. E., BOTELLA, R., & ÁLVAREZ, A. Effect of filler nature and content on the bituminous mastic behaviour under cyclic loads. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 33-42, 2017.

MOGHADDAM, T. B.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 805-816, 2016.

MOGHADDAM, T. B.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 805-816, 2016.

MORAES, S.L.; MOTTA, F.G.; MASSOLA, C.P.; SACCOCCIO, E.M.; CABRAL JÚNIOR, M. **Rejeitos de mineração: Um olhar do cenário brasileiro - Parte I: Cadeia produtiva**. 18º Simpósio de Mineração. São Paulo, SP, 02 a 06 outubro, 2017.

MOTTA, D. R., BERNUCCI, L. B., & CRISTINA DE FARIA, V. Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidas com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes. **Revista ANTT, Brasília**, v. 4, n. 2, p. 140-151, 2012.

MUKIZA, E., ZHANG, L., LIU, X., ZHANG, N. Utilization of red mud in road base and subgrade materials: A review. **Resources, conservation and recycling**, v. 141, p. 187-199, 2019.

NASCIMENTO, L. A. H. DO. Critérios Para Flow Number - Camada Final De Revestimento Asfáltico. **Relatório Interno**, CENPES - PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2014.

NASCIMENTO, LAH do. Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. **Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro**, 2008.

NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e fotooxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). USP/São Carlos. 2015.

NEMATI, Rasool; DAVE, Eshan V. **Generalized Regression Approach to Develop Predictive Models for Dynamic Modulus and Phase Angle of Asphalt Mixtures**. 2017.

NGUYEN, L. N., LE, T. H., NGUYEN, L. Q., & TRAN, V. Q. Machine learning approaches for predicting Cracking Tolerance Index (CTIndex) of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement. **Plos one**, v. 18, n. 10, p. e0287255, 2023.

NOFERINI, L., SIMONE, A., SANGIORGI, C., & MAZZOTTA, F. Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 10, n. 4, p. 322-332, 2017.

NOGUEIRA, D. R. S. **Compósitos magnéticos aplicados à concentração magnética de rejeitos e economia circular**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NOGUEIRA, M. G. **Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2008

OLIVEIRA, B. I. F.. **Avaliação do custo do ciclo de vida de materiais cimentícios: estudo para argamassas industrializadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.

OLIVEIRA, M. S., DE FARIAS, M. M., SILVA, J. P. S. Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01132, 2022.

OLIVEIRA, M. S. **Análise da fadiga em misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2020.

PAZOS, A. G. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015

PERSAUD, S., YOU, W. L. Examining the Bauxite Residue Management Framework in Jamaica. 2022.

PINTO, S., PREUSLLER, E. S. Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. 2ª Edição. **Rio de Janeiro: Synergia Editora, IBP**, 2010.

PIVETTA, F. C., NASCIMENTO, L. A. H., BRITO, L. A. T. Proposta de protocolo de ensaio para análise de regeneração em misturas asfálticas através do modelo S-VECD. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 4, p. 38-52, 2020.

POWER, G., GRÄFE, M., KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1-2, p. 33-45, 2011.

PULFORD, I. D., HARGREAVES, J. S. J., ĎURIŠOVÁ, J., KRAMULOVA, B., GIRARD, C., BALAKRISHNAN, M., & RICO, J. L. Carbonised red mud—a new water treatment product made from a waste material. **Journal of Environmental Management**, v. 100, p. 59-64, 2012.

QIN, X., SHEN, A., GUO, Y., LI, Z., & LV, Z. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 508-516, 2018.

QUARESMA, D. D. S. **Estudo hidrometalúrgico de compostos de titânio proveniente do resíduo do processo Bayer**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, PA, p. 107. 2012.

RADHAKRISHNAN, V., SRI, M. R., & REDDY, K. S. Evaluation of asphalt binder rutting parameters. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 298-307, 2018.

RAFIQ, W., MUSARAT, M. A., ALTAF, M., NAPIAH, M., SUTANTO, M. H., ALALOUL, W. S., JAVED, M.F., MOSAVI, A. Life cycle cost analysis comparison of hot mix asphalt and reclaimed asphalt pavement: A case study. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4411, 2021.

RAMOS, B. F. **Indicadores de qualidade dos resíduos da construção civil do município de Vitória-ES**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

RENAUD, C. L. R. S. A. **Module de rigidité et comportement em fatigue des enrobés bitumineux. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse**. These pour l'obtention du grade de docteur. Ecole Centrale Paris, 1996.

RIBEIRO, D. V., SILVA, M. A. S., LABRINCHA, J. A., & MORELLI, M. R. Estudo de Eventuais Patologias Associadas ao Uso da Lama Vermelha em Argamassas Colantes e de Revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 16, n. 1, p. 31-42, 2011.

ROBERTS, F. L.; KANDHAK, P. S.; BROWN, E.; RAY, D.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. Nacional Asphalt Pavement Association Education Foundation 2 ed., Lanham, 1996.

ROMANO, R. C. D. O., MESQUITA, J. A. F. S. D., BERNARDO, H. M., NIZA, D. A., MACIEL, M. H., CINCOTTO, M. A., & PILEGGI, R. G. Combined evaluation of oscillatory rheometry and isothermal calorimetry for the monitoring of hardening stage of Portland cement compositions blended with bauxite residue from Bayer process generated in different sites in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, 2021.

ROSS, S., WESTERFIELD, R., JORDAN, B. *Fundamentals of corporate finance standard*. São Paulo: McGraw Hill, 2010.

SÁ, T. S. W., ODA, S., TOLEDO FILHO, R. D., LOUBACK, V. K. C. B., & BALTHAR, M. Uso de rejeitos de mineração em pavimentos rodoviários: um referencial teórico. **QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**, v. 1, n. 1, p. 152-172, 2021.

SAMAL, SNEHA; RAY, AJOY K.; BANDOPADHYAY, AMITAVA. Characterization and microstructure observation of sintered red mud–fly ash mixtures at various elevated temperature. **Journal of cleaner production**, v. 101, p. 368-376, 2015.

SANT’ANA FILHO, J. N. **Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos intertravados de uso em pátios industriais e alto tráfego**. 2013. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – CEFET – Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 121f.

SANTOS, C. **Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SCHRECK, Richard J. More RAP in HMA: Is it Worth It? The 2007 Virginia RAP Initiative. **HMAT: Hot Mix Asphalt Technology**, v. 12, n. 4, 2007.

SEFFF, L.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 163-170, 2011.

SGLAVO, V. M., CAMPOSTRINI, R., MAURINA, S., CARTURAN, G., MONAGHEDDU, M., BUDRONI, G., & COCCO, G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 1: Thermal behaviour. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 3, p. 235-244, 2000.

SGLAVO, V. M., MAURINA, S., CONCI, A., SALVIATI, A., CARTURAN, G., & COCCO, G. Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 3, p. 245-252, 2000.

SHU, S.; CHUANYI, Z.; RUIBO, R.; BAODONG, X.; KUN, C.; GEN, L. SHU, Shiqi et al. Effect of Different Anti-Stripping Agents on the Rheological Properties of Asphalt. **Coatings**, v. 12, n. 12, p. 1895, 2022.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. D. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. XII, n. 2, p. 322-338, 2007.

SILVA, A., BATISTA, L. S., ANDRADE, S. S. F., LEAL, J., & COSTA, D. Estudo da reutilização de rejeito de scheelita em substituição do agregado miúdo na composição de misturas asfálticas. In: **2º Congresso Sul-americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**. Foz do Iguaçu: Corensol, 2019.

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. *Rev. Espaço Sophia*, n.8. 2007.

SILVEIRA, N. C., MARTINS, M. L., BEZERRA, A. C., & ARAÚJO, F. G. Red mud from the aluminium industry: production, characteristics, and alternative applications in construction materials—a review. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12741, 2021.

SIMONSEN, A. M. T., SOLISMAA, S., HANSEN, H. K., & JENSEN, P. E. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. **Waste Management**, v. 102, p. 710-721, 2020.

SINGH, D.; SHOWKAT, B.; SAWANT, D. A study to compare virgin and target asphalt binder obtained from various RAP blending charts. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 109-123, 2019.

SINGH, D., ZAMAN, M., COMMURI, S. Artificial neural network modeling for dynamic modulus of hot mix asphalt using aggregate shape properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 1, p. 54-62, 2012.

SIQUEIRA, M. V. **Influência da umidade e do envelhecimento térmico em misturas asfálticas à quente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2023.

SMITH, V. H., SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here ?. **Trends in ecology & evolution**, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009.

SOARES, J. B., FREITAS, F. A. C., BRANCO, J. C., MOTTA, L. M. G. Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ. **32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv**, v. 1, p. 148-160, 2000.

SOUSA, J.G.M. **Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 122f. 2017.

SOUSA, JGM. **Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação**. 2017. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 122f.

SOUZA, G. M. D., AMORIM, E. F., ANJOS, M. A. S. D., & FRANÇA, F. A. N. D. Estudo de misturas compostas por resíduos de scheelita e solos destinados a pavimentação. **Ambiente Construído**, v. 23, p. 117-137, 2023.

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**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará.

STIVAL, L. T., BARROS, R. G., & DA VEIGA, R. M. OS INSTRUMENTOS LEGAIS DE GESTÃO AMBIENTAL E SUA RELAÇÃO COM OS PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 73, p. 70-85, 2020.

SU, B.; HESHMATI, A.; GENG, Y.; YU, X. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal of cleaner production**, v. 42, p. 215-227, 2013.

SUZUKI, K.Y. Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019.

TAKAHASHI, M. M. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo. 2020.
TERREL, R.L., AL-SWAILMI, S. **Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: test selection**. 1994.

TONIAL, I.A. **Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2001.

TORRES, P. R. B., LUCENA, A. E. D. F. L., DE SOUSA, T. M., KRAU, M. M. T., LUZ, P. M. S. G., & DE LIMA BARBOSA, L. F. Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **Transportes**, v. 30, n. 1, p. 2585-2585, 2022.

TSAKIRIDIS, PETROS E., AGATZINI-LEONARDOU, STYLIANI, OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials**, v. 116, n. 1-2, p. 103-110, 2004.

TUR RASOOL, R., HONGRU, Y., HASSAN, A., WANG, S., & ZHANG, H. In-field aging process of high content SBS modified asphalt in porous pavement. **Polymer Degradation and Stability**, v. 155, p. 220-229, 2018.

ULRICH, B. Practical thoughts regarding filtered tailings. In: **Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings**. Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 71-79.

UPADHYAY, A., LAING, T., KUMAR, V., DORA, M. Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. **Resources Policy**, v. 72, p. 102037, 2021.

VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. Willey Series in Geotech. Eng. 1983.

VIEGAS, B. M., MAGALHÃES, E. M., SOUZA, J. A. D. S., & MACÊDO, E. N. (. A influência da temperatura nas transformações de fases dos minerais presentes na lama vermelha: redução da hematita à magnetita. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12594, 2020.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. P. 461. 2002.

VON PAUMGARTTEN, M. D., REIS, F. J. L., DE SOUZA PIKANÇO, M., MACEDO, A. N., DA COSTA, D. D. S. R., & DOS SANTOS, A. C. M. Caracterização e avaliação do índice de atividade pozolânica de lama vermelha e resíduo de manganês para produção de misturas ternárias cimentícias. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 85965-85979, 2021.

WEI, Z., JIA, Y., WANG, S., LI, Z., LI, Y., WANG, X., & GAO, Y. Utilization of iron ore tailing as an alternative mineral filler in asphalt mastic: High-temperature performance and environmental aspects. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, p. 130318, 2022.

WELP SÁ, T. S., TOLEDO FILHO, R. D., ODA, S., BALTHAR, V. K. C. B. L. M. Utilização de rejeitos de minério de ferro em camadas estruturais de pavimentos. **ENCONTRO**

NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, v. 6, p. 495-509, 2019.

WHITEOAK, D. Shell Bitumen Handbook,” Shell Bitumen UK, Riversdell House, 1990.

WILLIAMS, R., ZINK, D., O’BRIEN, S. Filtered tailings adds value in cost competitive industries. In: **Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings**. University of Science and Technology Beijing, p. 363-370, 2017.

WITCZAK, M. W. **Simple performance tests: Summary of recommended methods and database**. Transportation Research Board, 2005.

XAVIER, M. D. F., FERREIRA, W. L. G., BRANCO, V. T. F. C. Evaluation of coal ash use as an adhesion improver in asphalt mixtures. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.

XU, X., YU, J., XUE, L., HE, B., DU, W., ZHANG, H., LI, Y. Effect of reactive rejuvenating system on physical properties and rheological characteristics of aged SBS modified bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 35-42, 2018.

XUE, S., KONG, X., ZHU, F., HARTLEY, W., LI, X., LI, Y. Proposal for management and alkalinity transformation of bauxite residue in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 12822-12834, 2016.

YAO, Z., ZHANG, J., GAO, F., LIU, S., YU, T. Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 217-224, 2018.

ZANTA, V. M., FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. **AB de Castilho Júnior (Coordenador), Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. São Carlos, SP: Rima Artes e Textos, 2003.

ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., FRANK, R. 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 92, p. 230-245, 2014.

ZHANG, H., LI, H., ZHANG, Y., WANG, D., HARVEY, J., & WANG, H. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler. **Construction and building materials**, v. 160, p. 707-713, 2018a.

ZHANG, J., APEAGYEI, A. K., AIREY, G. D., & GRENFELL, J. R. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 62, p. 45-54, 2015.

ZHANG, J., LIU, S., YAO, Z., WU, S., JIANG, H., LIANG, M., & QIAO, Y. Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 605-613, 2018b.

ZHANG, J., SUN, C., LI, P., LIANG, M., JIANG, H., YAO, Z. Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 159-166, 2019.

ZHANG, J., YAO, Z., WANG, K., WANG, F., JIANG, H., LIANG, M., & AIREY, G. Sustainable utilization of bauxite residue (Red Mud) as a road material in pavements: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121419, 2021.

ZHANG, J., YAO, Z., WANG, K., WANG, F., JIANG, H., LIANG, M., AIREY, G. Properties analysis of asphalt binders containing Bayer red mud. **Materials**, v. 13, n. 5, p. 1122, 2020.

ZHANG, K., HUCHET, F., HOBBS, A. A review of thermal processes in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 609-619, 2019.

ZHANG, R., ZHENG, S., MA, S., & ZHANG, Y. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 189, n. 3, p. 827-835, 2011.

ZHANG, J., LI, P., WANG, K., MA, C., LIANG, M., JIANG, H., YAO, K., SU, C., YAO, Z. Adhesive behavior and pavement performance of asphalt mixtures incorporating red mud as a filler substitute. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123855, 2021.

ZHAO, S., HUANG, B., SHU, X., WOODS, M. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 92-100, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DAS ALTERNATIVAS ANALISADAS

Item	Período (ano)				
	1	2	3	4	5
Situação 1: não há utilização do RB, custos externos não contabilizados					
Custos internos (disposição)	R\$ 446.330.000,00	R\$ 466.861.180,00	R\$ 461.951.550,00	R\$ 460.612.560,00	R\$ 460.612.560,00
Benefícios	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Fluxo	-R\$ 446.330.000,00	-R\$ 466.861.180,00	-R\$ 461.951.550,00	-R\$ 460.612.560,00	-R\$ 460.612.560,00
VPL	-R\$ 1.347.539.051,04				
Situação 2: não há utilização do RB, custos externos contabilizados					
Custos internos + externos (disposição)	R\$ 580.772.000,00	R\$ 601.303.180,00	R\$ 596.393.550,00	R\$ 595.054.560,00	R\$ 595.054.560,00
Benefícios	0	0	0	0	0
Fluxo	-R\$ 580.772.000,00	-R\$ 601.303.180,00	-R\$ 596.393.550,00	-R\$ 595.054.560,00	-R\$ 595.054.560,00
VPL	-R\$ 1.742.000.776,98				
Situação 3: utilização de 5% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 589.451.394,43	R\$ 610.381.826,46	R\$ 605.376.723,14	R\$ 604.011.694,97	R\$ 604.011.694,97
Benefícios	R\$ 69.531.931,61	R\$ 71.989.992,56	R\$ 71.402.195,38	R\$ 71.241.887,06	R\$ 71.241.887,06
Fluxo	-R\$ 519.919.462,82	-R\$ 538.391.833,89	-R\$ 533.974.527,77	-R\$ 532.769.807,91	-R\$ 532.769.807,91
VPL	-R\$ 1.559.647.149,59				
Situação 4: utilização de 10% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 598.130.786,36	R\$ 619.460.470,41	R\$ 614.359.893,79	R\$ 612.968.827,44	R\$ 612.968.827,44
Benefícios	R\$ 139.063.863,23	R\$ 143.979.985,12	R\$ 142.804.390,76	R\$ 142.483.774,11	R\$ 142.483.774,11
Fluxo	-R\$ 459.066.923,13	-R\$ 475.480.485,29	-R\$ 471.555.503,03	-R\$ 470.485.053,33	-R\$ 470.485.053,33
VPL	-R\$ 1.377.293.514,86				
Situação 5: utilização de 15% de resíduo na composição de misturas asfálticas (custos externos contabilizados)					

Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 606.810.178,28	R\$ 628.539.114,37	R\$ 623.343.064,43	R\$ 621.925.959,91	R\$ 621.925.959,91
Benefícios	R\$ 208.595.794,84	R\$ 215.969.977,69	R\$ 214.206.586,14	R\$ 213.725.661,17	R\$ 213.725.661,17
Fluxo	-R\$ 398.214.383,45	-R\$ 412.569.136,68	-R\$ 409.136.478,30	-R\$ 408.200.298,74	-R\$ 408.200.298,74
VPL	-R\$ 1.194.939.880,14				

**APÊNDICE B - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ESTRATÉGIA DE UTILIZAÇÃO DO
RB EM MISTURAS ASFÁLTICAS PARA O PERCENTUAL DE 5%**

Item	Período (ano)				
	1	2	3	4	5
50 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 589.451.394,43	R\$ 610.381.826,46	R\$ 605.376.723,14	R\$ 604.011.694,97	R\$ 604.011.694,97
Benefícios	R\$ 69.531.931,61	R\$ 71.989.992,56	R\$ 71.402.195,38	R\$ 71.241.887,06	R\$ 71.241.887,06
Fluxo	-R\$ 519.919.462,82	-R\$ 538.391.833,89	-R\$ 533.974.527,77	-R\$ 532.769.807,91	-R\$ 532.769.807,91
VPL	-R\$ 1.559.647.149,59				
100 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 597.056.812,05	R\$ 618.337.093,18	R\$ 613.248.330,30	R\$ 611.860.485,88	R\$ 611.860.485,88
Benefícios	R\$ 69.531.931,61	R\$ 71.989.992,56	R\$ 71.402.195,38	R\$ 71.241.887,06	R\$ 71.241.887,06
Fluxo	-R\$ 527.524.880,44	-R\$ 546.347.100,61	-R\$ 541.846.134,92	-R\$ 540.618.598,82	-R\$ 540.618.598,82
VPL	-R\$ 1.582.609.077,21				
150 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 604.662.229,68	R\$ 626.292.359,90	R\$ 621.119.937,45	R\$ 619.709.276,79	R\$ 619.709.276,79
Benefícios	R\$ 69.531.931,61	R\$ 71.989.992,56	R\$ 71.402.195,38	R\$ 71.241.887,06	R\$ 71.241.887,06
Fluxo	-R\$ 535.130.298,07	-R\$ 554.302.367,34	-R\$ 549.717.742,08	-R\$ 548.467.389,73	-R\$ 548.467.389,73
VPL	-R\$ 1.605.571.004,83				
200 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 612.267.647,30	R\$ 634.247.626,62	R\$ 628.991.544,61	R\$ 627.558.067,70	R\$ 627.558.067,70
Benefícios	R\$ 69.531.931,61	R\$ 71.989.992,56	R\$ 71.402.195,38	R\$ 71.241.887,06	R\$ 71.241.887,06
Fluxo	-R\$ 542.735.715,69	-R\$ 562.257.634,06	-R\$ 557.589.349,23	-R\$ 556.316.180,64	-R\$ 556.316.180,64
VPL	-R\$ 1.628.532.932,45				

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ESTRATÉGIA DE UTILIZAÇÃO DO RB EM
MISTURAS ASFÁLTICAS PARA O PERCENTUAL DE 10%**

Item	Período (ano)				
	1	2	3	4	5
50 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 598.130.786,36	R\$ 619.460.470,41	R\$ 614.359.893,79	R\$ 612.968.827,44	R\$ 612.968.827,44
Benefícios	R\$ 139.063.863,23	R\$ 143.979.985,12	R\$ 142.804.390,76	R\$ 142.483.774,11	R\$ 142.483.774,11
Fluxo	-R\$ 459.066.923,13	-R\$ 475.480.485,29	-R\$ 471.555.503,03	-R\$ 470.485.053,33	-R\$ 470.485.053,33
VPL	-R\$ 1.377.293.514,86				
100 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 613.341.619,11	R\$ 635.371.001,35	R\$ 630.103.105,60	R\$ 628.666.406,76	R\$ 628.666.406,76
Benefícios	R\$ 139.063.863,23	R\$ 143.979.985,12	R\$ 142.804.390,76	R\$ 142.483.774,11	R\$ 142.483.774,11
Fluxo	-R\$ 474.277.755,88	-R\$ 491.391.016,23	-R\$ 487.298.714,84	-R\$ 486.182.632,64	-R\$ 486.182.632,64
VPL	-R\$ 1.423.217.362,77				
150 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 628.552.451,86	R\$ 651.281.532,30	R\$ 645.846.317,41	R\$ 644.363.986,07	R\$ 644.363.986,07
Benefícios	R\$ 139.063.863,23	R\$ 143.979.985,12	R\$ 142.804.390,76	R\$ 142.483.774,11	R\$ 142.483.774,11
Fluxo	-R\$ 489.488.588,63	-R\$ 507.301.547,17	-R\$ 503.041.926,65	-R\$ 501.880.211,96	-R\$ 501.880.211,96
VPL	-R\$ 1.469.141.210,67				
200 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 643.763.284,61	R\$ 667.192.063,24	R\$ 661.589.529,22	R\$ 660.061.565,39	R\$ 660.061.565,39
Benefícios	R\$ 139.063.863,23	R\$ 143.979.985,12	R\$ 142.804.390,76	R\$ 142.483.774,11	R\$ 142.483.774,11
Fluxo	-R\$ 504.699.421,38	-R\$ 523.212.078,11	-R\$ 518.785.138,46	-R\$ 517.577.791,28	-R\$ 517.577.791,28
VPL	-R\$ 1.515.065.058,57				

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ESTRATÉGIA DE UTILIZAÇÃO DO RB EM
MISTURAS ASFÁLTICAS PARA O PERCENTUAL DE 15%**

Item	Período (ano)				
	1	2	3	4	5
50 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 606.810.178,28	R\$ 628.539.114,37	R\$ 623.343.064,43	R\$ 621.925.959,91	R\$ 621.925.959,91
Benefícios	R\$ 208.595.794,84	R\$ 215.969.977,69	R\$ 214.206.586,14	R\$ 213.725.661,17	R\$ 213.725.661,17
Fluxo	-R\$ 398.214.383,45	-R\$ 412.569.136,68	-R\$ 409.136.478,30	-R\$ 408.200.298,74	-R\$ 408.200.298,74
VPL	-R\$ 1.194.939.880,14				
100 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 629.626.426,16	R\$ 652.404.909,53	R\$ 646.957.880,90	R\$ 645.472.327,63	R\$ 645.472.327,63
Benefícios	R\$ 208.595.794,84	R\$ 215.969.977,69	R\$ 214.206.586,14	R\$ 213.725.661,17	R\$ 213.725.661,17
Fluxo	-R\$ 421.030.631,32	-R\$ 436.434.931,84	-R\$ 432.751.294,76	-R\$ 431.746.666,47	-R\$ 431.746.666,47
VPL	-R\$ 1.263.825.648,32				
150 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 652.442.674,03	R\$ 676.270.704,69	R\$ 670.572.697,36	R\$ 669.018.695,36	R\$ 669.018.695,36
Benefícios	R\$ 208.595.794,84	R\$ 215.969.977,69	R\$ 214.206.586,14	R\$ 213.725.661,17	R\$ 213.725.661,17
Fluxo	-R\$ 443.846.879,20	-R\$ 460.300.727,01	-R\$ 456.366.111,23	-R\$ 455.293.034,19	-R\$ 455.293.034,19
VPL	-R\$ 1.332.711.416,51				
200 km					
Custos internos (disposição e transporte) + externos	R\$ 675.258.921,91	R\$ 700.136.499,86	R\$ 694.187.513,82	R\$ 692.565.063,09	R\$ 692.565.063,09
Benefícios	R\$ 208.595.794,84	R\$ 215.969.977,69	R\$ 214.206.586,14	R\$ 213.725.661,17	R\$ 213.725.661,17
Fluxo	-R\$ 466.663.127,07	-R\$ 484.166.522,17	-R\$ 479.980.927,69	-R\$ 478.839.401,92	-R\$ 478.839.401,92
VPL	-R\$ 1.401.597.184,70				