

## APLICAÇÃO DA LAMA VERMELHA COMO FÍLER NA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

M. S. S. LIMA, L. P. THIVES\*, L. ROHDE  
Universidade Federal de Santa Catarina  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4782-2496>  
[liseane.thives@ufsc.br](mailto:liseane.thives@ufsc.br)\*

Submitted October 26, 2023 - Accepted November 27, 2023

DOI: 10.15628/holos.2023.16344

### RESUMO

A lama vermelha é o resíduo do beneficiamento da bauxita na produção do alumínio. A disposição inadequada gera prejuízos sociais, econômicos e ambientais. A avaliação da inserção de resíduos industriais na cadeia produtiva é benéfica e necessária. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com lama vermelha como material de enchimento. Foram produzidas misturas asfálticas com 5% e 7% de lama vermelha e realizados ensaios de deformação permanente e de dano por umidade induzida. Uma mistura sem adição de lama

vermelha (controle) foi confeccionada para comparação. Os resultados mostraram que as misturas com lama vermelha apresentaram resistência à deformação permanente superior à mistura controle, com redução de afundamento maior que 40%. O dano por umidade induzida não afetou significativamente as misturas testadas. A aplicação de lama vermelha como fíler em misturas asfálticas é viável e pode ser uma alternativa para reduzir os danos que este resíduo pode causar ao meio ambiente.

**KEYWORDS:** Lama vermelha, Mistura asfáltica, Fíler, Deformação permanente.

### RED MUD APPLICATION AS FILLER IN ASPHALT MIXTURES PRODUCTION

#### ABSTRACT

Red mud is the solid waste from bauxite processing during aluminium production. Its inadequate disposal causes social, economic and environmental prejudices. The industrial solid waste insertion evaluation in the production chain is beneficial and necessary. This work aims to evaluate the mechanical performance of asphalt mixtures produced with red mud as filling material. Asphalt mixtures with 5% and 7% red mud were produced, and permanent deformation and moisture-induced damage tests were carried out. A mixture

without red mud addition (control) was produced for comparison. The results showed that the mixtures with red mud presented permanent deformation resistance greater than the control one, with more than 40% reduction in rutting deformation. The moisture damage did not significantly affect the mixtures tested. The red mud application as a filler in asphalt mixtures is viable and can be an alternative to reduce the damage such a waste can cause to the environment.

**Palavras chave:** Red mud, Asphalt mixture, Filler, Permanent deformation.

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio, as ligas de alumínio e os compósitos à base de alumínio são leves, possuem excelente condutividade térmica e elétrica, baixos custos operacionais e adequada resistência à corrosão. Devido às suas propriedades, esses materiais são amplamente utilizados por diversos setores industriais (Penkova & Miteva, 2022). No entanto, como o alumínio não ocorre naturalmente na forma metálica, o mesmo é produzido pelo refino do minério bauxita em óxido de alumínio (alumina), em cujo processo há geração de resíduos sólidos perigosos (IAI, 2021).

O Brasil é um dos maiores países produtores de bauxita, com 13% da produção e 9% das reservas mundiais (USGS, 2019), o que demonstra a importância econômica deste minério ao país. Em 2021, o Pará, principal estado produtor brasileiro, foi responsável por 89,4% da produção de bauxita bruta, beneficiada e comercializada (BRASIL, 2023). De acordo com o percentual de alumina, sílica e ferro, a bauxita classificada como metalúrgica é usada na produção de alumina e corresponde a 98% da produção nacional, enquanto que a não metalúrgica (refratária) é utilizada na indústria química, produção de abrasivos e cimento (Sampaio, Andrade & Dutra, 2008; Xavier, 2014).

A lama vermelha é o resíduo gerado durante o beneficiamento da bauxita em alumina, matéria-prima da produção de alumínio, realizado por meio do processo Bayer. No processo Bayer, a bauxita é aquecida sob pressão em elevadas temperaturas (280°C). A soda cáustica é usada para dissolver seletivamente alumina e, a maior parte de outros minerais não dissolvidos formam o principal elemento sólido, a lama vermelha (IAI, 2021). Devido ao processo utilizado, além da natureza alcalina, esse resíduo industrial é composto por metais pesados e substâncias tóxicas (Wang & Liu, 2012).

A proporção de lama vermelha gerada e alumina produzida varia de acordo com o método de produção e composição da bauxita. Estudos mostraram que para cada tonelada de alumina produzida podem ser geradas entre 0,3 a 2,5 toneladas de lama vermelha (Ribeiro, Labrincha & Morelli, 2012; Hildebrando, Sousa, Angélica & Neves, 2013). Estima-se que a quantidade de lama vermelha gerada anualmente no mundo é superior a 130 milhões de toneladas (Chen, Wang & Liu, 2023).

Considerando a elevada alcalinidade e dificuldade de emprego direto, a lama vermelha gerada é armazenada. Os principais métodos de disposição são os seguintes: imersão ao mar; lagunagem (em lagoas), empilhamento a seco, eliminação a seco, barragens, diques e aterros sanitários. O método comumente adotado é de empilhamento a seco a céu aberto, o qual requer grandes áreas e causa problemas ambientais como salinização e poluição do solo circundante. A lama vermelha tem o potencial de gerar lixiviados altamente alcalinos, levando à poluição das águas subterrâneas quando permeia o solo. O vento pode transportar partículas minúsculas de lama vermelha, causando poluição atmosférica. Além disso, dependendo da composição da bauxita, a lama vermelha pode conter elementos radioativos e causar poluição física (Lima & Thives, 2020).

A disposição inadequada da lama vermelha no meio ambiente acarretou graves acidentes ambientais no mundo e no Brasil. Um dos acidentes mais severos ocorreu em 2010, na cidade de Ajka, na Hungria, onde cerca 1,1 milhão de metros cúbicos de lama vermelha vazaram de uma

indústria de alumínio recobrando uma área de 40 km<sup>2</sup>, resultando na morte de sete pessoas e mais de outras cem feridas com queimaduras químicas (Matos, 2010). No Brasil, os acidentes ambientais por vazamentos de lama vermelha em 2003, 2009 e 2018, contaminaram os rios Murucupi e Pará, situados no Pará, e afetaram as comunidades ribeirinhas em um raio de dois quilômetros do local do depósito (Brabo, Lima & Santos, 2003; Santos, Jesus & Lima, 2009).

O incidente mais recente no Brasil ocorreu em 2018 na região de Barcarena (Pará). As chuvas intensas na região resultaram em inundações e transbordamento de lama vermelha acumulada nos depósitos da região, poluindo os rios e afetando a população local. O governo do Pará impôs uma multa ambiental e ordenou à refinaria uma redução da produção em 50% da capacidade no depósito de resíduos de bauxita (HYDRO, 2018).

Litovchenko e Shumakova (2022) enfatizaram a importância da tomada de medidas para redução do acúmulo de lama vermelha no entorno das refinarias. Os autores destacaram que, frequentemente, os riscos associados à disposição inadequada da lama vermelha e os respectivos impactos ao ambiente e à saúde humana são subestimados.

Considerando a severidade dos problemas ambientais relativos ao descarte de lama vermelha no meio ambiente, é necessário o desenvolvimento de pesquisas para seu reaproveitamento e reciclagem, cuja viabilidade foi comprovada em estudos anteriores. As aplicações mais abrangentes da lama vermelha incluem a produção de materiais de construção, como aglomerados (Wang *et al.*, 2017); vidro (Zhao *et al.*, 2019); concreto (Liu & Poon, 2016; Tang, Wang, Donne, Forghani & Liu, 2019); agregados à base de geopolímeros (Uysal, Aygörmez, Canpolat, Cosgun & Kuranlı, 2022); materiais cerâmicos (Kavas, 2006; Macêdo, Costa, Trindade, Souza & Carneiro, 2011) e misturas asfálticas e asfalto (Zhang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020; Lima & Thives, 2020).

Um dos principais obstáculos quanto à aplicação desse resíduo na cadeia produtiva se refere à distância de transporte do material entre o local de armazenamento ao ponto de reciclagem e aplicação. Por outro lado, considerando a disponibilidade e a quantidade de lama vermelha na região norte do Brasil, tem-se o favorecimento do uso como material alternativo na composição de misturas asfálticas. Neste cenário, é importante descrever as condições das rodovias do Estado do Pará.

No Brasil, o modo rodoviário é predominante, sendo responsável por 61% do transporte de cargas e 91% de passageiros. Em 2022, a Confederação Nacional do Transporte (CNT) avaliou as condições das rodovias federais e estaduais pavimentadas no Pará numa extensão de 4.164 quilômetros. Os resultados mostraram que quanto ao pavimento, 74,9% apresentou problemas; 25,1% estava em condição satisfatória e 1,0%, totalmente destruído. As precárias condições do pavimento afetaram o custo operacional do transporte no Pará, que aumentou 45,9%, gerando prejuízos à sociedade e à economia do país (CNT, 2023).

O grande volume de lama vermelha disponível no Pará e a qualidade inadequada das rodovias pavimentadas no norte do Brasil motivaram o desenvolvimento deste estudo. O uso de materiais alternativos e de baixo custo como a lama vermelha pode contribuir para uma gestão sustentável deste resíduo e melhoria as condições dos pavimentos rodoviários. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a viabilidade de aplicação de lama vermelha na composição de misturas asfálticas e previsão de desempenho mecânico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODO

### 2.1 Procedência da lama vermelha – área de estudo

As amostras de lama vermelha foram fornecidas pela refinaria de alumina Hydro Alunorte, localizada na cidade de Barcarena, no Pará, distante 113 km da capital Belém. A Figura 1 ilustra em (a), a localização de Barcarena no Brasil e em (b), as instalações da empresa e o armazenamento do resíduo a céu aberto.



Figura 1: Localização da procedência da lama vermelha - a) Pará e Barcarena no Brasil; b) refinaria Hydro Alunorte e depósito do resíduo.

### 2.2 Materiais

Os materiais utilizados no estudo foram a lama vermelha, agregados de origem granítica e asfalto convencional CAP 50/70. A lama vermelha foi caracterizada em laboratório por meio dos seguintes ensaios: (i) difração de raios-X (DRX) com o equipamento difratômetro de raios-X marca RIGAKU e modelo Miniflex II; (ii) fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX) no equipamento espectrômetro de fluorescência de raios-X marca Shimadzu e modelo 700 HS; (iii) densidade de acordo com a norma DNER-ME 084/95 (DNIT, 2023); (iv) granulometria a laser em analisador de partículas marca MICROTRAC, modelo S3500; (v) potencial hidrogeniônico (pH) com equipamento PHTEK, modelo PHS-3B. Para a análise mineralógica da lama vermelha, o ensaio foi realizado entre ângulos  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $90^\circ$ , com passo de 0,05 e 1 segundo no tempo de contagem. Na identificação das fases presentes foi utilizada a base de dados do *International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File* (ICDD-PDF) e *Crystallography Open Database* (COD).

Os agregados de origem granítica foram provenientes de uma britagem localizada no município de Palhoça em Santa Catarina. De acordo com o tamanho nominal máximo, os agregados foram classificados como brita nº 1 (3/4”), nº zero – 0 (3/8”) e pó de pedra (4,75 mm). A caracterização dos agregados foi realizada através dos seguintes ensaios: (i) granulometria, de acordo com a norma DNER-ME 083/98 (DNIT, 2023); (ii) densidade, conforme as normas DNER-ME 081/98 e DNER-ME 084/95 (DNIT, 2023); (iii) desgaste por abrasão Los Angeles, cujo ensaio seguiu a norma DNER-ME 035/98 (DNIT, 2023).

O asfalto CAP 50/70, classificado por penetração e especificado de acordo com a norma DNIT 095/2006 (DNIT, 2023) foi fornecido por uma empresa distribuidora de Curitiba (Paraná). Para caracterização foram realizados os ensaios de ponto de amolecimento (norma DNIT-ME 131/10; DNIT, 2023), penetração (norma DNIT-ME 155/10; DNIT, 2023) e viscosidade aparente

(norma NBR 15.184; ABNT 2004). Os ensaios de caracterização dos materiais corresponderam à Fase 1 do Método (Figura 2).

### 2.3 Método

A Figura 2 apresenta o fluxograma do método, composto por três fases. Na Fase 1, os materiais (agregados e asfalto) foram caracterizados para verificação de atendimento às especificações para produção de misturas asfálticas e a lama vermelha (LV) foi avaliada para identificação das características físico-químicas.

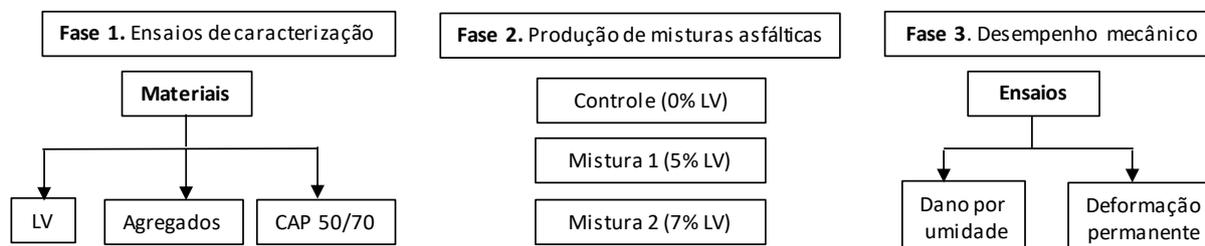


Figura 2: Fluxograma do método.

Na Fase 2 foram produzidas misturas asfálticas a quente de granulometria densa de acordo com a norma DNIT 031/2006, faixa “C” (DNIT, 2023), estabelecida pelo Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes (DNIT). Na composição granulométrica, a lama vermelha foi utilizada como fíler com percentuais de incorporação de 5% e 7%. Para comparação foi produzida uma mistura, denominada “controle” sem adição de lama vermelha e com pó de pedra como fíler.

Para todas as misturas foi fixado o percentual de fíler em 7% para atender aos requisitos de granulometria da norma DNIT 031/2006, faixa “C” (DNIT, 2023). Assim, dependendo da quantidade de lama vermelha incorporada, adicionou-se fíler de pó de pedra para composição da curva granulométrica. A dosagem foi realizada pelo método do *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE), cujo número de giros (N) de projeto, utilizado para estabelecer os esforços de compactação durante o processo de dosagem, correspondeu a um volume de tráfego elevado. A compactação foi feita no compactador giratório SUPERPAVE, num ângulo de giro de  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ , velocidade de 30 rotações por minuto e tensão vertical de 600 kPa. Para cada mistura, foram testados quatro teores de asfalto (4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%), e para cada teor, cinco corpos de prova foram produzidos, totalizando 60 corpos de prova.

Após o estabelecimento dos parâmetros volumétricos e do teor de asfalto, foram produzidos corpos de prova para realização dos ensaios de desempenho da Fase 3. Para o ensaio de deformação permanente, por mistura, duas lajes (50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 cm de espessura) foram compactadas na mesa compactadora de pneus francesa de acordo com a norma NFP 98-250-2 (AFNOR, 1997). As lajes foram compactadas até atingimento da massa específica aparente estabelecida na dosagem.

O ensaio de deformação permanente foi realizado no simulador de tráfego francês (*wheel tracker*) de acordo com a norma NFP 98-253-1 (AFNOR, 1993), cujo equipamento possui dois pneus, permitindo que duas lajes sejam ensaiadas simultaneamente. O ensaio foi conduzido pela aplicação de uma carga de 5 kN em pneus tipo *Treb Smooth* 400 x 8 com pressão de insuflagem de 0,6 MPa, na temperatura de 60°C. No ensaio, as lajes foram expostas a carregamentos longitudinais de até 30.000 ciclos na frequência de 1 Hz (cada ciclo equivale ao movimento de ida

e volta do pneu). Ao longo do ensaio foram realizadas medições de afundamento em 15 pontos distintos das lajes nos seguintes ciclos: 0, 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000.

A avaliação da resistência das misturas asfálticas à umidade foi realizada por meio do ensaio de dano por umidade induzida e seguiu a norma NBR 15.617 (ABNT, 2011). No compactador giratório SUPERPAVE, por mistura, foram compactados seis corpos de prova (100 mm de diâmetro) com um volume de vazios de  $7\% \pm 1\%$ . Os corpos de prova foram divididos em dois grupos de três, sendo que um grupo foi submetido a um processo de condicionamento. O processo de condicionamento dos corpos de prova consistiu na saturação em água de 55% a 80%, seguida por resfriamento durante 16 horas na temperatura de  $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  e posterior imersão em água por 24 horas a  $60^{\circ}\text{C}$ . Os corpos de prova condicionados foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. O mesmo ensaio foi realizado no outro grupo de corpos de prova sem condicionamento. O resultado do ensaio é expresso pela razão entre a média aritmética de resistência a tração por compressão diametral dos dois grupos, em porcentagem.

Foi realizada uma avaliação ambiental da água em que as amostras foram condicionadas no ensaio de dano por umidade induzida. Foi medido o pH e, as concentrações de ferro e alumínio avaliadas por meio de fotolorímetro. Na análise colorimétrica foi utilizado um sistema de comparação visual com cartela de cores e reagentes específicos para cada parâmetro avaliado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização da lama vermelha

A lama vermelha é constituída por partículas finas e assim, em presença de umidade (ar), *in natura*, tende a se aglomerar (Figura 3a). Para evitar a formação de grumos durante a produção das misturas, previamente a realização dos ensaios a lama vermelha foi seca em estufa ( $25^{\circ}\text{C}$  por 12 horas) e destorroada almofariz de porcelana com mão de gral de borracha (Figura 3b).



Figura 3: Aspecto da lama vermelha - a) *in natura*; b) destorroada.

A Figura 4(a) ilustra o difractograma que mostrou a presença de fases de hematita, anatásio, quartzo, karelianita, gibsita (oriundas da bauxita) e sodalita (formada no processo Bayer). Em concentrações inferiores às estabelecidas pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), a presença de hematita, anatásio, quartzo, a gibsita e sodalita não oferecem riscos à saúde humana. Por outro lado, a karelianita (trióxido de vanádio), na presença de umidade pode oxidar e transformar-se em pentóxido de vanádio, o qual em altas concentrações é um contaminante perigoso (ABNT, 1995).

De acordo com a norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004), a lama vermelha é classificada como um resíduo sólido inerte Classe II-B (Lima, 2015). No entanto, a presença do pentóxido de vanádio a caracteriza como substância tóxica, classificada como Classe I – Resíduo Perigoso. Quando um resíduo está disponível para reutilização, torna-se essencial avaliar a presença de contaminantes e suas concentrações antes da aplicação. Neste caso, a análise por meio do difractograma mostrou-se uma ferramenta adequada para esta avaliação. Por outro lado, na presença de concentrações de contaminantes que representam riscos à saúde humana ou ao meio ambiente, considera-se essencial fornecer meios para tornar os resíduos inertes ou neutralizá-los. Neste estudo, a lama vermelha foi utilizada como fíler na produção de misturas asfálticas, e espera-se que suas partículas sejam envolvidas pela película de asfalto, da mesma forma que ocorre com os agregados durante o processo de mistura, minimizando assim a possibilidade de lixiviação de qualquer contaminante.

A curva granulométrica (Figura 4(b)) obtida em analisador de partículas a laser mostrou que 100% das partículas de lama vermelha têm diâmetro menor que 0,29 mm. Cerca de 85% das partículas possuem diâmetro de 0,0004 mm a 0,06 mm, cuja classificação segundo a NBR 6.502 (ABNT, 1995), 20% corresponde à fração argila (< 0,002 mm), 65% à fração silte (0,002 mm a 0,06 mm) e 15% (0,06 mm a 0,2 mm) à fração areia fina. O fíler é um componente da mistura asfáltica, o qual apresenta, pelo menos, 65% do material passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$  (0,075 mm). Assim, quanto à granulometria, a lama vermelha pode ser utilizada como fíler em misturas asfálticas.

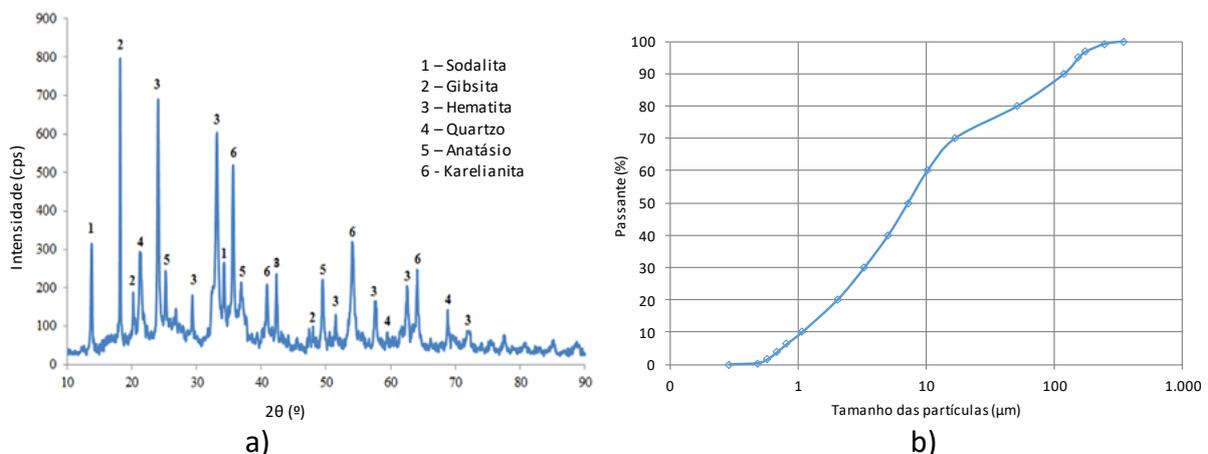


Figura 4: Caracterização da lama vermelha - a) difractograma; b) curva granulométrica.

Os resultados do ensaio de fluorescência mostraram na lama vermelha a presença, em proporções mais elevadas, de alumínio (35,47%), ferro (31,45%), silício (12,68%), dióxido de carbono (12,40%) e óxido de titânio (5,84%); e menores proporções de óxido de cálcio (1,81%), pentóxido de vanádio (0,22%) e óxido de manganês (0,13%). A densidade da lama vermelha medida no ensaio foi de 2,609. Para mensuração do pH, a lama vermelha foi misturada em água em proporção de 1:1 (em peso) e resultou em  $10,25 \pm 0,05$ , não sendo classificada como resíduo corrosivo, de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004). Por outro lado, um pH superior a 7, confere ao resíduo um caráter básico e assim, pode exercer influência na adesividade ao agregado.

Pinheiro, Fernandez, Costa, Valente & Carvalho (2017) avaliaram a lama vermelha da mesma refinaria e obtiveram resultados semelhantes ao deste estudo. Os autores concluíam que o valor de pH esteve entre 10,6 a 11,7 e a granulometria do material esteve na faixa de 0,0001 mm a 0,1 mm de diâmetro de tamanho de grão.

### 3.2 Caracterização dos agregados

A Tabela 1 apresenta a granulometria dos agregados e a Tabela 2, os resultados dos ensaios de densidade (real e aparente) e de absorção. O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado no equipamento Los Angeles nos agregados com tamanhos nominais de 3/4" e 3/8", e resultaram em 20,68% e 21,73%, respectivamente. De acordo com a norma DNIT 095/2006 (DNIT, 2023), os resultados foram satisfatórios (inferiores a 50%) e os agregados são adequados para produção de misturas asfálticas.

**Tabela 1: Granulometria dos agregados.**

| Peneira (mm) | 19,10        | 12,7  | 9,50  | 4,80 | 2,00 | 0,42 | 0,18 | 0,075 |
|--------------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| Agregados    | Passante (%) |       |       |      |      |      |      |       |
| n° 1 (3/4")  | 98,7         | 30,1  | 4,7   | 1,1  | 0,9  | 0,6  | 0,5  | 0,1   |
| n° 0 (3/8")  | 100,0        | 99,9  | 96,4  | 22,4 | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,4   |
| Pó de pedra  | 100,0        | 100,0 | 100,0 | 99,8 | 67,9 | 29,8 | 15,1 | 5,0   |

**Tabela 2: Resultados de densidade e absorção.**

| Agregados   | Densidade         |                       | Absorção (%) |
|-------------|-------------------|-----------------------|--------------|
|             | Real ( $G_{sa}$ ) | Aparente ( $G_{sb}$ ) |              |
| n° 1 (3/4") | 2,774             | 2,748                 | 0,351        |
| n° 0 (3/8") | 2,740             | 2,701                 | 0,521        |
| Pó de pedra | 2,717             | -                     | -            |

### 3.3 Caracterização do asfalto

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 e mostraram que o asfalto atendeu às especificações da norma DNIT 095/2006 (DNIT, 2023). O ensaio de viscosidade aparente foi realizado em um viscosímetro rotacional tipo Brookfield em três temperaturas para estabelecimento das faixas de temperaturas de produção e de compactação das misturas asfálticas. A faixa de temperaturas para produção (mistura dos componentes) foi de 145°C a 151°C e para compactação, de 135°C a 140°C.

**Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização do asfalto.**

| Ensaio                       | Unidade | Especificação   | Resultados |
|------------------------------|---------|-----------------|------------|
| Penetração (100 g, 5s, 25°C) | 0,01 mm | 50 a 70         | 64         |
| Ponto de amolecimento        | °C      | 46 (mín.)       | 49,5       |
| Viscosidade aparente         |         |                 |            |
| 135°C, sp 21, 50 rpm         | cP      | 274 (mín.)      | 308        |
| 150°C, sp 21, 60 rpm         | cP      | 112 (mín.)      | 157        |
| 177°C, sp 21, 100 rpm        | cP      | 57 a 285 (mín.) | 63         |

### 3.4 Dosagem das misturas asfálticas

A Figura 5 apresenta a curva granulométrica das misturas e os limites estabelecidos pela norma DNIT 031/2006 para faixa "C" (DNIT, 2023). De acordo com a dosagem, o teor de asfalto de projeto resultou em 4,7% para a mistura controle (fíler com 7% de pó de pedra), 4,5% para a mistura 1 (fíler com 5% de lama vermelha e 2% de pó de pedra) e 4,4% para a mistura 2 (fíler com

7% de lama vermelha). Observou-se que com a substituição da lama vermelha como fíler, houve redução do teor de asfalto. A Tabela 4 mostra os parâmetros volumétricos das misturas produzidas com os teores de asfalto obtidos na dosagem, os quais atenderam às especificações da norma DNIT 031/2006 (DNIT, 2023).

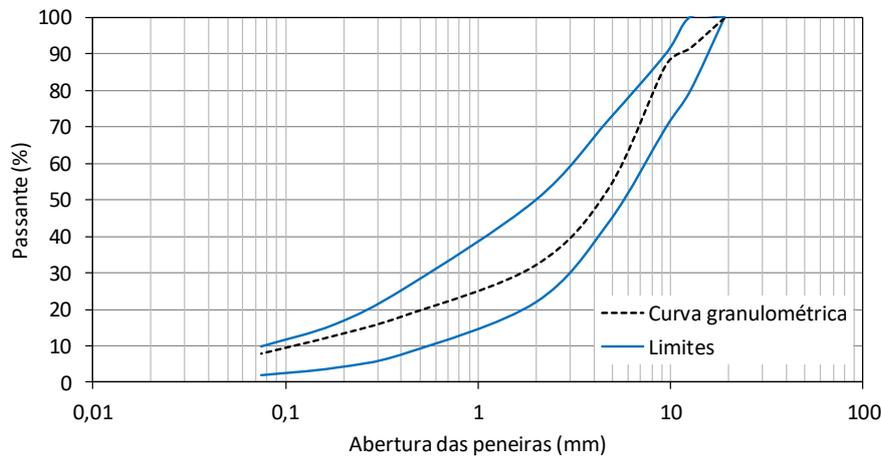


Figura 5: Curva granulométrica das misturas e limites da faixa “C”.

Tabela 4: Parâmetros volumétricos das misturas.

| Mistura                 | Teor de asfalto (%) | Volume de vazios (%) | $G_{mm}^2$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $G_{mb}^3$ (g/cm <sup>3</sup> ) | VAM <sup>4</sup> (%) | RBV <sup>5</sup> (%) |
|-------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| Controle                | 4,7                 | 4,91                 | 2,552                           | 2,427                           | 14,13                | 70,9                 |
| 1 (5% LV <sup>1</sup> ) | 4,5                 | 4,96                 | 2,560                           | 2,421                           | 12,7                 | 67,6                 |
| 2 (7% LV <sup>1</sup> ) | 4,4                 | 5,51                 | 2,558                           | 2,443                           | 12,4                 | 67,8                 |
| Limites <sup>6</sup>    | -                   | 4 a 6                | -                               | -                               | > 15                 | 65 a 82              |

<sup>1</sup>LV – Lama vermelha; <sup>2</sup> $G_{mm}$  – Massa específica máxima;  $G_{mb}$  – Massa específica aparente; <sup>3</sup>VAM – Vazios do agregado mineral; <sup>5</sup>RBV – Relação betume/vazios; <sup>6</sup>Norma DNIT 031/2006 (DNIT, 2023).

Lima, Amorim, Oliveira & Moura (2021) afirmaram que camadas de revestimento de pavimentos flexíveis, com o uso da Faixa “C” (DNIT, 2023), os teores de asfalto em geral variam de 4,5% a 6,0%, corroborando com os percentuais obtidos neste estudo (Tabela 4).

### 3.5 Resistência à deformação permanente

O desempenho das misturas asfálticas à deformação permanente foi avaliado em um simulador de tráfego francês e neste ensaio, o resultado é expresso em profundidade de afundamento (porcentagem) aos 30.000 ciclos. A Figura 6 ilustra em (a), o equipamento *wheel tracker*, em (b), as lajes antes do ensaio, e em (c), as lajes após o ensaio. Adicionalmente foram realizadas medições no ensaio para monitorar a evolução do afundamento ao longo dos ciclos.



Figura 6: Ensaio de deformação permanente - a) equipamento; b) lajes antes do ensaio; c) lajes após o ensaio.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios e constatou-se que, em média, aos 30.000 ciclos, em comparação com a mistura controle a redução do afundamento foi de 42,63% para a mistura 1 (5% lama vermelha) e de 42,30% para a mistura 2 (7% de lama vermelha).

No Brasil não há uma norma específica para limitação do afundamento relacionada a este ensaio. As diretrizes francesas têm limitado o afundamento em 10% aos 30.000 ciclos (LCPC, 2007). Entretanto, na França o eixo padrão é de 130 kN, enquanto no Brasil é de 80 kN. Outras diretrizes europeias limitam o afundamento em 5% para camadas de revestimento de rodovias de tráfego pesado compostas por misturas asfálticas densas (como faixa "C" do DNIT) (COST 333, 1999).

Aos 30.000 ciclos o afundamento para todas as misturas foi inferior a 10% (Tabela 5) e pôde-se observar que apenas as misturas com lama vermelha cumpriram as diretrizes europeias com afundamento inferior a 5% aos 30.000 ciclos.

**Tabela 5: Resultados dos ensaios de deformação permanente.**

| Ciclos      | Misturas        |           |           |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|
|             | Controle        | 1 (5% LV) | 2 (7% LV) |
|             | Afundamento (%) |           |           |
| 100         | 1,09            | 0,51      | 0,51      |
| 300         | 1,52            | 0,73      | 0,74      |
| 1.000       | 2,19            | 1,10      | 1,11      |
| 3.000       | 3,05            | 1,60      | 1,62      |
| 10.000      | 4,38            | 2,41      | 2,46      |
| 30.000      | 6,10            | 3,60      | 3,58      |
| Redução (%) | -               | 42,63     | 41,30     |

O teor de asfalto e o volume de vazios são parâmetros volumétricos que influenciam o desempenho de uma mistura asfáltica à deformação permanente. Em geral, um teor de asfalto mais elevado conduz a um desempenho inferior, enquanto um menor teor de vazios tende a aumentar a resistência à deformação permanente. Para as misturas estudadas, observou-se que, mesmo com um volume de vazios mais elevado (Tabela 4), as misturas produzidas com lama vermelha obtiveram um melhor desempenho à deformação permanente em comparação com a mistura controle. Desta forma, pôde-se concluir que a lama vermelha contribuiu para a melhoria da resistência à deformação permanente. Como a mistura 1 (5% lama vermelha) e a mistura 2 (7% lama vermelha) obtiveram desempenhos semelhantes (Tabela 5), a vantagem da utilização da mistura 2 é a possibilidade da inserção de um percentual mais elevado de resíduo como fíler na mistura asfáltica.

Os requisitos da curva granulométrica adotada limitaram a quantidade de fíler a ser inserido, o qual, como componente, influencia o desempenho mecânico da mistura asfáltica. O fíler tende a aumentar a viscosidade do asfalto e o ponto de amolecimento, reduzindo a suscetibilidade térmica e contribuindo para a resistência à deformação permanente. Bernucci, Motta, Ceratti e Soares (2022) afirmaram que durante o processo de mistura dos componentes, o fíler tende a se incorporar ao asfalto, formando o mástique que contribui para o aumento da rigidez do asfalto e conseqüentemente, da mistura.

Considerando que neste estudo foram introduzidos 7% de fíler em todas as misturas, com variações das proporções de lama vermelha e pó de pedra, e que 20% da lama vermelha é composta por partículas com dimensões inferiores a 0,02 mm (Figura 4b), foi avaliada a rigidez do

mástique formado. A rigidez do mástique foi mensurada através dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento. Foram produzidas amostras com a incorporação de lama vermelha em proporções de 5% e 7% ao asfalto (CAP 50/70).

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios, através dos quais comprovou-se que a incorporação de lama vermelha promoveu singelo aumento do ponto de amolecimento e redução da penetração (Tabela 5), indicando um acréscimo de rigidez em relação ao CAP 50/70 (Tabela 3).

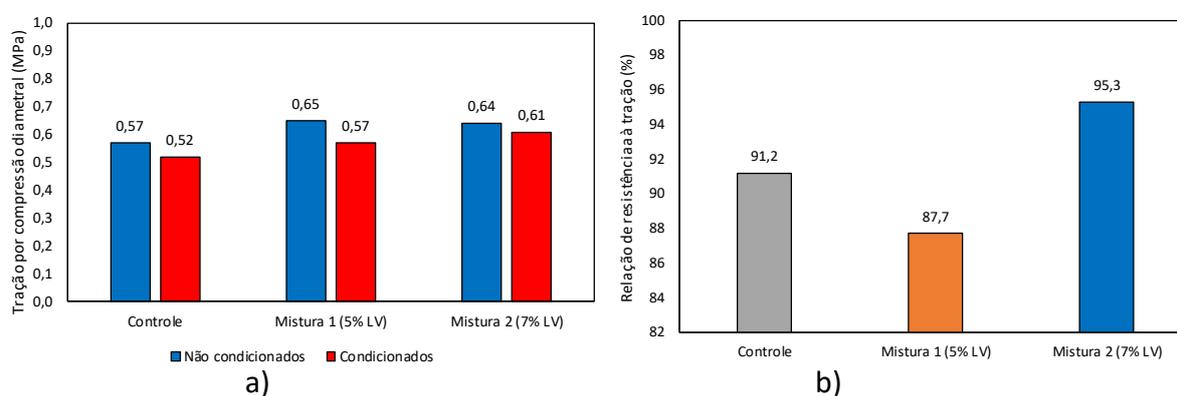
**Tabela 6: Influência da incorporação da lama vermelha na rigidez do asfalto.**

| Ensaio                       | Unidade | CAP <sup>1</sup> | CAP <sup>1</sup> + 5% LV <sup>2</sup> | CAP <sup>1</sup> + 7% LV <sup>2</sup> |
|------------------------------|---------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Penetração (100 g, 5s, 25°C) | 0,01 mm | 64               | 60                                    | 59                                    |
| Ponto de amolecimento        | °C      | 49,5             | 50,0                                  | 50,0                                  |

<sup>1</sup>CAP se refere ao asfalto CAP 50/70; <sup>2</sup>LV – Lama vermelha.

### 3.6 Resistência ao dano por umidade induzida

A Figura 7(a) apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova condicionados e não condicionados. Os resultados correspondem à média obtida por cada grupo (três corpos de prova por grupo). Para amostras não condicionadas, as misturas com lama vermelha (5% e 7%) obtiveram a maior média (0,65 MPa e 0,64 MPa, respectivamente) em relação à mistura controle (0,57 MPa). Como esperado, o condicionamento promoveu uma redução da resistência à tração, o que foi observado em todas as amostras, independentemente do tipo de mistura asfáltica. No entanto, a relação de resistência à tração (Figura 7b), representada pela média do quociente de resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados não foi significativa, sendo inferior a 30%, conforme estabelecido pela norma brasileira. A partir dos resultados mostrados na Figura 7(b), pôde-se afirmar que a mistura 1 (7% de lama vermelha) obteve maior resistência ao dano por umidade induzida, cuja relação de resistência à tração foi de 95,3%.



**Figure 7: Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida - a) resistência à tração; b) relação entre as resistências à tração**

A Figura 8 ilustra exemplos das condições dos pavimentos de dois trechos de rodovias federais no Pará. Na Figura 8(a) observa-se o pavimento da BR-163 (região de Altamira) com defeitos estruturais como deformação permanente e na Figura 8(b), que o pavimento da BR-222 (região de Bom Jesus do Tocantins) apresenta diversos buracos.

Os resultados de desempenho mecânico obtidos neste estudo pelas misturas asfálticas com lama vermelha como filer podem contribuir para que os revestimentos dos pavimentos das

rodovias brasileiras atinjam a vida útil do projeto com condições de tráfego adequadas e sem aparecimento de defeitos precoces. Ainda, foi comprovada a viabilidade da utilização de um resíduo industrial na composição de misturas asfálticas, minimizando problemas ambientais, principalmente quanto ao descarte e disposição inadequada da lama vermelha.



Figura 8: Condições dos pavimentos de rodovias federais no Pará - a) BR - 163; b) BR - 222.

Fonte: CNT (2023).

### 3.7 Avaliação ambiental

A norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004) lista a classificação dos resíduos e abrange indicações quanto à inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade. De acordo com esta norma, a lama vermelha é classificada como um resíduo sólido inerte Classe II-B. Por outro lado, é importante destacar que a composição da lama vermelha pode variar em função da fonte do minério bauxita, do processo adotado para obtenção da alumina e dos produtos químicos utilizados nas operações industriais. Estes fatores influenciam significativamente as características e concentrações de substâncias perigosas que podem estar presentes na lama vermelha.

A partir destas considerações, neste estudo foi realizada a avaliação da lama vermelha quanto aos critérios de corrosividade e toxicidade através de análise de pH e de caracterização química. O pH resultou em  $10,25 \pm 0,05$ , cujo valor de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), não a classifica como substância corrosiva. Contudo, a caracterização química revelou a presença de pentóxido de vanádio, substância listada na norma NBR 10004, Anexo “C”, como “substâncias que conferem periculosidade aos resíduos”, e no Anexo “D” como “substâncias agudamente tóxicas”.

Mesmo em pequena proporção (0,22%), o pentóxido de vanádio confere à lama vermelha características de resíduo perigoso. Assim, a lama vermelha poderia ser classificada como uma substância tóxica e resíduo de Classe I – Perigoso. Esta constatação alerta a comunidade científica para a necessidade de uma avaliação abrangente dos compostos químicos quando um resíduo é reutilizado ou reciclado para quaisquer aplicações. Em estudos anteriores realizados por Silva, Alves, & Motta (2007) e Macêdo *et al.* (2011), os pesquisadores não detectaram pentóxido de vanádio na lama vermelha da mesma procedência deste estudo.

De acordo com Cooper (2007), as vias aéreas humanas representam o principal acesso do pentóxido de vanádio aos pulmões e afeta os brônquios, brônquiólos e alvéolos, podendo causar lesões pulmonares, edema pulmonar e traqueobronquite aguda. Assim, a disposição e armazenamento inadequados da lama vermelha no meio ambiente favorecem a contaminação por

pentóxido de vanádio. Por outro lado, potenciais impactos devido aos vazamentos poderiam ser mitigados se a lama vermelha fosse totalmente incorporada às misturas asfálticas.

Em campo, as misturas asfálticas em camadas de revestimento de pavimentos estão frequentemente expostas à precipitação e ao desgaste pela ação do tráfego. Consequentemente, fragmentos da mistura asfáltica composta por lama vermelha poderiam se desprender da superfície e ser transportados ao meio ambiente, com potencial de contaminação o solo, rios e fontes de água. Neste estudo foi realizada uma análise da água utilizada no condicionamento dos corpos de prova no ensaio de dano por umidade induzida. A análise contemplou a medição do pH da água e das concentrações de alumínio e ferro.

A principal via de exposição humana não ocupacional ao alumínio é através da ingestão de alimentos e água; entretanto, não há indicações de que o alumínio apresente toxicidade aguda por via oral, apesar de sua ampla ocorrência em alimentos, água potável e medicamentos. Assim como o alumínio, o ferro não é considerado tóxico, mas pode causar problemas no abastecimento público, conferindo cor e sabor à água. A Portaria 2.914 (BRASIL, 2011) do Ministério da Saúde estabelece limites máximos permitidos para concentrações de alumínio, ferro e pH da água para consumo humano.

Os parâmetros selecionados foram igualmente medidos na água potável para consumo humano fornecida pela companhia de abastecimento. Na construção civil, dependendo do nível do lençol freático, às vezes é necessário promover a drenagem do terreno para rebaixamento do lençol freático. A água proveniente da drenagem do terreno é comumente descarregada em redes pluviais. Os dados médios coletados na tubulação de água proveniente da drenagem de terrenos são disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2005). As concentrações dos parâmetros selecionados e o pH da água de condicionamento foram comparadas aos limites de água potável (BRASIL, 2011) e aos de água de drenagem de terrenos (ANA, 2005), cujos resultados estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7: Avaliação da água potável e de condicionamento.**

| Parâmetros | Unidade | Água potável | Limites <sup>1</sup> | Água de drenagem <sup>2</sup> | Água de condicionamento |
|------------|---------|--------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Alumínio   | mg/L    | 0,42         | 0,20                 | -                             | 1,44                    |
| Ferro      | mg/L    | 0,09         | 0,30                 | 0,01 a 1,65                   | 0,29                    |
| pH         | -       | 7            | 6 a 9                | 5,8 a 7,6                     | 8                       |

<sup>1</sup>BRASIL (2011); <sup>2</sup>ANA (2005).

A partir dos resultados da Tabela 7 e conforme as exigências dos limites estabelecidos para água potável (BRASIL, 2011), pôde-se constatar que a água da rede pública de abastecimento apresentou concentração de alumínio (0,42 mg/L) superior ao limite permitido (0,20 mg/L). Como esperado, as amostras de água de condicionamento das misturas asfálticas com lama vermelha apresentaram elevada concentração de alumínio (1,44 mg/L). Em ambos os casos, a concentração de alumínio excedeu o limite permitido. Este parâmetro não está disponível para a água de drenagem de terrenos.

Quanto ao ferro (Tabela 7), as concentrações medidas foram inferiores aos limites (BRASIL, 2011), e a concentração da água de condicionamento ficou próxima do limite máximo. Relativamente ao pH, os valores medidos nas águas das diferentes fontes avaliadas mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

Considera-se fundamental ressaltar que a água de condicionamento não é destinada a uso para fins potáveis. Ainda, o volume de vazios ( $7 \pm 1\%$ ) dos corpos de prova condicionados para realização do ensaio de dano por umidade induzida não representa a condição real de campo, sendo superior ao estabelecido na dosagem das misturas asfálticas (Tabela 4).

A análise ambiental realizada neste estudo (Tabela 7) foi simplificada, mas destacou a necessidade de realização de ensaios ambientais mais completos, como lixiviação, por exemplo. Desta forma, será possível a avaliação do potencial de contaminação, principalmente quando a lama vermelha seja utilizada como componente de camadas de pavimentos sem a presença de um aglutinante como o asfalto ou agente estabilizante, como cimento Portland ou cal. No caso de camadas sem estes materiais, as partículas de lama vermelha podem estar “soltas”, sem envolvimento pelo estabilizante. Assim, os efeitos de possíveis contaminantes quando resíduos alternativos são utilizados em camadas de pavimentos rodoviários podem ser mitigados pela mistura com materiais como ligantes asfálticos, que podem se aderir e envolver as partículas.

Estudos futuros poderão contemplar outras alternativas de reuso da lama vermelha, como a incorporação direta ao asfalto antes da produção da mistura. Nesta alternativa, a lama vermelha não atuará como um fíler, mas como um agente modificador e será incorporada ao asfalto formando o mástique. Uma vantagem pode ser atribuída à facilidade da formação de uma película asfáltica capaz de encapsular as partículas de lama vermelha, reduzindo assim o potencial de contaminação ambiental.

Com base neste estudo, a utilização da lama vermelha como fíler na produção de misturas asfálticas mostrou-se uma alternativa viável tecnicamente para redução da quantidade de armazenamento deste resíduo, minimizando os riscos de contaminação ambiental e desastres no entorno das refinarias de alumínio. Adicionalmente, como fíler, a lama vermelha propiciou a melhoria do comportamento mecânico das misturas asfálticas quanto à deformação permanente. Este estudo foi baseado em resultados de ensaios de laboratório, sendo necessária uma aplicação em campo para validação do desempenho obtido.

## 4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi avaliada a viabilidade da aplicação do resíduo proveniente do processamento da bauxita, a lama vermelha como fíler na produção de misturas asfálticas a quente. Inicialmente foi realizada a caracterização físico-química da lama vermelha e dos materiais componentes das misturas (asfalto e agregados) para verificação de atendimento às especificações brasileiras. Foram produzidas misturas asfálticas de granulometria densa de acordo com a faixa “C” do DNIT com asfalto convencional CAP 50/70 e variações de percentuais de lama vermelha de 5% e 7%, complementadas por 2% e 0% de fíler de pó de pedra, num total de 7% de fíler. Uma mistura controle com 7% de fíler de pó de pedra foi produzida para comparação. As misturas foram avaliadas quanto ao desempenho mecânico à deformação permanente e ao dano por umidade induzida.

O pH da lama vermelha se enquadrou nos limites estabelecidos pelas normas brasileiras. No entanto, a análise química revelou a presença de pentóxido de vanádio, que a caracterizou como um resíduo com substância tóxica e a classificou na categoria de resíduo Classe I – Perigoso. Esta constatação contrasta com a classificação estabelecida pela norma brasileira NBR 10.004 para

a lama vermelha de resíduo sólido inerte Classe II-B e ressalta a importância da realização de uma avaliação mais completa dos componentes químicos de quaisquer tipos de resíduos para obtenção de uma classificação mais precisa.

A inserção da lama vermelha como fíler contribuiu significativamente para a melhoria da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, reduzindo o afundamento em comparação à mistura controle. Aos 30.000 ciclos, a mistura controle apresentou um afundamento de 6,1%, enquanto as misturas com lama vermelha obtiveram resultados de 3,50% (5% lama vermelha) e 3,58% (7% lama vermelha), representando uma redução superior a 40% em comparação com a mistura controle. Todas as misturas asfálticas apresentaram resultados adequados em relação ao dano por umidade induzida, com valores superiores ao limite de 70% estabelecido pelas normas brasileiras. Notavelmente, a mistura com 7% de lama vermelha apresentou o melhor desempenho.

A região norte do Brasil é caracterizada por altas temperaturas ao longo do ano, fator que contribui para a ocorrência de deformações permanentes nas camadas de revestimento de pavimentos flexíveis. Dada a proximidade dos depósitos de lama vermelha na região, a utilização deste resíduo se mostrou particularmente vantajosa. Comprovou-se o potencial de incorporação da lama vermelha como fíler em misturas asfálticas em melhorar o desempenho à deformação permanente.

A combinação da ação de cargas elevadas de tráfego e altas temperaturas pode resultar em desgaste e remoção dos componentes da mistura asfáltica, principalmente durante eventos de precipitação. Dependendo das concentrações de contaminantes, as águas subterrâneas ou os rios podem ser contaminados. Considerando o uso da lama vermelha como um componente das misturas asfálticas, neste estudo foi realizada uma avaliação ambiental simplificada da água de condicionamento das misturas. Como esperado, a concentração de alumínio foi elevada, a concentração de ferro permaneceu dentro dos limites permitidos e o pH em faixa aceitável. Para mitigar o risco de contaminação, recomenda-se uma avaliação abrangente das concentrações de poluentes da lama vermelha, por meio de ensaios padronizados como de lixiviação.

Pôde-se concluir que a lama vermelha, como fíler em misturas asfálticas se mostrou uma alternativa viável tecnicamente e adequada para minimizar a disposição inadequada deste resíduo no meio ambiente. No entanto, pesquisas sobre a incorporação de lama vermelha em pavimentos rodoviários devem ser continuadas contemplando curvas granulométricas que permitam percentuais mais elevados de fíler para possibilitar a inserção de maior quantidade de resíduo. Outros ensaios de desempenho mecânico, como fadiga e propagação de fendas devem ser realizados e também, a avaliação do potencial uso da lama vermelha como agente modificador do asfalto.

Para promover a viabilidade de reinserção da lama vermelha na cadeia produtiva sem restrições é imprescindível ressaltar a necessidade de uma avaliação completa da concentração de elementos lixiviáveis do resíduo ao meio ambiente.

## 5 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (2005). In: Conservação e reuso da água em edificações. Setor de Comunicação do SindusCon-SP. São Paulo, Brasil.

<https://smastr16.blob.core.windows.net/municípioverdeazul/2011/11/ManualConservacaoreusoAguaEdificacoes.pdf>

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Materiais betuminosos - determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (ABNT: NBR 15.184).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). Rochas e solos (ABNT: NBR 6.502).
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). Misturas asfálticas — determinação do dano por umidade induzida (NBR 15.617).
- Association Française de Normalisation (1993). Préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d'orniérage (AFNOR: NF P 98-253-1).
- Association Française de Normalisation (1997). Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques (AFNOR: NF-P-98-250-2).
- Brasil. Ministério da Saúde (2011). Portaria Nº 2.914. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, Brasil. <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>
- Brasil. Agência Nacional de Mineração (2023). In: Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas. Agência Nacional de Mineração. Brasília.
- Bernucci, L.B., Motta, L.G.M., Ceratti, J.A.P & Soares, J.B. (2022). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros (2a ed.). Rio de Janeiro, Brasil: Petrobras e Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos.
- Brabo, E.S., Lima, M.O. & Santos, J.G. (2003). Avaliação do Impacto no rio Murucupi em decorrência do transbordo de efluentes da bacia de rejeitos sólidos da Alunorte no Município de Barcarena - PA. Instituto Evandro Chagas, Belém, Pará, Brasil.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2004). CBA multada por poluir rios da região de Sorocaba. [https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/004/07/29\\_multa.pdf](https://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/004/07/29_multa.pdf)
- Chen, J., Wang, Y. & Liu, Z. (2023). Red mud-based catalysts for the catalytic removal of typical air pollutants: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 628–640. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.027>
- Confederação Nacional do Transporte (2023). In: Pesquisa CNT de rodovias 2022. CNT, SEST SENAT, Brasília, D.G., Brasil. CDU 656.11(81)(047). <https://www.cnt.org.br/>
- Cooper RG. (2007). Vanadium pentoxide inhalation. *Indian Journal of Occupation Environmental Medicine*, 11(3), 97–102. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3168171/>

- European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (1999). Development of new bituminous pavement design method: COST 333 - Final Report of the Action. European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research. European Commission Directorate General Transport. Belgium.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023). In: Coletânea de normas: DNIT. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas>
- Hildebrando, E.A., Sousa, J.A.S., Angélica, R.S. & Neves, R.F. (2013). Application of bauxite waste from Amazon region in the heavy clay industry. *Materials Research*, 6, XVI, 1418–1422. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000145>
- HYDRO (2018). In: 2018: Extreme rainfall in Brazil. <https://www.hydro.com/pt-MZ/sobre-a-hydro/company-history/2018-present/2018-extreme-rainfall-in-brazil/>
- International Aluminium Institute (2021). Sustainable bauxite residue management guidance. London, U.K.: IAI. <https://international-aluminium.org/>
- Kavas, T. (2006). Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. *Building and Environment*, 411779–1783. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.019>
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud. Groupe de travail RST Formulation des enrobés à chaud. LCPC, Nantes, France.
- Lima, C.E. de, Amorim, E.F., Oliveira, H. da S. & Moura, L. F. de. (2021). Concreto asfáltico a quente dosado com resíduos de construção e demolição (RCD) aplicado em pavimento flexível. *HOLOS*, 1, 1–18. <https://doi.org/10.15628/holos.2021.9576>
- Lima, M.S.S. (2015). Avaliação do emprego de lama vermelha no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas a quente (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Lima, M.S.S. & Thives, L.P.; 2020. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 260, 119894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119894>
- Litovchenko, V.I. & Shumakova, N.A. (2022). Processing red mud as a factor of removing the risk of environmental disasters: RUSAL experience. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1230, 012012. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1230/1/012012>
- Liu, R.-X. & Poon, C.S. (2016). Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, Part 1, 384–391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.049>
- Macêdo, A.N., Costa, D.H.P., Trindade, S.R.S., Souza, J.A.S. & Carneiro, R.J.F.M. (2011). Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila. *Revista Ambiente Construído*, 11, 4, 25–36. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000400003>

- Matos, C.E. (2010). Acidente com resíduo tóxico na Hungria. *Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade (RevInter)*, 3, 3, 44 -44. <https://doi.org/10.22280/revintervol3ed3.61>
- Penkova, A.B. & Miteva, A. (2022). Some aerospace applications of 7075 (B95) aluminium alloy. *Aerospace Research in Bulgaria*, 34, 165–179. <https://doi.org/10.3897/arb.v34.e15>
- Pinheiro, E.R., Fernandez, O.J.C., Margalho, E.V., Jonas, P. & Costa, J.C. (2017). Variações granulométricas, mineralógicas e alcalinas em resíduos inertizados da Hydro Alunorte. *HOLOS*, 6, 50–59. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.6401>
- Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A. & Morelli, M.R. (2012). Efeito da adição da lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5, 4, 451– 467. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000400004>
- Sampaio, J.A., Andrade, M.C. & Dutra, A.J.B. (2008). Bauxita. Rochas & Minerais Industriais, 14, 311–337. Centro de Tecnologia Mineral; Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, Brasil. <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>
- Santos, E.C.O., Jesus, I.M. & Lima, M.O. (2009). Caracterização preliminar dos impactos ambientais, danos ao ecossistema e riscos à saúde decorrentes do lançamento no rio Murucupi de efluentes do processo de beneficiamento de bauxita, Barcarena – PA. Relatório IEC-SAMAM 001/2009, Belém, Pará, Brasil.
- Silva Filho, E. B., Alves, M. C. M. & Motta, M. D. (2007). Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Revista Matéria*, 12, 2, 322–338. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000200011>
- Tang, W.C., Wang, Z., Donne, S.W., Forghani, M. & Liu, Y. (2019). Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120802. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120802>
- Uysal, M., Aygörmez, Y., Canpolat, O., Cosgun, T. & Kuranlı Ö.F. (2022). Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 361, 129718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129718>
- United States Geological Survey (2019). In: The mineral industry of Brazil. 2017–2018 Minerals Yearbook.: USGS. Reston, USA. <https://pubs.usgs.gov/myb/vol3/2017-18/myb3-2017-18-brazil.pdf>
- Xavier, C.L. (2014). Indústria do alumínio. Relatório estudos setoriais: Alumínio. Economia de baixo carbono: impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira. Ribeirão Preto, SP, Brasil, 127–151: FUNPEC. [http://www.sef.usp.br/wp-content/uploads/sites/33/2015/07/Economia\\_de\\_Baixo\\_Carbono.pdf](http://www.sef.usp.br/wp-content/uploads/sites/33/2015/07/Economia_de_Baixo_Carbono.pdf)
- Wang, P. & Liu, D.-Y. (2012). Physical and chemical properties of sintering red mud and Bayer red mud and the implications for beneficial utilization. *Materials*, 5(10), 1800–1810. <https://doi.org/10.3390/ma5101800>

- Wang, L., Yu, I.K.M., Tsang, D.C.W., Li, S., Li, J.-S., Poon, C.S., Wang, Y.-S. & Dai, J.-G. (2017). Transforming wood waste into water-resistant magnesia-phosphate cement particleboard modified by alumina and red mud. *Journal of Cleaner Production*, 168, 452–462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.038>
- Zhang, J., Liu, S., Yao, Z., Wu, S., Jiang, H., Liang, M. & Qiao, Y. (2018). Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 180, 605-613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.268>
- Zhang, J., Li, P., Liang, M., Jiang, H., Yao, Z., Zhang, X. & Yu S. (2020). Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder. *Construction and Building Materials*, 237, 117821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117821>
- Zhao, J., Wang, Y., Kang, J., Qu, Y., Khater, G.A., Li, S., Shi, Q. & Yue, Y. (2019). Effect of SnO<sub>2</sub> on the structure and chemical durability of the glass prepared by red mud. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 509, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.01.029>

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Padilha Thives, L., Sarisariyama Siverio Lima, M., & Rohde, L. (2023). Red mud application as filler in asphalt mixtures production. *HOLOS*, 5(39). <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16344>

#### ABOUT THE AUTHORS

##### L. P. THIVES

Universidade Federal de Santa Catarina. Possui graduação (1989), mestrado (2001) em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Engenharia Civil, área de conhecimento Vias de Comunicação, pela Universidade do Minho em Portugal (2009). É professora Associada da Universidade Federal de Santa Catarina e atua no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFSC) com orientação de mestrados e doutorados. É Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2.

E-mail: [liseane.thives@ufsc.br](mailto:liseane.thives@ufsc.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4782-2496>

##### M. S. S. LIMA

Universidade Federal de Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Rodovias; Projeto e Construção; Interesses pelas áreas de planejamento e gestão de projetos. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

E-mail: [mayarasiverio@gmail.com](mailto:mayarasiverio@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7831-0960>

##### L. ROHDE

Universidade Federal de Santa Catarina. Possui graduação (1999), mestrado (2002), doutorado (2007) e pós-doutorado jr. em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). É docente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

E-mail: [l.rohde@ufsc.br](mailto:l.rohde@ufsc.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9981-552X>

Editor: Francinaide de Lima Silva Nascimento



**Ad Hoc Reviewer:** Francisco Lledo dos Santos e Marina Batalini De Macedo



Submitted October 26, 2023

Accepted November 27, 2023

Published December 18, 2023