

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

Use of bauxite waste as filler, added polypropylene from mineral water bottle residue in hot-machined bituminous concrete

Utilización de residuos de bauxita como relleno, polipropileno añadido procedente de residuos de botellas de agua mineral en hormigón bituminoso mecanizado en caliente

Recebido: 15/05/2023 | Revisado: 06/06/2023 | Aceitado: 20/06/2023 | Publicado: 24/06/2023

Alex Gomes Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8571-4736>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: gomesalex01@yahoo.com.br

Marcelo de Souza Picanço

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7313-1229>
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: marcelosp@ufpa.br

Resumo

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

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

Abstract

The present study aims to evaluate the use of bauxite residue, together with polypropylene, from mineral water bottles, in the composition of Hot Mixed Bituminous Concrete - CBUQ. For this purpose, compositions were elaborated with three different percentages of bauxite residue (3%, 5% and 7%), mixtures using only polypropylene, in the contents of (1%, 3% and 5%), and dosages with substitution of 3% filler from bauxite residue and 3% polypropylene. The constituent materials were characterized in terms of chemical, physical and microstructural composition. The bauxite residue was evaluated in terms of granulometry, microstructure, pH, specific mass and chemical composition. The aggregates were submitted to tests of specific mass, abrasion, shape index and adhesiveness and, framed in the theoretical granulometric curve corresponding to the average of “Range C” of DNIT. For the CAP 50/70 binder, the penetration test, softening point and viscosity were carried out. The performance of the asphalt mixtures was measured using the parameters of the Marshall test and the results of static diametral compression traction at 25°C minimum MPa. The water from the conditioning at 60°C of specimens consisting of bauxite residue was collected and evaluated for pH and concentrations of iron and aluminum. The results showed that there is a prospect of improving the Marshall parameters for different contents of bauxite residue used as filler and polypropylene, creating alternative materials in the constitution of pavements, capable of conferring satisfactory mechanical properties to traffic, without contaminating the environment.

Keywords: Bauxite residue; Asphaltic mixture; Polypropylene; Marshall's essay.

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el uso de residuos de bauxita, junto con polipropileno, de botellas de agua mineral, en la composición de Hormigón Mixto Bituminoso en Caliente - CBUQ. Para ello, se elaboraron composiciones con tres porcentajes diferentes de residuo de bauxita (3%, 5% y 7%), mezclas utilizando únicamente polipropileno, en los contenidos de (1%, 3% y 5%), y dosificaciones con sustitución de 3% masilla de residuo de bauxita y 3% polipropileno. Los materiales constituyentes se caracterizaron en términos de composición química, física y microestructural. El residuo de bauxita se evaluó en términos de granulometría, microestructura, pH, masa específica y composición química. Los agregados fueron sometidos a pruebas de masa específica, abrasión, índice de forma y adhesividad y, enmarcados en la curva granulométrica teórica correspondiente al promedio del “Rango C” de DNIT. Para el ligante CAP 50/70 se realizó la prueba de penetración, punto de reblandecimiento y viscosidad. El desempeño de las mezclas asfálticas se midió utilizando los parámetros de la prueba de Marshall y los resultados de tracción a compresión diametral estática a 25°C mínimo MPa. Se recolectó el agua del acondicionamiento a 60°C de especímenes consistente en residuos de bauxita y se evaluó el pH y las concentraciones de hierro y aluminio. Los resultados mostraron que existe la perspectiva de mejorar los parámetros Marshall para diferentes contenidos de residuos de bauxita utilizados como relleno y polipropileno, creando materiales alternativos en la constitución de pavimentos, capaces de conferir propiedades mecánicas satisfactorias al tránsito, sin contaminar el medio ambiente.

Palabras clave: Residuos de bauxita; Mezcla asfáltica; Polipropileno; El ensayo de Marshall.

1. Introdução

Em geral, no Brasil, as indústrias produzem maior ou menor quantidade de resíduos, dependendo de cada etapa do seu processo produtivo. Contudo, principalmente na mineração, o volume de rejeitos gerados é alto, e a sua logística reversa passa a ser um problema, pois torna-se necessário um grande espaço para depositá-los, o que se torna extremamente oneroso para as empresas geradoras, sendo um grande desafio hoje a disposição final adequada destes subprodutos.

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

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

Os fabricantes de água mineral aparecem como grandes fontes geradoras de resíduos plásticos, a ANVISA estabelece procedimentos de Boas Práticas de Fabricação em todos os processos de industrialização da água até o seu produto final para a comercialização. Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Águas Minerais (ABINAM, 2022), são consumidos no Brasil, cerca de cinco bilhões de litros de água, todos os anos. A indústria de água mineral é caracterizada pelo grande consumo de recursos naturais e produção de efluentes, assim deve se adaptar a processos ambientalmente corretos. Neste sentido, alguns estudos têm sido realizados quanto à aplicabilidade de sistemas de qualidade e à questão dos resíduos nas indústrias de águas minerais, utilizando novas tecnologias mais limpas (Aragão & Tamiarana, 2021).

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

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

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

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

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

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

Ainda com relação ao uso de resíduos, nas atividades de mineração, dois tipos de resíduos sólidos são gerados em maiores quantidades, os estéreis ou resíduos sólidos de extração e os rejeitos. Os rejeitos da mineração são compostos por partículas finas derivadas da rocha explorada, e que não são aproveitados após o processo de beneficiamento, que é o processo responsável por extrair o mineral de interesse econômico dos demais materiais encontrados no processo de mineração. No caso, o resíduo de bauxita é um rejeito originado no processo de beneficiamento da bauxita em alumínio. Para cada tonelada de alumínio produzido são gerados entre 0,3 a 1,5 toneladas de resíduo de bauxita (Ribeiro *et al.*, 2012; Hildebrando, *et al.*, 2013).

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

Algumas pesquisas classificam a resíduo de bauxita como um resíduo não-inerte (Epa, 2014; Nunn, 1998; Lima, 2006). Entretanto, as propriedades de elevada alcalinidade conferem certa periculosidade a este resíduo (Collazo, *et al.*, 2005; Antunes *et al.*, 2011).

Ainda que armazenados de maneira eficiente, resíduos industriais como a resíduo de bauxita representam uma ameaça à fauna e flora, sendo passíveis de causar sérios danos ambientais, como contaminação de efluentes superficiais e subterrâneos, afetando assim, a saúde de populações mais próximas (Antunes *et al.*, 2011).

A solução mais coerente conforme as premissas da sustentabilidade é a emissão zero de resíduos, incomum nos atuais 26 padrões de produção. Assim, uma vez produzidos, é conveniente tentar reinseri-los no ciclo produtivo (Aragão & Tamiarana, 2021).

Dessa forma, pesquisas têm sido desenvolvidas visando à utilização do resíduo de bauxita na constituição de materiais cerâmicos (Kavas, 2006; Yang & Xião, 2008), compondo tijolos, telhas e cimento (Manfroi, 2009; Macêdo, *et al.*, 2011; Antunes *et al.*, 2011). Entretanto, são raras as referências que avaliam a utilização do resíduo aplicado em outros contextos.

Diante das informações acima descritas, a presente pesquisa objetiva avaliar a adição de resíduo do processo de reutilização do garrafão de água mineral (polipropileno) no comportamento de misturas asfálticas tipo CBUQ. Para tanto, serão analisadas as variações dos parâmetros Marshall e resultados da tração por compressão diametral estática a 25°C mínima MPa em mistura de Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ, para diferentes teores de resíduo de bauxita, utilizada como filler, além da possibilidade de adição de polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral na mistura, isoladamente, e integrado com o resíduo de bauxita, utilizado como aglomerante.

2. Materiais e Métodos

2.1 Classificação da pesquisa

Segundo Gil (2002), toda e qualquer classificação se faz mediante algum critério. E em relação às pesquisas, é usual a classificação com base em seus objetivos gerais. Deste modo, esta pesquisa possui uma abordagem do tipo explicativa, por ser baseada em métodos experimentais e aplicações práticas. Em relação aos procedimentos técnicos, é do tipo experimental e bibliográfica, uma vez que o embasamento teórico acerca da temática envolvida foi realizado através de consultas em livros, pesquisas científicas (monografias, dissertações, teses, artigos, revistas, normas, entre outros).

2.2 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados na produção das misturas asfálticas foram: o resíduo de bauxita, o polipropileno do resíduo de garrafão de água mineral, o ligante asfáltico (CAP 50/70), os agregados graúdos e miúdos. O resíduo de bauxita utilizado neste trabalho é originário da empresa Hydro Alunorte, localizada no município de Barcarena, Estado do Pará, disponibilizado pelo Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Previamente a realização dos ensaios e fabricação de misturas asfálticas, o resíduo de bauxita foi seco a 100°C e destorroado em almofariz. Tendo em vista, que o resíduo ainda apresentava sinais de aglomeração, o processo de secagem e destorroamento foram realizados novamente, o que proporcionou ao resíduo uma regularidade granulométrica, conforme Figura 1.

Figura 1 - Resíduo de bauxita destorroado.



Fonte: Autores (2023).

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

características físico-químicas, por meio de ensaios de massa específica, granulometria a laser, espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDX), também conhecida por fluorescência. A microestrutura do resíduo foi avaliada por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o potencial corrosivo, com auxílio de pHmetro.

A Caracterização dos agregados minerais, foi realizada por meio dos ensaios de análise granulométrica (DNER-ME 083/98), índice de forma NBR 7809 (ABNT, 2005), massa específica real de agregado graúdo (DNER-ME 081/98) e miúdo (DNER-ME 084/95), abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), adesividade em agregados graúdos (DNER-ME 078/94) e durabilidade (DNER-ME 89/94).

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

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

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

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

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

Por fim, a fim de analisar possíveis contaminações que a inserção de resíduo de bauxita às misturas asfálticas poderia vir a ocasionar, foi realizada uma análise da qualidade da água, aferindo o pH e possíveis variações na concentração de alumínio e ferro.

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

Os corpos de prova constituídos por 3%, 5% e 7% de resíduo de bauxita foram mantidos em banho-maria por 24 horas a uma temperatura de 60°C. Terminado o condicionamento, os corpos de prova foram retirados do recipiente e aproximadamente 500 ml de água foram recolhidos do centro do equipamento para a análise.

Por serem elementos representativos no resíduo de bauxita, foram analisadas as concentrações de ferro e alumínio. Outras substâncias não puderam ser avaliadas devido à restrição de reagentes disponíveis.

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

2.3 Dosagem Marshall

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

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

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

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

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

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

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

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

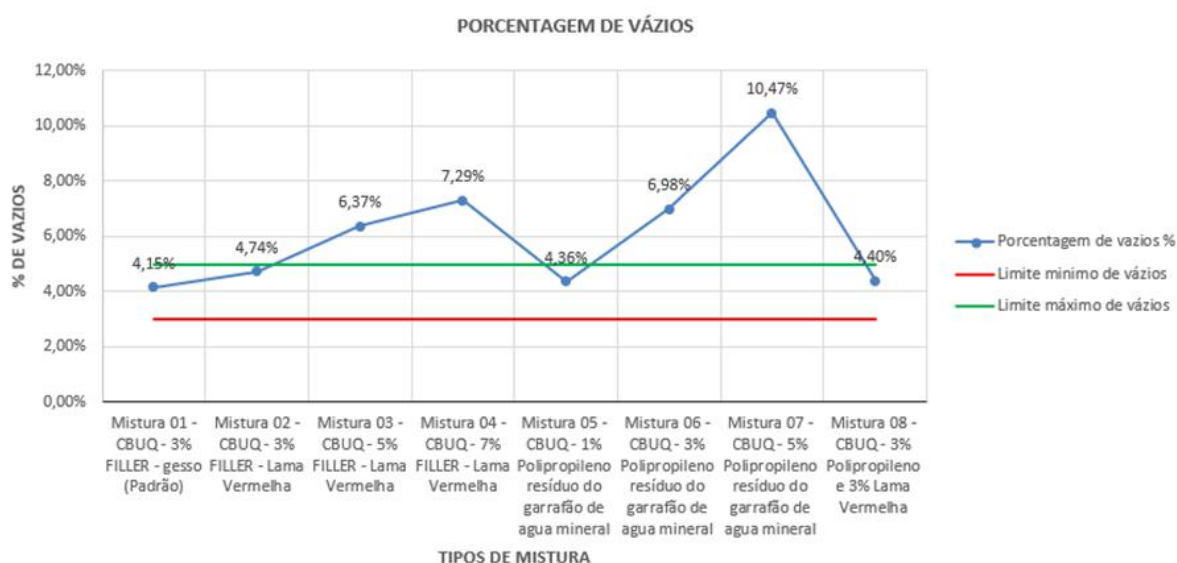
3. Resultados

3.1 Índice de vazios

O Gráfico da Figura 2 apresenta os valores obtidos para a porcentagem de vazios das amostras analisadas nesta pesquisa, a partir dos picos ilustrados na imagem. Nota-se que apenas quatro dos valores encontrados estão dentro da faixa compreendida entre 3,0% e 5,0% de volume de vazios. Tais resultados estão de acordo com o que se esperava, tendo em vista

que, quando se adota uma porcentagem muito mais alta de material fino (resíduo de bauxita e de polipropileno) com superfície específica elevada, promove-se um maior consumo de ligante, como o teor de ligante utilizado para todas as misturas foi igual (5,2%), o volume de vazios teve um aumento, à medida que se aumentava o percentual de material fino, pois o betume não conseguiu preenchê-los de maneira eficiente. Da mesma forma, se fosse adotada uma porcentagem de ligante muito alta, o betume preencheria todos os vazios e isso prejudicaria o desempenho do pavimento, uma vez que com a compactação dos agregados pelo alto fluxo de veículos faria com que houvesse a exsudação do asfalto, gerando o conhecido problema de pistas derrapantes.

Figura 2 - Porcentagem de vazios.



Fonte: Autores (2023).

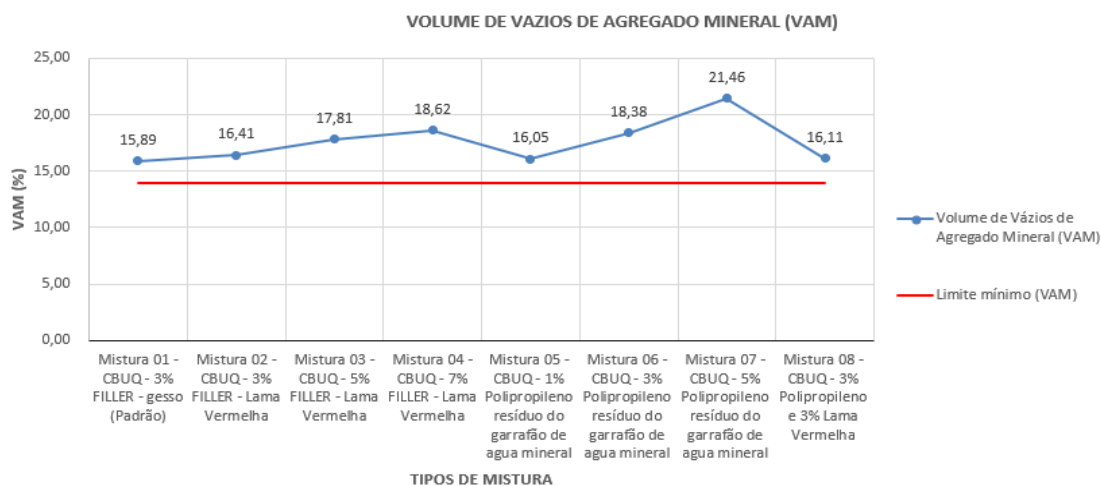
Como era de se esperar, o Gráfico da Figura 2 - Porcentagem de vazios - demonstra que quanto maior o teor de finos (resíduo de bauxita e polipropileno) maior será a porcentagem de vazios, e, portanto, maior será a superfície específica que é determinante para um maior consumo de ligante, nota-se que o teor de ligante usado nas misturas não foi suficiente para preencher a quantidade de vazios, tornando-se necessário um aumento da quantidade de ligante na mistura. Contudo, quando essa quantidade de ligante passa a ficar muito alta, o RBV se aproxima de 100% e começa a estabilizar. Um RBV de 100% significa que todos os vazios estão completamente preenchidos com betume. Essa situação é perigosa pois impede a permeabilidade da mistura asfáltica e atrapalha a vida útil do pavimento.

3.2 Índice de vazios do agregado mineral e relação betume/vazios - RBV

Conforme estabelece a norma ME 043 (DNER, 1995), para a faixa C, só são aceitos valores de VAM maiores que 14%. Sendo assim, todos os valores encontrados atendem essa exigência, conforme demonstrado no Gráfico da Figura 3, onde observa-se que os picos da linha em azul (volume de vazios das amostras) se sobrepõem a linha em vermelho (que representa o limite mínimo exigido). Contudo, como é possível notar ao se determinar a mistura ideal para o projeto, o valor de RBV tem influência direta na segurança e parâmetros mecânicos da mistura asfáltica. Nesta toada, observa-se no Gráfico da Figura 4 que os valores obtidos na mistura (linha em azul) não atendem o que determina norma ME 043 (DNER, 1995), que estabelece valores de 75 a 82 (representados pela linha em vermelho). Entretanto, alguns desses valores podem se enquadrar com um estudo do aumento do teor de ligante, todavia, não se pode afirmar que o teor de ligante influenciou substancialmente na

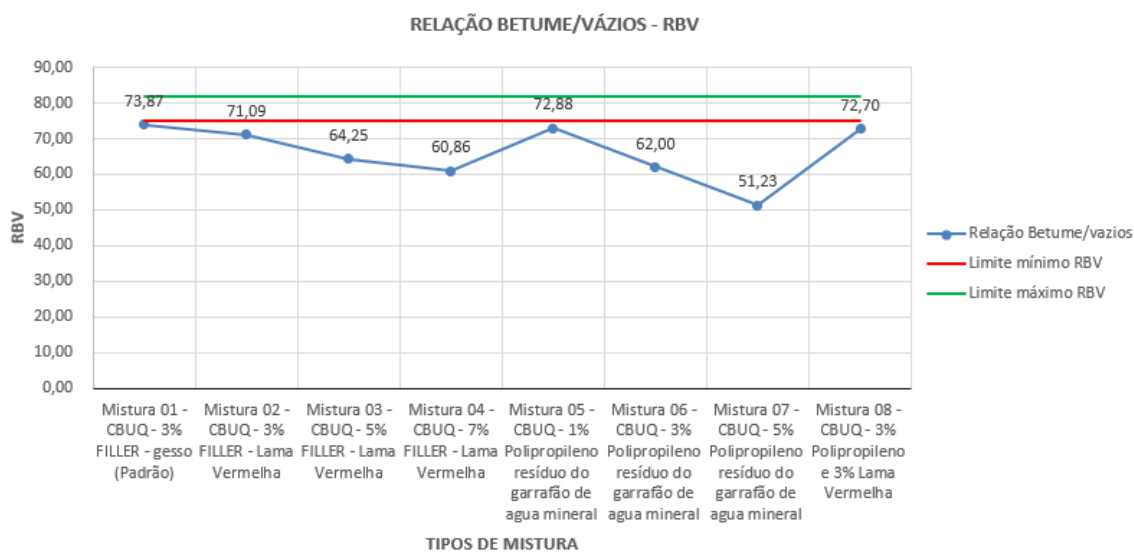
compactação das misturas, visto que todas as misturas foram moldadas com o mesmo teor de ligante, e obtiveram os parâmetros volumétricos requeridos, além de um grau de acomodação de grãos semelhante.

Figura 3 - Volume de vazios de agregado mineral.



Fonte: Autores (2023).

Figura 4 - Relação de Betume/Vazios – RBV.



Fonte: Autores (2023).

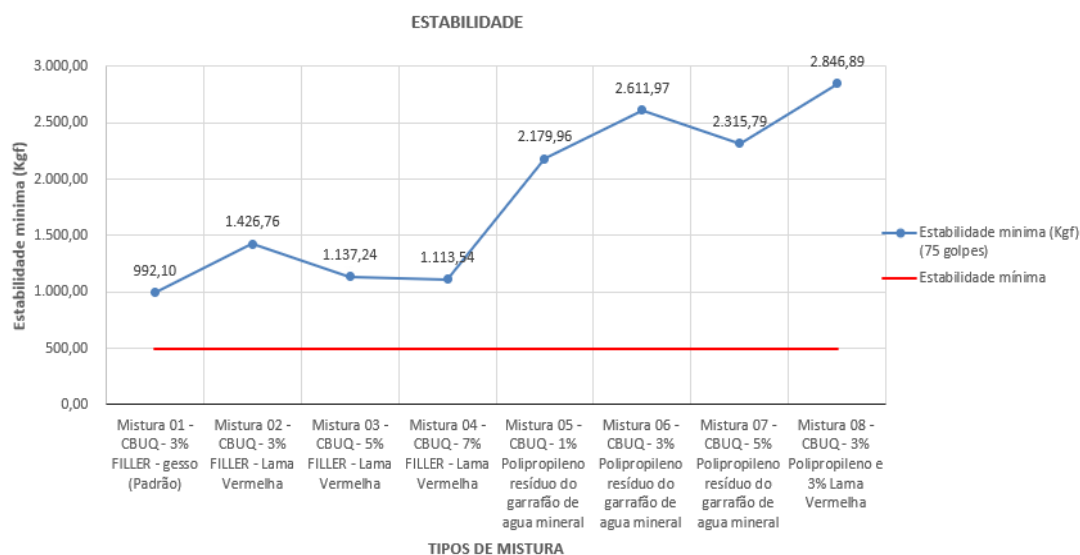
Conforme explícito acima, no que diz respeito a porcentagem de volume de vazios do agregado mineral (VAM), nenhuma das misturas atendeu ao valor mínimo normativo exigido. Entretanto, tendo em vista que os valores obtidos não distam dos requeridos e ainda o caráter experimental do trabalho, as misturas 01 (traço padrão), mistura 02 (3% de resíduo de bauxita), mistura 05 (1% de polipropileno resíduo do garrafão de água mineral) e mistura 08 (3% Polipropileno resíduo do garrafão de água mineral e 3% Resíduo de bauxita) foram consideradas aceitáveis.

3.3 Estabilidade

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

O pavimento advindo de uma mistura com valores de estabilidade altos pode ser submetido a maiores intensidades de tráfego, sem apresentar risco a segurança e ao conforto dos usuários. No caso das misturas avaliadas neste trabalho, os resultados estão demonstrados no Gráfico da Figura 5, a seguir, de acordo com a norma, os valores de estabilidade (N) precisam ser maiores do que 500 kgf (linha em vermelho) para que se possa aceitar a mistura como camada de rolamento, como se pode observar no gráfico supracitado acima, todos os valores encontrados (picos em azul) são bem maiores que a exigência normativa.

Figura 5 – Estabilidade.



Fonte: Autores (2023).

3.4 Porcentagem de vazios x estabilidade e Relação betume/vazios x estabilidade

Conforme demonstrado nos Gráficos das Figuras 6 e 7, o aumento da porcentagem de vazios está diretamente ligada a necessidade de preenchido de vazios com ligante, em apertada síntese, quando se aumenta o teor de ligante na mistura, o que ocorre com o aumento da Relação Betume/Vazios (RBV), aumenta-se também a estabilidade da mistura e isso já era esperado, pois o que ocorre é que se está preenchendo melhor os vazios e deixando a mistura mais uniforme. Destaca-se que para todas as misturas asfálticas deve se manter uma certa porcentagem de vazios, pois com o tempo os agregados tendem a se compactar sob a ação do tráfego e o asfalto tende a subir para a superfície da capa de rolamento (exsudação). Este fato cria o conhecido problema das pistas derrapantes, devido à película de asfalto que aparece no topo de uma camada de concreto asfáltico. Outra razão de se manter os vazios em certo intervalo de valor é a característica da variação de volume do asfalto por influência da temperatura, o que causaria o mesmo problema, se os vazios não existissem.

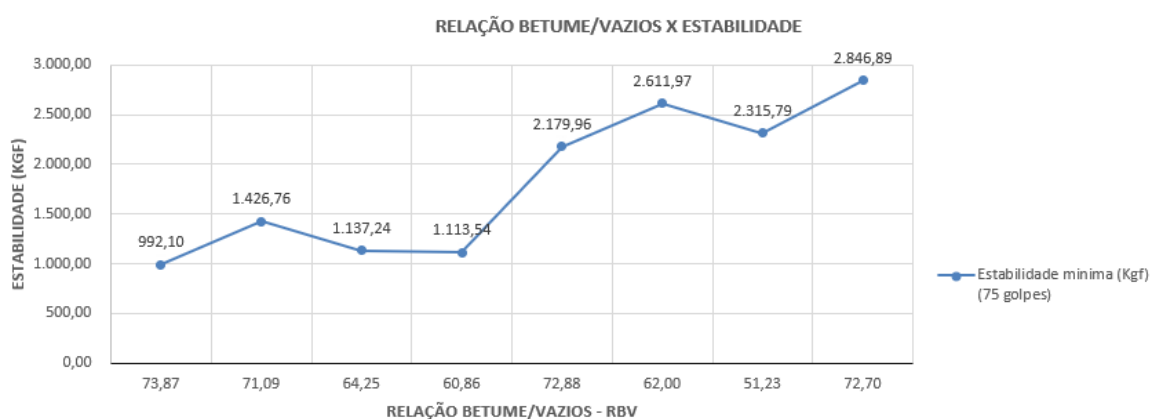
Outro ponto importante demonstrado nos Gráficos das Figuras 6 e 7, é que para as misturas utilizando polipropileno resíduo do garrafão de água mineral, onde a medida em que se aumentava o percentual de resíduo na mistura, os valores de vazios aumentavam e a Relação Betume/vazios diminuía, o que é um processo natural, conforme explicitado acima, entretanto, para estas misturas quando se diminuía a Relação Betume/Vazios a estabilidade da mistura ainda conseguia ser aumentada.

Figura 6 - Percentagem de vazios x estabilidade.



Fonte: Autores (2023).

Figura 7 - Relação Betume/Vazios x Estabilidade.

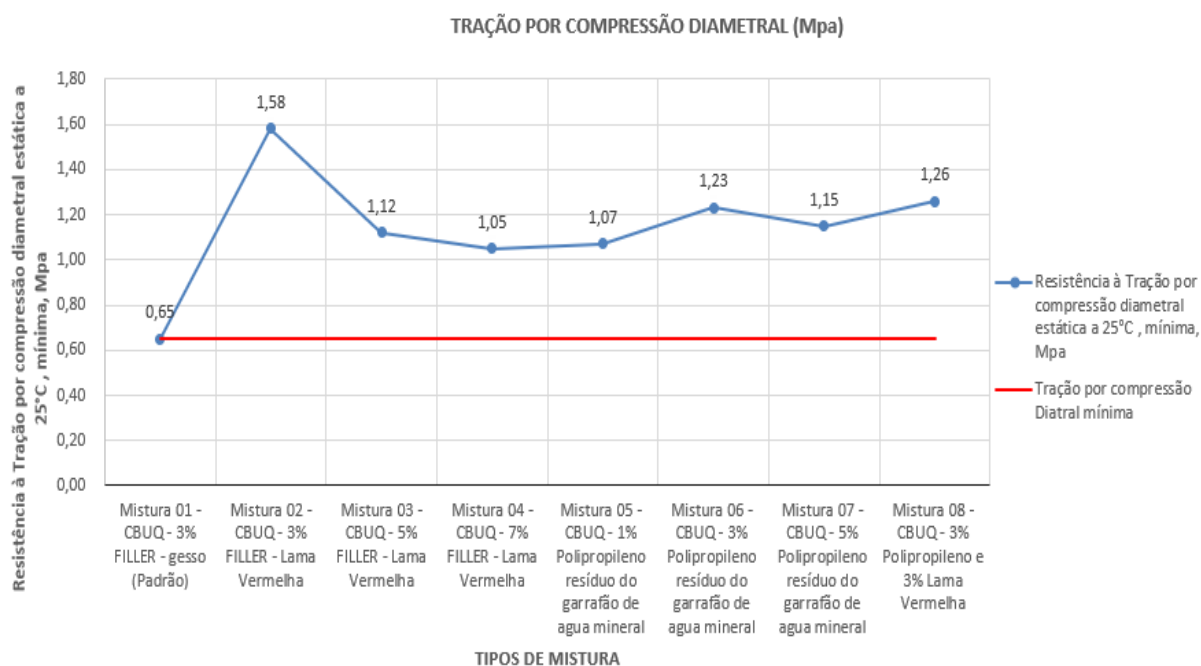


Fonte: Autores (2023).

3.5 Tração por compressão diametral

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para as misturas submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral. O referido ensaio seguiu os procedimentos descritos pela norma do DNIT ME – 136 (DNIT, 2010) que substitui a ME 138 (DNER, 1994). Neste sentido, foi aplicada de maneira progressiva uma carga, com velocidade de deformação de 0,8 mm/s, até que se observou a ruptura dos corpos de prova. Com o valor obtido de carga de ruptura, foi calculada a resistência a tração do corpo de prova rompido. É especificado na norma DNIT ME – 136 (DNIT, 2010) que é necessário para utilização da mistura asfáltica em pavimentos de rolamento um valor de resistência à tração superior a 0,65 MPa (representado pela linha em vermelho). Como é possível analisar no Gráfico da Figura 8, os valores encontrados são muito superiores aos exigidos, assim como no parâmetro de estabilidade. O aumento na resistência a tração se deve ao fato da adição de resíduo de bauxita e polipropileno do garrafão de água mineral contribuírem para o aumento da capacidade dessas misturas em aguentar as cargas as quais um pavimento é submetido.

Figura 8 - Tração por compressão diametral.



Fonte: Autores (2023).

3.6 Análise da qualidade da água

A norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) determina que para realizar a classificação de um resíduo quanto a sua periculosidade, ele deve constar nos anexos A e B da respectiva norma, possuir substâncias presentes nos anexos C e D, ou apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade patogenicidade e/ou toxicidade.

Em alguns casos há a necessidade de realizar ensaios de lixiviação e solubilização de resíduos para constatar se existem substâncias em concentrações superiores as permitidas pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). Neste trabalho, contudo, o resíduo de bauxita pôde ser classificado apenas com base nos resultados da análise química, sem que houvesse a necessidade de realizar ensaios adicionais.

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

- O pH da água com resíduo de bauxita a 3% apresentou um valor de $5,81 \pm 0,10$, conforme certificado de Análise n° 5FBC0B659593B160615920500483B8117DB8F201;
- O pH da água com resíduo de bauxita a 5% apresentou um valor de $6,12 \pm 0,10$, conforme certificado de Análise n° 5FBC0B6AE33421606159210C6000B2B6B4DCD252 e;
- O pH da água com resíduo de bauxita a 7% apresentou um valor de $6,16 \pm 0,10$, conforme certificado de Análise n° 5FBC0B6ABBC1516061592105A20B258F4D8E1418, que conforme a norma em questão, não caracteriza o resíduo de bauxita como uma substância corrosiva.

A principal forma de exposição humana ao alumínio é pela ingestão de alimentos e água, contudo, apesar do contato frequente, não há indicações de que o alumínio provoque qualquer tipo de intoxicação, ademais, todas as amostras analisadas apresentaram 0,00 (zero) mg/L de alumínio, cujos valores se encontram dentro dos parâmetros estabelecidos pela portaria de consolidação n° 05 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde, que estabelece um valor máximo permitido de alumínio de 0,1 mg/L como padrão de aceitação para água de consumo humano.

Com relação ao ferro, todas as amostras analisadas se apresentaram dentro do padrão de potabilidade, pois, estavam abaixo da concentração limite de 0,3 mg de ferro para cada litro de água. Assim como o alumínio, o ferro não é considerado tóxico, entretanto, traz diversos problemas para o abastecimento público de água, conferindo cor e sabor à água, contudo, para as amostras analisadas atende os padrões potabilidade.

O pH é um parâmetro importante em muitos estudos no campo do saneamento ambiental. De acordo Tavares (2012), o padrão de potabilidade do pH para águas de abastecimento público é de 6,0 a 9,5. Dessa forma, verificou-se que todos os valores auferidos estão dentro dos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Cabe ressaltar que a água sem ensaio provém diretamente do abastecimento de água público.

Os valores obtidos com a água proveniente do condicionamento dos corpos de prova a 60°C encontram-se dentro dos padrões de referência e, portanto, não indicam a liberação do resíduo de bauxita dos corpos de prova asfálticos. Ressalta-se, contudo, que esta análise é de caráter preliminar e há necessidade da realização de ensaios ambientais mais aprofundados, a fim de avaliar a real contaminação do resíduo na composição de pavimentos futuros.

4. Conclusões

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

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

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

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

Embora o pH e a concentração de ferro e alumínio tenham sido consideradas satisfatórias quanto aos valores normatizados, observa-se que a avaliação da qualidade da água realizada neste trabalho tem caráter preliminar e, portanto, não se pode afirmar que a utilização de resíduo de bauxita em misturas asfálticas não é capaz de provocar contaminações ao ambiente. Dessa forma, os indícios de liberação do resíduo de bauxita não são suficientes para inviabilizar a aplicação do resíduo em misturas asfálticas, sendo necessárias avaliações mais precisas e aprofundadas em trabalhos futuros.

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

De maneira geral, as misturas asfálticas constituídas por resíduo de bauxita obtiveram resultados superiores aos da mistura de referência, principalmente no que diz respeito aos valores de estabilidade da mistura e ensaio de tração por

compressão diametral estática a 25°C mínima. Em apertada síntese, entende-se que o resíduo de bauxita aumentou a resistência à tração por compressão diametral e estabilidade da mistura asfáltica

É importante que sejam continuadas pesquisas referentes ao reaproveitamento deste resíduo, principalmente no que diz respeito à constituição de misturas asfálticas, visto que a utilização do resíduo de bauxita não somente retira esse passivo ambiental da natureza, como é capaz de reduzir a probabilidade de contaminações ocasionadas pelo armazenamento contínuo do resíduo, além de melhorar o desempenho de pavimentos flexíveis.

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

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

Ademais, sugere-se o aprimoramento deste trabalho a partir da produção das seguintes pesquisas:

- I. Avaliação de maneiras de estudar possíveis contaminações que o resíduo de bauxita pode vir a ocasionar em lençóis freáticos;
- II. Utilização de agregados de caráter eletropositivo para compor misturas com resíduo de bauxita;
- III. Estudo sobre a incorporação de porcentagens superiores a 7% de resíduo de bauxita em outros tipos de ligante;
- IV. Avaliação do comportamento à deformação permanente e ao dano por umidade induzida de misturas asfálticas com resíduo de bauxita, utilizando o teor de projeto da mistura de referência;
- V. Realização do estudo de comportamento reológico e desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com resíduo de bauxita

Referências

- Abinam (2022). Associação Brasileira das Indústrias de Águas Minerais, 29º Congresso Brasileiro da Indústria de Águas Minerais & Expo-abinam& sindinam '2022. <https://www.abinam.com.br/congresso-e-expo-abinam/>
- Antunes, M. L. P., et al. (2011). Caracterização do resíduo de bauxita brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras. *3rd International Workshop / Advances in Cleaner Production*.
- Aragão, L. de P. & Tamarana, R. A. (2021). Aplicabilidade dos pressupostos da economia circular na indústria de água mineral. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 10 (1), 418-423
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 14222 (2019). *Embalagem plástica para água mineral e potável de mesa – Garrafão retornável – Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10.004 (2004). *Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Collazo, A. et al. (2005). Evaluation of red mud as surface treatment for carbon steel painting. *Process in Organic Coating*, 52 (2), 351-358.
- EPA (2014). Environmental Protection Agency. U. S. Government Printing Office. *Electronic code of federal regulations*. <http://ecfr.gpoaccess.gov>.
- Fernandes, M. R. S. et al. (2007). Caracterização de Asfaltos Modificados com SBS. *38ª Reunião anual de pavimentação, 12º Encontro nacional de conservação rodoviária*, Manaus, AM, Brasil.
- GIL, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa*. (4a ed.). Atlas.
- Hildebrando, E. A. et al. (2013). Application of Bauxite Waste from Amazon Region in the Heavy Clay Industry. *Materials Research*, XVI (6), 1418-1422. ISSN 1516-1439.
- Kavas, T. (2006). Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. *Building and Environment*, v. 41 (6), 1779-1783. ISSN 0360-1323.
- Lima, F. S. S. (2006). *Utilização do resíduo de bauxita e do resíduo caulinitico na produção de pigmento pozolânico para argamassas e concretos de cimento Portland*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Macêdo, A. N. et al. (2011). Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de resíduo de bauxita e argila. *Revista Ambiente Construído*, XI (4), 25-36.

Manfro, E. P. (2009). *Avaliação do resíduo de bauxita como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassa*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

Mello, L. G. R. (2008). *O estudo do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas*. (Tese de Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Miranda, et al. (2019). Sustentabilidade – ODS 18 – *Gestão ambiental nas empresas*. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Nunn, R. F. (1998). Advances in red mud dewatering and disposal technologies. *J. Light Metals - The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale*, 7 (2), 107-114.

Ribeiro, D. V. et al. (2012). Efeito da adição do resíduo de bauxita na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5 (4), 451-467.

Souza, J. A. D. S. (2010). *Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil*. (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Tavares, D. S. (2012). *Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Yang, J. & Xiao, B. (2008). Development of unsintered construction materials red mud wastes produced in the sintering alumina process. *Construction and Building Materials*, 3(22), 2299-2307.