

Otimização da sustentabilidade em pavimentação rodoviária: utilização de resíduos de celulose e papel como substituição de agregado miúdo em misturas asfálticas usinadas a quente

Alisson Victor Vanin¹
Fabiano Alexandre Nienov²
Gislaine Luvizão³

Resumo

O modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil, composto por pavimentos de múltiplas camadas, que utilizam o concreto asfáltico como revestimento. O concreto asfáltico, por sua vez, é responsável por resistir ao desgaste pneu-pavimento, bem como as deformações e variações climáticas. Atualmente, o concreto asfáltico vem sendo estudado com o intuito de aprimorar suas características mecânicas. Nesse sentido, resíduos industriais se tornam uma abordagem promissora para aprimorar as características do pavimento e reduzir o uso de matéria-prima. Com o crescente aumento das indústrias de papel, a utilização de resíduos de papel e celulose em concreto asfáltico se mostram como uma alternativa promissora. Dessa forma, o estudo atual buscou avaliar as propriedades do concreto asfáltico à medida que o agregado fino popularmente conhecido como pó de pedra foi substituído por resíduos de papel e celulose nas proporções de 0%, 2% e 4% de resíduos. Foram realizados ensaios de caracterização nos materiais utilizados, definido o traço padrão de concreto asfáltico e o teor ótimo de cimento asfáltico. Foram confeccionadas amostras com teores de 4,5%, 5,0%, 5,5% de CAP. Essas amostras foram utilizadas para avaliar as características do concreto asfáltico com a incorporação de resíduos por meio dos ensaios de estabilidade e fluência, resistência à tração por compressão diametral, abrasão Cântabro, dano por umidade induzida e avaliação química por solubilidade. Os resultados obtidos comprovam que o resíduo pode ser utilizado como substituto do agregado miúdo, os ensaios de estabilidade e dano por umidade induzida mostraram que o resíduo pode ser utilizado, embora com desempenho limitado, o traço com 2% de resíduo pode auxiliar no ganho de resistência abrasiva do concreto asfáltico, enquanto que o traço com 4% de resíduo pode auxiliar na resistência à tração do concreto asfáltico. A análise química comprovou que a utilização de resíduos em concreto asfáltico não causa impactos ambientais quando exposta ao ambiente.

Palavras-chave: Concreto asfáltico; Resíduos de papel e celulose; Sustentabilidade; Desempenho mecânico

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da Unoesc Campus de Joaçaba, e-mail: alisson.vanin@unoesc.edu.br.

² Professor Doutor, Universidade do Oeste de Santa Catarina, e-mail: fabiano.nienov@unoesc.edu.br.

³ Professora Doutora, Universidade do Oeste de Santa Catarina, e-mail: gislaine.luvizao@unoesc.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são compostos por múltiplas camadas, das quais, o revestimento é o que enfrenta diretamente as forças climáticas e a influência da aderência pneu-pavimento, bem como a tração veicular. No cenário dos pavimentos no Brasil, é comum empregar concreto asfáltico como revestimento, visando a estabilidade e durabilidade das vias (BERNUCCI et al., 2002).

Conforme mencionado, o concreto asfáltico é utilizado como material predominante na construção de pavimentos rodoviários. No entanto, esse material enfrenta uma alta demanda, necessitando de matérias-primas como agregados provenientes dos processos de britagem em pedreiras, além do cimento asfáltico derivado do petróleo. Tanto os agregados quanto o cimento asfáltico são recursos não renováveis, o que acarreta significativos impactos ambientais (BERNUCCI et al., 2008).

Nesse contexto, conforme mencionado por Faxina (2002), as pesquisas no campo da pavimentação buscam impulsionar o avanço tecnológico, buscando aprimorar tanto o desempenho do concreto asfáltico quanto as propriedades da mistura, além das técnicas construtivas associadas. O objetivo central é elevar a qualidade das rodovias e, simultaneamente, diminuir a dependência de matérias-primas originadas de recursos naturais.

De maneira abrangente, estudos na área de resíduos industriais surgem como uma abordagem para essa questão, uma vez que esses resíduos consistem em materiais de granulação fina, apresentando-se como possíveis substitutos para agregados miúdos, como areia e pó de pedra.

Na região do Meio Oeste Catarinense, destaca-se o crescimento da indústria de papel, que, por sua vez, gera uma considerável quantidade de resíduos, denominada lama de cal. Diante do aumento dos custos e dos desafios associados ao armazenamento, emerge a necessidade quanto à maneira adequada de gerir esse resíduo e explorar oportunidades de reaproveitamento (COLLATTO e BERGMANN, 2009).

Nesse cenário, a utilização de resíduo de papel e celulose na construção civil emerge como uma escolha economicamente viável. Essa abordagem não apenas visa a redução da demanda e dos custos associados à aquisição de matéria-prima, mas também busca fornecer um destino adequado para os resíduos, que atualmente carecem de uma destinação apropriada e acabam sendo depositados em aterros (MARQUES et al., 2014).

Para concretizar essa abordagem, torna-se viável analisar as características de misturas de concreto asfáltico com a inclusão do resíduo. Isso implica na avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas. Com o intuito de alcançar resultados satisfatórios, é essencial conduzir um estudo químico do CAUQ com resíduo. Esse estudo não somente visa aferir a viabilidade do seu uso como componente em pavimentação, mas também examinar os possíveis impactos ambientais que poderiam surgir em decorrência dessa aplicação.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de misturas de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), incorporando resíduos em proporções de

0%, 2% e 4%. Esses resíduos substituem o material pó de pedra nas mesmas proporções. Além disso, serão analisados os aspectos físicos, mecânicos e químicos em teores de 4,5%, 5% e 5,5% de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e no teor ótimo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este estudo foi elaborado com base em uma revisão de literatura que exemplifica e confirma a viabilidade do aproveitamento de resíduos de celulose provenientes da indústria de papel em diversas aplicações. Esses resíduos encontram sua utilidade como incorporação em diferentes setores, destacando-se na construção civil e no estudo de solos. Além disso, numerosas pesquisas têm demonstrado que a incorporação de resíduos industriais de diferentes materiais e origens pode contribuir para o desempenho do concreto asfáltico, trazendo benefícios em diversas perspectivas. A seguir, apresentaremos os resultados de diversos estudos, abordando tanto o potencial dos resíduos de papel e celulose quanto o uso de resíduos em concreto asfáltico.

2.1 RESÍDUO DE PAPEL E CELULOSE

Na produção de papel, a indústria utiliza da madeira como sua principal fonte para a obtenção de celulose. No processo de transformação dessa matéria-prima, uma considerável quantidade de resíduos é gerada, incluindo cascas de madeira, cinzas resultantes da combustão e resíduos conhecidos como lama de cal. Esse último resíduo é vinculado ao processo conhecido como Kraft. Segundo Carvalho (2006), é estimado que mensalmente uma única fábrica seja responsável pela geração de aproximadamente 2000 toneladas de resíduos, os quais são direcionados para um aterro industrial.

De acordo com a análise realizada por Pinheiro et al., (2007), e seguindo as orientações estabelecidas pela norma NBR 10004/2004, é possível classificar o resíduo como pertencente à classe II A, caracterizada como não inerte. Nesse contexto, a lama de cal não demonstra sofrer reações químicas significativas. Os mesmos autores indicam que o resíduo proveniente da indústria de papel e celulose é composto por elementos como celulose, calcita e caulinita. Sendo considerado como não perigoso, apresentando potencial para ser reciclado.

Os resultados obtidos por Oliveira (2022) atestam que o resíduo proveniente da indústria de papel e celulose apresenta potencial para ser empregado na produção de ligantes alcalis ativos. Pértile (2011) demonstrou que a incorporação da lama de cal no solo contribui para a fertilidade química, bem como para a correção do pH e a neutralização da acidez do solo. Além disso, foi estabelecido como uma fonte viável a criação de briquetes, por meio da incorporação de resíduos celulósicos provenientes da indústria de papel, juntamente com finos de carvão vegetal, como evidenciado por Martins et al. (2016).

Outros autores também têm comprovado a eficácia do resíduo de papel e celulose na indústria da construção civil. Molina et al. (2004) comprovou sua utilidade em combinação

com cal, resultando em maior resistência à tração em bases e sub-bases de estruturas rodoviárias. Além disso, estudos como o de Li et al. (2022) demonstraram a capacidade do resíduo em aprimorar as propriedades mecânicas do concreto espumado. Trentin (2011) explorou a substituição parcial da areia por resíduo de papel em argamassas. O potencial de produzir tijolos de papel-concreto utilizando resíduos de papel também tem sido investigado, sendo recomendado por Niyomukiza et al. (2023) para aplicações em paredes de alvenaria não estrutural.

2.2 RESÍDUOS EM CONCRETO ASFÁLTICO

O concreto asfáltico, segundo Bernucci et al. (2008) é produzido através da combinação de agregados e ligante asfáltico. Sua fabricação ocorre em usinas fixas ou móveis, onde a mistura é realizada antes da aplicação no local de construção. Essa mistura pode ser processada a altas temperaturas, temperaturas moderadas ou até mesmo a frio, podendo inclusive incorporar aditivos como a espuma de asfalto. Além do concreto asfáltico convencional, existem variações como a lama asfáltica e o micro revestimento, cada uma servindo a um propósito distinto e atendendo a requisitos específicos de qualidade.

A utilização de resíduos no concreto asfáltico apresenta um atrativo significativo, como ressaltado por Wesseling (2005). Isso se deve ao fato de que a pavimentação demanda grandes volumes de materiais, e a incorporação de resíduos reduz os riscos de acidentes ambientais, transformando esses resíduos em componentes encapsulados no concreto asfáltico, evitando a liberação de contaminantes. Além disso, a necessidade constante de manutenção das vias estimula a busca por soluções que otimizem a relação custo-benefício na produção de estradas. Assim, a inclusão de resíduos se destaca como uma abordagem promissora para aprimorar esse processo de maneira sustentável.

Silva (2023) realizou um estudo para avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos provenientes de usina de asfalto (BGA) em concretos asfálticos. Os resultados indicaram que a adição de 2% de BGA, com teor ótimo de ligante apresentou resultados satisfatórios. Souza (2022) investigou a adição de 20% a 30% de resíduos provenientes da construção civil (agregados recicláveis) em concreto asfáltico. Sua pesquisa evidenciou que tal adição provocou alterações nas características volumétricas do material, sem comprometer a compactação e mantendo-se dentro dos parâmetros mínimos de estabilidade Marshal.

Estudos regionais têm confirmado que a incorporação de escória de aciaria em concreto asfáltico resulta em um aprimoramento significativo nas propriedades mecânicas e de durabilidade. De maneira semelhante, a utilização do resíduo de areia de fundição (RAF) em misturas asfálticas também demonstrou a capacidade de atingir valores satisfatórios. Entretanto, quando o resíduo de escória de aciaria e o RAF são empregados de forma conjunta, foi constatado um desempenho mecânico abaixo das expectativas, além de um consumo elevado de ligante asfáltico (Salla e Luvizão, 2019; Wesseling, 2005).

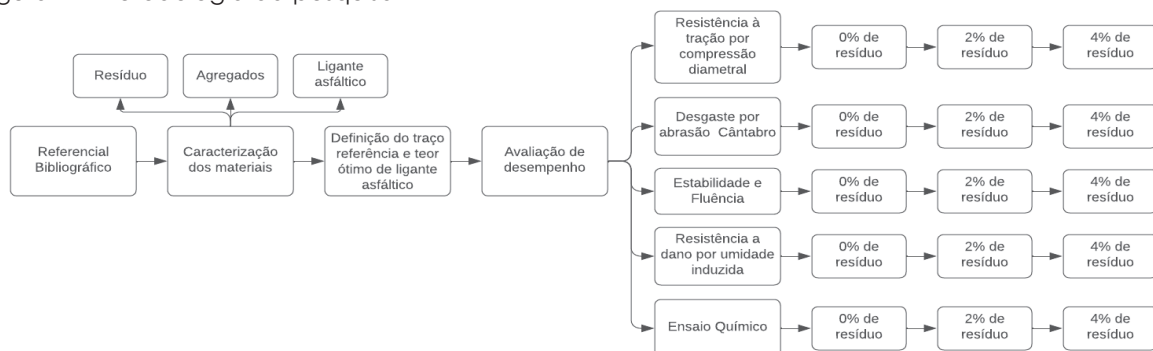
No contexto internacional, dentro do mesmo segmento, Modolo et al. (2010) conduziu uma investigação que constatou que a utilização de resíduos provenientes da indústria de papel e celulose demonstram desempenho satisfatório como agregado em misturas betuminosas. Já em um âmbito nacional, Vanin et al. (2023) validou que a adição de 2% de resíduos de papel e celulose em concreto asfáltico não afeta drasticamente as características da mistura, possibilitando uma destinação mais eficaz para o resíduo, mesmo que com um desempenho estrutural limitado.

Assim, como mencionado em pesquisas anteriores e destacado por diversos autores, o estudo da viabilidade do resíduo de papel e celulose como substituto para agregados finos em misturas de concreto asfáltico usinado a quente emerge como uma perspectiva promissora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para obter os resultados, foram empregados diversos materiais, incluindo resíduo de papel e celulose, pó de pedra, pedrisco, brita I e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Todos esses materiais passaram por um processo de caracterização antes de serem utilizados na fabricação dos corpos de prova de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). O procedimento seguiu rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas, que orientam a realização de ensaios e fornecem o embasamento teórico e os cálculos necessários. A Figura 1 fornece uma ilustração esquemática da metodologia adotada, destacando as etapas-chave do processo.

Figura 1 – Metodologia da pesquisa



Fonte: os autores (2023).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

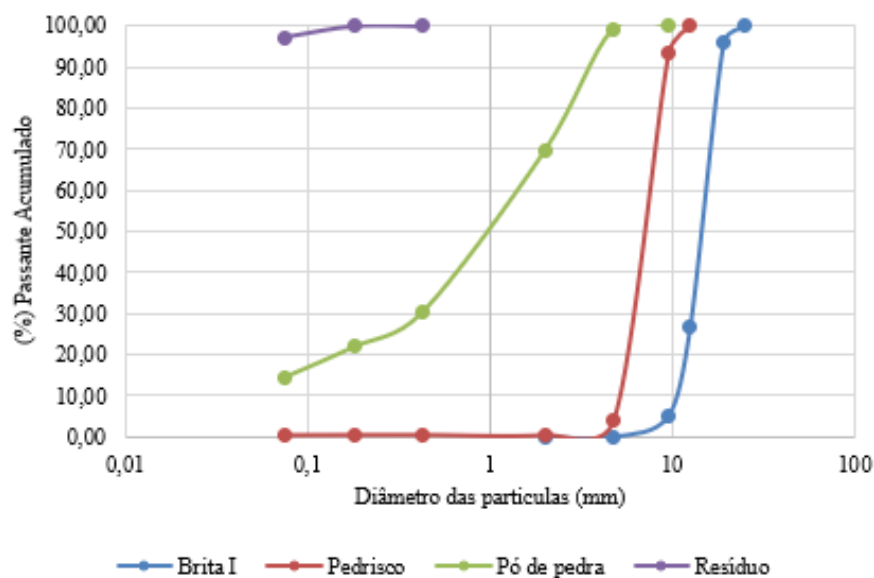
A fabricação dos corpos de prova requer o estudo dos materiais. Isso inclui a obtenção de informações como a granulometria dos agregados, o teor de umidade do resíduo e a temperatura de usinagem e compactação do cimento asfáltico de petróleo (CAP). Além disso, é necessário especificar o tipo de cimento asfáltico utilizado. Para a determinação do

teor ótimo de CAP no concreto asfáltico, é imprescindível a definição da massa específica dos agregados e a densidade do CAP.

3.1.1 Caracterização dos agregados e resíduo

Para avaliar a granulometria dos agregados, foi conduzido ensaio conforme as diretrizes da norma DNER-ME 083/98. Essas diretrizes estabelecem a quantidade de material a ser analisado e quais peneiras devem ser utilizadas. Seguindo o mesmo protocolo, foi realizado o ensaio sem a lavagem das amostras. Os resultados obtidos atenderam aos limites estabelecidos por norma, os quais estão representados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Granulometria dos agregados e resíduo



Fonte: os autores (2023).

Para determinar a massa específica foram seguidas as orientações das normas DNER-ME 195/97 e DNER-ME 084/95, que são aplicáveis à caracterização de agregados miúdos e graúdos, respectivamente. Para a obtenção da massa específica do resíduo, adotou-se como referência o ensaio de massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó, conforme definido na NBR 16605 Além disso, procede-se com o ensaio de massa unitária, conforme norma DNIT 437/2022. Todos esses valores resultantes dessas análises estão devidamente apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Massa específica e massa unitária

Materiais	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
Brita I	2,85	1,54
Pedrisco	2,83	1,51
Pó de pedra	2,97	1,87
Resíduo	2,63	0,63

Fonte: os autores (2023).

A determinação do teor de umidade desempenhou um papel fundamental na avaliação dos custos associados à remoção da quantidade de água presente no resíduo, permitindo uma ponderação entre os gastos com materiais e os custos envolvidos na utilização apropriada desse resíduo. De acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma DNER-ME 213/94, foi possível determinar um teor de umidade *in natura* de 39,13% para o resíduo coletado na fábrica, indicando uma elevada quantidade de água presente no resíduo. Essa informação é de grande relevância para a tomada de decisões quanto à gestão e reaproveitamento desse material, contribuindo para uma análise mais precisa dos custos e benefícios associados a esses processos.

3.1.2 Caracterização do cimento asfáltico

Para assegurar a conformidade dos resultados obtidos nos demais ensaios com as referências bibliográficas, classificou-se o cimento asfáltico com base nos resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, seguindo as orientações estabelecidas pelas normas DNIT 155/2010 – ME e DNIT 131/2010 – ME, respectivamente. Dessa forma, dentre as opções disponíveis de CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200, o cimento asfáltico utilizado foi classificado como CAP 50-70. Além disso, é relevante mencionar que o resultado do ensaio de densidade, conduzido de acordo com a norma DNER-ME 193/96, se mostrou coerente com os valores de referência. Os detalhes desses resultados podem ser observados na Tabela 2.

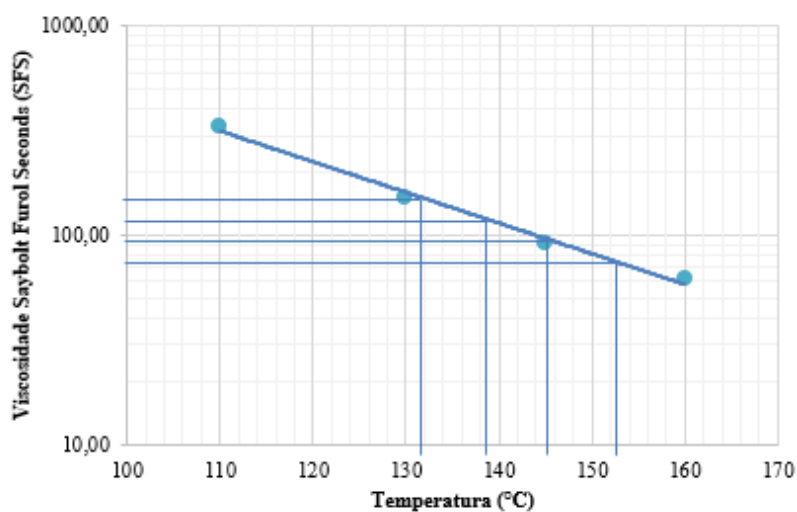
Tabela 2 – Características do ligante asfáltico

Ensaio	Resultado	Unidade
Penetração	52,33	0,1 mm
Ponto de amolecimento	48	°C
Densidade	1,002	g/cm ³

Fonte: os autores (2023).

Para definir as temperaturas de usinagem e compactação, foi realizado o ensaio de viscosidade Saybolt Furol, um procedimento padronizado pelas normas NBR 14950 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) e DNER-ME 004-94. Este ensaio avalia o tempo de viscosidade em diferentes temperaturas, resultando no Gráfico 2, o qual indicou a temperatura de 148°C para usinagem e 135°C para compactação. A temperatura de usinagem será crucial para regular a temperatura dos moldes dos corpos de prova, bem como outros componentes envolvidos no processo, garantindo condições ideais para a produção dos materiais de teste.

Gráfico 2 – Resultados do ensaio de viscosidade Saybolt Furol

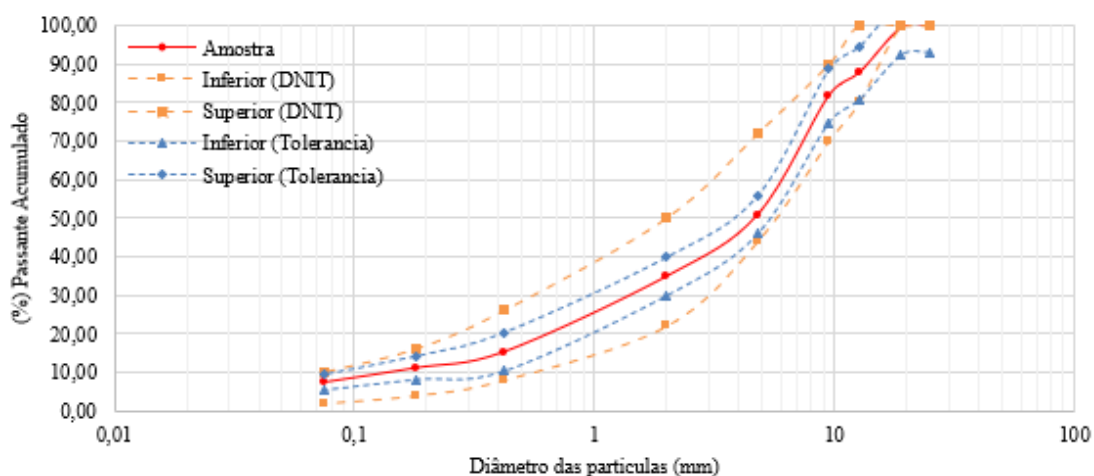


Fonte: os autores (2023).

3.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO REFERENCIA E TEOR ÓTIMO DE CIMENTO ASFÁLTICO

Após a obtenção da granulometria dos agregados utilizados, foi possível determinar a quantidade de cada material necessário para a composição do traço referência. Esse valor é calculado de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma DNIT 031/2006, que define faixas de composição da mistura e suas respectivas tolerâncias. Para este estudo, tomamos como referência a faixa granulométrica C, que resultou na composição da mistura com 17% de brita I, 33% de pedrisco e 50% de pó de pedra. Essas proporções se mostraram as mais adequadas, conforme ilustrado no Gráfico 3, proporcionando a melhor combinação de materiais para os corpos de prova em questão.

Gráfico 3 – Faixa granulométrica

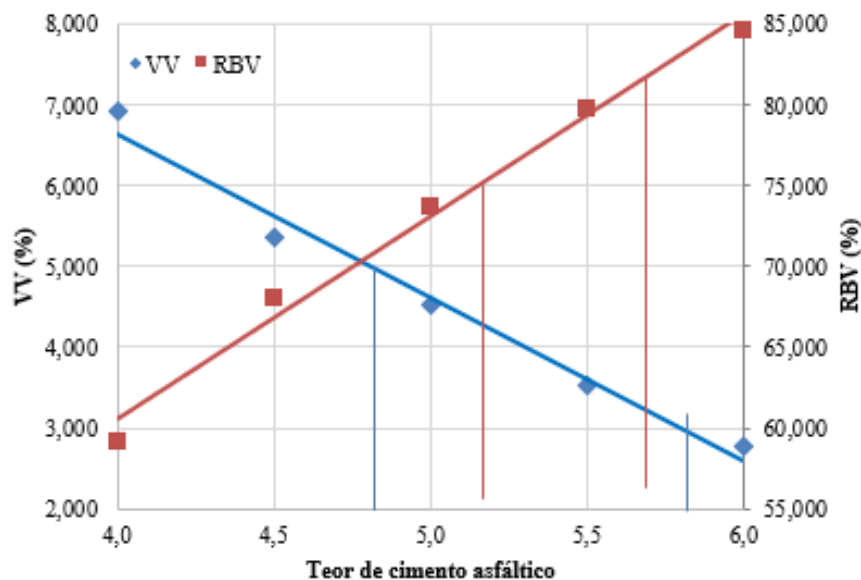


Fonte: os autores (2023).

Uma vez estabelecida a quantidade de material a ser utilizada, procede-se com o ensaio Marshal, empregando compactação automática, conforme diretrizes estipuladas na norma DNER-ME 043/95. Neste ensaio, foram produzidos corpos de prova com diferentes teores de cimento asfáltico, variando entre 4,0% a 6,0%. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à aferição de diâmetro, altura, massa seca e massa submersa.

Com os corpos de prova devidamente preparados, foi realizado os ensaios de estabilidade e fluência, dos quais foram obtidos valores de referência. Integrando as medições dimensionais, a massa específica de cada material e os resultados de estabilidade e fluência, foi determinado o teor ótimo de cimento asfáltico. Esse processo está representado no Gráfico 4, onde definimos o teor ideal de 5,1% de CAP. Este valor servirá como referência posterior para avaliar o desempenho das misturas com adição de resíduo.

Gráfico 4 – Definição do teor ideal de cimento asfáltico



Fonte: os autores (2023).

3.3 ENSAIOS DESTRUTIVOS E ANÁLISE QUÍMICA

Para o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), a avaliação de sua resistência ao desgaste, capacidade de suportar cargas, resistência às intempéries e variações climáticas desempenham um papel primordial na determinação da qualidade e desempenho do material. Para conduzir uma avaliação abrangente desses fatores, procedeu-se com ensaios de estabilidade e fluência, resistência à tração por compressão diametral, ensaio de abrasão Cântabro e análise do dano por umidade induzida.

Os ensaios de estabilidade e cântabro foram conduzidos com a fabricação de três corpos de prova para cada um dos teores de 4,5%, 5,0% e 5,5% de CAP. Para cada teor de ligante, realizaram-se avaliações variando de 0%, 2% e 4% de substituição do pó de pedra pelo resíduo. Os ensaios de dano por umidade induzida e resistência à tração por compressão

diametral foram exclusivamente realizados para o teor ideal de cimento asfáltico, variando a substituição de pó de pedra entre 0%, 2% e 4% de resíduo.

Além dos ensaios destrutivos, tornou-se essencial avaliar o comportamento químico da mistura, com o objetivo de obter informações relevantes quanto a interação do resíduo com o ambiente. Isso inclui a análise para determinar se a incorporação do resíduo pode apresentar algum risco ambiental.

3.1.1 Estabilidade e resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de estabilidade, exemplificado na Figura 2a, tem por finalidade a avaliação da capacidade do concreto asfáltico em resistir a cargas específicas sem que ocorram deformações permanentes. A Figura 2b, por sua vez, representa o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCTD), também conhecido como ensaio de resistência à tração indireta. Este teste visa determinar a capacidade do concreto asfáltico de resistir a cargas que atuam perpendicularmente ao seu diâmetro. É importante salientar que, segundo Bernucci et al. (2008), esse ensaio pode, adicionalmente, ser utilizado para estimar o potencial de trincamento do concreto asfáltico.

Figura 2 – Ensaio de estabilidade e resistência à tração por compressão diametral



(a)

(b)

Fonte: os autores (2023).

No ensaio de estabilidade, foram seguidas as diretrizes estabelecidas pela norma DNER-ME 043/95. Já o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi conduzido de acordo com as prescrições da norma DNIT-ME 136/2018. É relevante destacar que em ambos os ensaios, os corpos de prova foram submetidos a temperaturas específicas, sendo 60°C para o ensaio de estabilidade para o RCTD.

3.1.2 Desgaste por abrasão cântabro

Para avaliar o processo de desgaste abrasivo do concreto asfáltico, o ensaio de abrasão cântabro foi conduzido. Neste procedimento, os corpos de prova foram inseridos no aparelho de abrasão Los Angeles, submetidos a 300 rotações a uma velocidade controlada entre 30 a 33 rotações por minuto, em conformidade com os critérios estabelecidos pela norma DNER-ME 383/99. Este processo tem por finalidade estabelecer uma correlação entre o desgaste abrasivo do concreto asfáltico e sua durabilidade.

O desgaste cântabro pode ser observado na Figura 3, que ilustra o corpo de prova com 4,5% de CAP e 4% de resíduo em dois estados distintos: antes da realização do ensaio cântabro (Figura 3a) e após a conclusão do ensaio (Figura 3b).

Figura 3 – Corpo de prova submetido ao ensaio de abrasão cântabro



(a)

(b)

Fonte: os autores (2023).

3.1.3 Dano por umidade induzida

Conforme prescrito pela norma DNIT 180/2018 – ME, o ensaio de dano por umidade induzida (DUI) representa uma ferramenta essencial para verificar a resistência do concreto asfáltico as variações climáticas e de temperatura ao qual o pavimento é submetido. Em contrapartida aos demais ensaios, este procedimento requer a padronização do volume de vazios ao ar no concreto asfáltico, estabelecendo-o em 7%. Essa condição específica é alcançada mediante uma variação na energia de compactação, neste estudo a energia de compactação foi reduzida de 75 golpes para 50 golpes.

O ensaio DUI envolve um processo no qual o corpo de prova é submetido a um condicionamento térmico acelerado, resultando em um choque térmico controlado. Inicialmente, o corpo de prova foi exposto a uma temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, seguida de submissão a uma temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Após esse processo de condicionamento, os corpos de prova são submetidos ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral, e os dados resultantes são utilizados para avaliar a razão de resistência a tração retida (RRT).

3.1.4 Análise química

Com o objetivo de avaliar o impacto ambiental associado à incorporação de resíduos de papel e celulose em concreto asfáltico, realizou-se um ensaio de solubilidade. Esse ensaio foi adequado de acordo com o método estabelecido na norma NBR 10006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), que descreve o procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Para realizar o teste, os corpos de prova foram acondicionados em recipientes vedados, mantidos a uma temperatura de 25°C e imersos em aproximadamente um litro de água destilada.

Após um período de sete dias, foi coletada uma amostra da água em contato com o concreto asfáltico, a qual foi realizado uma análise química, consistindo na determinação do pH da água, utilizando o método potenciométrico conforme SM 4500-H+ B, bem como a quantificação dos teores de fósforo mediante o método colorimétrico, baseado no SM 4500-P E, sílica utilizando o método do molibdato conforme SM 4500-SiO₂ C e sulfato através do método nefelométrico, baseado no SM 2130-B.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No estado fresco do concreto asfáltico foi observado uma redução leve na cobertura de CAP nos agregados de granulometria mais grossa, essa variação foi pouco expressiva. Essa ocorrência se explica pelo fato de que o resíduo apresenta uma proporção maior de partículas finas em comparação com o pó de pedra. Consequentemente, ao ser utilizado como substituto, o resíduo proporciona uma área superficial superior, o que resulta na absorção de uma quantidade maior de CAP. As misturas com maior teor de CAP apresentaram total cobertura dos agregados.

Não foram identificadas grandes alterações no concreto asfáltico no estado endurecido durante a substituição. Observou-se que o concreto asfáltico não demonstrou uma tendência significativa ao esfarelamento após a substituição. Pelo contrário, notou-se que a maior presença de partículas finas, devido ao resíduo, resultou em uma redução na quantidade de vazios quando avaliado visualmente a olho nu. Isso sugere que o resíduo pode desempenhar um papel benéfico na diminuição dos vazios no concreto asfáltico.

Após a obtenção dos resultados dos ensaios de estabilidade e fluência, abrasão Cântabro, resistência à tração por compressão diametral e dano por umidade induzida, ficou

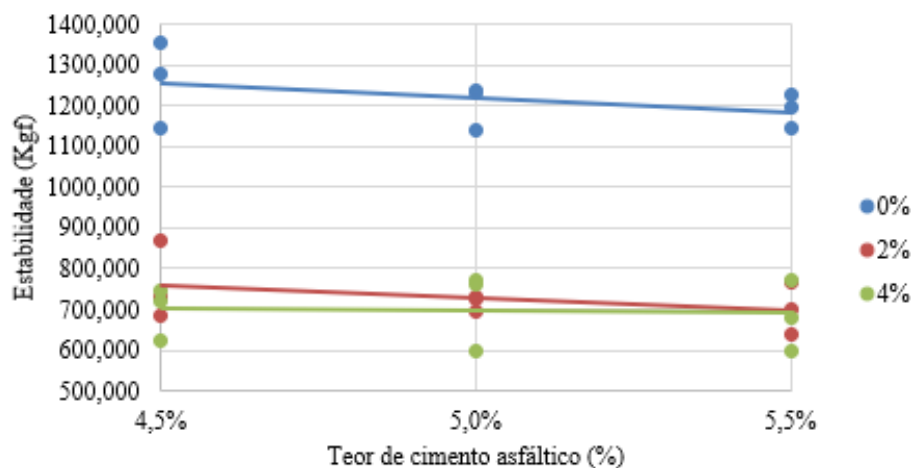
evidente que houve impactos significativos nos resultados quando comparados com o traço de referência, que não continha resíduo.

4.1 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA

No ensaio de estabilidade, constatou-se que a utilização de resíduo levou a uma redução na estabilidade do concreto asfáltico em comparação com o traço de referência. Além disso, observou-se que não houve diferenças significativas nos resultados entre as amostras contendo 2% e 4% de resíduo. Mostrando que o resíduo pode ser utilizado em maiores quantidades.

As amostras no teor ótimo de concreto asfáltico exibiram uma redução na estabilidade de 40% e 43% para os traços com 2% e 4% de resíduo, respectivamente, em comparação com o traço de referência. É importante ressaltar que, embora o resíduo tenha resultado em desempenho inferior ao traço padrão, todos os valores permaneceram acima do parâmetro mínimo normativo de 500 Kgf, conforme demonstrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Resultados do ensaio de estabilidade

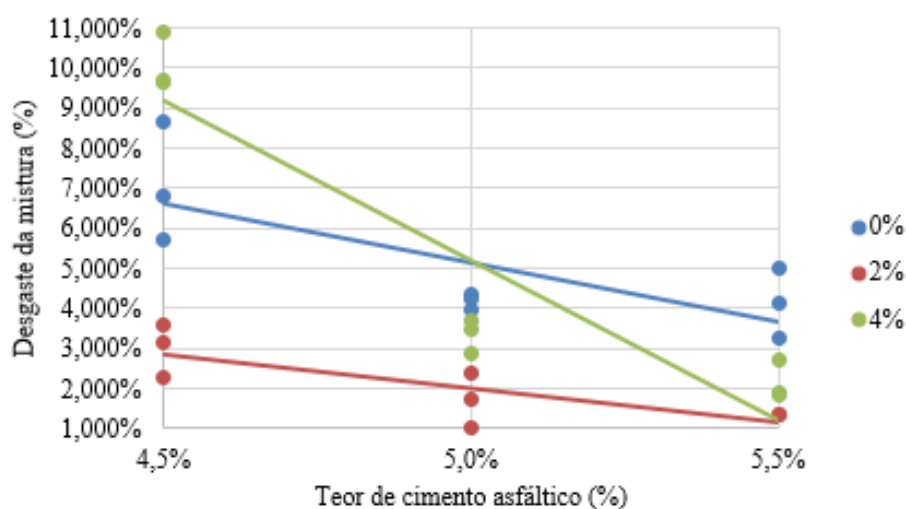


Fonte: os autores (2023).

4.2 DESGASTE POR ABRASÃO CONTABRO

Os corpos de prova contendo resíduo demonstraram um aumento na resistência à abrasão cântabro, conforme ilustrado no Gráfico 6. À medida que o teor de resíduo aumentou, houve uma redução no desgaste, sugerindo que o concreto respondeu favoravelmente à incorporação do resíduo em termos de resistência à abrasão. Foi observado redução superior a 60% no desgaste cântabro para a amostra com 2% de resíduo no teor ideal de cimento asfáltico e uma redução de 9% para a amostra com 4% de resíduo comparados ao traço referência.

Gráfico 6 – Resultados Cântabro



Fonte: os autores (2023).

Foi observado um comportamento distinto na amostra com 4% de resíduo no teor de 4,5% de CAP, onde o desgaste abrasivo aumentou em 46% em relação ao traço padrão com 4,5% de CAP. Isso indica que a utilização de resíduo em teores de CAP abaixo do ideal pode resultar em menor resistência à abrasão.

É importante notar que algumas fontes nacionais (BERNUCCI et al., 2008) recomendam um limite de desgaste inferior a 25% para o concreto asfáltico. Nesse contexto, considerando que o maior desgaste registrado foi de 10% no concreto asfáltico com 4% de resíduo e 4,5% de CAP, é possível concluir que todas as amostras atenderam aos parâmetros normativos estabelecidos.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E DANO POR UMIDADE INDUZIDA

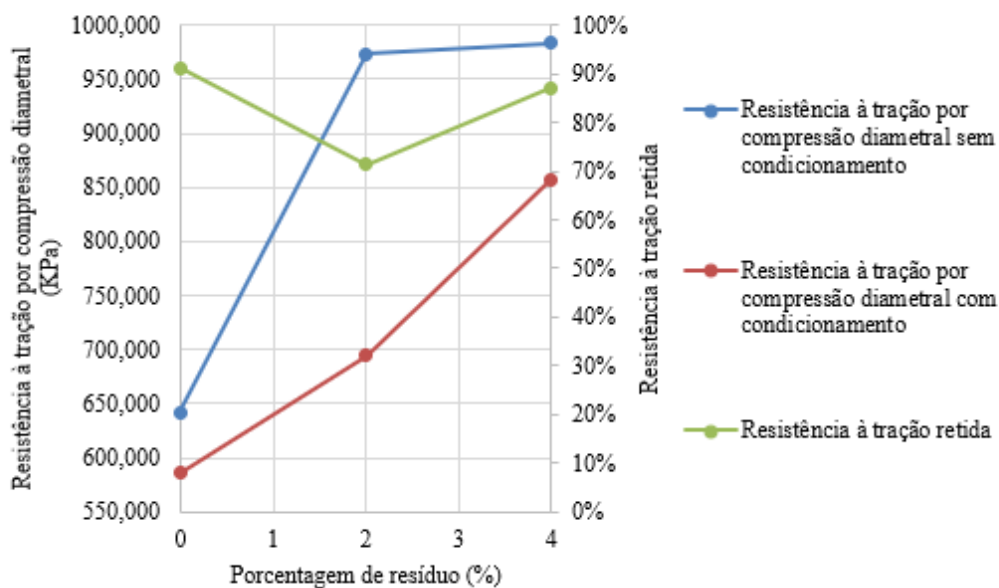
No ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCTD), observou-se aumento na resistência dos corpos de prova. Especificamente, foi evidenciado incremento ao comparar o traço com resíduo em relação ao traço com 2%, e uma menor variação entre o traço com 2% e o traço com 4% de resíduo. Esse aumento foi de 51% e 53%, respectivamente, para os traços com 2% e 4% de resíduo em comparação com o traço sem resíduo, mantendo uma proporção de 5,1% de CAP.

Para os corpos de prova que passaram por ensaios de RCTD após condicionamento, observou-se um aumento de resistência que apresentou um comportamento linear. Isso indica um aumento constante da resistência à medida que a incorporação de resíduo no concreto asfáltico aumenta. Especificamente, houve um aumento de 19% para o traço com 2% de resíduo e um aumento de 46% para o traço com 4% de resíduo, quando comparados ao traço padrão no teor ótimo de CAP.

No ensaio de dano por umidade induzida, que avalia a resistência à tração retida, expressa em porcentagem, foi observado uma considerável variação na resistência dos corpos de prova que continham resíduo em comparação com aqueles que não foram submetidos ao choque térmico. Os corpos de prova com 2% de resíduo apresentaram maior variação de resistência à tração retida, seguido pelas amostras com 4%, enquanto que o traço padrão exibiu a menor variação. Houve uma redução na resistência à tração retida de 22% e 4% para os traços com 2% e 4% de resíduo, respectivamente, indicando que o resíduo em pequenas quantidades não reage favoravelmente a variações de temperatura.

Conforme Bernucci et al. (2008), a resistência à tração retida deve ser superior a 70%. Considerando que a menor resistência à tração retida observada foi de 71% para as amostras no teor ótimo de CAP com 2% de resíduo, pode-se afirmar que todas as amostras atenderam aos parâmetros estabelecidos pelas normas. Os resultados relativos aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e dano por umidade induzida podem ser visualizados no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Resultados resistência à tração por compressão diametral e dano por umidade induzida



Fonte: os autores (2023).

4.4 AVALIAÇÃO QUÍMICA

A avaliação química foi realizada com base nos resultados obtidos por meio do ensaio de solubilidade. Os dados apresentados na Tabela 3 reforçam a evidência de que a presença do resíduo de papel e celulose no concreto asfáltico provoca alterações nas propriedades de solubilidade da água.

A incorporação de resíduos ao teor ótimo de cimento asfáltico resultou em um aumento de 7% e 11% no pH da água solubilizada para teores de 2% e 4% de resíduo, em comparação com o traço padrão. No que se refere ao fosfato total, a inclusão do resíduo elevou o valor

em 0,02 mgP2O5.L-1, independentemente do teor de resíduo, demonstrando um aumento constante no teor de fosfato na água solubilizada.

Quanto à análise de sílica, houve um aumento de 15% no teor de sílica no traço com 2% de resíduo e um triplo aumento no traço com 4%. Já na análise de sulfato, a amostra com 2% de resíduo registrou uma diminuição de 2% em relação ao traço padrão, enquanto a amostra com 4% apresentou um aumento de 50%, o que representa um resultado atípico em comparação com as outras análises.

Tabela 3 – Resultados obtidos por meio dos ensaios químicos

Teor de resíduo	pH	Fosfato total mgP2O5.L-1	Sílica mgSiO2.L-1	Sulfato mgSO4.L-1
0%	7,6	0,01	1,3	24,2
2%	8,1	0,03	1,5	23,6
4%	8,4	0,03	3,9	36,2

Fonte: os autores (2023).

Na análise de pH, os resultados demonstram que a incorporação do resíduo não afeta adversamente o pH da água, mantendo-o dentro da faixa neutra. Para o teor de sulfato, a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) estabelece um limite de 250 mgSO4.L-1, indicando que a incorporação do resíduo não gera problemas em relação a esse parâmetro.

Para as análises de fosfato e sílica, a legislação brasileira não estabelece valores limites específicos. No entanto, autores sugerem critérios de potabilidade, com valores de referência de 78,7 mgSiO2.L-1 e 0,05 mgP2O5.L-1. Esses parâmetros apontam que a água solubilizada não demonstra preocupações em relação ao teor de fosfato e sílica (LAZZERINI apud BRAGA ET AL., 2020; CONCEIÇÃO ET AL. apud VASCONCELOS JR., 2018).

5 CONCLUSÃO

A substituição do pó de pedra por resíduos revelou comportamentos distintos tanto no concreto asfáltico no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, a incorporação de resíduos não contribuiu para o adequado cobrimento dos agregados, resultando na absorção de uma quantidade maior de CAP. Por outro lado, no estado endurecido, a presença de resíduos levou a uma aparente redução na quantidade de vazios no concreto asfáltico

No ensaio de estabilidade, as amostras apresentaram resultados semelhantes tanto para o traço contendo 2% quanto para o que continha 4% de resíduo. Os valores obtidos ficaram abaixo do traço padrão, mas acima dos limites estabelecidos pelas normas, o que indica que é possível utilizar o resíduo, mesmo que com desempenho limitado. Contudo, pode ser necessário fazer ajustes no teor ideal de CAP. No ensaio de resistência à abrasão Cântabro, os resultados indicaram que a inclusão de resíduo nas proporções de 2% e 4% contribuiu para

um aumento da resistência abrasiva. O traço contendo 2% de resíduo obteve os melhores resultados em termos de resistência abrasiva.

Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, as amostras contendo 2% e 4% de resíduo demonstraram uma resistência à tração superior em comparação com o traço padrão. O traço com 4% de resíduo alcançou os resultados mais promissores. Nos resultados do ensaio de dano por umidade induzida, as amostras contendo resíduo obtiveram resultados inferiores ao traço padrão, mas ainda acima dos parâmetros estabelecidos pelas normas, o que sugere que o resíduo pode ser empregado, embora com um desempenho limitado. Além disso, observou-se que a substituição com 4% de resíduo demonstrou uma variação térmica menor do que com 2%, tornando-a mais recomendada para utilização.

A análise química comprovou que, embora tenham ocorrido modificações nas propriedades químicas da água solubilizada ao entrar em contato com o concreto asfáltico com incorporação de resíduo, essas alterações não resultam em impactos ambientais. Os valores químicos permanecem dentro dos limites estabelecidos. Portanto, é seguro afirmar que a incorporação de resíduo de papel e celulose no concreto asfáltico não representa uma ameaça ao meio ambiente.

Dessa forma, o traço contendo 2% de resíduo se mostra adequado para melhorar a resistência abrasiva do concreto asfáltico, enquanto o traço com 4% de resíduo pode ser recomendado para aprimorar a resistência à tração. Além disso, o uso de resíduos como substitutos contribui para a redução da demanda por matérias-primas e diminui a necessidade de aterros para resíduos industriais sem gerar impactos ambientais.

Recomenda-se um estudo mais aprofundado sobre a utilização de resíduos como substitutos em traços com proporções mais elevadas, como 10% e 15%. Além disso, é aconselhável realizar readequações no teor ótimo de cimento asfáltico para misturas contendo 2% e 4% de resíduo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol.** Rio de Janeiro, 2003.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros.** 2008. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://abeda.org.br/pavimentacao-asfalticaformacao-basica-para-engenheiros/>. Acesso em: 01/09/2023.

BRAGA, Erika et al. **Presença de sílica em águas subterrâneas e possíveis benefícios para a saúde**. Águas Subterrâneas, [S. l.], v. 34, n. 2, 2020. DOI: 10.14295/ras.v34i2.29887. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29887>. Acesso em: 18/10/2023.

CARVALHO. Anderson Luiz. **Avaliação das propriedades mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo de carbonato de cálcio gerado na fabricação de celulose**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-12591/avaliacao-das-propriedades-mecanicas-da-argamassa-contendo-adicao-de-residuo-de-carbonato-de-calcio-gerado-na-fabricacao-de-celulose>. Acesso em: 01/09/2023.

COLLATO, Décio; BERGMANN, Carlos Pérez. **Emprego de resíduo de celulose da indústria de papel como matéria-prima para fabricação de material cerâmico**. 2009. Ceram. Ind., vol. 14, n3, p.0, 2009. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876573c7f8c9d6e028b4765>. Acesso: 01/09/2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 004/94: Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98: Agregados – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084/95: Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 193/96: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade**. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 195/97: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 213/94: Solos – determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131/2010 – ME: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155/2010 – ME: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 180/2018 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 437/2022 – ME: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios de agregados em estado solto e compactado – Método de ensaio.** Brasília, 2022.

FAXINA, Adalberto Leandro. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha.** 2002. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-13052016-155321/pt-br.php>. Acesso em: 01/09/2023.

LI, Zhanchen, et al. **A Feasibility Study of Low Cement Content Foamed Concrete Using High Volume of Waste Lime Mud and Fly Ash for Road Embankment.** 2022. 1. Ed. Materials. China, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/1/86>. Acesso: 01/09/2023.

MARQUES, Maria Lidiane et al. **Potencialidades do uso de resíduo de celulose (Dregs/Grits) como agregado em argamassas.** 2014. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 423-431, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277927578_POTENCIALIDADES_DO_USO_DE_RESIDUOS_DE_CELULOSE_DREGSGRITS_COMO_AGREGADO_EM_ARGAMASSAS. Acesso: 01/09/2023.

MARTINS, Mariana Provedel et al. **Produção e avaliação de briquetes de finos de carvão vegetal compactados com resíduo celulósico proveniente da indústria de papel e celulose.** Revista Árvore, v. 40, n. 1, p. 173–180, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/rPNwWm89Bv6tFgPf5xwGsWD/?lang=pt#>. Acesso: 01/09/2023.

MODOLO, R. et al. **Pulp and paper plant wastes valorisation in bituminous mixes.** 2010. Waste Management, vol. 30, issue 4, pages 685-696, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X09004796?via%3Dihub>. Acesso: 01/09/2023.

MOLINA, Carlos E. C., et al. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de resíduo da fabricação de papel e solo para utilização na construção rodoviária.** 2004. Dissertação (Mestrado em transporte), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-10072017-161404/en.php>. Acesso: 01/09/2023.

NIYOMUKIZA, John Bosco et al. **Investigation on the potential use of waste paper to produce papercrete bricks.** The 6th international conference on energy, environment, epidemiology and information system (ICENIS)+ 2023. Semarang, Indonesia. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2683/1/030012/2891205/Investigation-on-the-potential-use-of-waste-paper?redirectedFrom=fulltext>. Acesso: 01/09/2023.

OLIVEIRA, Leandro Danilo. **Avaliação da utilização de resíduos grits da indústria de papel e celulose na produção de ligantes álcali ativados.** 2022. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/35168>. Acesso: 01/09/2023.

PÉRTILE, Patricia. **Resíduo alcalino da indústria de celulose em solos ácidos e área degradada.** 2011 Dissertação (Mestrado em manejo do solo), Universidade do estado de Santa Catarina, 2011. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages, 2011. Disponível em: <http://bibliotecaforestal.ufv.br/handle/123456789/7784>. Acesso: 01/09/2023.

PINHEIRO, R. M. et al. **Caracterização de resíduo de papel**. 2007. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/51/artigos/51cbc-14-23.pdf. Acesso em: 01/09/2023.

SALLA, R. L.; LUVIZÃO, G. **Incorporação de resíduo de areia de fundição em misturas asfálticas usinadas a quente: avaliação dos componentes presentes na água de solubilização e do comportamento mecânico**. 2019. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/19288>. Acesso: 01/09/2023.

SILVA, Débora Marta Epaminondas Almeida da. **Viabilidade da incorporação de resíduo proveniente de usina de asfalto em concreto asfáltico usinado a quente**. 2023. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53498>. Acesso em: 01/09/2023.

SOUZA, Isabella de Oliveira. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em um concreto asfáltico**. 76f. Curso de Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/948>. Acesso: 01/09/2023.

STANDART METHODS. **Standart Methods for the Examination os Water and Wastewater**. 23th. 2017.

TRENTIN, Liana Camila. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo gerado na fabricação de celulose e papel**. Relatório de projeto de pesquisa apresentado ao PIBITI através do curso de Engenharia Civil, Universidade do Oeste de Santa Catarina. 2011. Joaçaba.

VANIN, Alisson Victor et al. **Avaliação da utilização de resíduo de celulose e papel em misturas asfálticas usinadas a quente para aplicação em pavimentação rodoviária**. 2023.

VASCONCELOS, Neuton et al. **Avaliação da concentração de fosfato nas águas subterrâneas do bairro das flores, município de Benevis – PA**. XV Congresso brasileiro de exotoxicologia, Aracaju – SE, p153-155, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331357554_Sublethal_effects_of_caffeine_in_Daphnia_magna_life_cycle_using_a_new-term_endpoint. Acesso: 18/10/2023.

WESSELING, Diego Henrique. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. 2005. Dissertação (mestrado em engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/7133>. Acesso: 01/09/2023.