

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)BGS

48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

DOSAGEM DE MISTURAS A FRIO RECICLADAS COM EMULSÃO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SUL-AFRICANA A NÍVEL NACIONAL

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Daniel Wolter Martell¹; Washington Peres Núñez¹

RESUMO

Este estudo teve como objetivo aplicar a metodologia empregada na África do Sul para dosagem de duas misturas a frio estabilizadas com emulsão. O processo de dosagem das misturas, compostas por brita graduada simples (BGS), fresado (RAP), cimento e emulsão, foi feito mediante a realização de ensaios de resistência à tração indireta (ITS). Foram adicionados quatro teores de emulsão: 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%. Os percentuais de RAP incorporados foram de 20% e 40%, buscando simular, respectivamente, a técnica de reciclagem profunda (FDR) em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado e com espessura intermediária. O conteúdo de cimento foi fixado em 1%, para todas as amostras. Durante a moldagem dos corpos de prova, foi utilizada a compactação vibratória. O cimento empregado foi do tipo CP IV-32. Foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Houve dificuldades para promover a densificação adequada dos corpos de prova, sendo que o martelo demolidor utilizado parece não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo. Ambas as misturas (80%BGS_20%RAP e 60%BGS_40%RAP) conseguiram alcançar os valores mínimos de resistência à tração indireta seca e imersa de, respectivamente, 225 kPa e 125 kPa, preconizados pela metodologia de dosagem podendo, dessa forma, ser classificadas como materiais do tipo BSM1 (classe 1). A mistura 60%BGS_40%RAP obteve os maiores valores de ITS. Os teores de emulsão de projeto selecionados pela metodologia de dosagem para as misturas 60%BGS_40%RAP e 80%BGS_20%RAP foram, respectivamente, 2,6% e 3%, o equivalente a teores de ligante residual de 1,57% e 1,82%. Esses resultados corroboram a tendência apresentada por outros autores, que afirmam que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto obtidos por meio do processo de dosagem.

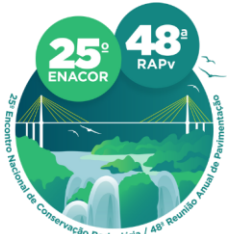
PALAVRAS-CHAVE: compactação vibratória; reciclagem profunda de pavimentos; resistência à tração indireta.

ABSTRACT

This study aimed to apply the methodology used in South Africa for dosing two emulsion-stabilized cold mixtures. The dosing process of the mixtures, composed of simple graded gravel, reclaimed asphalt pavement (RAP), cement and emulsion, was carried out by carrying out indirect tensile strength (ITS) tests. Four emulsion contents were added: 2.9%, 3.1%, 3.3% and 3.5%. The percentages of RAP incorporated were 20% and 40%, seeking to simulate, respectively, the Full-Depth Reclamation (FDR) in a pavement structure with a thin asphalt coating and intermediate thickness. The cement content was set at 1% for all samples. During molding of the specimens, vibratory compaction was used. The cement used was type CP IV-32. A cationic asphalt emulsion modified by slow-breaking elastomeric polymers, of the RL1C-E type, was applied. There were difficulties to promote adequate densification of the test specimens, and the demolition hammer used seems not to be indicated for compacting materials similar to this study. Both mixtures (80%BGS_20%RAP and 60%BGS_40%RAP) managed to reach the minimum values of dry and soaked indirect tensile strength of, respectively, 225 kPa and 125 kPa, recommended by the dosage methodology, which can, therefore, be classified as BSM1 type materials (class 1). The 60%BGS_40%RAP mixture obtained the highest ITS values. The design emulsion contents selected by the dosing methodology for the 60%BGS_40%RAP and 80%BGS_20%RAP mixtures were, respectively, 2.6% and 3%, equivalent to residual binder contents of 1.57% and 1.82%. These results corroborate the tendency presented by other authors, who state that the increase in RAP content promotes a decrease in the design contents obtained through the dosing process.

KEY WORDS: vibratory compaction; Full-Depth Reclamation; indirect tensile strength.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, daniel.martell@ufrgs.br; washington.nunez@ufrgs.br.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

O consumo de matérias-primas vem crescendo ao longo das últimas décadas. O aumento populacional, o desenvolvimento de novas indústrias e tecnologias, o crescimento das economias globais bem como a expansão da infraestrutura necessária para proporcionar uma qualidade de vida adequada aos habitantes do planeta são alguns dos fatores que podem ser citados como colaboradores desse cenário. Em um futuro próximo, a não adoção de medidas mitigatórias para reversão desse quadro poderá, em uma situação limite, levar ao esgotamento dos recursos naturais. Cientes desse panorama, os pesquisadores e a comunidade acadêmica vêm desenvolvendo estudos objetivando o reaproveitamento e a busca por materiais alternativos para construção de novas obras. É dentro desse contexto que a reciclagem de pavimentos ganha relevância.

O Brasil possui uma malha viária extremamente malconservada, sendo necessários investimentos robustos para reabilitação ou restauração das rodovias já existentes. Além disso, a nível mundial, as demandas por reabilitação ou restauração de pavimentos parecem cada vez mais exceder a necessidade de construção de novas estradas. Sendo assim, a reciclagem de pavimentos pode auxiliar no processo de recuperação da infraestrutura nacional e vêm, ao que parece, ganhando maior visibilidade e notoriedade internacional.

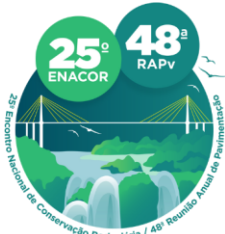
A escolha do presente tema também foi motivada pela escassez de normativas brasileiras acerca do assunto. Apesar de ser utilizada no Brasil há algumas décadas, as especificações de serviço brasileiras carecem de um procedimento de dosagem adequado para as misturas a frio estabilizadas com emulsão. O resultado prático, infelizmente, é o emprego de diferentes métodos, situação que pode acabar comprometendo o sucesso dos resultados obtidos com a técnica de reciclagem. Buscando contribuir com essa área do conhecimento, este estudo se propôs a aplicar a metodologia Sul-Africana na dosagem de duas misturas a frio estabilizadas com emulsão. Este trabalho poderá incentivar pesquisas na área, colaborando com críticas e sugestões construtivas acerca do método aplicado.

ASPECTOS GERAIS DA ESTABILIZAÇÃO COM EMULSÃO ASFÁLTICA

De acordo com a *Southern African Bitumen Association* (SABITA, 2020), materiais estabilizados com betume, também chamados BSMs – da sigla em inglês *Bitumen Stabilized Materials* – são materiais de pavimentação tratados com emulsão ou espuma de asfalto. Os autores relatam que as quantidades de ligante residual envolvidos na estabilização tipicamente não excedem 2,5%, em massa, do agregado seco. Na maioria dos casos, um fíler ativo como cimento ou cal hidratada também é adicionado à mistura. Os autores destacam que a adição de cimento nunca deve exceder o teor de 1% pois, caso um percentual maior seja adicionado, o material passará a se comportar e deverá ser considerado como um material estabilizado com cimento e não com emulsão.

A adição de ligantes asfálticos resulta em um aumento na resistência dos materiais estabilizados, mediante o incremento da sua coesão, além de reduzir a susceptibilidade à umidade dos mesmos, devido ao revestimento das partículas por um filme de ligante asfáltico. O trabalho de Ingles e Metcalf (1972) *apud* Gondim (2008) apresenta uma constatação importante. De acordo com os autores, esses dois fenômenos são antagônicos pois, quanto mais delgadas as películas de ligante formadas, maior a resistência da mistura. Por outro lado, quanto maior a espessura da película, mais efetiva será a mistura para resistir aos efeitos deletérios da água. Elevados teores de ligante acabam por lubrificar as partículas do agregado, evitando o entrosamento dos grãos e, por consequência, causando uma redução na resistência da mistura.

Entre as partículas revestidas por ligante asfáltico, água e ar poderão ser encontrados. De acordo com Buocz e Csagoly (1961) *apud* Kézdi (1979), grãos minerais completamente secos ou contendo pequena quantidade de água dificilmente irão se misturar com o ligante e, caso isso ocorra, será em



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



um ritmo bastante lento. Materiais com elevados teores de água também irão apresentar essa limitação. Todavia, os autores destacam que, em havendo um conteúdo de água satisfatório, os grãos dos agregados poderão ser prontamente e eficientemente misturados, resultando em partículas revestidas por asfalto residual de forma relativamente uniforme.

MÉTODO DE DOSAGEM DA SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION

Sabita (2020) publicou recentemente a 3ª edição do TG2 (*Technical Guideline*), documento que apresenta de forma detalhada o procedimento de dosagem utilizado na África do Sul. A Figura 1 exibe um fluxograma contendo todas as etapas preconizadas por esse método.

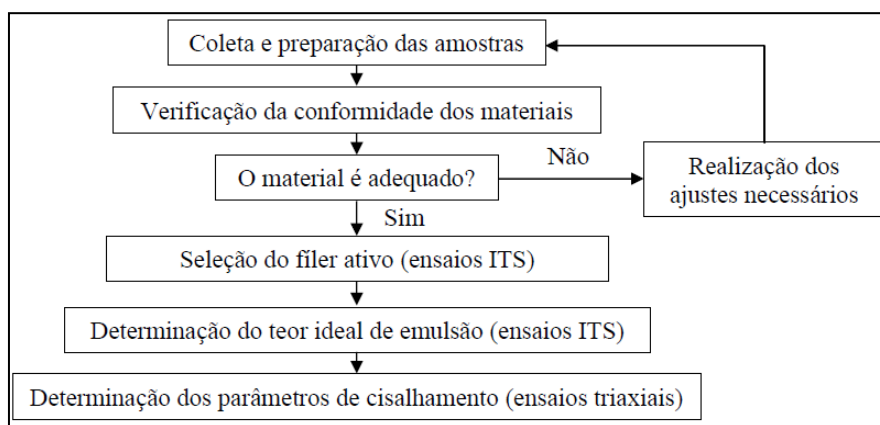


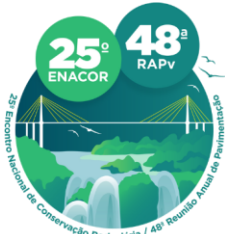
Figura 1. Fluxograma método de dosagem da Sabita (elaborado pelo autor e adaptado de Sabita, 2020).

De acordo com o TG2, ensaios ITS devem ser realizados para selecionar o tipo de filer ativo a ser aplicado. A quantidade de emulsão adicionada nessa etapa é idêntica para todos os corpos de prova, sendo definida em função da granulometria dos materiais. Três amostras devem ser preparadas para produzir três grupos de corpos de prova em que o filer será a variável a ser considerada. Um conjunto será confeccionado sem adição de filer; no outro deve ser incorporado 1% de cimento e, por fim, 1% de cal hidratada. Seis corpos de prova de 150 mm de diâmetro e 95 mm de altura são confeccionados para cada conjunto. A compactação deve ser realizada com martelo vibratório. Após a compactação, os corpos de prova são submetidos a um processo de cura controlada. A determinação da ITS deve ser feita para as condições seca e imersa (ITS_{dry} e ITS_{wet}). Os resultados obtidos são então utilizados como indicadores primários para definir o tipo de filer a ser adicionado, caso necessário.

Realizada a seleção do filer ativo, deve ser feita a determinação do teor ideal de emulsão a ser incorporado à mistura. Nessa etapa é realizada uma análise de sensibilidade, ou seja, os ensaios ITS são executados em misturas contendo diferentes teores de emulsão. Para cada conjunto de corpos de prova deve ser aplicada uma taxa de emulsão distinta daquela adicionada na etapa anterior (avaliação do filer). Os teores a serem adicionados nessa fase são: taxa inicial - 0,4%; taxa inicial - 0,2% e taxa inicial + 0,2%. Seis corpos de prova são moldados para cada teor de emulsão, sendo todos submetidos a um processo de cura controlada seca (ITS_{dry}). Passado esse período, três corpos de prova são colocados em imersão por 24 horas, a fim de determinar os valores de ITS_{wet} . O conteúdo de emulsão que atender aos critérios de classificação é definido como o teor de projeto.

O TG2 atribuiu uma etapa adicional para que o processo de dosagem seja concluído: a determinação dos parâmetros de cisalhamento da mistura (coesão e ângulo de atrito interno). Essa etapa adicional foge ao escopo do presente estudo e, dessa forma, não será aqui apresentada.

Por fim, cabe destacar que apesar de a deformação permanente ser considerada o principal mecanismo de falha dos materiais tipo BSM (SABITA, 2020), a metodologia de dosagem Sul-Africana não leva



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



em consideração esse aspecto quando da definição do teor de emulsão a ser incorporado. Considerando que um dos principais problemas que podem ocorrer no caso da reciclagem profunda, também conhecida como FDR – da sigla em inglês *Full-Depth Reclamation* – com emulsão ser, justamente, as deformações plásticas, caso o projetista considere necessário, ensaios adicionais deverão ser realizados para avaliação desse aspecto.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram programados com base na metodologia de dosagem da Sabita (2020). Quanto ao conteúdo de cimento, optou-se pelo teor de 1%, destacando-se que não foi incluída no programa experimental a etapa de dosagem que versa sobre a seleção do fíler ativo.

Foram utilizados dois conteúdos de RAP, iguais a 20% e 40%. O primeiro teor foi definido buscando simular a técnica FDR em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado, enquanto o segundo, uma camada de CBUQ com espessura intermediária. Além do RAP, foi incorporada às misturas brita graduada simples (BGS), simulando a camada subjacente de base. Dessa forma, as duas misturas estudadas possuem as seguintes composições: 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP, ambas com incorporação de 1% de cimento.

MATERIAIS

Materiais Procedentes da Coleta de Campo (RAP e BGS)

A BGS, de origem granítica, foi coletada junto a um fornecedor localizado no município de Eldorado do Sul/RS. O RAP foi recolhido em um depósito localizado às margens da rodovia BR-290 (km 134), próximo ao município de Eldorado do Sul/RS. Cabe destacar que não foi possível obter informações acerca do tipo de CAP presente no RAP. Ambos os materiais foram armazenados em bombonas plásticas de 200 litros, as quais foram mantidas em um depósito fechado até que os agregados fossem ensaiados. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados na BGS, os quais foram executados pelo próprio fornecedor do agregado.

Tabela 1. Resultados dos ensaios realizados para caracterização da BGS.

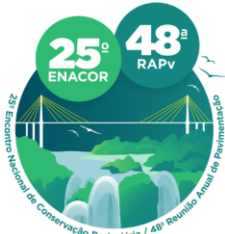
Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (DNIT 141/2010-ES)
ISC	NBR 9895/17	176%	≥ 80%
Expansão	NBR 9895/17	0%	≤ 0,5%
Limite de liquidez	DNER-ME 082/94	NP	≤ 25%
Índice de plasticidade	DNER-ME 082/94	NP	≤ 6%
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	63,3%	> 30%
Absorção	DNER-ME 195/97	0,6%	-
Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/98	21%	≤ 55%
Índice de forma	DNIT-ME 424/20	0,8%	-

Cimento

Foi utilizado um cimento do tipo CP IV-32. A escolha da classe intermediária de resistência (32 MPa) pode ser justificada, de acordo com Fedrigo (2015), pelo fato de haver diversas experiências com o uso desse tipo de cimento em serviços de reciclagem de pavimentos. Sabita (2020) relata que podem ser utilizados diferentes tipos de cimento na estabilização de misturas a frio com emulsão, devendo ser evitados aqueles com endurecimento rápido.

Emulsão Asfáltica

Foi aplicada uma emulsão asfáltica catiônica modificada por polímeros elastoméricos de ruptura lenta, do tipo RL1C-E. Denominada Recycla RP, o ligante foi fornecido por uma empresa parceira



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



da pesquisa. Greca Asfaltos [2021?] destaca em seu portfólio de produtos que a Recycla RP está inserida na categoria das emulsões especiais, sendo seu uso recomendado para reciclagem do tipo FDR. O catálogo ainda cita que Recycla é a linha de emulsões indicada para produção de misturas a frio com utilização de até 100% de RAP, atuando diretamente na reativação das características aglutinantes do ligante. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados na emulsão, valendo destacar que eles foram executados pelo próprio fornecedor.

Tabela 2. Resultados dos ensaios realizados para caracterização da emulsão.

Propriedade	Normativa do ensaio	Resultado	Especificação (resolução ANP n°36)	
			Mínimo	Máximo
Saybolt Furol	NBR 14491/07	25 s	-	70 s
Sedimentação	NBR 6570/16	1,6%	-	5%
Peneiração	NBR 14393/12	0,01%	-	0,1%
Carga de partícula	NBR 6567/15	Positiva	Positiva	
Resíduo seco	NBR 14376/19	60,5%	60%	-
pH	NBR 6299/12	4	-	6,5

MÉTODOS

Caracterização das Misturas (RAP + BGS + cimento + emulsão)

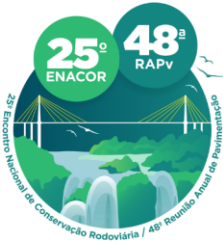
As curvas granulométricas foram determinadas a partir das granulometrias individuais dos agregados RAP e BGS, sendo seguidas as diretrizes constantes no método de ensaio DNER-ME 083 (DNIT, 1998). Dessa maneira, foi possível verificar se elas se encontravam dentro do intervalo preconizado pelo método de dosagem Sabita (2020).

As curvas de compactação buscaram determinar os parâmetros de moldagem ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e OFC, da sigla em inglês *Optimum Fluid Content*). Para isso, foram seguidas as orientações contidas no método de ensaio DNIT-ME 164 (DNIT, 2013), com algumas adaptações. Primeiramente, cabe destacar que foram eliminadas todas as partículas retidas na peneira de #19mm (3/4”), tanto no RAP quanto na BGS, não havendo a substituição dessa parcela de agregados graúdos pela fração compreendida entre as peneiras de #19mm e #4,8mm, aspecto recomendado pela normativa supracitada. De acordo com o TG2 (SABITA, 2020), quando houver material retido na peneira #20mm, o mesmo deverá ser levemente triturado até que sua totalidade passe por essa abertura, devendo essa parcela ficar retida na malha de #14mm. Na impossibilidade de reduzir o tamanho desses agregados, optou-se apenas pela eliminação da fração retida na peneira #19mm.

Os ensaios de compactação foram executados sem reuso de material, empregando-se o cilindro e o soquete grandes, sendo aplicada a energia modificada. As amostras foram secas ao ar, sendo o cimento adicionado, no teor de 1%, considerando as suas massas secas. As misturas foram produzidas de forma manual. Tradicionalmente, a obtenção das curvas de compactação é feita mediante a adição de água. Entretanto, de acordo com o TG2 (SABITA, 2020), no caso das misturas a frio estabilizadas com emulsão, deve ser preparado um fluido composto por 50% de água e 50% de emulsão, devido ao fato do ligante residual também ser considerado um fluido que contribui para o processo de compactação. Para cada teor de fluido adicionado, foi determinado o peso do conjunto (molde + material compactado). Aplicando a equação (1), foi determinado o peso específico aparente seco (γ_{seco}) para cada ponto da curva de compactação.

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{úmido}}{1+FC} \quad (1)$$

Onde: γ_{seco} = peso específico aparente seco (g/cm^3); $\gamma_{úmido}$ = peso específico aparente úmido (g/cm^3); FC = teor de fluido (teor de água + emulsão).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Dosagem das Misturas

A definição do teor de emulsão de projeto foi feita mediante a realização de ensaios ITS. Apesar de a metodologia de dosagem preconizar, em um segundo momento, o rompimento de corpos de prova para verificação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ), esses resultados não serão abordados nesse artigo. A partir desse momento, todos os ensaios foram realizados nas dependências do LAPAV/UFRGS.

Para determinação da ITS foram moldados corpos de prova em triplicata, levando-se em consideração o teor de emulsão e o tipo de cura realizada. O teor inicial de emulsão foi definido pela curva granulométrica das misturas. A metodologia Sabita (2020) preconiza o acréscimo de quatro teores distintos, buscando otimizar e definir o conteúdo a ser empregado no projeto. Dessa maneira, foram confeccionados 24 corpos de prova para cada mistura, totalizando 48 moldagens. As misturas foram produzidas de forma manual, buscando-se adotar o mesmo tempo de homogeneização quando cada um dos materiais era adicionado (2 a 3 minutos). As amostras foram secas ao ar e, após a determinação das suas umidades, foi calculada a massa seca da mistura, parâmetro utilizado para determinar as quantidades de cimento e emulsão a serem adicionadas.

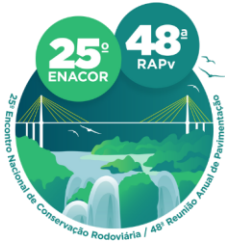
Importante salientar que nessa etapa não foi feita a diluição da emulsão, sendo esse processo realizado apenas na obtenção das curvas de compactação. Ainda, o primeiro insumo a ser adicionado às misturas foi a água, seguido pelo cimento e, por fim, foi feito o acréscimo da emulsão. A definição da quantidade de água a ser incorporada foi feita respeitando-se o OFC obtido através das curvas de compactação. A equação (2) apresenta essa relação, que leva em conta os teores de fluido, água, emulsão e umidade higroscópica dos agregados.

$$\text{OFC} = \text{WC} + \text{EC} + \text{HM} \quad (2)$$

Onde: OFC = teor de fluido ideal determinado na curva de compactação (%); WC = teor de água a ser adicionado (%); EC = teor de emulsão (%); HM = umidade higroscópica dos agregados (%).

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões 150x95mm (diâmetro x altura), com auxílio de um molde tripartido, empregando-se a compactação vibratória. Foi utilizado um martelo demolidor da marca Bosch, modelo GSH 500, com uma potência nominal de 1100 W e uma energia de impacto de 7,5 J por golpe, sendo acoplada na sua extremidade uma ponteira adaptada. Inicialmente, os corpos de prova foram confeccionados em duas camadas. Todavia, foi observado que o $\gamma_{dm\acute{a}x}$ não estava sendo alcançado, mesmo com o incremento no tempo de compactação aplicado. Dessa forma, os corpos de prova passaram a ser moldados em três camadas. Vale destacar que essas recomendações constam no TG2 (SABITA, 2020). Durante as moldagens, o controle do tempo de compactação, o qual variou entre 30 e 120 segundos, foi feito mediante a aferição das alturas, sendo realizado o processo de escarificação entre as camadas. Após a compactação, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada conforme a descrição apresentada a seguir:

- Finalizada a remoção dos corpos de prova dos moldes, eles foram identificados e colocados em estufa a uma temperatura de 40°C por um período mínimo de 72 horas;
- Depois das 72 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa e pesados, sendo suas massas individuais registradas;
- Todos os corpos de prova foram recolocados na estufa a 40°C por mais quatro horas e, passado esse período, o exercício de pesagem foi repetido. Como a massa de todos os corpos de prova apresentou uma diferença inferior a dez gramas (critério de aceitação), ou seja, praticamente foi atingida a constância de massa, eles foram removidos da estufa;



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- d) Os corpos de prova foram então colocados sobre uma bancada até que fosse alcançada a temperatura de 25°C. Após o resfriamento ser realizado por um período mínimo de 20 horas, foram determinadas as densidades aparentes secas de cada corpo de prova;
- e) Foram excluídos das análises todos os corpos de prova que apresentaram uma densidade aparente individual superior a +/- 2,5% da média obtida para o conjunto, sendo considerado como conjunto os seis corpos de prova moldados para cada teor de emulsão incorporado;
- f) Feita a análise estatística, os corpos de prova não submetidos a imersão foram rompidos. Já a outra metade dos corpos de prova (três para cada teor de emulsão) foram colocados em um banho de imersão com água a 25°C, por um período de 24 horas. Após serem removidos da água, suas superfícies foram secas e o ensaio ITS foi realizado imediatamente.

A Figura 2 ilustra dois conjuntos de corpos de prova moldados para o ensaio de ITS. Como é possível visualizar, um dos grupos se encontra imerso em água enquanto o outro, submetido ao processo de cura controlada sem imersão, está prestes a ser rompido.



Figura 2. Corpos de prova ITS em imersão (à esquerda) e após concluída a cura controlada sem imersão (à direita).

O ensaio para determinação da ITS foi executado de acordo com a normativa DNIT-ME 136 (DNIT, 2018), desenvolvido originalmente para misturas asfálticas. Considerando a carga de ruptura aplicada, o parâmetro ITS foi calculado mediante a aplicação da equação (3).

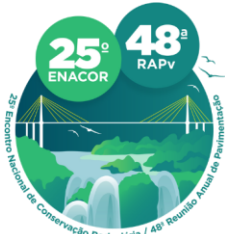
$$ITS = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3)$$

Onde: ITS = resistência à tração indireta (MPa); F = carga de ruptura (N); D = diâmetro do corpo de prova (cm); H = altura do corpo de prova (cm).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Caracterização das Misturas

As curvas granulométricas das misturas são apresentadas na Figura 3. Nela, também é possível observar a faixa granulométrica recomendada para reciclagem de materiais com incorporação de emulsão asfáltica de acordo com o TG2 (SABITA, 2020). Considerando que as granulometrias se encontram dentro dos limites propostos, não foi necessária a adição de nenhum outro tipo de agregado, sendo dispensável o processo de estabilização granulométrica. Devido ao fato de ambas as misturas apresentarem uma fração passante na peneira #4,75mm inferior a 50% e, ainda, considerando que o teor de finos (passante #0,075mm) obtido para ambas as misturas foi menor do



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



que 4%, o teor inicial de emulsão a ser adicionado foi definido como sendo 3,3%. Maiores detalhes sobre a definição do conteúdo inicial de emulsão podem ser obtidos no documento TG2.

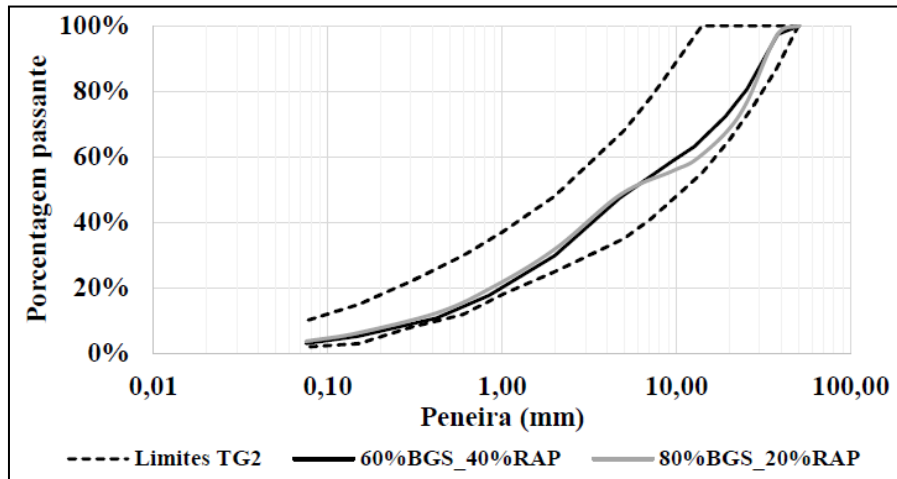


Figura 3. Curvas granulométricas das misturas.

As curvas de compactação das misturas são exibidas na Figura 4. Para fins de comparação, também foi inserida a curva do agregado tipo BGS. Destaca-se que a incorporação de RAP promoveu uma redução no $\gamma_{dm\acute{a}x}$. e na $w_{\acute{o}t}$. (umidade ótima) dos materiais. É possível verificar que quanto maior o teor de RAP incorporado, maior a redução observada no $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Esse comportamento já foi relatado por outros autores como Specht *et al.* (2013) e Fedrigo (2015), dentre outros. Com relação ao parâmetro OFC, a variação nos teores de RAP não promoveu uma influência significativa. Isso talvez possa ser explicado pelo fato de as curvas granulométricas de ambas as misturas exibirem considerável similaridade, com um conteúdo de finos praticamente idêntico (3%), fazendo com que a adição de um mesmo teor de fluido promova a máxima densificação dos materiais.

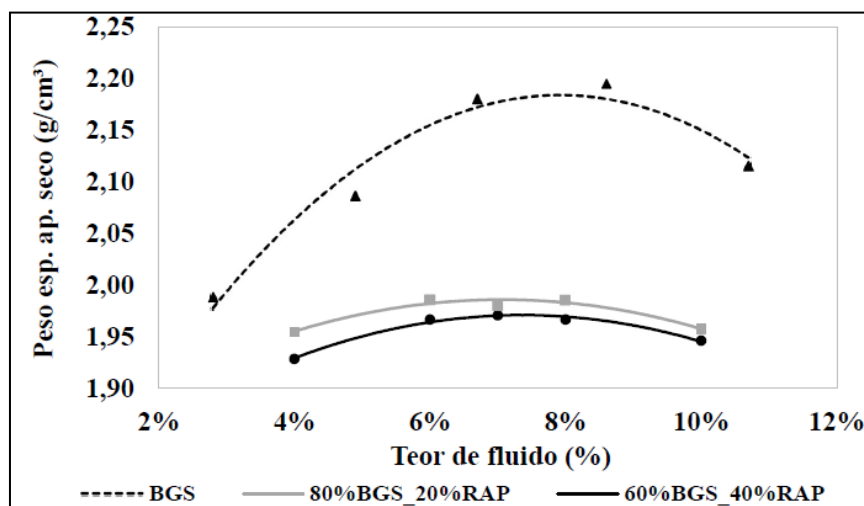
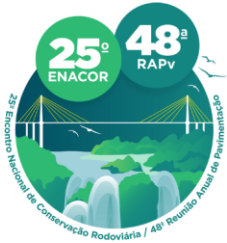


Figura 4. Curvas de compactação das misturas.

Baseado nos resultados dos ensaios de granulometria e compactação, foi possível definir os teores de emulsão e água a serem acrescentados às misturas na etapa de dosagem bem como os seus parâmetros de moldagem. A Tabela 3 apresenta uma síntese dessas definições, incluindo o número de corpos de prova confeccionados e os parâmetros de moldagem do agregado tipo BGS.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3. Parâmetros obtidos na etapa de caracterização das misturas.

Mistura	Tipo de cura	Nº de corpos de prova	Parâmetros de moldagem		Teores adicionados	
			OFC	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$	Emulsão	Água
80%BGS_20%RAP (1% cimento)	Seca	3	7%	1,985 g/cm ³	2,9%	4,1%
		3			3,1%	3,9%
		3			3,3%	3,7%
		3			3,5%	3,5%
		3			2,9%	4,1%
	Seca + imersão	3			3,1%	3,9%
		3			3,3%	3,7%
		3			3,5%	3,5%
		3			2,9%	4,5%
		3			3,1%	4,3%
60%BGS_40%RAP (1% cimento)	Seca	3	7,4%	1,970 g/cm ³	3,1%	4,3%
		3			3,3%	4,1%
		3			3,5%	3,9%
	Seca + imersão	3			2,9%	4,5%
		3			3,1%	4,3%
		3			3,3%	4,1%
Agregado tipo BGS Total	-	3	8% (w _{ót.})	2,180 g/cm ³	3,5%	3,9%
		48			-	-

Definição dos Teores de Projeto

A Figura 5 exibe os valores obtidos para o parâmetro ITS considerando os diferentes conteúdos de emulsão adicionados. A partir dela, foram definidos os teores de projeto de ambas as misturas.

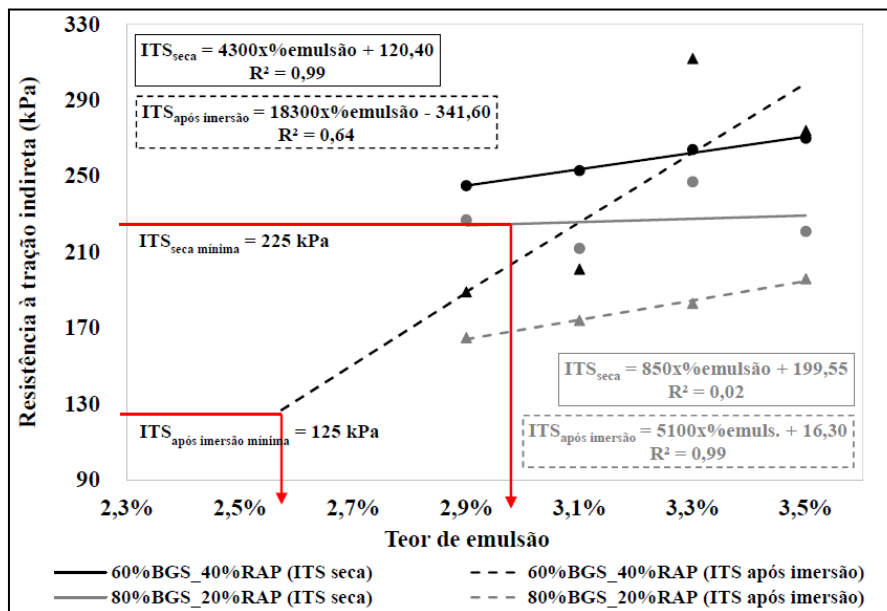
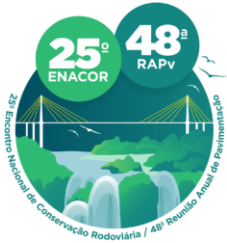


Figura 5. Definição dos teores de projeto das misturas.

O primeiro ponto a ser observado é que ambas as misturas conseguiram alcançar os valores mínimos preconizados pelo TG2, podendo ser classificados como materiais do tipo BSM1. Para os corpos de prova submetidos à cura seca, a metodologia de dosagem determina um valor mínimo para ITS de 225 kPa, enquanto os submetidos à imersão devem alcançar um valor mínimo de 125 kPa. Os modelos de ajuste obtidos para cada condição de cura foram comparados, sendo considerado para fins de dosagem aquele que resultou em um maior teor de emulsão. No caso da mistura 60%BGS_40%RAP,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



a definição do teor de projeto foi feita levando-se em consideração o modelo de ajuste obtido pelos corpos de prova submetidos à imersão, enquanto na mistura 80%BGS_20%RAP essa determinação foi realizada pela correlação apresentada pelos corpos de prova não submersos em água. As linhas vermelhas da Figura 5 ilustram, esquematicamente, os teores de projeto selecionados. Para mistura 60%BGS_40%RAP, esse conteúdo ficou em 2,6%. Já o desempenho da mistura 80%BGS_20%RAP resultou em uma taxa de emulsão de 3%. Esses resultados corroboram a tendência apresentada por Jenkins; Greyling e Collings (2021), estudo no qual os autores afirmam que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto.

Outro aspecto a ser destacado é que os modelos de ajuste ITS_{seca} da mistura 60%BGS_40%RAP e $ITS_{após\ imersão}$ da mistura 80%BGS_20%RAP alcançaram coeficientes de determinação R^2 bastante elevados. Isso mostra que, nessas duas situações, os valores de ITS podem ser previstos e extrapolados com considerável confiabilidade levando-se em consideração diferentes teores de emulsão. Também vale destacar que os maiores R^2 foram obtidos pelos conjuntos de corpos de prova que apresentaram os menores desvios-padrão, indicando que os mesmos conseguiram alcançar densidades relativamente próximas. Essa circunstância acaba por proporcionar um melhor mapeamento do desempenho dos materiais frente ao parâmetro ITS.

Por outro lado, enquanto a correlação $ITS_{após\ imersão}$ da mistura 60%BGS_40%RAP obteve um ajuste com qualidade intermediária ($R^2 = 0,64$), o fator negativo ficou por conta do modelo ITS_{seca} da mistura 80%BGS_20%RAP. Nesse último caso, os valores de ITS apresentaram uma elevada variabilidade, situação que acabou por prejudicar o modelo de ajuste alcançado ($R^2 = 0,02$). Esse fato talvez possa ser explicado em função das baixas densidades alcançadas pelos corpos de prova moldados com 3,1% e 3,5% de emulsão os quais obtiveram, respectivamente, graus de compactação de 93,4% e 92,7%. Os demais corpos de prova do conjunto, moldados com 2,9% e 3,3% de emulsão atingiram, respectivamente, graus de compactação de 94,5% e 95,6%. Sendo assim, o corpo de prova com maior conteúdo de emulsão, devido a sua menor densidade, teve a determinação da ITS afetada de forma negativa e considerável. Isso explica o porquê de, no caso da mistura 80%BGS_20%RAP, o aumento do teor de emulsão ter promovido um acréscimo extremamente baixo na ITS dos corpos de prova não submetidos à imersão. Para todos os demais modelos, a adição de maiores quantidades de emulsão promoveu um crescimento, em maior ou menor escala, nesse parâmetro.

É possível concluir que os melhores modelos de ajuste foram alcançados pelos conjuntos de corpos de prova que obtiveram os menores desvios-padrão nos graus de compactação. Ainda, o grupo que obteve o pior modelo de ajuste (mistura 80%BGS_20%RAP para o tipo de cura seca + imersão) apresentou o maior desvio-padrão dentre os conjuntos analisados. Vale salientar que os graus de compactação obtidos foram insatisfatórios, indicando que o martelo demolidor empregado não conseguiu promover a densificação adequada dos materiais.

Com relação a determinação dos teores de projeto, considerando a situação ideal e hipotética em que as densidades alvo tivessem sido alcançadas, é possível inferir que o parâmetro ITS teria seus valores elevados o que, inevitavelmente, faria com que os modelos de ajuste apresentados na Figura 5 fossem deslocados para cima. Dessa forma, os teores de projeto selecionados seriam menores, resultando em maiores benefícios econômicos e ambientais.

Por fim, cabe uma observação crítica com relação à compactação vibratória. Embora ela seja aplicada em campo, sua simulação dentro do laboratório acaba por não controlar de forma satisfatória uma série de propriedades, as quais só podem ser verificadas após a conclusão das moldagens. Os desvios-padrão obtidos nas densidades podem ser citados como um exemplo pois, por mais que o operador busque conferir a altura de cada uma das camadas compactadas, inevitavelmente, variações indesejadas sempre estarão presentes. Nesse sentido, do ponto de vista laboratorial, no qual todos os



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



parâmetros envolvidos devem ter o máximo de controle e precisão, o autor acredita que a compactação do tipo giratória seja a mais indicada, por possibilitar um monitoramento contínuo das propriedades e reduzir consideravelmente as dispersões.

CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa, que consistiu na aplicação da metodologia Sul-Africana para dosagem de duas misturas a frio estabilizadas com emulsão foi cumprido. Dessa forma, é possível concluir que o referido método de dosagem pode ser aplicado, de forma satisfatória, nos materiais brasileiros. Abaixo são destacadas as principais conclusões desse trabalho:

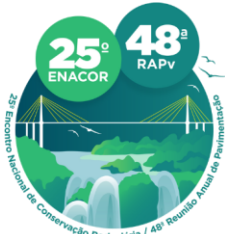
- a) Houve dificuldades para promover a densificação adequada dos materiais. O martelo demolidor empregado da marca Bosch, modelo GSH 500, com uma potência nominal de 1100 W e uma energia de impacto de 7,5 J por golpe parece, dessa forma, não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo;
- b) Existe uma variabilidade inerente no processo de compactação vibratória, a qual é difícil de ser eliminada. Considerando que o operador do equipamento trabalhe com extrema atenção durante as moldagens, ainda assim, serão observadas dispersões nas densidades. Apesar de o método de compactação aplicado em campo ser do tipo vibratório, o autor gostaria de destacar que, do ponto de vista exclusivamente laboratorial, a compactação giratória tende a resultar em uma menor variabilidade na etapa de moldagem, haja vista o monitoramento contínuo da altura e densidade dos corpos de prova realizado pelo equipamento giratório;
- c) Ambas as misturas conseguiram alcançar os valores mínimos de resistência à tração indireta preconizados pelo TG2 podendo, dessa forma, ser classificadas como materiais do tipo BSM1. Essa situação foi verificada para as duas condições de cura;
- d) A mistura 60%BGS_40%RAP obteve os maiores valores de ITS. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de ligante oxidado existente nesse material. Considerando que a emulsão incorporada promove a reativação parcial desse ligante, fazendo com que suas propriedades viscoelásticas sejam restauradas, justifica-se tal comportamento;
- e) Parece ter havido uma “superdosagem” das misturas, ou seja, os teores de emulsão de projeto selecionados poderiam ter sido menores. Sabe-se que a densificação dos corpos de prova foi insuficiente, comprometendo o desempenho de ambas as misturas. Sendo assim, considerando a situação hipotética em que as densidades obtidas no ensaio Proctor tivessem sido alcançadas, o comportamento das misturas teria sido alavancado e, dessa maneira, os teores de emulsão selecionados seriam reduzidos;
- f) Os teores de emulsão de projeto selecionados para as misturas 60%BGS_40%RAP e 80%BGS_20%RAP foram, respectivamente, 2,6% e 3%. Isso equivale a teores de ligante residual de 1,57% e 1,82%. Esses resultados corroboram a tendência apresentada por Jenkins; Greyling e Collings (2021), estudo no qual os autores afirmam que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto obtidos por meio do processo de dosagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14491:2007**: Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6299:2012**: Emulsões asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14393:2012**: Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6567:2015**: Ligantes asfálticos – Emulsões asfálticas – Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6570:2016**: Ligantes asfálticos – Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:2017**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14376:2019**: ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – análise granulométrica**. DNER-ME 083/98. Rio de Janeiro, 5 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, 6 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. DNER-ME 195/97. Rio de Janeiro, 6 p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Equivalente de areia**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, 10 p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – determinação do limite de plasticidade**. DNER-ME 082/94. Rio de Janeiro, 3 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio**. DNIT 424/2020-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT 136/2018-ME. Rio de Janeiro, 9 p. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. DNIT 164/2013-ME. Rio de Janeiro, 7 p. 2013.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem**. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2015.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará**. 2008. 248 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

GRECA ASFALTOS. **Portfólio de produtos**. [2021?]. 36 p. Disponível em: <https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/catalogo-produtos-greca-asfaltosweb.pdf>. Acesso em: 30 set. 2022.

JENKINS, K. J.; GREYLING, A. H.; COLLINGS, D. C. **Bitumen Stabilization of Base Layers for Pavement Rehabilitation Reaches Greater Heights**. 2021. International Airfield and Highway Pavements Conference 2021. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483510.024>. Acesso em: 29 jul. 2021.

KÉZDI, A. **Stabilized Earth Roads – Developments in Geotechnical Engineering**. Elsevier Company, 1979.

SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials**. Third Edition. July, 2020.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIEFENSEE, M. D. **Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo**. Anais da 42ª Reunião Anual de Pavimentação. 2013. Gramado/RS, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273980399>. Acesso em: 8 ago. 2022.