



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RAP NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA DE MISTURAS DO TIPO BSM ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Daniel Wolter Martell¹; Washington Peres Núñez²; Lélío Antônio Teixeira Brito²

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de RAP na resistência à tração indireta de misturas do tipo BSM estabilizadas com emulsão asfáltica. As misturas estudadas foram compostas por brita graduada simples (BGS), fresado (RAP), cimento e emulsão. Foram adicionados quatro teores de emulsão: 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%, definidos em função da granulometria dos materiais. 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. A incorporação de RAP promoveu um aumento nos valores do parâmetro ITS. Esse comportamento foi observado para todos os teores de emulsão asfáltica empregados e para ambas as condições de cura (seca e imersa). Os resultados obtidos indicam que o grau de compactação influencia de forma significativa o parâmetro ITS. O processo de quarteamento, realizado em laboratório para redução das amostras coletadas em campo, parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade obtida nas densidades dos corpos de prova. Cabe destacar que dentre os 48 corpos de prova rompidos, o maior valor obtido para ITS foi de 312 kPa.

PALAVRAS-CHAVE: compactação vibratória; resistência à tração indireta; misturas tipo BSM, RAP, emulsão.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of incorporating RAP on the indirect tensile strength of BSM mixtures stabilized with asphalt emulsion. The mixtures studied were composed of graded crushed stone, reclaimed asphalt Pavement (RAP), cement and emulsion. Four emulsion levels were added: 2.9%, 3.1%, 3.3% and 3.5%, defined depending on the particle size of the materials. The percentages of RAP incorporated were 20% and 40%, seeking to simulate, respectively, the full-depth reclamation (FDR) in a pavement structure with thin and intermediate thickness asphalt coating. The cement content was set at 1% for all samples. During the molding of the specimens, vibratory compaction was used. The cement used was CP IV-32 type. A cationic asphalt emulsion modified by slow-breaking elastomeric polymers, type RL1C-E, was Applied. There were difficulties in promoting adequate densification of the specimens, and the demolition hammer used seems not to be suitable for compacting materials similar to those in this study. The incorporation of RAP promoted an increase in the values of the ITS parameter. This behavior was observed for all asphalt emulsion levels used and for both curing conditions (dry and soaked). The results obtained indicate that the degree of compaction significantly influences the ITS parameter. The quartering process, carried out in the laboratory to reduce samples collected in the field, appears not to have been effective in reducing the variability obtained in the densities of the specimens. It is worth noting that among the 48 specimens, the highest value obtained for ITS was 312 kPa.

KEY WORDS: vibratory compaction; indirect tensile strength; BSM mixtures, RAP, emulsion.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, danielmartell@ifsul.edu.br.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, washington.nunez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br.



INTRODUÇÃO

A engenharia civil pode ser considerada um dos pilares da economia mundial. O porte atingido pela indústria da construção tem sido alcançado por meio da utilização de inúmeros recursos naturais gerando, historicamente, um grande ônus ambiental. Essa percepção histórica, aliada aos conceitos atuais de sustentabilidade e economia circular, vem provocando uma mudança de postura na sociedade em geral. Dessa forma, cada vez mais estudos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos no intuito de reutilizar materiais já existentes os quais, ao terem suas propriedades recuperadas, passam a ser novamente utilizados, fazendo com que a exploração de jazidas e materiais virgens seja reduzida. A reciclagem profunda de pavimentos, também conhecida como FDR – da sigla em inglês *Full-Depth Reclamation* – área na qual se insere o presente trabalho, vem a contribuir com esse contexto.

Diversas metodologias de dosagem internacionais e grande parte das especificações técnicas brasileiras levam em consideração, para fins de definição dos teores de projeto a serem aplicados nas misturas tipo BSM – da sigla em inglês *Bitumen Stabilized Materials* – a resistência à tração indireta (ITS, da sigla em inglês *Indirect Tensile Strength*). Esse cenário destaca a importância dessa propriedade levando em consideração esse tipo de estabilização. A nível nacional, o “banco de dados” disponível para o dimensionamento de pavimentos considerando a aplicação de misturas do tipo BSM pode ser considerado insatisfatório. Sendo assim, parece oportuno que pesquisas envolvendo o parâmetro ITS para essa categoria de material sejam desenvolvidas.

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de RAP – da sigla em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* – na resistência à tração indireta de misturas do tipo BSM estabilizadas com emulsão asfáltica. Para atingir tal objetivo, foram adicionados dois teores de RAP nas misturas, iguais a 20% e 40%. Também foram acrescentados quatro teores de emulsão, definidos em função da granulometria dos materiais, iguais a 2,9%, 3,1%, 3,3% e 3,5%. Dessa maneira, foi possível avaliar a influência da incorporação de RAP no parâmetro ITS para os diferentes teores de ligante incorporados.

CONCEITUAÇÃO E ASPECTOS GERAIS DAS MISTURAS TIPO BSM

De acordo com a *Southern African Bitumen Association* (SABITA, 2020), o comportamento das misturas tipo BSM é bastante semelhante ao de materiais granulares não cimentados, porém com níveis significativamente maiores de coesão e reduzida sensibilidade à umidade. Normalmente, pequenas quantidades de filer ativo, como cimento ou cal hidratada, são adicionados à mistura em conjunto com a emulsão asfáltica ou espuma de asfalto. A presença do filer ativo acaba por auxiliar o processo de dispersão do ligante. A hidratação do cimento ou da cal reduz o teor de umidade na mistura e ajuda a resistir à desagregação precoce causada pela ação do tráfego. Também pode ser observado um ganho de resistência gradual ocasionado pelas forças de ligação existentes entre o ligante e os agregados, efeito esse que é aprimorado pela presença do filer ativo, proporcionando uma resistência de longo prazo aos danos provocados pela umidade (SABITA, 2020).

O documento da SABITA (2020) expõe ainda as principais características envolvidas no comportamento dos BSMs, as quais são destacadas a seguir:

- a) Os BSMs obtêm um aumento significativo na coesão quando comparados aos materiais não tratados. O ângulo de atrito interno dos BSMs é bastante semelhante ao do material não tratado;



- b) Os BSMs adquirem resistência à flexão e uma certa rigidez como resultado das propriedades viscoelásticas do ligante disperso na mistura. Todavia, as partículas maiores não são revestidas pela película de ligante de forma contínua, não ficando totalmente “ligadas”. Dessa forma, os BSMs retêm as características granulares do material original, sendo sua rigidez dependente do estado de tensões e não estando propensos ao trincamento por fadiga;
- c) O ligante asfáltico fica disperso, principalmente, no entorno das partículas menores, o que acaba por encapsular e imobilizar as mesmas. Isso promove uma redução na susceptibilidade à umidade, melhorando a durabilidade dos BSMs. Uma vez que os finos estão “colados”, a tendência dos BSMs de bombear finos ao ser solicitado pelas cargas do tráfego é significativamente reduzida;
- d) De forma semelhante aos materiais granulares não tratados, a rigidez dos BSMs em uma camada de pavimento depende de alguns fatores como: a qualidade inerente do material não tratado; a densidade atingida pelo material; os teores de ligante e filer ativo adicionados e sua dispersão na mistura; o clima local (principalmente a temperatura e a precipitação) e a rigidez da camada subjacente. Importante destacar que o elevado aumento na coesão bem como a pequena variação no ângulo de atrito interno do BSM são os fatores responsáveis por permitir que o mesmo seja capaz de sustentar um maior nível de rigidez quando uma carga é aplicada;
- e) O principal mecanismo de falha dos BSMs é a deformação permanente;
- f) O comportamento dos BSMs pode variar consideravelmente e depende da qualidade do material não tratado bem como das quantidades de ligante e filer ativo aplicadas. Quando cimento em excesso é adicionado, a mistura pode acabar se comportando como um material tratado com cimento, sendo que o benefício da adição do ligante passe a ser discutível. Por esta razão, a adição de cimento deve ser limitada a 1% (em massa). Adicionalmente, existindo a presença de sílica no material não tratado, o potencial para reação pozolânica com o filer ativo precisa ser examinado.

Feita a apresentação das principais características das misturas tipo BSM, cabe um esclarecimento. O fato de a adição de cimento ser limitada a 1% não indica que o acréscimo de teores mais elevados possa ser, obrigatoriamente, prejudicial para a mistura. Essa limitação busca apenas garantir que as misturas do tipo BSM se comportem, de fato, como materiais granulares. Resultados obtidos por Andrade (2017) e Kuchiishi (2019) no ensaio triaxial de módulo de resiliência (MR) indicam que misturas contendo teores de cimento a partir de 2% não apresentam relação entre o MR e as tensões confinantes (σ_3) aplicadas assemelhando-se, dessa maneira, aos materiais cimentados. Nesse caso, eles estariam sujeitos, por exemplo, ao trincamento por fadiga. Cabe destacar que, na estabilização com emulsão, uma das principais funções do filer ativo consiste em auxiliar o processo de dispersão do ligante na mistura, diferentemente do que ocorre na estabilização com cimento, em que o ganho de rigidez é o principal benefício esperado.

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 filer ativo. Maiores



esclarecimentos sobre esse procedimento de dosagem podem ser obtidos nos estudos de Martell (2022), Martell e Núñez (2023).

Na presente pesquisa, foram utilizados dois conteúdos de RAP, iguais a 20% e 40%. O primeiro teor foi definido buscando simular a técnica da reciclagem tipo FDR em uma estrutura de pavimento com revestimento asfáltico delgado, enquanto o segundo, uma camada de CBUQ com espessura intermediária. Cabe destacar que de acordo com a *Portland Cement Association* (PCA, 2017), a reciclagem do tipo FDR é um método de reabilitação que envolve a reciclagem de um pavimento asfáltico existente (camada superficial) e sua camada inferior, transformando essa mistura reciclada em uma nova camada de base.

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. Considerando uma profundidade de reciclagem de 25 cm, as misturas 80% BGS/20% RAP e 60% BGS/40% RAP equivalem, respectivamente, a uma estrutura de pavimento com 5 cm de CBUQ/20 cm de BGS e 10 cm de CBUQ/15 cm de BGS. A determinação exata dos percentuais de cada material e suas espessuras em campo deve ser feita mediante a consideração das densidades *in situ*, sendo que as estruturas aqui apresentadas podem ser consideradas aproximadas. Maiores esclarecimentos sobre esse aspecto podem ser obtidos no documento TG2 (SABITA, 2020).

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 asfáltica, 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 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 tipo BSM 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.



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

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

Definição dos Teores de Emulsão Asfáltica Incorporados

O teor inicial de emulsão foi definido pela curva granulométrica das misturas. A metodologia Sabita (2020) preconiza o acréscimo de quatro teores distintos, sendo eles: teor inicial - 0,4%; teor inicial - 0,2%; teor inicial; teor inicial + 0,2%. De acordo com a metodologia de dosagem, essa etapa busca otimizar e definir o conteúdo a ser empregado no projeto final das misturas BSM.

Preparação e Compactação das Amostras

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 $\gamma_{\text{dmáx}}$ 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.

Cura Controlada das Amostras

Após a compactação, os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura controlada conforme a descrição apresentada a seguir:

- a) 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;



- b) Depois das 72 horas, os corpos de prova foram retirados da estufa e pesados, sendo suas massas individuais registradas;
- c) 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;
- 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.

Determinação da Resistência à Tração Indireta (ITS)

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. Dessa maneira, foram confeccionados 24 corpos de prova para cada mistura, totalizando 48 moldagens.

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 1. 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 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 nos documentos TG2 (SABITA, 2020), Martell (2022), Martell e Núñez (2023).

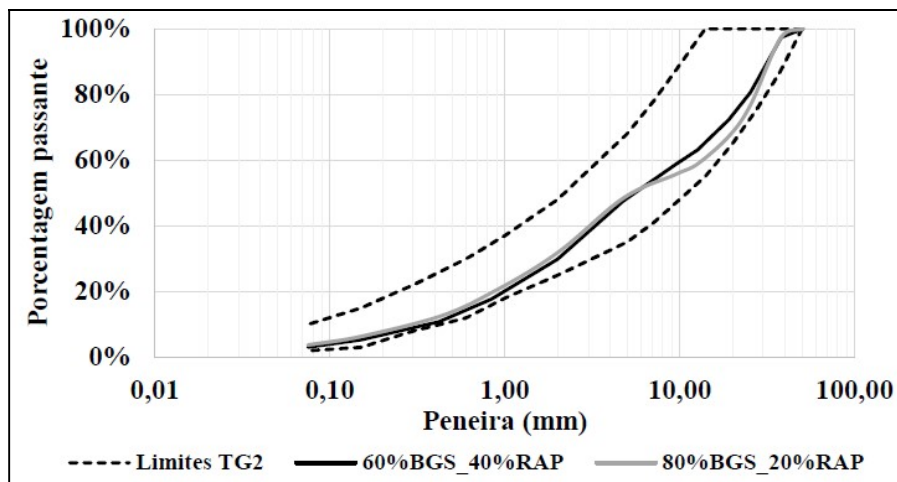


Figura 1. Curvas granulométricas das misturas.

As curvas de compactação das misturas são exibidas na Figura 2. 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.

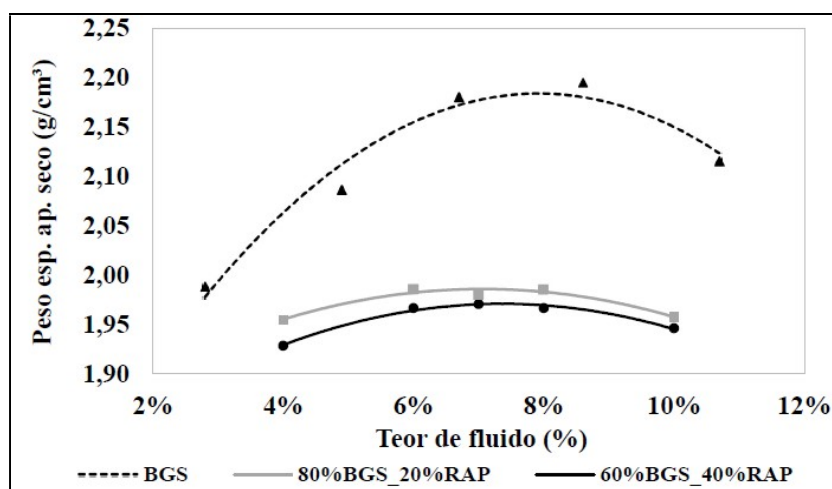


Figura 2. Curvas de compactação das misturas.

Baseado nos resultados dos ensaios de granulometria e compactação, foi possível definir os teores de emulsão e água a serem acrescentados às misturas 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.



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%
		3			2,9%	4,5%
		3			3,1%	4,3%
	Seca + imersão	3			3,3%	4,1%
		3			3,5%	3,9%
		3			-	-
		3			-	-
		3			-	-
Agregado tipo BGS	-	48	8% (w _{ót.})	2,180 g/cm ³	-	-
Total	-	48	-	-	-	-

Efeito da Incorporação de RAP na Resistência à Tração Indireta (ITS)

A figura 3 exibe os resultados da ITS em função do teor de RAP incorporado às misturas. Os dados representam a média dos corpos de prova moldados em triplicata, levando em consideração os teores de emulsão acrescentados e o tipo de cura realizado.

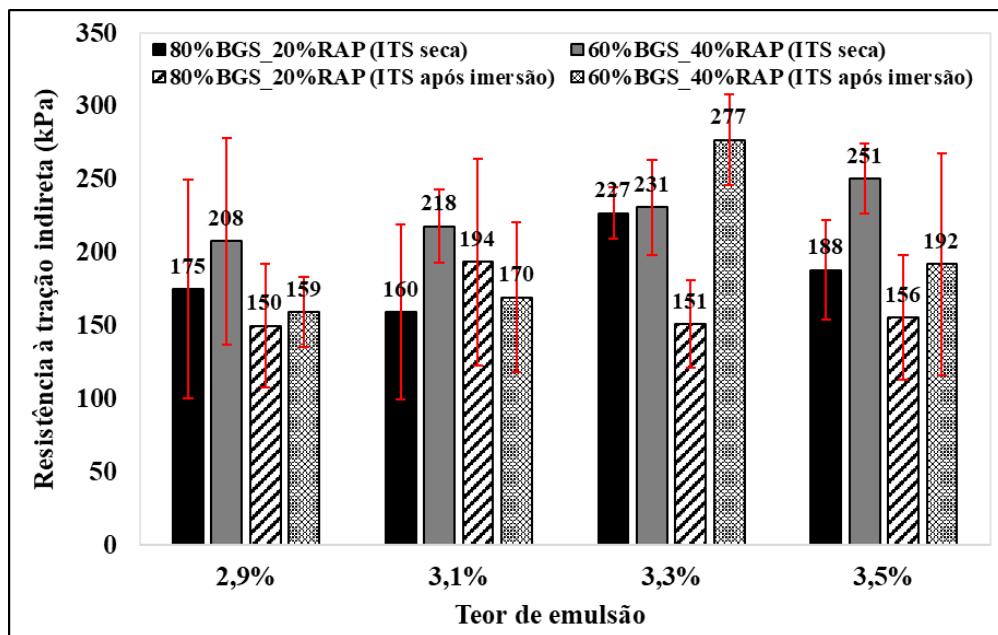


Figura 3. Efeito da incorporação de RAP na ITS das misturas.

Um primeiro aspecto a ser observado é que, no caso dos corpos de prova não submetidos à imersão, a mistura 60%BGS_40%RAP alcançou os melhores resultados, independentemente do teor de emulsão acrescentado. Isso vem ao encontro de alguns resultados observados na literatura, pois a



mistura com maior percentual de RAP, por possuir uma quantidade superior de ligante oxidado e, considerando que a emulsão utilizada nesse estudo rejuvenesce as propriedades desse insumo, é totalmente compreensível que a mistura 60%BGS_40%RAP obtenha um desempenho superior.

Considerando a cura controlada sem imersão, o maior acréscimo de ITS, de aproximadamente 36%, foi observado para o conjunto de corpos de prova moldados com 3,1% de emulsão. Os corpos de prova com 3,5% de emulsão obtiveram um ganho de 33,5%, enquanto os com 2,9% de emulsão alcançaram um aumento de 19%. Nessas três situações, os graus de compactação alcançados pelos conjuntos de corpos de prova, considerando cada condição de cura, foram relativamente próximos, com uma variação máxima de 1,7%. Para os corpos de prova moldados com 3,3% de emulsão, o acréscimo na ITS foi praticamente nulo, com um ganho de 1,8%. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de os corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP com 3,3% de emulsão terem alcançado um grau de compactação médio de 94,6%, enquanto os corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP atingiram uma média de 91,4%, ou seja, uma variação de 3,2%. Isso fez com que o desempenho da mistura com menor percentual de RAP fosse alavancado, inibindo o efeito da incorporação de tal agregado frente ao parâmetro ITS. Tal situação indica que um aumento na densidade influencia de forma positiva a ITS. Aqui, cabe citar o trabalho de Jenkins; Greyling e Collings (2021), estudo o qual afirma que o aumento do conteúdo de RAP promove uma queda nos teores de projeto, devido ao melhor comportamento das misturas BSM frente ao parâmetro ITS.

No caso dos corpos de prova submetidos à imersão, a situação se manteve idêntica, com exceção do conteúdo de emulsão de 3,1%. Nesse teor específico, a mistura com menor percentual de RAP obteve um melhor desempenho. Analisando as informações de maneira mais detalhada, percebe-se que o conjunto de corpos de prova da mistura 80%BGS_20%RAP obteve um grau de compactação médio de 93,6%, enquanto o conjunto da mistura 60%BGS_40%RAP atingiu 91,2%. Sendo assim, sabendo-se que maiores graus de compactação afetam de forma positiva a ITS, explica-se parcialmente os resultados obtidos. Ainda, considerando que os corpos de prova com menor grau de compactação possuem um maior índice de vazios ($e\%$) e, consequentemente, uma menor resistência aos efeitos deletérios da umidade, os mesmos tendem a sofrer uma maior influência dos danos causados pela imersão, devido ao preenchimento dos vazios pela água, aspecto que também ajuda a explicar tal situação. As conclusões obtidas no estudo de Yang *et al.* (2021) destacam que a redução do índice de vazios, ou seja, a promoção de maiores graus de compactação é uma maneira eficiente de aumentar a ITS dos materiais. Os resultados aqui obtidos corroboram essa tendência.

Também vale citar que o conjunto de corpos de prova da mistura 60%BGS_40%RAP submetidos à imersão com 3,3% de emulsão incorporada apresentou os melhores resultados de ITS. Para essa situação, foi observado um aumento de aproximadamente 83% em tal parâmetro. Avaliando o grau de compactação médio obtido para esse grupo, percebe-se que as densidades ficaram em patamares muito próximos aos demais conjuntos, não podendo ser indicada como uma razão para o melhor desempenho. Sendo assim, aparentemente, esses resultados indicam uma possível variabilidade existente no próprio processo de confecção dos corpos de prova, não sendo identificado nenhum aspecto notável que possa explicar tal comportamento. Cabe destacar que dentre os 48 corpos de prova rompidos, o maior valor obtido para ITS foi de 312 kPa.

Por fim, é importante mencionar que as barras de erro presentes na figura 3 indicam que houve uma elevada variabilidade nos resultados obtidos. Tal ocorrência sugere que, devido ao fato de os materiais aqui estudados terem sido coletados em campo, o processo de quarteamento realizado em laboratório para redução das amostras parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade e,



ainda, por se tratar de misturas recicladas, a variabilidade existente pode ser uma condição inerente ao próprio tipo de material utilizado.

CONCLUSÕES

Abaixo são destacadas as principais conclusões desse trabalho:

- a) Houve dificuldades para promover a densificação adequada das misturas. Dessa forma, o martelo demolidor aqui empregado parece não ser indicado para compactação de materiais similares aos desse estudo;
- b) A incorporação de RAP promoveu um aumento nos valores do parâmetro ITS. Esse comportamento foi observado para todos os teores de emulsão e para ambas as condições de cura. Considerando que a emulsão incorporada promove a reativação parcial do ligante oxidado no RAP, fazendo com que suas propriedades viscoelásticas sejam restauradas, justifica-se tal comportamento. Dessa forma, o RAP pode ser considerado um agregado nobre, devendo a sua reutilização ser cada vez mais estimulada.
- c) Os resultados obtidos indicam que o grau de compactação influencia de forma significativa o parâmetro ITS. Sendo assim, é imprescindível que uma densificação adequada das misturas tipo BSM seja alcançada para o seu adequado comportamento. Nesse contexto, cabe destacar que existe uma variabilidade inerente no processo de compactação vibratória, sendo observadas dispersões nas densidades. Sendo assim, embora o método de compactação do tipo vibratório seja aquele aplicado em campo, 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;
- d) Devido ao fato de os materiais aqui estudados terem sido coletados em campo, o processo de quarteamento realizado em laboratório para redução das amostras parece não ter sido eficaz para reduzir a variabilidade. Tal fato fez com que as densidades obtidas pelos corpos de prova fossem relativamente distintas, situação que afetou de forma negativa as análises aqui realizadas, que buscaram considerar exclusivamente o efeito da incorporação de RAP no parâmetro ITS. Para pesquisas futuras, a fim de mitigar a influência da variabilidade e as consequentes diferenças nas densidades, o autor sugere que as amostras sejam preparadas dentro do laboratório, com a pesagem específica dos materiais em cada uma das peneiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, L.R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. 2017. 179 p. Thesis (Master in Transportations Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- 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.
- 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.

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.

KUCHIISHI, A. K. **Mechanical Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures**. 2019. 191 p. Master Thesis (Engineering), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

MARTELL, D. W. **Reciclagem Profunda de Pavimentos Asfálticos com Emulsão: Aplicação da Metodologia de Dosagem Sul-Africana a Nível Nacional**. 156 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura. Porto Alegre, BR-RS, 2022.

MARTELL, D. W.; NÚÑEZ, W. P. **Dosagem de Misturas a Frio Recicladas com Emulsão: Aplicação da Metodologia Sul-Africana a Nível Nacional**. Anais do 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR). Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV). 2023. Foz do Iguaçu/PR. Disponível em: <https://rapvenacor.com.br/anais/2023/TT048.pdf>. DOI: 10.29327/1304307.48-50.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to full-depth reclamation (FDR) with cement**. Report Nº SR1006P, 2017.

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.

YANG, W.; OUYANG, J.; MENG, Y.; HAN, B.; SHA, Y. **Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical Properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under diferente cement contents**. Construction and Building Materials 297, 123699. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123699>. Acesso em: 23 jun. 2021.