TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Avaliação da adição de materiais fresados em camadas granulares para bases de pavimentos asfálticos

Evaluation of the addition of recycled asphalt pavement materials in granular layers for asphalt pavement base

Eduarda Fração Santos[1], **Luciano Pivoto Specht**[1], **Magnos Baroni**[1], **Jéssica da Silva Vieira**[1]

[1]Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

Contato: eduardafracao@gmail.com, (EFS); luspecht@ufsm.br, (LPS); magnos.baroni@ufsm.br, (MB); jessica.vieira@acad.ufsm.br, (JSV)

Recebido:
2 de fevereiro de 2024
Revisado:
8 de maio de 2024
Aceito:
1 de setembro de 2024
Publicado:
2 de dezembro de 2024
Editor de Área:
Kamilla Vasconcelos, Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:
Reciclagem.
Ensaios Dinâmicos.
Módulo de Resiliência.
Deformação Permanente.
MeDiNa.

Keywords:
Recycling.
Triaxial Tests.
Resilient Modulus.
Permanent Deformation.
MeDiNa.

DOI: 10.58922/transportes.v32i3.2989

RESUMO

A reciclagem de pavimentos possibilita a reutilização de materiais fresados como insumos para novas estruturas. Essa prática contribui para o desenvolvimento sustentável, reduzindo a geração de resíduos e consumo de agregados pétreos. A reciclagem a frio, sem emprego de aditivos estabilizantes, como cimentos e emulsões asfáltica, com incorporação de fresados em camadas granulares é uma possibilidade atrativa econômica e ambientalmente. Assim, neste estudo foram avaliadas diferentes misturas granulares produzidas com adição de fresados e agregados pétreos de riodacito, empregando ensaios triaxiais com cargas repetidas e modelos de previsão abordados pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Os resultados demonstraram um aumento significativo nos módulos de resiliência das misturas com a adição dos fresados, promovendo um alívio de tensões e retardando o trincamento por fadiga no revestimento. Nos testes de deformação permanente, os resultados variaram conforme o nível de tensão. Contudo, para as estruturas analisadas, as deformações não ultrapassaram 10 mm quando se empregou apenas fresado na camada de base. Logo, nas condições desta pesquisa, a adição dos fresados nas camadas granulares promoveram um melhor desempenho estimado para as estruturas, retardando o trincamento, sem apresentar afundamentos excessivos. Assim, conclui-se que essa prática é capaz de produzir benefícios técnicos, econômicos e ambientais a construção de pavimentos. Contudo, cada caso deve ser analisado considerando suas especificidades e materiais disponíveis.

ABSTRACT

Pavement recycling makes it possible to reuse milled materials as inputs for new structures. This practice contributes to sustainable development, reducing waste generation and stone aggregates consumption. Cold recycling methods, without the use of stabilizing additives, as asphalt emulsion or cement, with the incorporation of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials into granular layers, are an economically and environmentally attractive possibility. Therefore, in this study, different mixtures produced with the addition of RAPs in unbound granular material with rhyodacite stony aggregates were evaluated, using triaxial tests with repeated loads and prediction models within the National Method for pavement design from Brazil (MeDiNa). The results demonstrated a significant increase in the resilient modulus generated of the mixtures with the addition of RAPs, promoting stress relief and delaying the fatigue cracking of the top layer. In permanent deformation tests, the results varied depending on stress level. However, for structures analyzed, the deformations did not exceed 10mm when only RAP material was used in the base layer. Therefore, under the conditions of this research, the addition of RAPs materials in granular layers promoted a better estimated performance for the pavements, delaying cracking, without presenting excessive deformations. Thus, it is concluded that this practice is capable of producing technical, economic and environmental benefits for pavements constructions. However, each case must be analyzed considering its specificities and available materials.

OPEN ACCESS
CC BY

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo desenvolvimento sustentável fomenta a criação de novas práticas e soluções técnicas que visam reduzir os impactos sobre o meio ambiente. Neste contexto, a reciclagem de pavimentos é uma alternativa que permite a preservação dos recursos naturais e financeiros. Essa técnica surgiu em meados de 1915 e a partir de 1970, devido a inflação dos preços do petróleo provocada pelo embargo da Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC), ganhou importância nos Estados Unidos e a forma como é conhecida hoje (Sullivan, 1996).

O termo RAP (Reclaimed Asphat Pavement) de origem norte americana é usado internacionalmente para denominar o material fresado. O fresado é obtido do processo de desbaste de pavimentos asfálticos e é composto por agregados envoltos por ligante envelhecido (Bonfim, 2011). O uso desses materiais eventualmente gerados em empreendimentos tornou-se uma prática obrigatória para os projetos de engenharia de restauração, adequação e ampliação de obras viárias, no âmbito da Sede e Superintendências Regionais (Brasil, 2021).

Há diferentes formas de utilização do RAP, que pode ser incorporado nas misturas asfálticas que compõem o revestimento de pavimentos ou em camadas de base e ou sub-base em substituição aos agregados virgens (Cosentino et al., 2003; Enieb, 2023).

A principal vantagem do emprego do RAP em misturas asfálticas é a possibilidade de redução do teor de ligante necessário, pois pode-se estimar um grau de reativação do ligante envelhecido presente no fresado (Zaumanis, Mallick e Frank, 2016; Lo Presti et al., 2019; Botella et al., 2022). Contudo, a execução dessas misturas demanda gastos energéticos elevados devido as altas temperaturas necessárias para produção e gera emissões de fumaças e vapores que são danosos a saúde humana (Thives e Ghisi, 2017; Gungat et al., 2019).

Técnicas de reciclagem a frio, sem emprego de calor, representam uma alternativa mais atrativa. Contudo, para execução de revestimentos com essas misturas asfálticas recicladas a frio (CRAM – *Cold Recycled Asphalt Mixtures*), muitas vezes, torna-se necessário o uso de estabilizantes químicos, como cimentos e/ou emulsões asfálticas (Pires et al., 2016; Mehranfar e Modarres, 2018; Pasche et al., 2018; Silva et al., 2022). Sendo necessária uma análise de custo-benefício detalhada, com bom controle tecnológico desses aditivos.

Portanto, diante das possíveis dificuldades em acesso a insumos e necessidade de promover uma destinação correta ao RAPs, esses materiais também passaram a ser incorporados em camadas de base e/ou sub-base, compondo misturas granulares que permitem incorporação de altos teores de fresado (Alam, Abdelrahman e Schram, 2010; Pinto, Cervo e Pereira, 2012; Specht et al., 2013; Saride, Avirneni e Javvadi, 2016; Bradshaw, Costa e Giampa, 2016; Hermes, Echeverria e Specht, 2016; Plati e Cliatt, 2018; George et al., 2019; Mousa, El-Badawy e Azam, 2020; Barmade, Patel e Dhamaniya, 2022; Mariyappan, Palammal e Balu, 2023; Rayapeddi Kumar e Archilla, 2023).

Embora diversos estudos já apontem a viabilidade do emprego dos RAPs em camadas de base e/ou sub-base, são escassas as pesquisas acerca do comportamento dessas misturas, sem presença de estabilizantes e a luz do novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Assim, essa prática carece de dados que permitam uma análise prévia de desempenho, auxiliando na tomada de decisão para o uso assertivo dos fresados.

Logo, o principal objetivo desta pesquisa reside em investigar o uso de misturas granulares compostas com fresados, sem estabilizantes químicos, em camadas de base em pavimentos. Visando a obtenção de dados representativos desses materiais que permitam obter uma estimativa de desempenho e, assim, contribuindo para decisões técnicas e análises de custo-benefício. Para

isso, realizou-se análises laboratoriais, empregando o Equipamento Triaxial de Cargas Repetidas (ETCR), seguindo normativas validadas para materiais tradicionais, como solos e britas granulares simples (BGS).

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

Para avaliação do módulo de resiliência das misturas foram realizados ensaios seguindo o método descrito em DNIT- ME 134/2018 (DNIT, 2018a). Os corpos de prova foram moldados na umidade ótima e com energia modificada, para uma melhor eficiência de compactação. Já para avaliação da deformação permanente foram seguidos os procedimentos descritos em DNIT 179/2018-IE (DNIT, 2018b), com uma redução para seis pares de tensões propostos por Lima, Motta e Aragão (2019), para o modelo desenvolvido por Guimarães (2009).

A partir dos valores de módulo de resiliência e deformações permanentes, analisou-se a aderência do comportamento das misturas aos modelos de previsão. Para isso, foram realizadas análises de regressão múltiplas através do software "Statistica", versão 10, permitindo a obtenção das constantes para cada modelo.

Os modelos de previsão obtidos foram então empregados para uma avaliação mecanicista através do software "MeDiNa", versão v.1.1.5.0, para cinco níveis de tráfego (A: N=5,0×105; B: N=5,0×106; C: N=1,0×107; D: N=2,5×107 e E: N=5,0×107) e tipos de revestimento distintos. Obtendo, assim, estimativas de área trincada e afundamento em trilha de roda (ATR).

3. MATERIAIS E PROPRIEDADES FÍSICAS

Foram empregados dois fresados provenientes de obras de restauração de rodovias no estado do Rio Grande do Sul. O material denominado RAP-RS400 advêm de um trecho da rodovia RS-400, localizada no município de Candelária e apresenta um ligante asfáltico do tipo CAP 50/70. Já o RAP-BR290 provem do desbaste de dois trechos da BR-290, composto por agregados basálticos e ligante modificado por polímeros do tipo AMP 60/85.

Ambos RAPs possuem granulometrias que melhor se aproximaram da "Faixa C – DNIT 031/2006" para misturas betuminosas usinadas a quente (DNIT, 2006). Porém, apresentaram uma quantidade de finos insuficiente, o que é comum no caso de fresados já que os finos são incorporados pelo ligante asfáltico (Sultan, Abduljabar e Abbas, 2013; Consoli et al., 2017).

Os agregados minerais são provenientes do município de Itaara (RS) e fornecidos por uma empresa privada da região. Esses foram classificadas por Sagrilo et al. (2023) como um riodacito, cujas características são resumidas na Tabela 1. Percebe-se que a perda de massa resultante por exposição a sulfatos e o percentual de desgaste por abrasão atendem aos limites para camadas de base.

A partir das frações totais dos RAP, britas 3/4, 3/8 e pó de pedra foram dosadas nove misturas que melhor atendessem a "Faixa C" da especificação 141/2022 do DNIT (2022) e permitissem uma análise comparativa dos fresados: duas misturas com apenas fresado (M1 e M5), duas com fresado e pó de pedra (M2 e M6), duas que atenderam aos limites da faixa (M3 e M7), outras duas composições mais próximas ao limite inferior da faixa com deficiência em finos (M4 e M8) e uma composição com apenas agregados virgens (AV), sem fresado (M0).

Definidas as composições, foram determinados seus parâmetros de compactação. Para isso, seguiu-se o Procedimento Rede 04 (Petrobras, 2010), sem reuso de material e empregando o cilindro tripartido. Na Tabela 2 são expressas as composições e nomenclaturas das misturas, bem

como os Coeficiente de Não Uniformidade (CNU), o Coeficiente de Curvatura (CC) e a Superfície Específica que foi estimada a partir da Fórmula de Vogt, empregando a massa específica máxima obtida a partir do *Rice Test* (ABNT, 2008) e os parâmetros de compactação.

Tabela 1: Composição mineralógica e caracterização.

Minerais essenciais	**35% Feldspato; 32% Quartzo; 25% Piroxênio e 8% Opacos**
Mineiras Secundários	Opacos
Minerais de Carboneto	Ausentes
Minerais Deletérios	Ausentes
Estrutura	Maciça
Textura	Afanítica inequigranular porfirítica muito fina
Tipo rochoso	Riodacito (DNER, 1994a)
Densidade (g/cm^3)	2,5 (DNER, 1997a)
Absorção (%)	2,19 (DNER, 1997a)
Abrasão Los Angeles (%)	10,05 (DNER, 1998)
Resistencia a sulfato de sódio (%)	0,66* / 5,61** (DNER, 1994b)
Resistencia a impacto (%)	4,66 (DNER,1999)
Resistencia a esmagamento (%)	13,17 (DNER,1997b)

Legenda: (*): Agregados graúdos; (**): Agregados miúdos.
Fonte: Adaptado de Sagrilo et al. (2023).

Nota-se que o coeficiente CC ficou entre 1 e 3 para todas as misturas, logo, essas podem ser classificadas como bem graduadas. Ainda, percebe-se que a adição de agregados virgens aos fresados contribui para obtenção de composição menos uniformes.

Ainda, ao analisar as curvas granulométricas apresentadas na Figura 1, observa-se uma deficiência em partículas finas na maioria das misturas, sendo que apenas M0, M3 e M7 atenderam ao limite inferior da faixa. Já as curvas M4 e M8 foram muito próximas, assim como M3 e M7.

Tabela 2: Nomenclatura e misturas produzidas.

	DOSAGEM					**GRANULOMETRIA**			**COMPACTAÇÃO**		
	RAP-RS400	**RAP-BR290**	**Brita 3/4**	**Brita 3/8**	**Pó de pedra**	**CNU**	**CC**	**Superfície Específica(m^3/Kg)**	**MEAS Máxima (g/cm^3)**	**Umidade Ótima (%)**	**Volume de Vazios (%)**
M0	-	-	25%	24%	51%	37,50	2,34	9,73	2,110	7,30	20,11
M1	100%	-	-	-	-	12,00	1,47	2,74	2,146	7,10	19,84
M2	70%	-	-	-	30%	16,00	1,44	6,85	2,118	6,80	20,50
M3	30%	-	6%	16%	49%	23,53	1,47	9,36	2,140	8,20	19,52
M4	22%	-	41%	8%	29%	30,56	1,58	6,55	2,128	6,80	18,96
M5	-	100%	-	-	-	6,55	1,46	2,35	1,910	7,00	25,22
M6	-	70%	-	-	30%	10,00	1,11	6,62	1,938	8,20	25,43
M7	-	20%	15%	16%	49%	23,53	1,78	9,41	2,085	7,80	20,72
M8		21%	45%	9%	25%	23,91	1,44	5,90	2,060	5,20	21,04

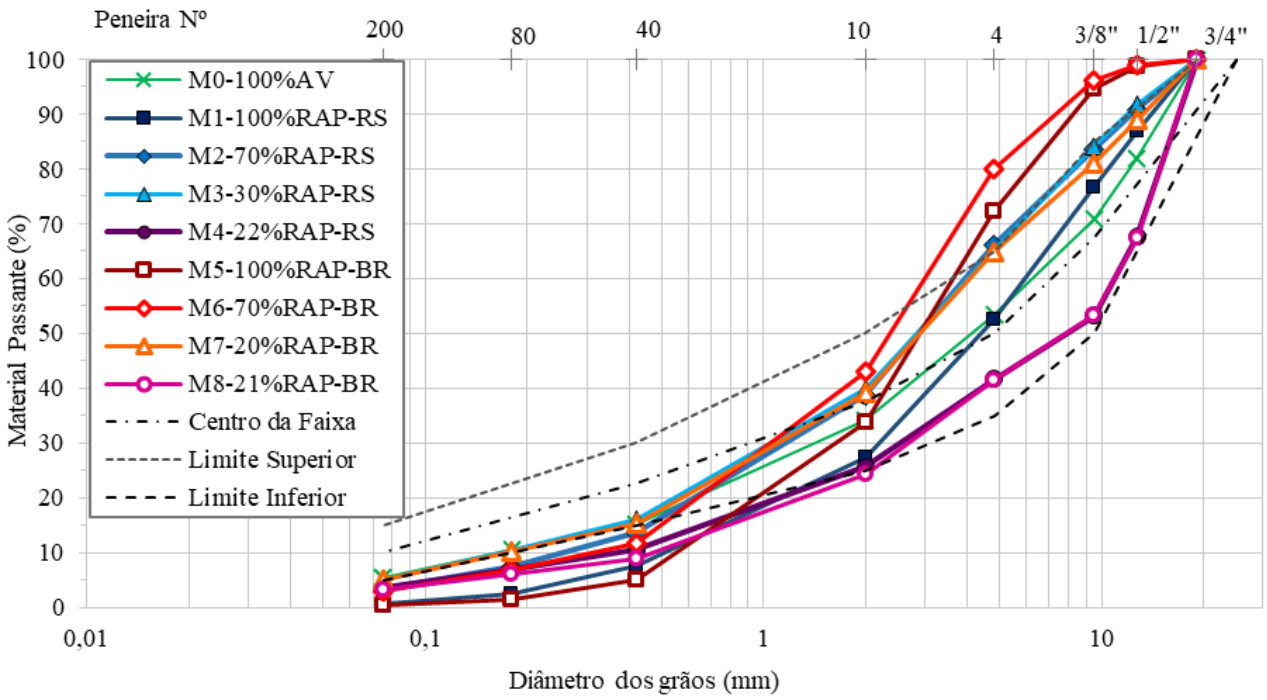


Figura 1. Curvas granulométricas das misturas: Faixa C DNIT 141/2022-ES.

4. COMPORTAMENTO RESILIENTE

Para apresentação dos resultados obtidos nos testes com ETCR, foram plotados gráficos dos valores de módulo de resiliência versus a tensão confinante, de forma que as linhas representam os modelos de previsão, dependente da tensão confinante (MR-σ_3), obtidos para cada mistura e os marcadores correspondem aos dados experimentais (Figura 2).

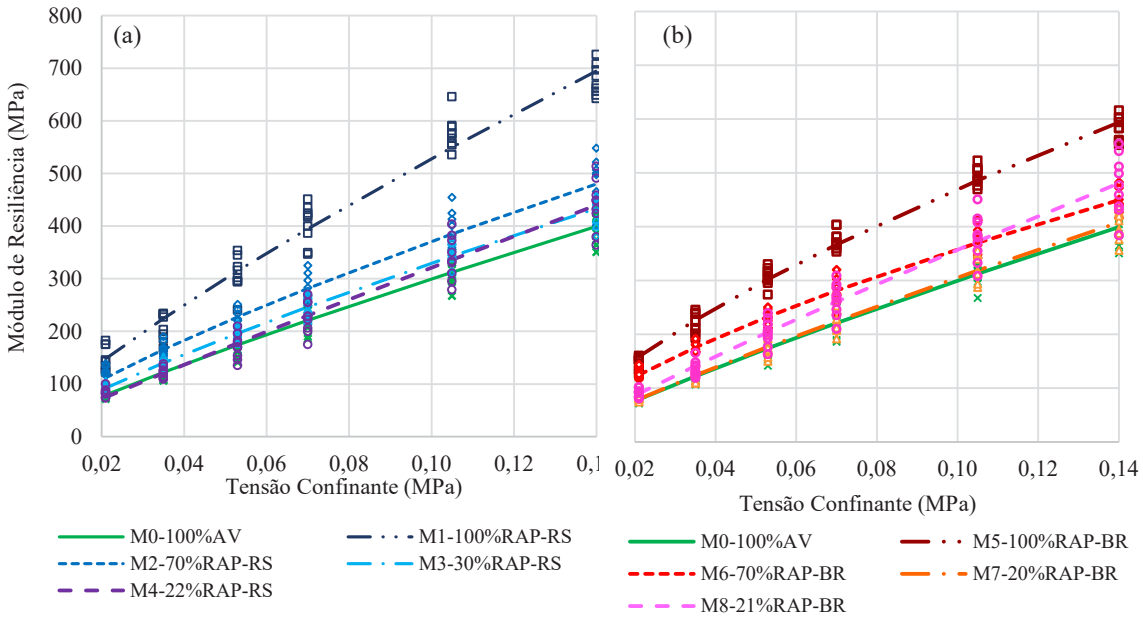


Figura 2. Módulos de resiliência obtidos para as misturas. (a) misturas com fresado RAP-RS400 e (b) misturas com fresado RAP-BR290.

Percebe-se que os maiores valores de módulos foram obtidos para as misturas compostas apenas com fresados (M1 e M5), mesmo essas apresentando granulometrias mais distantes da faixa. Efeito semelhante também foi relatado nos trabalhos de Kim, Labuz e Dai (2007), Attia e Abdelrahman (2011), Abdelrahman, Alam e Zollars (2011), Dong e Huang (2014), Thakur e Han (2015), Saride, Avirneni e Javvadi (2016), Mousa et al. (2017) e Coban et al. (2022a), que verificaram módulos superiores para as misturas com maiores teores de fresado, quando comparadas a misturas com agregados virgens.

Logo, de forma geral, as misturas com maiores teores de fresado atingiram os maiores valores de módulo. Contudo, no grupo com RAP-RS400, a mistura M4 superou os módulos de M3 em níveis mais altos de tensão, mesmo com um menor teor de fresado. Assim como no grupo RAP-BR290, em que M8 obteve módulos superiores a M6 em tensões mais elevadas. Essas divergências podem ser justificadas devido ao fato de M4 e M8 apresentarem curvas granulométricas mais grossas e com distribuições menos uniformes, contribuindo para uma melhor distribuição de tensões.

Nota-se também que a adição do pó de pedra resultou em módulos inferiores aos obtidos pelas misturas com apenas fresados, em ambos os casos. Assim, pode-se dizer que a adição de finos proporcionou uma redução na rigidez das misturas, como também verificado por Thom e Brown (1987), Kamal et al. (1993) e Lima, Motta e Guimarães (2017) em pesquisas com agregados pétreos.

Ainda, ao comparar os dois grupos, percebe-se que os módulos atingidos pelas misturas com RAP-RS400 foram ligeiramente superiores. O que pode ser justificado pela maior densidade desse fresado e maior grau de envelhecimento do seu ligante do tipo CAP 50/70, conforme verificado em estudo de Vestena et al. (2022). Assim, acredita-se que fresados mais envelhecido, cujo reaproveitamento em revestimentos é mais dificultoso, proporcionem um ganho de rigidez quando empregados em camadas granulares.

Por fim, foram analisados quatro diferentes modelos de previsão para módulo de resiliência, como orienta o DNIT (2020). Para todos os casos, o modelo que melhor representou o comportamento das misturas estudadas foi o Modelo Composto, assim como verificado por Attia e Abdelrahman (2011) e Lima, Silva e Rezende (2023). Os coeficientes de determinação para esse modelo variaram entre 0,965 e 0,993, enquanto que para o modelo $k-\sigma_d$, dependente somente da tensão desvio, variaram entre 0,677 e 0,769 (Tabela 3).

Tabela 3: Parâmetros de regressão dos modelos testados de módulo de resiliência.

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Modelo k-σ_3: $MR = k_1(\sigma_3)^{k_2}$									
k_1	2139,022	3448,198	2173,203	2153,363	2752,784	2331,587	1700,152	2216,671	2729,133
k_2	0,853	0,815	0,768	0,815	0,933	0,696	0,676	0,861	0,883
R^2	0,965	0,972	0,950	0,981	0,947	0,985	0,975	0,975	0,947
Modelo k-σ_d: $MR = k_1(\sigma_d)^{k_2}$									
k_1	729,519	1142,838	829,566	749,309	838,886	914,057	687,16	735,336	880,363
k_2	0,582	0,516	0,528	0,543	0,628	0,447	0,437	0,577	0,592
R^2	0,769	0,677	0,752	0,739	0,750	0,680	0,681	0,753	0,732
Modelo k-θ: $MR = k_1(\theta)^{k_2}$									
k_1	520,043	868,863	610,869	552,039	584,583	721,349	544,798	528,858	627,518
k_2	0,805	0,737	0,729	0,758	0,875	0,635	0,621	0,804	0,825
R^2	0,970	0,918	0,954	0,961	0,951	0,928	0,925	0,966	0,939

Tabela 3: Continuação...

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Modelo Composto: $MR = k_1(\sigma_3)^{k_2}(\sigma_d)^{k_3}$									
k_1	1938,633	3339,847	1996,426	2012,018	2478,283	2286,827	1655,628	2038,085	2504,100
k_2	0,694	0,765	0,626	0,705	0,762	0,664	0,633	0,724	0,743
k_3	0,159	0,049	0,144	0,110	0,172	0,031	0,043	0,136	0,140
R^2	0,989	0,974	0,973	0,993	0,972	0,986	0,978	0,992	0,965

Portanto, assim como observado para materiais granulares virgens, o comportamento elástico das misturas granulares com fresados também sofre influência do estado de tensões nas camadas e da magnitude do carregamento. Contudo, a presença do fresado tende a gerar uma resposta elástica superior a BGS.

5. COMPORTAMENTO PLÁSTICO

Devido ao tempo de duração dos ensaios e disponibilidade do equipamento ETCR, optou-se por selecionar três misturas para análise de deformações permanentes, dando prioridade ao grupo com RAP-RS400, pois esse possui um ligante asfáltico do tipo CAP 50/70, mais empregado no Rio Grande do Sul. Assim, selecionou-se a mistura M0, sem fresado, a M3 com 30% RAP-RS400 e dentro da faixa C e a M1 composta apenas de RAP-RS400. Os resultados obtidos nos testes de DP são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4: Deformações permanentes acumuladas específicas para cada mistura.

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_3/σ_d	Deformação permanente total - ε_p (mm)		
			M0	M3	M1
0,04	0,04	1	0,034	0,218	0,594
0,08	0,08	1	0,149	0,318	0,805
0,12	0,24	2	1,140	1,160	2,080
0,04	0,12	3	1,240	1,475	0,973
0,08	0,24	3	1,720	1,490	2,020
0,12	0,36	3	2,020	1,900	3,040

Legenda: σ_3: Tensão Confinante; σ_d: Tensão Desvio.

Percebe-se que as maiores deformações totais ocorreram no maior nível de tensão (0,12-0,36 MPa), em todas as misturas. Para M0, o valor atingiu 2,02 mm, o que corresponde a 1,008% da altura inicial da amostra, para M3 foi de 1,90 mm (0,934%) e para M1 atingiu 3,04 mm (1,516%). Logo, pode-se dizer que a adição de agregados virgens ao fresado RAP-RS400, produzindo uma composição dentro dos limites da faixa (M3), contribuiu para reduzir as deformações plásticas máximas.

Já, para o nível mais baixo de tensão (0,04-0,04 MPa), os valores atingidos e percentuais em relação à altura inicial da amostra foram de 0,034 mm (0,017%) para M0, 0,218 mm (0,109%) para M3 e 0,594 mm (0,296%) para M1. Assim, demonstrando que a adição do fresado resultou em maiores deformações, o que pode ser justificado pelo aumento da uniformidade das curvas, prejudicando o intertravamento das partículas.

Ainda, comparando as deformações obtidas nos pares 0,08-0,24 MPa e 0,12-0,24 MPa, em que a tensão desvio se manteve constante, com aumento da tensão confinante, verificou-se uma redução das deformações para as misturas, exceto em M1. Assim, pode-se inferir que o efeito do confinamento foi pouco significativo para a mistura com apenas fresado, o que pode ter relação com algum efeito cimentante herdado do ligante asfáltico envelhecido.

Enquanto que, no caso dos pares em que a tensão confinante foi constante e a desvio sofreu aumento (0,04-0,04 e 0,04-0,12 MPa; 0,08-0,08 MPa e 0,08-0,24 MPa) as deformações aumentaram para todas as misturas. Contudo, a mistura M1 sofreu os menores acréscimos, ratificando a hipótese anterior.

A partir dos resultados dos testes, foram então obtidos os parâmetros de regressão para modelo de previsão de deformação permanente de Guimarães (2009) das misturas testadas, expressos na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de regressão obtidos para o modelo de previsão de Guimarães (2009).

Modelo de Guimarães (2009): $\varepsilon_p(\%) = \psi_1 (\sigma_3)^{\psi_2} (\sigma_d)^{\psi_3} N^{\psi_4}$					
Mistura	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R^2
M0-100%AV	0,019000	-1,11300	1,65000	0,180000	0,981
M3-30%RAP-RS400	0,038630	-1,12055	1,42500	0,137200	0,947
M1-100%RAP-RS400	0,060472	0,209853	0,87307	0,179984	0,983

Nota-se que o parâmetro "ψ_2" foi positivo apenas para a mistura composta totalmente de fresado, indicando uma influência negativa do aumento da tensão confinante na resistência à deformação permanente, consistente com a hipótese anterior. Ressalta-se que valores positivos, apesar de mais comumente encontrados em solos, também foram determinados por Guimarães (2009) para lateritas e por Malysz (2009) para uma brita de basalto e em ambos os estudos os modelos foram considerados adequados.

Já o parâmetro "ψ_3", para todos os casos, apresentou valores absolutos superiores ao "ψ_2", demonstrando a prevalência da influência da tensão desvio sob a tensão confinante no comportamento plástico das misturas.

Para representação gráfica dos resultados foram plotados os resultados experimentais da deformação permanente acumulada versus o número de ciclos de carregamento, para cada um dos seis pares de tensão analisados (σ_3 – σd) obteve-se os gráficos representados em (a), (b) e (c) na Figura 3. E para análise de ocorrência de acomodamento plástico, foram plotados gráficos da taxa de acréscimo de deformação permanente versus o número de ciclos de aplicação de carga em escala logarítmica, representados em (d), (e) e (f) na Figura 3. Os níveis de tensões são indicados na legenda, na forma "tensão confinante – tensão desvio" em MPa.

Para os dois níveis de tensão em que a relação σ_3/σ_d é igual a um, a mistura M0, sem adição de fresado, apresentou as menores deformações, seguida pela M3 e M1. Já para um nível de tensão intermediário (0,04-0,12 MPa), a mistura M1 obteve melhor desempenho, seguida da M0 e M3. Por fim, para os níveis de tensões mais altos, a mistura M3 apresentou as menores deformações, seguida da M0 e M1, como comentado anteriormente.

Logo, o aumento no teor de RAP teve efeitos diferentes para cada nível de tensão. Para níveis de tensões menores verifica-se um aumento das deformações com o aumento dos teores de RAP, porém para o nível intermediário (0,04-0,12 MPa) o comportamento foi contrário. Jeon, Steven e

Harvey (2009) também concluíram que as deformações de materiais fresados tendem a ser superior para tensão baixas, mas menores em tensões mais elevadas quando comparados aos agregados virgens. Embora Lima, Silva e Rezende (2023), que investigaram deformações em misturas de fresado com solo, encontraram deformações médias maiores para maiores teores de RAP.

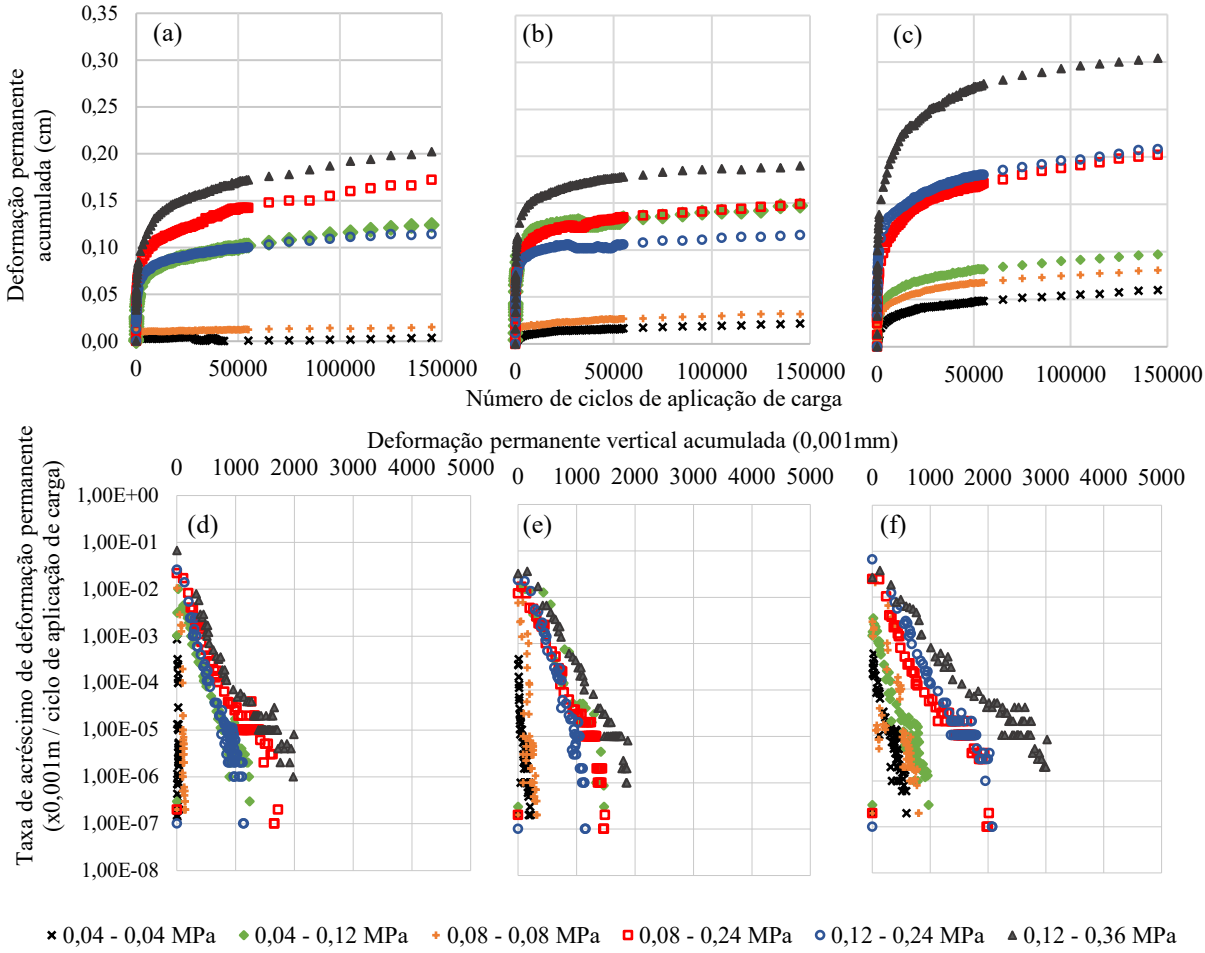


Figura 3. Deformações permanentes acumuladas versus número de ciclos para (a) M0-100%AV, (b) M3-30%RAP-RS e (c) M3-30%RAP-RS; Ocorrência de *Shakedown* para (d) M0-100%AV, (e) M3-30%RAP-RS e (f) M3-30%RAP-RS.

Com relação a análise dos níveis de *shakedown*, verifica-se que algumas curvas não atingiram taxas inferiores 10^{-7}×10^{-3} m/ciclo, mesmo apresentando uma tendência de acomodamento plástico. Isso ocorre, pois, o número de ciclos de carregamento (150.000) pode não ter sido suficiente para que o limite fosse atingido (Lima,2020).

Assim, conforme a classificação proposta por Lima (2020), houve a ocorrência de *shakedown* ou acomodamento plástico, nível A, na maioria dos casos. Contudo, segundo esses critérios, M0 apresentou um comportamento do tipo AB no nível de tensão 0,12-0,136 MPa, assim como M1 para os pares 0,08-0,24 MPa e 0,12-0,24 MPa, atingindo uma taxa de 10^{-6}×10^{-3} m/ciclo com uma deformação acumulada em 150 mil ciclos superior a 1% da altura inicial do corpo de prova e o comportamento tipo B, escoamento plástico, ocorreu em M1 para a tensão 0,12-0,36 MPa.

Para uma análise comparativa das misturas, fixou-se um nível de tensão representativo das camadas de base em pavimentos, definido pelo protocolo NCHRP 1-28A do TRB (*Transportation Research Board*) como uma tensão confinante, $\sigma_3 = 5\ psi = 0,0345\ MPa$ e tensão desvio $\sigma_d = 15\ psi = 0,1015\ MPa$, e

calculou-se os valores de deformações através do modelo de previsão de Guimarães (2009), empregando os parâmetros da Tabela 5. Os valores encontrados para 150.000 ciclos foram de 0,19 mm para a mistura sem RAP (M0), cerca de 0,48 mm para M3 e apenas 0,05 mm para M1.

Coban et al. (2022b) também verificaram deformações acumuladas menores para bases recicladas com adição de fresado, quando comparadas com britas calcárias em testes triaxiais que seguiram o protocolo AASHTO T 307 (AASHTO, 2007).

Logo, pode-se dizer que, para o nível de tensão verificado, a presença do fresado não afetou o desempenho das misturas quanto à deformação permanente. Contudo, salienta-se que os teores de RAP devem ser analisados com cautela, a fim de resultarem em uma quantia suficiente para promover ganho de coesão, sem comprometer a distribuição granulométrica da mistura.

6. ANÁLISE MECANICISTA

A análise mecanicista consistiu em avaliar o desempenho de estruturas dimensionadas para cinco situações de tráfego, considerando as classes previstas para o MeDiNa na IS-247 do DNIT (2021). A situação "A" foi empregado um nível de tráfego leve ($N = 5,0 \times 10^5$) com uma camada de revestimento composta de TSD (tratamento superficial duplo); nas situações "B" e "C" empregou-se um tráfego intermediário ($N = 5,0 \times 10^6$ e $N = 1,0 \times 10^7$) com concreto asfáltico classe 1 e 3 respectivamente e nas situações "D" e "E" considerou-se um nível de tráfego elevado ($N = 2,5 \times 10^7$ e $N = 5,0 \times 10^7$) com uma camada asfáltica classe 4.

Primeiramente, as estruturas foram dimensionadas de acordo com os critérios do Método DNER, empregando o ISC (índice de Suporte Califórnia) característico dos solos adotados como subleito, para cada nível de tráfego. Os solos "Solo JC" e "Solo Cruz Alta", analisados por Zago et al. (2021) e Pascoal et al. (2023) respectivamente, foram empregados nas análises e representam materiais reais utilizados em obras rodoviárias no estado do Rio Grande Sul (Brasil). Na Tabela 6 são resumidos os resultados obtidos, ressaltando-se que o coeficiente estrutural para as misturas empregadas como base foi considerado como 1,0, ou seja, um material granular padrão.

Tabela 6: Estruturas dimensionadas de acordo com o Método DNER (1981).

Estrutura	Situação	Revestimento	Base	Subleito
1	A: N=5,0×10^5	TSD - 2 cm	M0 a M8 -33 cm	Solo JC*
2	B: N=5,0×10^6	CA c.1 - 5 cm	M0 a M8 - 29 cm	Solo JC*
3	C: N=1,0×10^7	CA c.3 - 7,5 cm	M0 a M8- 26 cm	Solo JC*
4	D: N=2,5×10^7	CA c.4 - 10 cm	M0 a M8 - 23 cm	Solo JC*
5	E: N=5,0×10^7	CA c.4 - 10 cm	M0 a M8 - 24 cm	Solo JC*
6	A: N=5,0×10^5	TSD - 2 cm	M0 a M8 -25 cm	Solo Cruz Alta**
7	B: N=5,0×10^6	CA c.1 - 5 cm	M0 a M8 - 21 cm	Solo Cruz Alta**
8	C: N=1,0×10^7	CA c.3 - 7,5 cm	M0 a M8- 17 cm	Solo Cruz Alta**
9	D: N=2,5×10^7	CA c.4 - 10 cm	M0 a M8 - 15 cm	Solo Cruz Alta**
10	E: N=5,0×10^7	CA c.4 - 10 cm	M0 a M8 - 15 cm	Solo Cruz Alta**

Legenda: TSD: Tratamento Superficial Duplo; CA: Concreto asfáltico; c.1/c.3/c.4: classe de fadiga do concreto asfáltico; ISC: índice de Suporte Califórnia. Obs.: (*): Solo analisado por Zago et al. (2021) com ISC=11%; (**): Solo analisado por Pascoal et al. (2023), com ISC=16,6%.

Definidas essas espessuras iniciais, todas as estruturas foram analisadas no software MeDiNa, versão v.1.1.5.0. Para isso, empregou-se materiais do próprio banco de dados do programa para compor as camadas de revestimento, considerando a classificação sugerida pela instrução IS-247 (DNIT, 2021). Já para os materiais de subleito ("Solo JC" e "Solo Cruz Alta"), considerou-se o módulo de resiliência não linear, adotando os parâmetros do modelo composto para uma energia intermediária de compactação, enquanto que para as camadas de base, utilizou-se os parâmetros para o modelo composto apresentados na Tabela 3.

Para ambos os subleitos analisados, todas as estruturas dimensionadas pelo método DNER apresentaram uma área trincada superior ao limite de ruptura funcional de 30%, em um período de projeto de 120 meses. Contudo, nos casos em que as misturas com maiores teores de RAP foram empregadas nas camadas granulares, a ruptura ocorreu mais tardiamente. Acredita-se que isso ocorreu devido a um alívio de tensões nas camadas de revestimento, pois os módulos de resiliência dessas misturas foram superiores às demais, como também foi verificado em estudo de Mousa, El-Badawy e Azam (2020).

Na Figura 4 são apresentados os gráficos de área trincada para a situações com volume de tráfego intermediário (Situação B) e pesado (Situação E). Esclarece-se que a situação A não compõem essa análise, pois trata-se de uma estrutura com revestimento do tipo TSD.

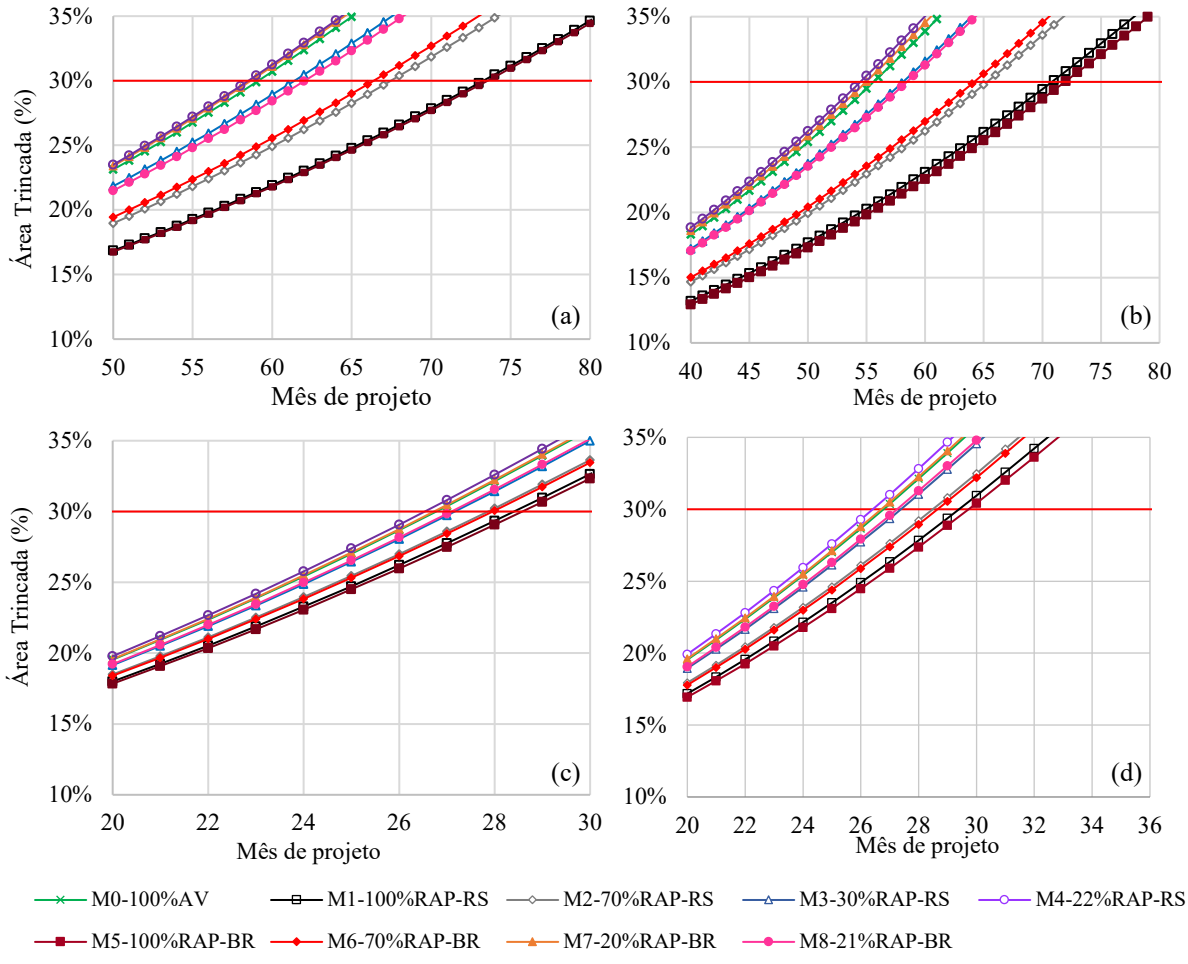


Figura 4. Gráficos de propagação da área trincada para as estruturas dimensionadas pelo Método DNER. (a): Situação B, Subleito Solo Cruz Alta; (b): Situação B, Subleito Solo JC; (c): Situação E, Subleito Solo Cruz Alta e (d): Situação E, Subleito Solo JC.

De forma semelhante ao verificado para os valores de módulo de resiliência, as misturas que atingiram o limite de ruptura de 30% mais tardiamente foram a M1 e a M5, compostas totalmente de fresados. Essa superioridade foi clara para todos os níveis de tráfego e se justifica pelo maior módulo de resiliência apresentado por essas composições.

As penúltimas estruturas que atingiram o limite de ruptura foram as que utilizaram as misturas M2 e M6, ambas com 70% de fresado. Já as misturas M4, com 22% de RAP-RS400; M7, com 20%RAP-BR290 e M0, sem presença de fresados, foram as primeiras a tingirem o limite de 30% de área trincada, ocupando a última posição. Portanto, para esses teores de RAP, a presença do fresado não foi capaz de prorrogar a ruptura funcional por trincamento.

Com relação aos afundamentos na trilha de roda (ATR), foram obtidos resultados para as misturas que dispunham de modelos de previsão representativos (M0, M1 e M3), considerando os dois subleitos empregados e as cinco situações (A, B, C, D e E), conforme resumido na Figura 5.

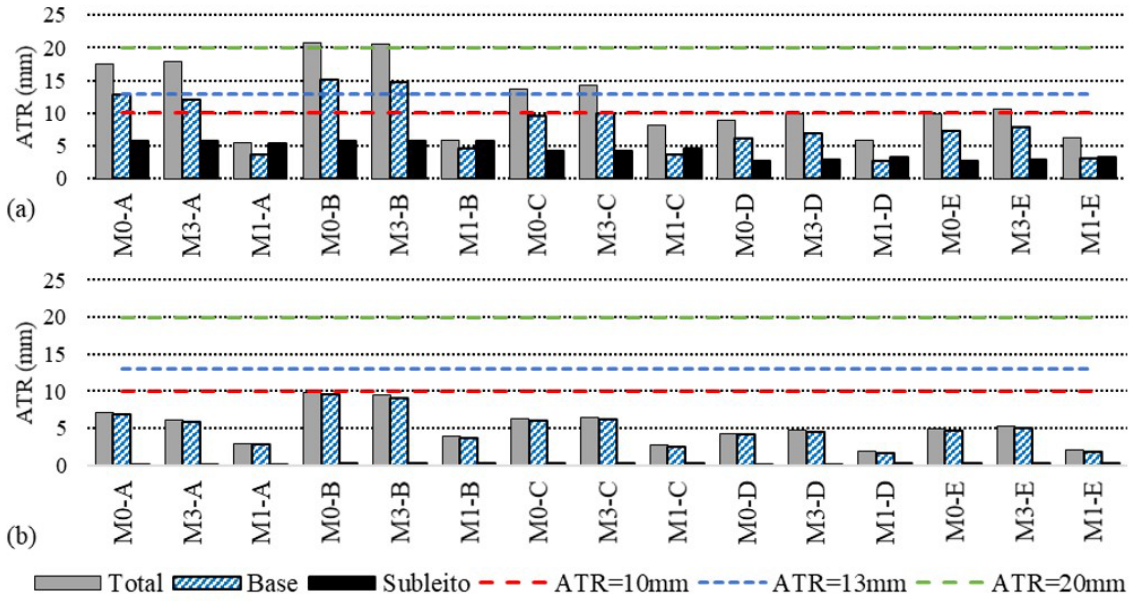


Figura 5. Resultados de Afundamento na Trilha de Roda (ATR) para as estruturas dimensionadas pelo Método DNER. (a) Subleito Solo JC e (b) Subleito Solo Cruz Alta.

Para o subleito "Solo JC", as deformações totais estimadas foram superiores à 10 mm em todas as situações, exceto para M0-D e nos casos em que a camada granular foi composta pela mistura M1, com 100% de RAP-RS400. Enquanto que para o subleito "Solo Cruz Alta" as deformações totais não ultrapassaram 10 mm.

Percebe-se a influência do subleito na estimativa de ATR e nota-se que M1 gerou as menores deformações. Esse dado, a primeira impressão, pareceu contradizer os resultados obtidos nos testes de DP, em que a mistura M1 apresentou maiores deformações acumuladas. Contudo, para o nível de tensão intermediário (0,04-0,12 MPa), mostrou-se coerente.

Mousa, El-Badawy e Azam (2020) também estimaram deformações menores para estruturas de três camadas que empregaram bases granulares com RAP. Os autores consideraram três condições climáticas, duas velocidades e seis teores de fresado (0,20,40,60,80 e 100%) e concluíram que os afundamentos previstos aumentam com a diminuição do teor de RAP, para todas as condições.

Por fim, as estruturas foram então redimensionadas de acordo com o MeDiNa, Método de Dimensionamento Nacional (DNIT, 2021). Para isso, empregou-se como subleito o "Solo Cruz Alta" e fixou-se a espessura da camada de base, determinada anteriormente (Tabela 6), alterando-se a espessura do revestimento para atender aos critérios do método.

Na Tabela 7 são apresentados os valores calculados pela diferença entre a espessura de revestimento para a mistura sem fresado (M0) e as demais misturas, assim, valores positivos representam uma redução e negativos uma adição.

Tabela 7: Diferença em centímetros entre a espessura do revestimento necessária para a camada granular sem fresado (M0-100%AV) e demais misturas com fresado, para cada caso.

RAP	Base Granular	Situação				Diferença Média	Teor de RAP (%)
		B	C	D	E		
RAP-RS400	M1-100%RAP-RS	1,2	0,9	0,7	0,7	0,9	100
	M2-70%RAP-RS	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6	70
	M3-30%RAP-RS	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	30
	M4-22%RAP-RS	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	22
RAP-BR290	M5-100%RAP-BR	1,3	0,8	0,8	0,9	1,0	100
	M6-70%RAP-BR	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7	70
	M8-21%RAP-BR	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	21
	M7-20%RAP-BR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20

Os resultados demonstraram que o emprego dos fresados em camadas granulares proporcionou uma redução das espessuras de revestimentos em até 1,30 cm. A redução ocorreu para todas as misturas, exceto a M4, que apresentou módulo de resiliência estimado pelo modelo composto, para um nível de tensão representativo (σ3 = 0,0345 MPa e σd = 0,1015 MPa), inferior ao atingido pela M0.

Portanto, nota-se uma tendência de que o uso de fresados em camadas de base de pavimentos possa promover ganho financeiro, quando comparado com bases tradicionais. A simples substituição dos agregados virgens por RAP já é capaz de gerar ganhos financeiros que chegaram a 3,46 dólares por tonelada, no caso de aplicação de 20% de RAP em mistura granular, conforme o estudo de Franke e Ksaibati (2015) . Considerando ainda uma tendência de redução nas espessuras de concreto asfáltico ou nos serviços de manutenção, esse ganho pode ser mais expressivo. Contudo, dependerá das características de cada projeto que devem ser analisadas com cautela.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível concluir que o emprego de materiais fresados em misturas granulares para camadas de base me pavimentos é capaz de produzir estruturas com desempenho superior as com bases tradicionais. Além disso, pode promover redução de custos com aquisição e transporte de agregados pétreos, favorecendo a preservação de recursos naturais, financeiros e energéticos.

Os testes e análises realizadas, demonstraram que a adição de fresados nas misturas analisadas promoveu um aumento significativo nos módulos de resiliência, para ambos os fresados. Assim, quando empregadas em camadas de base, essas promoveram um alívio de tensões e, consequentemente, reduziram a propagação de trincas no revestimento.

Contudo, fatores como a granulometria também influenciaram o comportamento mecânico das misturas. Sendo verificado que composições mais finas e uniformes, mesmo com presença de fresado, não apresentaram um ganho de rigidez quando comparadas a bases sem fresado. Já, considerando as diferenças entre os tipos de fresados, acredita-se que ligantes mais envelhecidos proporcionem ainda maiores ganhos de rigidez às misturas granulares.

Com relação ao comportamento plástico, o estudo ateve-se a apenas um tipo de fresado (RAP-RS400). O desempenho das misturas variou conforme o nível de tensão. Em níveis de tensões mais altos, a adição do RAP tende a produzir maiores deformações, assim como em níveis mais baixos. Contudo, para níveis intermediários, compatíveis com as estruturas testadas, o fresado apresentou menores valores de ATR. Fato que pode ser atribuído ao efeito cimentante herdado do ligante asfáltico, possivelmente mais atuante para esse nível de tensão.

Porém, ressalta-se que os testes ocorreram em temperaturas ambientes, ou seja, sem considerar os efeitos da variação térmica. Acredita-se que, devido a presença do ligante asfáltico nos fresados, esses podem apresentar deformações mais significativas em temperaturas elevadas. Mas essas deformações também podem ser compensadas por um maior grau de cimentação conferido pelo ligante. Logo, essas suposições carecem de investigações que avaliem esse efeito nas misturas granulares com fresados.

Por fim, sugere-se que novas pesquisas desenvolvidas avaliem diferentes pares de tensão em testes de deformação permanente, bem como, obtenham dados de monitoramento de trechos experimentais com bases recicladas. Outros métodos de compactação, teores de umidade e composições granulométricas, não explorados neste estudo, também podem ser investigados a fim de aumentar o conhecimento acerca do tema, uma vez que os fresados possuem uma grande variabilidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2007) *AASHTO T 307-99 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Washington, D.C.: AASHTO.

Abdelrahman, M.; T. Alam e J. Zollars (2011) Performance of high Recycled Asphalt Pavement (RAP) content as base layer in flexible pavement. *Journal of Solid Waste Technology Management*, v. 36, n. 3, p. 131-142. DOI: 10.5276/JSWTM.2010.131.

ABNT (2008). *ABNT NBR 15619: Misturas asfálticas – Determinação da Massa Específica Máxima Medida em Amostras não Compactadas*. Rio de Janeiro: ABNT.

Alam, T.B.; M. Abdelrahman e S.A. Schram (2010) Laboratory characterisation of recycled asphalt pavement as a base layer. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 11, n. 2, p. 123-131. DOI: 10.1080/10298430902731362.

Attia, M. e M. Abdelrahman (2011) Effect of state of stress on the resilient modulus of base layer containing reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, v. 12, n. 1, p. 79-97. DOI: 10.1080/14680629.2011.9690353.

Barmade, S.; S. Patel e A. Dhamaniya (2022) Performance evaluation of stabilized reclaimed asphalt pavement as base layer in flexible pavement. *Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste*, v. 26, n. 1, p. 04021051. DOI: 10.1061/(ASCE) HZ.2153-5515.0000656.

Bonfim, V. (2011) *Fresagem de Pavimentos Asfálticos* (3a ed.). São Paulo: Exceção Editorial.

Botella, R.; D. Lo Presti; K. Vasconcelos et al. (2022) Machine learning techniques to estimate the degree of binder activity of reclaimed asphalt pavement. *Materials and Structures*, v. 55, p. 112. DOI: 10.1617/s11527-022-01933-9.

Bradshaw, A.S.; J. Costa e J.R. Giampa (2016) Resilient moduli of reclaimed asphalt pavement aggregate subbase blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 5, p. 6. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001508.

Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021) Resolução nº 14, de 08 de julho de 2021. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília.

Coban, H.S.; B. Cetin; H. Ceylan et al. (2022a) Evaluation of engineering properties of recycled aggregates and preliminary performance of recycled aggregate base layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 5, p. 04022053. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004191.

Coban, H.S.; B. Cetin; H. Ceylan et al. (2022b) Evaluation of long-term performance of recycled aggregate base (RAB) layers and optimization of their design thicknesses. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 5, p. 1310-1329. DOI: 10.1080/14680629.2022.2072373.

Consoli, N.; E. Pasche; L.P. Specht et al. (2017) Key parameters controlling dynamic modulus of crushed reclaimed asphalt paving-powdered rock-Portland cement blends. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 8, p. 1716-1733. DOI: 10.1080/14680629.2017.1345779.

Cosentino, P.J.; E.H. Kalajian; C.S. Shieh et al. (2003) *Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II: Final report*. Melbourne: Civil Engineering Department, Florida Institute of Technology. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37263> (acesso em 01/09/2024).

DNER (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Brasília: DNER.

DNER (1994a) *Materiais Rochosos Usados em Rodovias – Análise Petrográfica – Instrução de Ensaio 006*. Brasília: DNER.

DNER (1994b) *Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou Magnésio – Método de Ensaio DNER 89*. Brasília: DNER.

DNER (1997a) *Agregado – Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo – Método de Ensaio DNER 195*. Brasília: DNER.

DNER (1997b) *Agregado Graúdo – Determinação da Resistência do Esmagamento – Método de Ensaio DNER 197*. Brasília: DNER.

DNER (1998) *Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão "Los Angeles" – Método de Ensaio DNER 35*. Brasília: DNER.

DNER (1999). *Agregados – Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton - Método de Ensaio DNER 399*. Brasília: DNER.

DNIT (2006) *DNIT 031/2006- ES: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico*. Brasília: DNIT.

DNIT (2018a) *DNIT 134/2018-ME: Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*. Brasília: DNIT.

DNIT (2018b) *DNIT 179/2018 - IE: Pavimentação – Solos – Determinação da Deformação Permanente – Instrução de Ensaio. Brasília: DNIT*.

DNIT (2020) *Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecanístico-empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Manual de Utilização do Programa MeDiNa*. Brasília: DNIT.

DNIT (2021) *Instrução de Serviço -IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa*. Brasília: DNIT.

DNIT (2022) *DNIT141/2022 – ES: Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço*. Brasília: DNIT.

Dong, Q. e B. Huang (2014) Laboratory evaluation on resilient modulus and rate dependencies of RAP used as unbound base material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 2, p. 379-383. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000820.

Enieb, M. (2023) Using reclaimed asphalt pavement for sustainable development of highway construction: article review. In *Anais do 3º ICC International Conference on Civil Engineering: Development & Sustainability*. Hurghada: AUN, p. 242-265. Disponível em: <https://www.aun.edu.eg/engineering/sites/default/files/researches/1036-ICCE23.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Franke, R. e K. Ksaibati (2015) A methodology for cost-benefit analysis of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in various highway applications. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 16, n. 7, p. 660-666. DOI: 10.1080/10298436.2014.943217.

George, A.M.; A. Banerjee; A.J. Puppala et al. (2019) Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 2, p. 181-191. DOI: 10.1080/10298436.2019.1587437.

Guimarães, A.C.R. (2009) *Método Mecanistico Empírico para Previsão de Deformação em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/153-2009/1199-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes> (acesso em 01/09/2024).

Gungat, L.; M. O. Hamzah; N. I. M. Yusoff et al. (2019) Design and properties of high reclaimed asphalt pavement with RH-WMA Design and properties of high reclaimed asphalt pavement with RH-WMA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 512, p. 012055. DOI: 10.1088/1757-899x/512/1/012055.

Hermes, T.B.; J.A.S. Echeverria and L.P. Specht (2016) Utilização de material fresado como camada de pavimentos em construção de faixa adicional, *Revista Pavimentação*, v. 11, n. 41, p. 49-62. Disponível em: <https://revistapavimentacao.org.br/wp-content/uploads/2022/06/Revista-Pavimentacao-n-41.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Jeon, E.J.; B. Steven and J.T. Harvey (2009) Comprehensive laboratory testing and performance evaluation of recycled pulverized hot-mix asphalt material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2104, n. 1, p. 42-52. DOI: 10.3141/2104-05.

Kamal, M.A.; A.R. Dawson; O.T. Farouki et al. (1993). Field and laboratory evaluation of the mechan- ical behaviour of unbound granular materials in pavements. *Transportation Research Record*, v. 1406, p. 88-97. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1406/1406-012.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Kim, W.; J.F. Labuz and S. Dai (2007) Resilient modulus of base course containing recycled asphalt pavement, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2005, n. 1, p. 27-35. DOI: 10.3141/2005-04.

Lima, C.D.A. (2020) *Avaliação da Deformação Permanente de Materiais de Pavimentação a Partir de Ensaios Triaxiais de Cargas Repetidas*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/627-2020/9586-caroline-dias-amancio-de-lima-3> (acesso em 01/09/2024).

Lima, C.D.A.; L.M.G. Motta e A.C.R. Guimarães (2017) Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaisse para uso em base e sub-base de pavimentos. *Transportes*, v. 25, n. 2, p. 41-52. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1262.

Lima, C.D.A.; L.M.G. Motta e F.T.S. Aragão (2019). Análise das tensões aplicadas nos ensaios de deformação permanente de solos e britas para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. In Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ed.) *Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro: ANPET, p. 1222-1233.

Lima, L.B.F.; J.P.S. Silva e L.R. Rezende (2023) Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with Reclaimed Asphalt Pavement. *Transportation Geotechnics*, v. 43, p. 101103. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101103.

Lo Presti, D.; K. Vasconcelos; M. Orešković et al. (2019) On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, v. 21, n. 8, p. 2071-2090. DOI: 10.1080/14680629.2019.1607537.

Malysz, R. (2009) *Desenvolvimento de um Equipamento Triaxial de Grande Porte para a Avaliação de Agregados Utilizados Como Camada de Pavimentos*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_a072b174e18ccd130376e0cb51064c58> (acesso em 01/09/2024).

Mariyappan, R.; J.S. Palammal e S. Balu (2023) Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 30, n. 16, p. 45587-45606. DOI: 10.1007/s11356-023-25847-3. PMid:36820969.

Mehranfar, V. e A. Modarres (2018) Evaluating the recycled pavement performance and layer moduli at variable temperature by nondestructive tests. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 21, n. 7, p. 817-829. DOI: 10.1080/10298436.2018.1511784.

Mousa, E.; A. Azam; M. El-Shabrawy et al. (2017) Laboratory characterization of reclaimed asphalt pavement for road construction in Egypt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 44, n. 6, p. 417-425. DOI: 10.1139/cjce-2016-0435.

Mousa, E.; S. El-Badawy e A. Azam (2020) Effect of reclaimed asphalt pavement in granular base layers on predicted pavement performance in Egypt. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 5, p. 57. DOI: 10.1007/s41062-020-00301-2.

Pasche, E.; L.P. Specht; M.C. Tansky et al. (2018) Avaliação da rigidez de misturas recicladas cimentadas: abordagem elástica e viscoelásticas. *Transportes*, v. 26, n. 1, p. 94-107. DOI: 10.14295/transportes.v26i1.1342.

Pascoal, P.T.; A. Sagrilo; M. Baroni et al. (2023) Lateritic soil deformability regarding the variation of compaction energy in the construction of pavement subgrade. *Soils and Rocks*, v. 46, n. 3, p. e2023009922. DOI: 10.28927/SR.2023.009922.

Petrobras (2010) Procedimento Rede nº 04/2010 – Detalhamento do Ensaio Triaxial de Módulo de Resiliência de Solos. In Petrobras (ed.) *Rede Temática de Asfalto: Manual de Execução de Trechos Monitorados: Anexo Digital*. Rio de Janeiro, p. 26-30. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/778471438/Manual-de-execucao-de-trechos-monitorados-Anexo-digital> (acesso em 01/09/2024).

Pinto, M.M.; T.C. Cervo e D.D.S. Pereira (2012) Reutilização de material fresado em acostamentos como agente regularizador e nivelador. *Revista Pavimentação*, v. 6, n. 23, p. 27-35. Disponível em: <https://revistapavimentacao.org.br/wp-content/uploads/2022/06/Revista-Pavimentacao-n-23.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Pires, G.M.; L.P. Specht; R.J.B. Pinheiro et al. (2016) Comportamento mecânico de material fresado após processo de estabilização granulométrica e química por meio da incorporação de cimento e cinza de casca de arroz moída. *Matéria*, v. 21, n. 2, p. 365-384. DOI: 10.1590/S1517-707620160002.0035.

Plati, C. e B. Cliatt (2018) A sustainability perspective for unbound reclaimed asphalt pavement (RAP) as a pavement base material. *Sustainability*, v. 11, n. 1, p. 78. DOI: 10.3390/su11010078.

Rayapeddi Kumar, J.K. e A.R. Archilla (2023) Laboratory studies on resilient modulus of foamed asphalt mix and virgin aggregate used in base course layers.In *InternacionalAirfield and Highway Pavements 2023: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements, Selected Papers from the International Airfield and Highway Pavements Conference 2023*. Austin: ASCE, p. 266-277. DOI: 10.1061/9780784484906.025.

Sagrilo, A.V.; P. Pascoal; M. Baroni et al. (2023) Contribution to resilient and permanent deformation investigation of unbound granular materials with different geological origins from Rio Grande do Sul, Brazil, *Soils and Rocks*, v. 46, n. 3, e2023009822. DOI: 10.28927/SR.2023.009822.

Saride, S.; D. Avirneni e S.C.P. Javvadi (2016) Utilization of reclaimed asphalt pavements in indian low-volume roads. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 2, p. 04015107. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001374.

Silva, V.D.; J.P.C. Meneses; K. Vasconcelos et al. (2022) Permanent deformation assessment of cold recycled asphalt mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2022, n. 1, p. 8247787. DOI: 10.1155/2022/8247787.

Specht, L.P.; G.M. Pires; T. Vitorelo et al. (2013) Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. In *Anais do 42ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação*. Gramado: RAPv, p. 13.

Sullivan, J. (1996) *Pavement Recycling Executive Summary and Report*. United States: Federal Highway Administration, Office of Engineering, Office of Technology Applications. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/011182.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Sultan, S.A.; M.B. Abduljabar e M.H. Abbas (2013) Improvement of the mechanical characteristics of reclaimed asphalt pavement in Iraq. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, v. 2, n. 4, p. 22-29. Disponível em: <https://www.ijscer.com/uploadfile/2015/0429/20150429080511515.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Thakur, J.K. e J. Han (2015) Recent Development of Recycled Asphalt Pavement (RAP) bases treated for roadway applications. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, v. 2, n. 2, p. 68-86. DOI: 10.1007/s40515-015-0018-7.

Thives, L.P. e E. Ghisi (2017) Asphalt mixtures emission and energy consumption: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 473-84. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.087.

Thom, N.H. e S.F. Brown (1987) Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base. *Transportation Research Record*, v. 1121, p. 50-56. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1121/1121-008.pdf> (acesso em 01/09/2024).

Vestena, P.M.; P.O.B. Almeida Júnior; L.P. Specht et al. (2022) Degree of binder activity on 100% recycled mixtures and its linear viscoelasticity behavior. In H. Di Benedetto, H. Baaj, E. Chailleux et al. (eds.) *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. ISBM 2020*. RILEM Bookseries, vol. 27. Cham: Springer, p. 529-553. DOI: 10.1007/978-3-030-46455-4_67.

Zago, J.P.; R.J.B. Pinheiro; M. Baroni et al. (2021) Study of the permanent deformation of three soils employed in highway subgrades in the municipality of Santa Maria-RS, Brazil, *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 14, n. 6, p. 729-739. DOI: 10.1007/s42947-020-0129-6.

Zaumanis, M.; R.B. Mallick e R. Frank. (2016) 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 3493-3502. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.315.