



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ISABELA DE JESUS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RAP NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MISTURAS COM SOLO LATERÍTICO DE ALTA PLASTICIDADE PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

Cruz das Almas-BA

2023

ISABELA DE JESUS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RAP NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MISTURAS COM SOLO LATERÍTICO DE ALTA PLASTICIDADE PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Mario Sergio de Souza Almeida

ISABELA DE JESUS SANTOS

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RAP NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS COM SOLO LATERÍTICO DE ALTA PLASTICIDADE PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Cruz das Almas/BA, 22 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA
Data: 23/12/2023 07:00:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Mario Sergio de Souza Almeida, DSc. (Orientador)
DNIT/UFRB

Documento assinado digitalmente
 MARIA DO SOCORRO COSTA SAO MATEUS
Data: 22/12/2023 12:13:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Maria do Socorro Costa São Mateus, DSc.
PPGECEA/UEFS

Documento assinado digitalmente
 WEINER GUSTAVO SILVA COSTA
Data: 22/12/2023 11:52:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Weiner Gustavo Silva Costa, MSc.
UFRB

AGRADECIMENTOS

Á Deus pelo amor e misericórdia derramada sobre minha vida, dando-me forças e coragem para seguir.

Agradeço aos meus pais, Ducilene e Antonio Marcos, por todo apoio, paciência e compreensão, vocês são a razão da minha vida e da minha conquista, a vocês toda a minha gratidão.

A minha Irmã Iris Marques, por todo carinho e por sempre ser uma das minhas maiores alegrias.

Ao meu orientador, Dr. Mario Sergio, que me auxiliou e esteve presente quando precisei, contribuindo com o desenvolvimento do trabalho e ajudando-me a acreditar no meu potencial, a você toda a minha admiração.

Aos meus amigos, com quem divido todas minhas alegrias e angústias em especial.

Ao Laboratório de Pavimentação da UFRB pelo apoio para realização da pesquisa.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO: A exploração de jazidas, danos decorrentes a emissão de gases com efeito estufa e escassez de materiais em determinadas regiões, além de custos com transporte, foram fatores que impulsionaram o setor da engenharia civil, em especial o ramo de pavimentação, a iniciativa de reaproveitamento de resíduos, tais como, os materiais oriundos da fresagem do revestimento asfáltico, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), formado pela mistura entre o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) envelhecido e agregados de diversos tamanhos. Este processo é considerado um dos maiores geradores de resíduos da construção civil. Quando descartado de forma inadequada, torna-se agressivo ao meio ambiente, tornando sua reutilização necessária. O presente estudo tem por objetivo avaliar a influência do teor de RAP no comportamento mecânico de um solo laterítico de alta plasticidade para aplicação em pavimentação, nos teores de 0%, 50%, 60%, 70%, 80% e 100% de RAP em misturas com solo, através de ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica, mini-mcv e perda de massa por imersão (PI), Compactação Indicice Suporte Califórnia (CBR), além de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) análise química do solo, além da análise tensão-deformação por meio do software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) tendo em vista a determinação do comportamento mecânico de misturas Solo-RAP. Os resultados indicaram que apenas as misturas solo-RAP de 70% e 80%, enquadram-se nas faixas granulométricas especificadas em ES DNIT 141 (DNIT, 2022), a adição do RAP ao solo provocou melhorias no comportamento mecânico das misturas a partir de 70% de RAP, entretanto observou-se uma tendência de crescimento de DP com o aumento do teor do RAP nas misturas solo-RAP, em relação aos valores nos pares de tensões mais baixos. A partir das análises de tensão-deformação observou-se que as misturas solo-RAP na análise da interface da camada não aderida nenhuma das configurações de pavimento atenderam a exigência $N_{adm} \geq N_{AASHTO}$. Entretanto, na condição aderida a estrutura que apresentou maior vida útil para o solo foi a configuração B70SB70, que se obteve N_{adm} da ordem de $1,73 \times 10^6$. Sendo assim, esta estrutura apresentou maior resistência dentre as demais estudadas na condição de interface da camada como aderida.

Palavras-chaves: Solo-RAP, Módulo de Resiliência, Deformação Permanente, Análise Mecânica.

ABSTRACT: The exploration of deposits, damage resulting from the emission of greenhouse gases, and scarcity of materials in certain regions, in addition to transport costs, were factors that boosted the civil engineering sector, especially the paving industry. The initiative to reuse waste, such as materials arising from the milling of the asphalt coating, known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), is formed by the mixture of aged Petroleum Asphalt Cement (PAC) and aggregates of different sizes. This process is considered one of the largest generators of construction waste. When discarded inappropriately, it becomes harmful to the environment, making its reuse necessary. The present study aims to evaluate the influence of RAP content on the mechanical behavior of a high plasticity laterite soil for application in paving, with the following percentages of RAP content 0%, 50%, 60%, 70%, 80% and 100%. In mixtures with soil, laboratory tests were conducted for geotechnical characterization, mini-MCV, mass loss by immersion (PI), California Support Compaction Index (ICS), as well as Resilience Modulus (RM) and Permanent Deformation (PD). Chemical analysis of the soil, along with stress-strain analysis using the Elastic Analysis of Multiple Layers (AEMC)

software, was performed to determine the mechanical behavior of Soil-RAP mixtures. The results indicated that only Soil-RAP mixtures of 70% and 80% fell within the particle size ranges specified in ES DNIT 141 (DNIT, 2022). The addition of RAP to the soil caused improvements in the mechanical behavior of the mixtures starting from 70% RAP. However, a tendency for PD growth was observed with increasing RAP content in Soil-RAP mixtures in relation to values in the lowest tension pairs. From the stress-strain analysis, it was observed that in the analysis of the unbonded layer interface, none of the pavement configurations met the $N_{adm} \geq NAASHTO$ requirement. However, in the adhered condition, the structure that exhibited the greatest useful life for the soil was the B70SB70 configuration, which achieved a N_{adm} of approximately 1.73×10^6 . Therefore, this structure demonstrated greater resistance compared to the others studied in the adhered condition of the soil layer.

Keywords: Soil-RAP, Resilience Modulus, Permanent Deformation, Mechanistic Analysis.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, considerando-se a extensão da malha rodoviária brasileira de 1.720.909 km, a quantidade de vias pavimentadas é significativamente reduzida. Existem aproximadamente cerca de 213.500 km de estradas pavimentadas, representando apenas 12,4% do total. Destas vias pavimentadas, 55,5% apresentam algum tipo de problema no pavimento, num nível em que as irregularidades e manifestações patológicas presentes têm gerado impactos na segurança e conforto dos usuários, além de comprometerem sua performance funcional e estrutural (CNT, 2022). Dados como estes evidenciam a grande quantidade de rodovias que necessitam de algum tipo de recuperação.

A estrutura do pavimento asfáltico comparando-se a outras estruturas de engenharia, apresenta vida útil reduzida em função do aumento da solicitação prevista em projeto, e por isso, deve-se utilizar técnicas de manutenção mais elaboradas como, por exemplo, a fresagem e a reciclagem de pavimentos (CENTOFANTE *et al.*, 2018).

A crescente preocupação com o meio ambiente sobre danos decorrentes das emissões de Gases com Efeito Estufa (GEE), explorações de jazidas naturais e do consumo de recursos escassos e não renováveis, tem impulsionado o conceito de pavimentação mais verdes, nesta perspectiva os trechos de pavimento asfáltico que necessitam de reconstrução ou de uma nova cobertura são potencialmente bons candidatos para utilização de materiais reciclados no pavimento que será reconstruído (LIZÁRRAGA *et al.*, 2018).

As áreas de descartes de resíduos estão enfrentando crescentes dificuldades para lidar com o aumento na quantidade de resíduo sólido gerado. Para solucionar o desafio do excesso de resíduos sólidos, especialistas propuseram a ideia de utilizá-los na construção de pavimentos. (ZHAO *et al.*, 2020). Ao longo dos anos, novas técnicas sustentáveis de restauração de pavimentos asfálticos flexíveis vêm sendo estudadas em diferentes partes do mundo (PLATI & CLITT, 2018; ARGUELLO & MOYA, 2019; GHANIZADEH & RAHROVAN, 2019).

A restauração de estradas pavimentadas é uma atividade essencial para garantir a durabilidade e a segurança das vias de tráfego, neste processo, a fresagem do revestimento asfáltico é uma técnica comumente aplicada, entretanto é considerada como uma grande

geradora de resíduos asfálticos, intitulado também como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), formado pela mistura entre o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) envelhecido e agregados de diversos tamanhos, todos os dias são produzidos centenas de toneladas de metro cúbico de material fresado em todo o Brasil, no qual resulta em extrema necessidade de destinação deste nobre material (LEITE *et al.*, 2021).

SUZUKI (2019) realizou um estudo sobre a estimativa de produção de RAP nas rodovias das concessionárias pertencentes ao Grupo CCR, no período entre 2017 a 2021 situadas nos estados do Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo, o grupo tinha a expectativa de gerar um total de 1.087.000 toneladas de RAP ao longo desses cinco anos, o que equivale a uma média anual de 217.400 toneladas de RAP produzidas no Brasil.

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2021), muitos países estão produzindo resíduos provenientes da fresagem do revestimento asfáltico, com destaque para os Estados Unidos da América, Alemanha e Itália com cerca de 91.000.000, 14.000.000 e 11.000.000 de toneladas anuais, respectivamente. Conforme destacado em estudos recentes, a utilização do RAP na engenharia rodoviária tem experimentado um aumento significativo, não apenas no Brasil como também em diversos outros países (GEORGE *et al.*, 2019; WIDYATMOKO *et al.*, 2022; KHAN & PUPPALA, 2023).

O processo de reutilização dos resíduos oriundos da construção civil, como os materiais fresados, contribui positivamente para o meio ambiente na conservação de recursos naturais como também economicamente (KLAMT, 2017). O Manual de Restauração de Pavimentos do DER-SP (DER-SP, 2006), que prevê a reciclagem como alternativa de restauração de pavimentos flexíveis, em especial com a utilização do material fresado em camadas do pavimento, reforça que esta é uma solução que promove preservação do meio ambiente, economia de energia e conservação das condições geométricas da via.

De acordo com LEITE *et al.* (2021) no Brasil a maior parte do resíduo oriundo da fresagem asfáltica é utilizado em camada de revestimento primário de estradas vicinais sem nenhum tratamento especial ou de rejuvenescimento e eventualmente são utilizados para compor uma nova base do pavimento flexível, onde o revestimento é congregado com parte da base preexistente em uma proporção de menos de 10% das obras de recuperação de rodovias federais.

Nos Estados Unidos, o RAP se tornou o material mais reciclado do país, com 99% de reaproveitamento (NAPA, 2019). A utilização do RAP na Europa é regulamentada pela norma EN 13108-8 (2016) – Bituminous mixtures. Há mais de 30 anos a reciclagem de material fresado está incorporada no dia a dia das obras de pavimentação na Holanda e Alemanha. (LEITE, *et al.* 2021).

As misturas utilizando o RAP devem possuir as características exigidas de resistência, durabilidade e estabilidade. Vários estudos foram realizados para verificar essas propriedades a fim de avaliar possível uso do RAP para melhorar as propriedades físicas e geotécnicas de solos locais (MARIYAPPAN *et al.*, 2023). Alguns destes trabalhos são os de:

LIMA *et al.* (2023) estudaram o tratamento de um subleito laterítico da cidade de Aparecida de Goiânia, no estado de Goiás - Brasil, com a adição de 0%, 25% e 50% de RAP, como objetivo de analisar o comportamento e a desempenho mecânico de misturas

compostas por solo laterítico tropical e RAP como camadas granulares do pavimento (sub-base e camada de base) em termos de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) com auxílio do software MeDiNa. Os resultados da compactação das misturas, em energia intermediária, apresentaram valores de CBR da ordem 40,8%, 36%, 25,6% para as amostras 0%, 25% e 50% de RAP respectivamente, demonstrando maior valor para 0%, entretanto os valores médios de MR apresentaram tendência de crescimento da magnitude de 164 MPa para 0% de RAP, 234,9 MPa para 25% de RAP e 327,8 de RAP, além das misturas com maiores teores de RAP apresentarem valores de DP mais elevados. Assim, os autores concluíram através da abordagem do método mecanístico-empírico que a mistura composta por 25% de RAP é a mais adequada alternativa para aplicações no curso base da configuração da estrutura do pavimento e características do tráfego investigadas, como também salientaram a importância da análise pelo método mecanístico-empírico, uma vez que, o valor de CBR classificava o solo com 0% de RAP como a amostra de melhor comportamento.

Outro estudo realizado no Egito por MOUSA *et al.* (2021) buscaram avaliar o comportamento do módulo de resiliência, resistência ao cisalhamento e características de condutividade hidráulica de materiais de base utilizando o agregado de dolomita triturado misturado com diversos teores de RAP (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%). Através da compactação realizada em energia modificada, medidas de CBR, permeabilidade e testes triaxiais, além da tomografia computadorizada de raio X. Os resultados demonstraram que tanto o CBR quanto a condutividade hidráulica são mais baixos para misturas com maiores quantidades de RAP. Por outro lado, o aumento do valor de RAP mostrou um aumento significativo no módulo de resiliência. A coesão aparente das misturas com RAP aumentou quase linearmente com o aumento da quantidade de RAP na mistura, enquanto o ângulo de atrito diminuiu. A partir da tomografia computadorizada, verificou-se que a amostra com 0% de RAP apresentou maior conteúdo de vazios de ar quando comparada à amostra com 80% de RAP, isto sugere que os menores vazios de ar podem levar a valores mais elevados de módulo de resiliência para amostras que consistem em uma maior quantidade de RAP.

ALHAJI & ALHASSAN (2018) estudaram um solo proveniente do estado de Adamawa – Nigéria tratado com RAP com teores de 0% a 100% variando em 10% de adição de RAP para avaliar a microestrutura e a resistência das misturas compactadas. Os resultados da compactação, em energia modificada, nas misturas indicaram que a massa específica seca máxima apresentou um aumento de 1.890 para 2.034 mg/m³ ao incorporar 30% de RAP. Entretanto, houve uma redução para 1,925 mg/m³ ao atingir 100% de RAP. Em relação ao teor de umidade ótima, observou-se uma diminuição de 13,7% quando o teor de RAP foi de 0% para 8,8% na faixa de 40-60% de teor de RAP. Após esse ponto, houve um leve aumento para 9,5% com 90% de teor de RAP. Os valores de CBR tiveram um aumento de 11% para 0% de RAP para um pico de 35% com 30% de teor de RAP, seguido por uma queda para 5% com 100% de RAP. A partir disto, os autores concluíram que a mistura com 30% de teor de RAP é a ideal, por apresentar a maior resistência podendo ser usada como material de sub-base para estradas.

ULLAH & TANYU (2020) analisaram as mudanças nas propriedades mecânicas de um solo misturado com teores de 0%, 20% e 30% RAP coletado na cidade da Virginia – Estados Unidos, que após compactados com massa específica seca máxima e umidade

ótima foram submetidos ao adicional 2% e 4% de água. Os resultados mostraram que a adição de água aumenta a deformação permanente e diminui o módulo de resiliência. Entretanto, as amostras com teores de 20% e 30% demonstraram melhores propriedades de drenagem relação a amostra de 0% de RAP.

GHANIZADEH & RAHROVAN (2018) avaliaram a estabilização de misturas contendo solos granulares, cimento e RAP para utilização em obras de reciclagem. Foram utilizados os teores de 0%, 20%, 40% e 60% de RAP adicionados aos teores de 3%, 4%, 5% e 6% de cimento no solo granular, após as amostras serem compactadas foram submetidas a cura de 7 e 28 dias. Os resultados demonstraram que para o mesmo teor de RAP, o acréscimo de 1% do teor de cimento correspondeu ao aumento médio da resistência a compressão não confinada de 390 kPa. Os autores concluíram que o teor ótimo de cimento para construção de camadas recicladas está entre 3% e 5% para os materiais estudados.

Desta forma, após inúmeros trabalhos relacionados a utilização do RAP na recuperação de pavimentos flexíveis, surge-se a necessidade do uso de métodos que permitam simular o comportamento desse tipo de material em campo para avaliação de sua utilização nas camadas de base e sub-base. Na área da Engenharia de Pavimentação, os métodos mecanístico-empíricos, auxiliados por ferramentas computacionais desenvolvidas a partir dos princípios teóricos da mecânica dos pavimentos, estão cada vez mais em ascensão. Isso se deve principalmente à sua notável confiabilidade nos resultados e à facilidade de utilização (FERREIRA, 2021).

Os dimensionamentos de pavimentos com métodos mecanístico-empíricos são realizados com auxílio de software como AASHTOWare Pavement ME Design, AEMC, ELSYM5 e entre outros. Atualmente adotado ao redor do mundo por grande parcela dos órgãos rodoviários, isso porque, ao determinar os estados de tensões e deformações em qualquer ponto da estrutura em análise, torna-se viável simular o acúmulo de um dano específico em um pavimento ao longo do tempo utilizando modelos de desempenho. (SANTOS, 2020).

Recentemente no Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) lançou o novo Método de Dimensionamento Nacional Mecanístico-Empírico, o MeDiNa, desenvolvido por uma parceria entre DNIT, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) e Rede Temática de Asfaltos. (SILVA, 2021). Permite análises do tipo tensão-deformação, através de ensaios, em laboratório, de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP). Segundo FRANCO & MOTTA (2018) O MeDiNa é composto por três sub-rotinas: (AEMC) que se refere o cálculo de tensões-deformações, (BackMeDiNa) que realiza a retroanálise, além de uma de dimensionamento propriamente dita. Segundo Santana *et al.*, (2022) este método incorpora equações de desempenho desenvolvidas no Brasil, entretanto especialidades do solo e qualidade de estudo do tráfego devem ser consideradas.

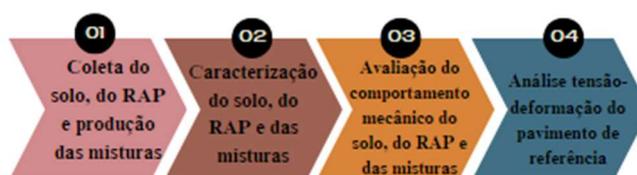
Desta forma, o presente estudo tem por objetivo avaliar a influência do teor de RAP no comportamento mecânico de um solo laterítico de alta plasticidade para aplicação em pavimentação, nos teores de 0%, 50%, 60%, 70%, 80% e 100% de RAP em misturas com solo, consideradas pelo o autor SILVA (2022), como promissoras para dimensionamento pelo o método MeDiNa, através de ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica, mini-mcv e perda de massa por imersão (PI), Compactação

Índice Suporte Califórnia (CBR), além de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) análise química do solo, além da análise tensão-deformação por meio do software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) tendo em vista a determinação do comportamento mecânico de misturas Solo-RAP, a fim de garantir uma maior vida útil ao pavimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Após a realização da coleta das amostras, o programa experimental constituiu-se na realização de ensaios de caracterização geotécnica, mini-mcv e perda de massa por imersão (PI), Compactação, Índice Suporte Califórnia (CBR), Módulo de Resiliência (MR), Deformação Permanente (DP) e análise química do solo, como também, análise tensão-deformação pelo software AEMC. Com o solo, RAP e os teores das misturas de solo-RAP consideradas pelo o autor SILVA (2022) como promissoras para dimensionamento pelo o método MeDiNa. A Figura 1 mostra o fluxograma das etapas realizadas no presente estudo, para melhor visualização.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do presente estudo.



2.1. Local de coleta e caracterização geotécnica das amostras

O solo do presente estudo é um argiloso residual do granulito-gnaiss, conhecido como Regolito, coletado na área da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), em Salvador, Bahia.

Posteriormente, para realização da caracterização geotécnica do solo, foram realizados os ensaios de granulometria por peneiramento ME DNER 80 (DNER, 1994a), limite de liquidez ME DNER 122 (DNER, 1994b), limite de plasticidade ME DNER 82 (DNER, 1994c) e densidade real ME DNER 93 (DNER, 1994d). O solo foi devidamente preparado para cada ensaio ME DNER 41 (1994e). Os resultados de granulometria e limites de consistência permitiram classificar o solo no método TRB.

Os ensaios necessários para classificação do solo pela metodologia MCT englobam a obtenção de parâmetros relacionados a compactação das amostras em miniatura (Mini-MCV) e determinação da perda de massa por imersão (Pi). O primeiro consistiu na compactação de cinco corpos de prova (CP) em miniatura ($\varnothing = 50$ mm) com umidades variadas de, aproximadamente, 2%. Foram aplicados sucessivos golpes no solo com auxílio do compactador Mini-MCV e verificado com auxílio do extensômetro a altura do corpo de prova, interrompendo-se o processo quando um dos critérios foi atingido: a) diferença inferior a 2 mm entre a leitura após 4n golpes e após n golpes; b) intensa exsudação de água no topo e na base do corpo-de-prova; c) 256 golpes.

Logo após, foi realizado o ensaio de Perda de Massa por Imersão (Pi), em que, os 5 corpos de prova compactados foram extrudados do molde em aproximadamente 10 mm. Em seguida, as amostras foram imersas em água por 24 h, na posição horizontal, onde recolheu-se a massa eventualmente desprendida, para determinação de sua massa seca ME DNIT 258 (DNIT, 2023 e CLA DNIT 259 (DNIT, 2023).

O RAP utilizado no presente estudo é oriundo dos serviços de fresagem do revestimento primário da BR 101/BA, coletado durante a obra de restauração de segmento da rodovia.

Devido a heterogeneidade presente na formação do RAP, utilizou-se o material passante na peneira ¾” (19,1mm). A caracterização deste material teve início com o ensaio de granulometria ME DNER 083 (DNER, 1998a) e densidade real ME DNER 081 (DNER, 1998b).

Foram testadas as misturas de Solo-RAP nos percentuais 0%, 50%, 60%, 70%, 80% e 100% de RAP, cujas quantidades foram calculadas em relação a massa seca. Inicialmente, de posse dos resultados da granulometria por peneiramento do solo e do RAP individualmente, foi determinado a granulometria das misturas considerando os percentuais de cada um nas diferentes misturas, além disso, utilizou-se os valores percentuais do material passante na peneira #40 obtido da caracterização das amostras do Solo e do RAP, em relação ao percentual de cada mistura para realização dos ensaios de limite de liquidez ME DNER 122 (DNER, 1994b) e limite de plasticidade, ME DNER 82 (DNER, 1994c).

De posse dos resultados da granulometria do solo, RAP e misturas, foi utilizado como referência as faixas granulométricas indicadas na norma ES DNIT 141 (DNIT, 2022). Conforme Tabela 1, para verificação da utilização destes materiais como base.

Tabela 1 – Faixas granulométricas de referência.

Peneiras		Faixas						Tolerância da faixa de projeto
		Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		
Pol./número	mm	A	B	C	D	E	F	
2”	50,8	100	100	-	-	-	-	±7
1”	25,4	-	75-90	100	100	100	100	±7
¾”	9,5	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	4,8	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	±5
Nº 10	2,0	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	0,42	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	0,074	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: ES DNIT 141 (DNIT, 2022).

2.2. Análise química do solo

Para análise sobre o tipo de argilomineral presente na fração fina de cada solo, foi realizado por Souza *et al.* (2020), a caracterização química do solo. Segundo estes autores, a avaliação foi realizada a partir de atributos químico, tais como, cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} , pH em água e em KCl (relação solo:solução de 1:2,5), por titulação após extração com solução de 1 mol.L⁻¹KCl; Na^+ e K^+ por fotometria de chama, após extração com Mehlich-1; H+Al extraídos com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinado com NaOH 0,025 mol.L⁻¹. De posse desses dados e do teor de argila do solo foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC), pela soma do resultado de bases

trocáveis ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$) e acidez ($\text{H}+\text{Al}$), e da atividade da argila (T), referente à capacidade de troca de cátions correspondente à fração argila, calculada pela Equação 1, além de calcular saturação por base (V) e saturação por Alumínio (M). Além disto, foram analisados os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , presentes na fração de argila do solo, utilizando-se aparelho de raios x de fluorescência portátil, a fim de se calcular as relações moleculares K_i e K_r , os quais indicam a presença de argilominerais existentes no solo, calculados pelas Equações 2 e 3 (EMBRAPA, 2018).

$$T = CTC \cdot \frac{100}{\text{teor}} \text{ de argila (\%)} \quad (1)$$

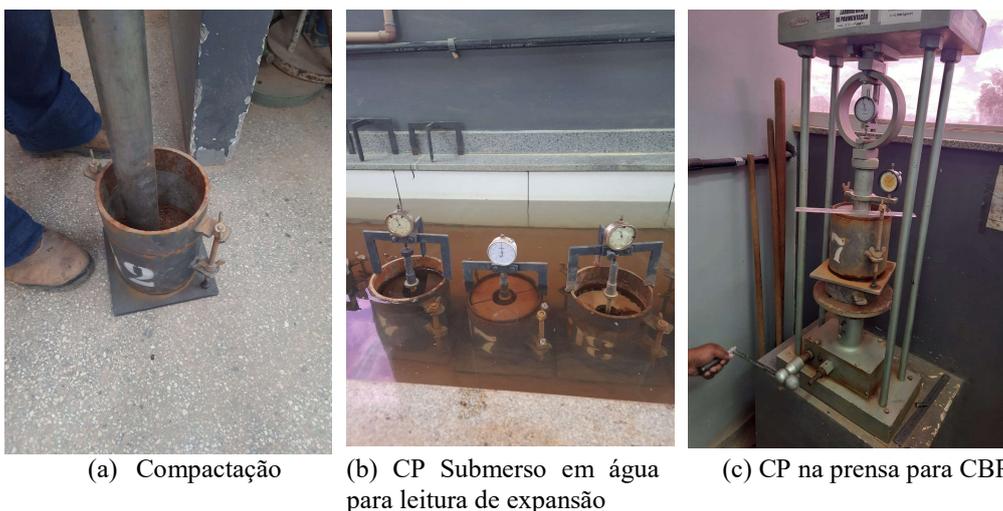
$$k_i = 1,70 \cdot \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (2)$$

$$k_r = \frac{1,70 \cdot \text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0,6375} \quad (3)$$

2.3. Compactação e CBR

Os ensaios de compactação do solo, RAP e das misturas para determinação da curva de compactação obtendo a umidade ótima (w_{ot}) e massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) de cada amostra, foram realizados conforme a norma DNIT 443 (DNIT, 2023), na energia Proctor intermediária ($12.8 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$). Inicialmente, foram preparados 5 corpos de prova (CP) para cada uma das amostras, com aproximadamente, 4 kg, sendo o primeiro CP moldado em umidade próxima da w_{ot} , percebida por análise tátil e visual, os demais com teores crescentes de 2% para o ramo úmido, e decrescentes de 2% para o ramo seco. Com este ensaio foi possível obter os parâmetros ótimos de compactação (w_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$).

Figura 2 – Procedimento do ensaio CBR e Expansão



Em seguida, de posse dos parâmetros ótimos de compactação foram realizados os ensaios de CBR em triplicata, na mesma energia, do solo, RAP e das misturas solo-RAP DNIT 172 (DNIT,2016). Os CP foram inseridos no tanque para leituras diárias de expansão

durante 4 dias e em seguida rompidos na prensa. A Figura 2 apresenta os procedimentos deste ensaio.

2.4. Módulo de Resiliência

Os ensaios de MR foram realizados nas 6 amostras (solo, RAP e misturas) não trabalhadas de acordo com a norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018a). Cada amostra foi compactada, no cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, em dez camadas, na energia do Proctor intermediária e umidade ótima anteriormente determinada. Foram compactados CP em triplicata para cada amostra.

Em seguida, cada CP compactado foi levado para o equipamento triaxial de carga repetida (Figura 3), onde foi submetido ao ensaio de MR para aplicação de diferentes pares de tensões desvio (σ_d) e confinante (σ_3), conforme preconizado na norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018a). Os ensaios foram realizados prioritariamente com os 18 pares de tensões da referida norma com o carregamento vertical cíclico aplicado na frequência de 1 Hz (60 ciclos de carregamento por minuto). Logo após a finalização do ensaio, cada CP foi pesado e levado à estufa, com temperatura de aproximadamente 110°C por 48 horas ou até a constância da massa, para determinação do teor de umidade.

A relação entre a tensão σ_d e a deformação resiliente (ϵ_r) determina o módulo de resiliência para cada par de tensões aplicado (Tabela 2), conforme a Equação 4. De posse dos MR calculados, para diferentes pares de tensões testados foi possível determinar as constantes de k_1 , k_2 e k_3 do modelo de variação do módulo de resiliência, de acordo com a Equação 5.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (4)$$

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (5)$$

Em que MR: Módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 : coeficientes de regressão constantes;

σ_3 : Tensão confinante [MPa];

σ_d : Tensão desvio [MPa].

Figura 3 – Procedimento da moldagem do Corpo de Prova.



(a) Compactação do CP



(b) CP moldado



(c) CP no equipamento triaxial

Tabela 2 - Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência.

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: ME DNIT 134 (DNIT, 2018a).

2.5. Deformação Permanente

Os ensaios de DP foram realizados para o solo, o RAP e misturas solo-RAP conforme especificações IE DNIT 179 (DNIT, 2023c). Cada amostra foi compactada, no cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, em dez camadas, na energia do Proctor intermediária e umidade ótima anteriormente determinada. Foram compactados nove CP de cada amostra conforme modelo proposto por Guimarães (2009) para utilização no método MeDiNa, de acordo com a equação 6.

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (6)$$

Onde,

ϵ_p : Deformação Permanente;

Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 : Coeficientes de regressão;

σ_3 : Tensão confinante [MPa];

σ_d : Tensão desvio [MPa]

ρ_0 : Tensão de referência [MPa]

N: número de aplicações do ciclo.

Após a etapa de compactação, foi medida a deformação permanente de cada amostra conforme IE DNIT 179 (DNIT, 2023) aplicando-se nove pares de tensões, um em cada CP. Inicialmente são aplicados 50 golpes, com par tensões iniciais de σ_3 e σ_d da ordem de 0,030 MPa, e de frequência de 5Hz. Ao término da aplicação dos ciclos iniciais, são aplicados 150.000 ciclos de carregamentos. Os pares de tensões típicos deste ensaio estão demonstrados na Tabela 3. De posse dos dados gerados dos nove pares de tensões foi possível determinar as constantes de regressão, calculadas pela equação 6.

Tabela 3 - Estados de tensões indicados para determinação da deformação permanente.

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$
0,040	0,040	2
	0,080	3
	0,120	4
0,080	0,080	2
	0,160	3
	0,240	4
0,120	0,120	2
	0,240	3
	0,360	4

Fonte: Adaptado IE DNIT 179 (DNIT, 2023).

2.6. Pavimento de referência

Utilizou-se para o dimensionamento do pavimento de referência, de acordo com o trabalho do autor SILVA (2022). Segundo o autor o pavimento foi dimensionado considerando no subleito o solo estudado pelo mesmo e para as camadas de base e sub-base, utilizou-se valores da literatura descritos no método de dimensionamento empírico vigente DNER (DNER, 1981) e apresentados na Tabela 4. Com número de operações do eixo padrão de 80 kN, com $N_{projeto} = 5,0 \times 10^6$ para o *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e $N_{projeto} = 1,6 \times 10^6$ para o *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Ainda conforme SILVA (2022) foram utilizadas as inequações especificadas pelo (DNIT,2006) e os dados dos CBR mínimos, para determinação das espessuras das camadas de base e sub-base.

As espessuras destas camadas e os parâmetros estão listadas na Figura 4, constituído por Base (B), Sub-base (SB) granulares e Subleito (SL). De posse do pavimento de referência, realizou-se a análise tensão-deformação por meio do software AEMC.

Tabela 4 – Dados dos materiais das camadas do pavimento de referência.

Parâmetros	Base	Sub-base	Subleito
CBR (%)	≥ 80	≥ 20	9,4
Expansão (%)	$\leq 0,5$	≤ 1	0,14
L. Liquidez (%)	≤ 25	-	27
L. Plasticidade (%)	≤ 6	-	18
Índice de Grupo	0	0	4
E. de Areia (%)	≥ 30	-	-
C. Estrutural	1	0,89	-

Fonte: Silva (2022)

Após o pavimento de referência dimensionado (Figura 4), a próxima etapa é avaliar a performance desta estrutura, a partir de análises tensão-deformação com auxílio do software AEMC, com diversas configurações, utilizando as misturas solo-RAP como camadas granulares de base e sub-base, a fim de definir a configuração ideal, ou seja, aquela que promova a maior expectativa de vida útil do pavimento empiricamente dimensionado.

Figura 4 - Pavimento de Referência.

MR = 5764 MPa $v = 0,30$	Revestimento (R) = 5 cm
$v = 0,35$	Base (B) = 18 cm
$v = 0,35$	Sub-base (SB) = 20 cm
$v = 0,40$	Subleito (SL) = ∞

Fonte: Adaptado de Silva (2022)

Após o pavimento de referência dimensionado (Figura 4), a próxima etapa é avaliar a performance desta estrutura, a partir de análises tensão-deformação com auxílio do software AEMC, com diversas configurações, utilizando as misturas solo-RAP como camadas granulares de base e sub-base, a fim de definir a configuração ideal, ou seja, aquela que promova a maior expectativa de vida útil do pavimento empiricamente dimensionado.

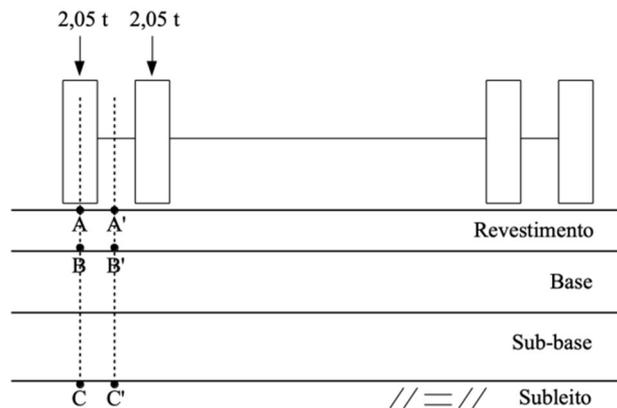
2.7. Análise Tensão-Deformação

A análise tensão-deformação no software Análise Elástica de Múltiplas Camadas, sub-rotina do Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos asfálticos desenvolvidos

por FRANCO E MOTTA (2020), foi a ferramenta utilizada para avaliação estrutural do pavimento de referência (Figura 4) para as misturas solo-RAP. Nas análises realizadas no AEMC a interface entre as camadas do pavimento foi considerada em duas condições como não aderida e aderida e os módulos foram utilizados com variação não linear e, conseqüentemente, foram adotadas as respectivas constantes de regressão determinadas a partir dos ensaios de MR (Tabela 4) para o solo, as misturas e o RAP.

Para obtenção dos valores, tais como, deslocamento vertical no topo do revestimento (D), deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t) e deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v). Aplicou-se nestas avaliações uma pressão de pneu de 0,56 MPa em um raio de atuação de 10,8 cm (representando a carga de uma roda do eixo padrão de 8,2 t). Todas as análises foram realizadas entre as duas rodas e sob a roda do semieixo padrão, ou seja, nos pontos A, A', B, B', C e C' da Figura 5, respectivamente. Em todas as análises, a resposta elástica mais crítica foi levada em consideração para a avaliação do comportamento do pavimento.

Figura 5 – Pontos de aplicação de carga e análise tensão-deformação.



Após realização da análise estrutural, foi calculado o número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 8,2 t acumulado, considerando um período de projeto ($N_{projeto}$) para o qual a estrutura é capaz de suportar. Foram utilizadas as Equações 8 a 10 (DER-SP, 2006) e os valores de k e n, conforme Tabela 9. É importante ressaltar que, das equações apresentadas na Tabela 5, a Equação 8 faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, para a determinação do tráfego ou ($N_{previsto}$), e as Equações 8 e 10 fazem referência aos FEC da USACE.

Os valores dos coeficientes de Poisson e do MR da camada de Revestimento, foram adotados da Instrução de Projeto IP- DE-P00/001 do Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (DER-SP, 2006), e os dados de MR das demais camadas (Base, Sub-base e Subleito) obtidos experimentalmente (Tabela 12).

Tabela 5 – Equações e Parâmetros utilizados para o cálculo do número N.

Local de Análise	Equação	k	n	Fonte
Topo do revestimento Equação 8	$N_{tr} = \sqrt[n]{\frac{10^k}{D}}$	3,01	0,176	DNER PRO 11 (DNER, 1979)
Fibra inferior do revestimento Equação 9	$N_{ir} = k \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n$	$1,09 \times 10^{-6}$	3,512	FHWA (1976) apud DER-SP (2006)
Topo do subleito Equação 10	$N_{sub} = \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	Dormon e Metcalf (1965) apud DER-SP (2006)

Em que:

N_{tr} : N_{adm} para o topo do revestimento a ser comparado com o NUSACE;

N_{ir} : N_{adm} para a fibra inferior do revestimento a ser comparado com o NAASHTO;

N_{sub} : N_{adm} para o topo do subleito a ser comparado com o NUSACE;

D: deslocamento vertical/deflexão (mm) no topo do revestimento;

ε_t : deformação específica horizontal de tração para a camada de revestimento;

ε_v : deformação específica vertical de compressão no topo do subleito;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica, e modificados para refletir o desempenho no campo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização do solo, do RAP e das misturas

A Tabela 6 apresenta os resultados referentes a Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Índice de Plasticidade (IP), densidade real dos grãos (ρ_s), parâmetros ótimos de compactação (w_{ot} e $\rho_{dm\acute{a}x}$), e as classificações Transportation Research Board (TRB) e metodologia MCT do solo.

Tabela 6 – Caracterização do solo

Parâmetros	Resultados
LL (%)	89
LP (%)	49
IP (%)	40
ρ_s (g/cm ³)	2,73
Wot (%)	29,32
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,47
TRB	A-7-5
Pi (%)	55
Classificação MCT	LG'

Observa-se os resultados presente na Tabela 6 o solo foi classificado pela TRB como A-7-5 solos argilosos, não adequado para utilização em subleito, com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.

Entretanto, pela metodologia MCT foi classificado como LG', são tipicamente argilosos, de natureza laterítica, devido a sua composição pedológica são conhecidos por latossolos. Segundo esta metodologia o solo estudado no presente trabalho é adequado para o uso em pavimentação. De acordo com NOGAMI, & VILLIBOR (1995), solos deste grupo podem apresentar um comportamento igual aos classificados como LA' ao serem submetido a um aumento na quantidade de grão de areia no solo. Contrariando a constatação relacionada a classificação TRB.

A Tabela 7 refere-se aos parâmetros de caracterização ρ_s , $\rho_{dm\acute{a}x}$ e wot do RAP.

Tabela 7 – Caracterização do RAP

Parâmetros	Resultados
ρ_s (g/cm ³)	2,45
Wot (%)	6,18
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,83
IP	NP

Analisando-se a Tabela 7, observa-se que a massa específica aparente seca máxima alcançada pelo RAP na energia intermediária, é menor que a apresentada no solo (Tabela 6). Esta variação explica-se pela presença de ligante asfáltico residual no RAP (SILVA, 2022).

A Tabela 8 traz resultados da caracterização geotécnica das misturas, tais como, LL e LP além dos parâmetros ótimos de compactação.

Observa-se na Tabela 8 uma tendência de crescimento da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), com o aumento do teor de RAP de 50% até 80%, de 1,76 g/cm³ até 1,97 g/cm³, respectivamente, em contrapartida em relação ao teor de umidade ótimo (wot) observou-se uma tendência foi de diminuição da ordem de 16,30%, para 50% de RAP, até 9,9%, para 80% de RAP. Esta situação diminui a necessidade de água para atingir-se o grau ótimo de compactação, além de indica que os vazios do solo estão sendo reduzidos, e por consequente, aumentando a resistência, a densidade e a estabilidade. Em relação aos dados em literatura, este comportamento mostra-se coerente com os estudos dos autores ALHAJI & ALHASSAN (2018).

Tabela 8 – Caracterização das misturas

Misturas	Wot (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo	29,32	1,47	89	49	40
50% RAP	16,30	1,76	83	47	36
60% RAP	14,13	1,85	81	44	37
70% RAP	11,76	1,89	74	43	31
80% RAP	9,9	1,97	65	34	31
100% RAP	6,18	1,83	-	-	NP

A Tabela 9 demonstra o resultado da granulometria do solo, do RAP e das misturas por peneiramento e o seu respectivo enquadramento nas faixas granulométricas para base conforme ES DNIT 141 (DNIT, 2022).

Tabela 9 – Resultado da granulometria das amostras e faixas granulométricas.

Misturas	2"	1"	Peneiras					Faixa DNIT
			3/8"	4	10	40	200	
% Passante								
Solo	100	100	98,58	97,89	96,80	86,46	73,62	-
50% RAP	100	100	87,98	73,00	60,60	46,65	37,16	-
60% RAP	100	100	85,86	68,02	53,36	38,68	29,87	-
70% RAP	100	100	83,74	63,04	46,12	30,72	22,58	D
80% RAP	100	100	81,62	58,06	38,89	22,76	15,28	C
100% RAP	100	100	77,38	48,10	24,40	6,83	0,70	-

Fonte: ES DNIT 141 (DNIT, 2022).

Ao avaliarmos os resultados da granulometria do solo, RAP e misturas, observa-se que existe uma predominância de finos na composição do solo com valor da ordem de 73,62% passante na peneira nº 200, ao passo que o RAP se apresenta como material granular, com apenas 0,70 % passante na peneira nº 200. Considerando-se a norma DNIT 141 (DNIT, 2022), as misturas de solo-RAP 70% e 80% enquadraram-se para uso como base nas faixas D e C, respectivamente.

3.2. Análise química do solo

Os resultados encontrados por SOUZA *et al.* (2020) estão apresentados na Tabela 10. Os valores de k_i e k_r representam o grau de intemperismo do solo, indicando o tipo de argilomineral presente na composição do mesmo. De acordo com a Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária (2018) os valores de K_i e K_r superiores a 0,75, existe uma predominância de argilominerais do grupo caulinita (1:1). Os resultados obtidos por estes autores, indicam que o solo em estudo apresenta características de solo predominantemente caulínico, devido apresentar valores de k_i e k_r superiores a 0,75. Além de confirmarem a classificação do solo como latossolos por apresentar capacidade de troca de cátions valores abaixo de 17 cmol/kg em sua composição.

Tabela 10 – Resultados da análise química do solo.

Solo	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CTC (cmol/kg)	K _i	K _r	T (cmol/kg)
Regolito	11,63	14,73	12,34	2,60	2,15	1,28	4,81

Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2020)

3.3. Índice de Suporte Califórnia e Expansão

A Tabela 11 demonstra os valores médios encontrados nos ensaios de CBR e Expansão.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 11, a mistura de solo-RAP que apresentou aumento no valor do CBR, foi a de 60% de RAP com valor da ordem de 18,6%. Representando um aumento em relação ao valor de CBR do RAP de aproximadamente, 251% e apenas, 3% em relação ao solo puro.

Tabela 11 – Dados CBR e Expansão do solo e das misturas.

Amostra	Wot (%)	ρ_d (kN/m³)	CBR (%)	Expansão
Solo	29,32	14,70	18,00	0,25
50% RAP	16,30	17,30	17,2	0,09
60% RAP	14,13	18,50	18,6	0,09
70% RAP	11,76	18,90	14,8	0,01
80% RAP	9,99	19,20	12,2	0,00
100% RAP	6,18	18,30	5,3	0,00

Conforme os resultados apresentados na Tabela 11, a mistura de solo-RAP que apresentou aumento no valor do CBR foi a de 60% de RAP com valor da ordem de 18,6%. Representando um aumento em relação ao valor de CBR do RAP de aproximadamente, 251% e apenas, 3% em relação ao solo puro.

As demais misturas apresentaram valores de CBR abaixo do encontrado no solo. Alguns autores como LIMA *et al.* (2022) e PEDROSO *et al.* (2023) mostram que o incremento do RAP no solo em maiores teores influenciam no valor do CBR de forma negativa, resultando na redução do valor encontrado no solo existente.

De acordo com as especificações do método DNIT (DNER), os materiais constituintes do pavimento devem atingir valores mínimos de CBR para sua utilização como base ou sub-base, para base o valor mínimo é de 80% ou 60%, dependendo do tráfego, no presente estudo, o valor mínimo considerado é de 60% devido $N \leq 5,0 \times 10^6$. Para sub-base o valor mínimo especificado é de 20%. Entretanto, todos os materiais estão abaixo destes valores. Logo, por este método nenhum material está apto para utilização nestas camadas do pavimento.

3.4. Módulo de Resiliência

A Tabela 12 apresenta os resultados de MR médios e as constantes de regressão k1, k2 e k3, bem como os valores de R² obtidos do ajuste dos resultados dos ensaios realizados no equipamento triaxial de carga repetida nas amostras de solo do presente estudo.

As amostras apresentaram comportamento não linear para MR conforme relatado por (SANTOS *et al.*, 2021) para materiais granulares. Considerando-se estes valores médios de MR (Tabela 12), observa-se que a adição do RAP ao solo provocou melhorias no comportamento mecânico das misturas a partir de 70% de RAP, sendo este o melhor teor observado nas misturas, com uma melhoria da ordem de 11%. Por outro lado, o RAP puro mostrou-se o de melhor comportamento mecânico em termos de MR (254 MPa). Também foi observado aumento no valor de MR devido ao incremento do RAP na estabilização granulométrica do solo por LIMA *et al.* (2023).

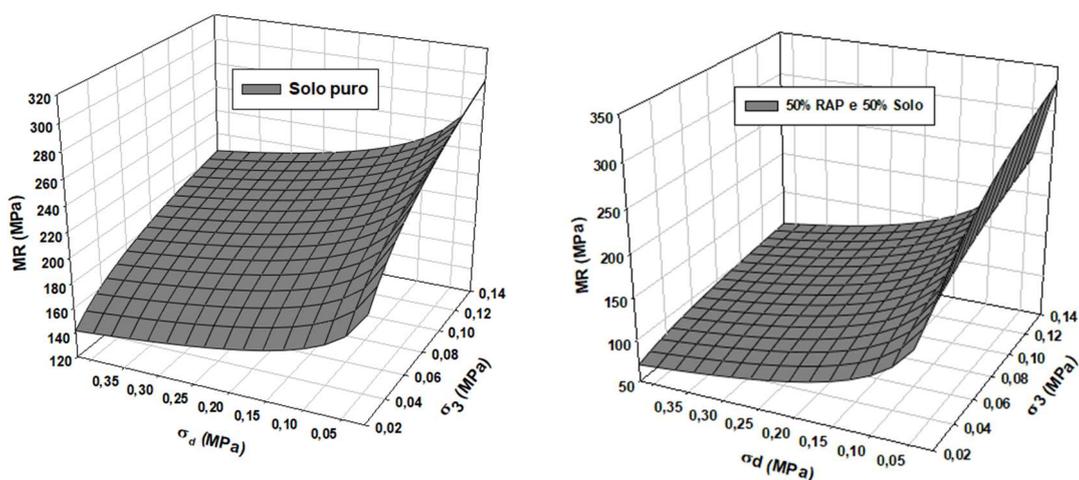
Tabela 12 – Dados da moldagem e módulo de resiliência do solo e das misturas.

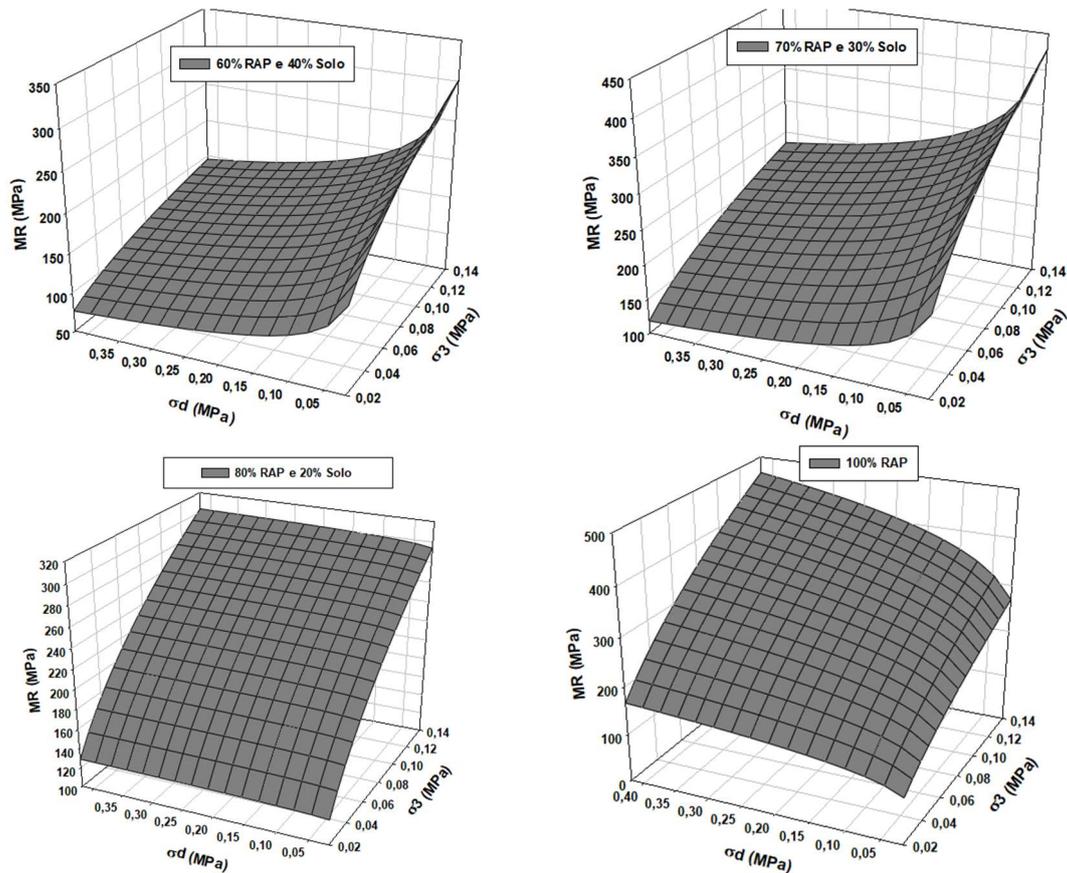
Amostra	Wot (%)	ρ_d (kN/m ³)	MR _{méd} (MPa)	k1	k2	k3	R ²
Solo	29,32	14,70	200,00	268,13	0,19	-0,12	0,85
50% RAP	16,30	17,30	148,00	120,32	0,22	-0,37	0,79
60% RAP	14,13	18,50	152,00	225,40	0,33	-0,24	0,78
70% RAP	11,76	18,90	222,00	389,79	0,35	-0,20	0,82
80% RAP	9,99	19,20	208,00	726,49	0,44	0,01	0,96
100% RAP	6,18	18,30	254,00	1.546,70	0,53	0,18	1,00

Entretanto, as misturas de 50% e 60% não obtiveram melhoria no comportamento mecânico com o acréscimo do RAP, comparando-se ao solo. Entretanto, SILVA (2022), em seu estudo com solo de classificação LA', analisou o MR das misturas solo-RAP de 0% a 100% de RAP, variando 10% entre elas. Obteve-se como resultado, baixa resistência no solo puro, não passou da fase de condicionamento, além disto, a mistura de 50% apresentou o maior valor de MR. Este estudo, reforça a necessidade de considera-se as características geotécnicas específicas de cada solo para adoção da melhor dosagem de estabilização granulométrica.

A figura 6 apresenta a variação de MR das amostras em função σ_d e σ_3 , plotados a partir dos coeficientes de regressão k1, k2 e k3 obtidos experimentalmente no ensaio de MR, observa-se que σ_3 as amostras obtiveram valores semelhantes, destacando-se a amostra solo-RAP no teor de 70 % de RAP e 30% de solo que apresentou melhor comportamento entre as demais devido obter maior valor de MR., entretanto, em termos de σ_d destaca-se a amostra de 60% RAP e 40% de solo que apresentou pior comportamento devido apresentar menor valor entre as amostras estudadas.

Figura 6 – Variação de MR das amostras em função σ_d e σ_3 .





3.5. Deformação Permanente

A Tabela 13 apresenta as constantes de regressão e o R^2 das amostras, de acordo com o modelo proposto por GUIMARÃES (2009). A Figura 7 demonstra os resultados de DP do solo e das misturas. Analise-se que dentre as amostras avaliadas, o solo demonstrou melhor comportamento em relação aos valores de deformação permanente, devido apresentar melhores valores nos pares de tensões mais baixos. Além disto, observou-se uma tendência de crescimento de DP com o aumento do teor do RAP nas misturas solo-RAP. Contrariando o resultado de MR (Tabela 13), em relação aos valores médios, o qual, o aumento do teor do RAP apresentou efeitos positivos no comportamento das misturas em relação ao solo puro.

Na literatura, alguns trabalhos envolvendo deformação permanente em misturas solo-RAP foram realizadas, tais como THAKUR *et al.* (2015) e ULLAH e TANYU (2020), onde obtiveram aumento no valor de deformação permanente com o aumento do teor do RAP nas misturas. Entretanto, LIMA *et al.* (2023) em seu estudo observou que o maior teor de RAP apresentou menores acúmulos de DP, ou seja, em alguns solos a estabilização granulométrica com o RAP demonstra-se eficiente. Esta divergência de resultados corrobora com ideia de considera-se as características do solo, para adoção do melhor teor.

Observou-se também, que a mistura solo-RAP com teor de 70% de RAP difere dos demais resultados, uma vez que, apresentou um dos maiores valores de MR e o menor

valor de DP em relação as demais misturas. Além disto, o RAP também obteve o mesmo comportamento observado na mistura de 70% de RAP.

Vale Ressaltar que, os ensaios de DP com solo e as misturas foram todas realizadas utilizando-se 9 pares tensões (Tabela 3), entretanto, em três amostras (solo, 60% e 70%) os resultados não obtiveram êxito, resultando em valores do ajuste do R² baixos. Diante disto, optou-se utilizar nestas amostras 6 pares de tensões, número mínimo permitido pela norma IE DNIT 179 (DNIT, 2023), visto que, nesta configuração os valores de R² apresentaram-se ótimos, constantes na Tabela 13. Posteriormente, será realizado novos ensaios de DP com estas amostras nos pares de tensões que apresentaram resultados discrepantes para melhor análise.

Figura 7 – Deformação Permanente das amostras

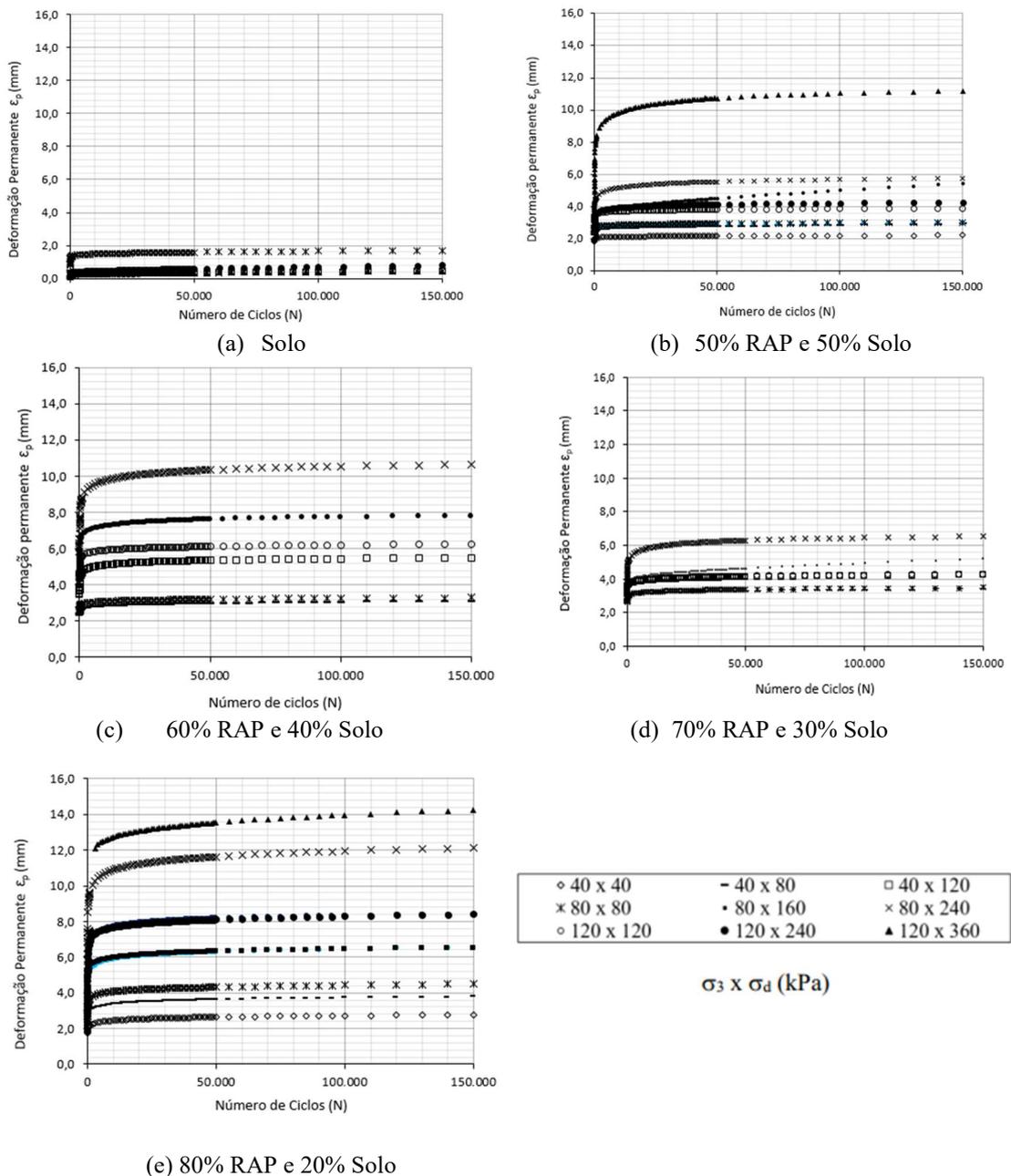


Tabela 13 – Constantes de regressão

Amostra	Constantes de Regressão				R ²
	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	
Solo	0,0111	1,7978	-1,2585	0,0775	0,79
50% RAP	0,0548	0,1285	0,5118	0,0319	0,82
60% RAP	0,2456	0,1584	1,0320	0,0349	0,96
70% RAP	0,0442	0,0098	0,5064	0,0317	0,97
80% RAP	0,0626	-0,0227	0,7296	0,0697	0,93

3.6. Análise Tensão-Deformação

Embora os materiais estudados não atingiram valores mínimos de CBR para utilização como camadas de base e sub-base de pavimento flexível, todas as misturas de solo-RAP foram testadas na base e na sub-base da simulação da estrutura do pavimento de referência (Figura 4). O Rap puro foi testado somente como camada de sub-base.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados da análise tensão-deformação realizada por meio do software AEMC, na condição de interface da camada não aderida e aderida, respectivamente, para o cálculo da deflexão (D) no topo do revestimento, das deformações de tração na fibra inferior do revestimento em concreto asfáltico (ϵ_t) e vertical no topo do subleito (ϵ_v), considerando a variação não linear dos módulos de resiliência e, conseqüentemente, as respectivas constantes de regressão (Tabela 12) obtidas experimentalmente e com coeficientes de Poisson médios recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DERSA, 2006) das amostras de solo do presente estudo.

Na Tabela 14 demonstra-se os resultados encontrados para análise de tensão-deformação na condição não aderida, observa-se que as misturas solo-RAP em sua maioria obtiveram valores de N_{adm} para o topo do pavimento e topo do subleito superior ao $N_{projeto}$, entretanto, nenhuma estrutura conseguiu atingir a exigência de $N_{adm} \geq NAASHTO$.

Os resultados obtidos na simulação do pavimento de referência na condição aderida (Tabela 15) demonstram que as estruturas de pavimento avaliados com diferentes configurações para base e sub-base, apresentaram valores admissíveis de solicitações estimadas apenas nas misturas que continham 70% e 80% de RAP na base, nas configurações B70SB70 composta por base e sub-base com 70% de RAP e B80SB70 composta por 70% de RAP na base e 80% de RAP na sub-base o N_{adm} (N_{tr} , N_{ir} , N_{sub}) foi superior ao $N_{projeto}$. As demais configurações apenas atingiram valores admissíveis de solicitações para o topo do revestimento e topo do subleito. Este resultado é esperado, uma vez que, somente estes dois teores (70% e 80%) se enquadram nas faixas granulométricas do DNIT (Tabela 9). Além disto, obtiveram os maiores valores médios de CBR e MR.

Tabela 14 – Resultados da análise estrutural no software AEMC condição não aderido.

Estrutura do Pavimento	Respostas Elásticas			N _{adm}			
	D (0,01 mm)	ε _t (10 ⁻⁴)	ε _v (10 ⁻⁴)	N _{tr}	N _{ir}	N _{sub}	
B50SB50	68,98	5,21	1,80	4,52x10 ⁶	3,70x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B50SB60	69,56	5,23	1,79	4,31x10 ⁶	3,65x10 ⁵	4,24x10 ⁸	
B50SB70	64,68	5,06	1,80	6,51x10 ⁶	4,12x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B50SB80	66,20	5,11	1,80	5,71x10 ⁶	3,96x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B50SB100	65,32	5,08	1,80	6,16x10 ⁶	4,05x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B60SB50	69,24	5,23	1,80	4,42x10 ⁶	3,65x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B60SB60	69,83	5,26	1,79	4,21x10 ⁶	3,59x10 ⁵	4,24x10 ⁸	
B60SB70	64,80	5,07	1,80	6,45x10 ⁶	4,09x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B60SB80	66,36	5,13	1,80	5,63x10 ⁶	3,92x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B60SB100	65,45	5,09	1,80	6,10x10 ⁶	4,02x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B70SB50	61,96	4,67	1,80	8,31x10 ⁶	5,42x10 ⁵	4,13x10 ⁸	
B70SB60	62,56	4,70	1,76	7,87x10 ⁶	5,33x10 ⁵	4,54x10 ⁸	
B70SB70	57,64	4,51	1,78	1,25x10 ⁷	6,16x10 ⁵	4,35x10 ⁸	
B70SB80	59,20	4,57	1,78	1,08x10 ⁷	5,87x10 ⁵	4,35x10 ⁸	
B70SB100	58,30	4,53	1,78	1,18x10 ⁷	6,03x10 ⁵	4,35x10 ⁸	
B80SB50	63,55	4,81	1,78	7,20x10 ⁶	4,91x10 ⁵	4,35x10 ⁸	
B80SB60	64,17	4,83	1,77	6,81x10 ⁶	4,83x10 ⁵	4,42x10 ⁸	
B80SB70	59,01	4,63	1,79	1,10x10 ⁷	5,63x10 ⁵	4,27x10 ⁸	
B80SB80	60,62	4,69	1,79	9,41x10 ⁶	5,35x10 ⁵	4,29x10 ⁸	
B80SB100	59,67	4,65	1,79	1,03x10 ⁷	5,51x10 ⁵	4,25x10 ⁸	
N _{Projeto}	NUSACE				5,00x10 ⁶		
	NAASHTO				1,60x10 ⁶		

*BXXSBYY → B: base, SB: sub-base, XX e YY: Porcentagem de RAP da mistura solo-RAP

Tabela 15 – Resultados da análise estrutural no software AEMC condição aderido.

Estrutura do Pavimento	Respostas Elásticas			N _{adm}			
	D (0,01 mm)	ε _t (10 ⁻⁴)	ε _v (10 ⁻⁴)	N _{tr}	N _{ir}	N _{sub}	
B50SB50	50,73	3,96	3,55	2,59x10 ⁷	9,73x10 ⁵	1,63x10 ⁷	
B50SB60	52,18	4,02	3,52	2,21x10 ⁷	9,20x10 ⁵	1,70x10 ⁷	
B50SB70	48,88	3,88	3,54	3,20x10 ⁷	1,04x10 ⁶	1,64x10 ⁷	
B50SB80	51,15	3,98	3,52	2,47x10 ⁷	9,54x10 ⁵	1,69x10 ⁷	
B50SB100	51,60	4,00	3,51	2,35x10 ⁷	9,38x10 ⁵	1,71x10 ⁷	
B60SB50	50,74	3,97	3,54	2,59x10 ⁷	9,65x10 ⁵	1,65x10 ⁷	
B60SB60	52,28	4,04	3,51	2,18x10 ⁷	9,07x10 ⁵	1,71x10 ⁷	
B60SB70	48,64	3,86	3,53	3,29x10 ⁷	1,06x10 ⁶	1,67x10 ⁷	
B60SB80	51,04	3,98	3,51	2,50x10 ⁷	9,57x10 ⁵	1,70x10 ⁷	
B60SB100	51,52	4,01	3,52	2,37x10 ⁷	9,31x10 ⁵	1,69x10 ⁷	
B70SB50	46,62	3,53	3,41	4,19x10 ⁷	1,46x10 ⁶	1,96x10 ⁷	
B70SB60	48,13	3,59	3,38	3,49x10 ⁷	1,37x10 ⁶	2,05x10 ⁷	
B70SB70	43,54	3,36	3,39	6,17x10 ⁷	1,73x10 ⁶	2,03x10 ⁷	
B70SB80	46,27	3,45	3,36	4,37x10 ⁷	1,58x10 ⁶	2,10x10 ⁷	
B70SB100	46,75	3,48	3,37	4,12x10 ⁷	1,53x10 ⁶	2,07x10 ⁷	
B80SB50	47,66	3,64	3,45	3,69x10 ⁷	1,30x10 ⁶	1,87x10 ⁷	
B80SB60	49,43	3,74	3,42	3,00x10 ⁷	1,19x10 ⁶	1,94x10 ⁷	
B80SB70	44,92	3,44	3,41	5,17x10 ⁷	1,60x10 ⁶	1,96x10 ⁷	
B80SB80	47,27	3,55	3,40	3,87x10 ⁷	1,42x10 ⁶	2,01x10 ⁷	
B80SB100	46,82	3,53	3,39	4,08x10 ⁷	1,45x10 ⁶	2,02x10 ⁷	
N _{Projeto}	NUSACE				5,00x10 ⁶		
	NAASHTO				1,60x10 ⁶		

*BXXSBYY → B: base, SB: sub-base, XX e YY: Porcentagem de RAP da mistura solo-RAP

O menor valor calculado de N_{adm} define a resistência máxima do pavimento de referência analisado, nesta perspectiva, a estrutura que apresentou maior vida útil para o solo Regolito foi a configuração B70SB70, que se obteve N_{adm} da ordem de $1,73 \times 10^6$.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

o presente estudo tem por objetivo avaliar a influência do teor de RAP no comportamento mecânico de um solo laterítico de alta plasticidade para aplicação em pavimentação, nos teores de 0%, 50%, 60%, 70%, 80% e 100% de RAP em misturas com solo, consideradas pelo autor Silva (2022), como promissoras para dimensionamento pelo o método MeDiNa, através de ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica, mini-mcv e perda de massa por imersão (PI), Compactação Indicie Suporte Califórnia (CBR), além de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) análise química do solo, além da análise tensão-deformação por meio do software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) tendo em vista a determinação do comportamento mecânico de misturas Solo-RAP.

Os resultados demonstraram que apenas as misturas solo-RAP de 70% e 80%, enquadraram-se nas faixas granulométricas especificadas em ES DNIT 141 (DNIT, 2022), sendo D e C, respectivamente, para utilização como base do pavimento.

No resultado de análise química do solo observa-se o solo apresenta características de solo predominantemente caulínico, devido apresentar valores de k_i e k_r superiores a 0,75. Além de confirmar a classificação do solo como latossolo por apresentar capacidade de troca de cátions valor abaixo de 17 cmol/kg em sua composição.

Para os resultados de CBR, obteve-se que apenas o teor de 60%, apresentou um aumento em relação ao valor de CBR do RAP de aproximadamente, 251% e apenas, 3% em relação ao solo puro. Apesar das melhorias apresentadas, nenhum dos materiais atenderam valores mínimos de CBR especificados na DER-SP (DNIT, 2006).

Em termos de Módulo de Resiliência, observa-se nos resultados, que a adição do RAP ao solo provocou melhorias no comportamento mecânico das misturas a partir de 70% de RAP, sendo este o melhor teor observado nas misturas, com uma melhoria da ordem de 11%.

A partir dos resultados de deformação Permanente, observou-se uma tendência de crescimento de DP com o aumento do teor do RAP nas misturas solo-RAP, em relação aos valores nos pares de tensões mais baixos. O solo puro obteve melhor comportamento.

Os resultados da análise de tensão-deformação demonstraram que as misturas solo-RAP na análise da interface da camada não aderida nenhuma das configurações de pavimento atenderam a exigência $N_{adm} \geq N_{AASHTO}$. Entretanto, na condição aderida a estrutura que apresentou maior vida útil para o solo foi a configuração B70SB70, que se obteve N_{adm} da ordem de $1,73 \times 10^6$. Sendo assim, esta estrutura apresentou maior resistência dentre as demais estudadas na condição de interface da camada como aderida.

Apesar de controvérsias considerando-se o teor ideal para misturas de solo-RAP, a utilização do RAP em misturas é de caráter satisfatório. Vale ressaltar que, estas

conclusões podem ser extrapoladas apenas para misturas com características semelhantes com os investigados.

5. REFERÊNCIAS

ALHAJI, M.M. & ALHASSAN, M. **Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Stabilization on the Microstructure and Strength of Black Cotton Soil.** International Journal of Technology, 4: 727-736, 2018.

ARGÜELLO, F. M. & MOYA, J. P. A. **mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados.** Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR Volume 10, N.º1, Enero, 2019.

CENTOFANTE, R. *et al.* **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, p. e12178, 2018.

Confederação Nacional dos Transportes (CNT) **Anuário CNT do Transporte 2022. Anuário CNT do transporte 2022.** Disponível em <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/>. Acesso em: 10 setembro de 2023.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994a). DNER 041/94 ME - **Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 4 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1998a). DNER 083/98 ME - **Agregados – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 5 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994b). DNER 080/94 ME - **Solos - análise granulométrica por peneiramento.** Rio de Janeiro, 4 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1998b) DNER 081/98 ME: **Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 6 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994d) DNER 093/94 ME: **Solo – Determinação da Densidade Real.** Rio de Janeiro, 4 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994b) DNER-ME 122/94. **Solos- Determinação do limite de liquidez- método de referência.** Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994c) DNER-ME 082/94. **Solos-Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2018). DNIT 134/2018 ME – **Pavimentação Solos - Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro, 18 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes. (2022). DNIT 141/2022 ES - **Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente.** Rio de Janeiro, 9 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2016). DNIT 172/2016 ME – **Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas**. Brasília-DF, 17 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023c). DNIT 179/2023 – IE. – **Pavimentação Solos - Determinação da deformação permanente**. Brasília - DF, 17 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023a). DNIT 258/2023 – ME. – **Compactação em equipamento miniatura – Ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão**. Brasília - DF, 22 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023b). DNIT 259/2023 – CLA. - **Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura**. Brasília - DF, 8 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023d). DNIT 443/2023 ME - **Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos**. Brasília-DF, 12 p.

DNER (1981) **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DER-SP. 2006. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Projeto de Pavimentação**. IP-DE-P00/001. São Paulo, 53 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Solos. (2018) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília, DF. 356p.

European Asphalt Pavement Association (EAPA) <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2021/>Acesso em: 14 setembro de 2023.

FRANCO, F. A. C. P; & MOTTA, L. M. G. da. **Guia para utilização de Método Mecânico- empírico: Programas MeDiNa, AEMC e BackMeDiNa – Manual de utilização**. Rio de Janeiro: Convênio DNIT/COPPE, 70 p., 2018.

FERREIRA, A. D. **Comparação entre método empírico e mecânico-empírico para dimensionamento de pavimentos flexíveis**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2021.

GEORGE, A. M. *et al.* **Performance Evaluation of Geocell-reinforced Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Bases in Flexible Pavements**. International Journal of Pavement Engineering. 1-11, 2019.

GHANIZADEH, A.L. e RAHROVAN, M. **Modeling of unconfined compressive strength of soil-RAP blend stabilized with Portland cement using multivariate adaptive regression spline**. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 13: 787-799, 2019.

GHANIZADEH, A.L; RAHROVAN, M. e BAFGHI, K.B. **The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation**. Construction and Building Materials, 161: 165-174, 2018.

KHAN, M. A. e PUPPALA, A. J. **Sustainable pavement with geocell reinforced reclaimed-asphalt-pavement (RAP) base layer.** Journal of Cleaner Production, v. 387, p. 135802, 2023.

KLAMT, R. A. *et al.* **Estudo da utilização da reciclagem de concreto asfáltico como camada de pavimento.** Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 7, n. 3, p. 539-553, 2018.

LEITE, M. F. *et al.* **A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas.** Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/2021-ebook-ibp-informacoes-basicas-sobre-materiais-asfalticos.pdf>>. Acesso em: 8 setembro de 2023.

LIMA, L. B. F. *et al.* **Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with Reclaimed Asphalt Pavement.** Transportation Geotechnics, v. 43, p. 101103, 2023.

LIZÁRRAGA, J. M. *et al.* **Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation.** Construction and Building Materials, v. 170, p. 433-445, 2018.

MARIYAPPAN, R; PALAMMAL, J.S. e BALU, S. **Sustainable use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in pavement applications—a review.** Environ Sci Pollut Res 30, 45587–45606 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25847-3>

MOUSA, E; EL-BADAWY, S. e AZAM, A. **Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt.** Transportation Geotechnics, v. 26, p. 100414, 2021.

NAPA (2019) Recycling. Disponível em: <http://www.asphaltpavement.org/recycling>. Acesso em: 08 setembro 2023.

PEDROSO, O. M. *et al.* **Avaliação mecânica do uso de resíduo de fresagem de pavimentos na estabilização de um solo siltoso.** Encontro Nacional de aproveitamento de Resíduos na construção, 8(00), 1–6. <https://doi.org/10.46421/enarc.v8i00.3692>, 2023.

PLATI, C. e CLIATT, B. **A sustainability perspective for unbound reclaimed asphalt pavement (RAP) as a pavement base material.** Sustainability, v. 11, n. 1, p. 78, 2018.

SANTANA, V. R. *et al.* **Effects of overload and layer interface condition on estimated flexible pavement lifespan: Case study from BR-116/BA.** Transportation Geotechnics, v.34, p. 100762, 2022.

SANTOS, T. A. dos *et al.* **Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

SILVA, C. C. V. P. da. **Estudo e proposição de solução para segmento crítico na rodovia BR-230/PB com aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos-MeDiNa.** Dissertação (Mestrado). Universidade federal de Campina Grande, PB, 2021.

SILVA, P. A. **Dosagem de mistura solo-RAP e estratégia para definição de uso em diferentes camadas granulares de pavimento asfáltico.** Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade federal do Recôncavo da Bahia, BA, 2022.

SOUZA, F. S. et al. **Curvas de retenção de água de três solos compactados do Recôncavo da Bahia.** In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2020, Campinas. Anais eletrônicos. Campinas, 2020.

SUZUKI, K.Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Brasil, SP, 2019.

THAKUR, Jitendra K.; HAN, Jie. **Recent development of recycled asphalt pavement (RAP) bases treated for roadway applications.** Transportation Infrastructure Geotechnology, v. 2, p. 68-86, 2015.

ULLAH, S. e TANYU, B. F. **Effect of variation in moisture content on the mechanical properties of base course constructed with RAP-VA blends.** In: Geo-Congress 2020. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 612-620.

WIDYATMOKO, I. *et al.*; **Characterization of multiple recycled reclaimed asphalt incorporating polymer modified bitumen.** In: Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 3. CRC Press, 2022. p. 341-350.

ZHAO Z., XIAO F. e AMIRKHANIAN S. **Recent applications of waste solid materials in pavement engineering.** Waste Manage 108:78–105, 2020.