

Os primórdios da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos











Temos o prazer em convidá-lo para o
almoço comemorativo à inauguração da
Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos.

Data: 12 / 07 / 96

Horário: 12:30 h

Local: Restaurante do Antônio

Campus do Vale - UFRGS





3rd International Conference



3rd International Conference on
Accelerated Pavement Testing

Workshop Introduction to Accelerated Pavement Testing

Angel Mateos – Transport Research Center of CEDEX
Nick Coetzee – Dynatest Consulting, Inc.

What is APT ?

- **ALT** ~ **Accelerated Load Testing (of pavements)**
- **APT** ~ **Accelerated Pavement Testing**

Controlled application of a prototype wheel loading, at or above the appropriate legal load limit to a prototype or actual, layered, structural pavement system to determine pavement response and performance under a controlled, accelerated, accumulation of damage in a compressed time period.

(NCHRP Synthesis 235, 1996)

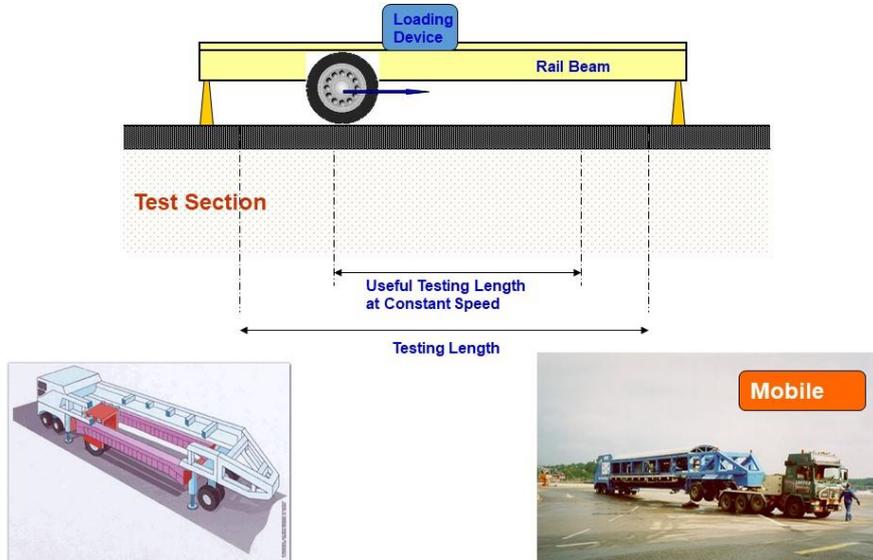
Controlled application of wheel loading to pavement structures for the purpose of simulating the effects of long-term in-service loading conditions in a compressed time period.

(NCHRP Synthesis 325, 2004)

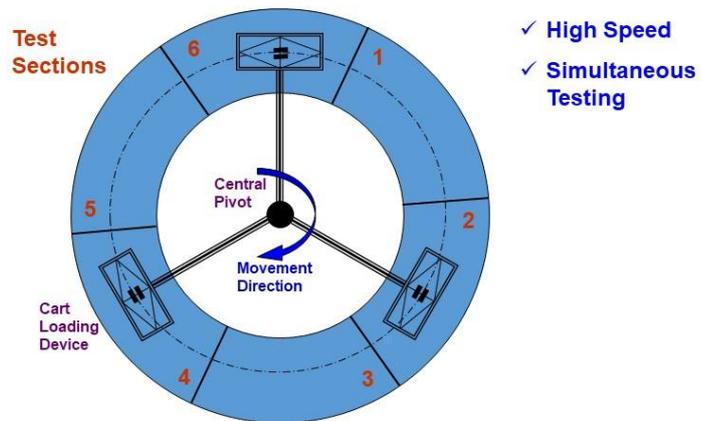
Why use APT?

- ✓ Improved understanding of pavement behaviour
- ✓ Rapid evaluation of pavement performance
- months instead of years -
- ✓ Ability to control variables
- load related, pavement related, some environmental -
- ✓ Ability to evaluate contribution of specific variables to pavement performance
- load related, pavement related, some environmental -
- ✓ No risk to traffic by failure of in-service pavement test section

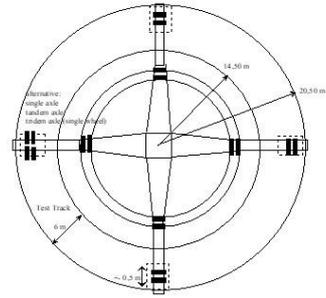
Types of APT Facilities – Linear Test Tracks –



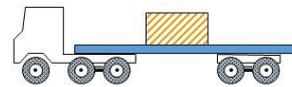
Types of APT Facilities – Circular Test Tracks –



LCPC Test Track



Types of APT Facilities – Test Roads –



Mn/ROAD Truck
(manually driven)

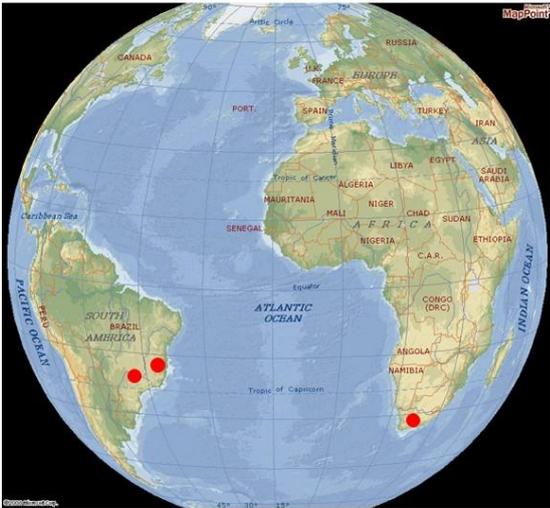
Mn-ROAD

Highway
I-94
(Real Traffic)

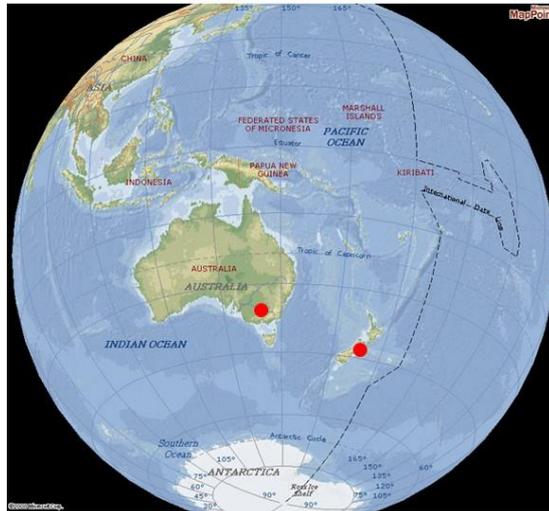
Types of APT Facilities
– USA Full-Scale Facilities –



Types of APT Facilities
– African and South American Full-Scale Facilities –



Types of APT Facilities – Oceania Full-Scale Facilities –



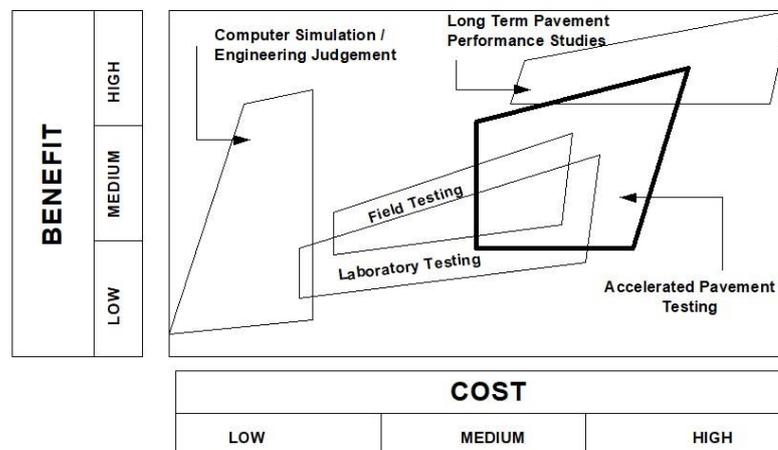
Applications of APT Testing

- ✓ Models calibration
- ✓ Verification of sections
- ✓ Comparison of different Pavements
- ✓ Alternative Designs
- ✓ New Materials
- ✓ New Sections
- ✓ Study of Specific Issues
- ✓ Rehabilitation Designs and Strategies

Limitations of APT Testing

- ✓ Compressed time period of APT test tends to exclude environmental effects seen by in-service pavements
- ✓ Specially built test sections may not be representative of typical in-service construction
- ✓ Relatively high cost

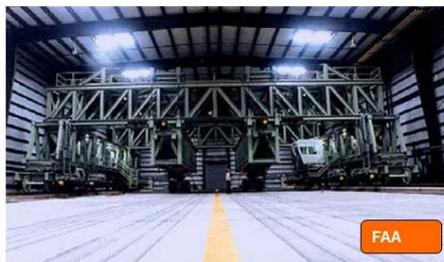
Limitations of APT Testing



Feasibilities of APT Testing – Environment Simulation –



air temperature can
be controlled in any
indoor facility



ATLaS

Feasibilities of APT Testing – Environment Simulation –



a test pit allows
water table control

... and homogeneous
support throughout
tests



Feasibilities of APT Testing – In-Situ Testing –



only a few facilities
can be used to test
existing pavements

*Testing
Rehabilitation
Strategies*



Benefits

- ✓ Reduction of pavement costs by reducing unnecessary pavement thickness, or by improving the structural balance of the design
- ✓ Avoidance of failure caused by the use of unproven designs or by abnormally heavy traffic
- ✓ Improving pavement design methods including both new and rehabilitation methods
- ✓ Greater knowledge and understanding of pavement and materials behaviour
- ✓ Rapid evaluation and comparison of rehabilitation measures for flexible, semi-flexible (stabilized) and rigid pavements

Conclusions

- ✓ APT is active world-wide
- ✓ There are different types of ALT facilities
- ✓ APT limitations → APT versus Real Roads
- ✓ Main studies: structural response
 pavement deterioration
- ✓ APT is a basic tool for any pavement research strategy
- ✓ International Cooperation on this Area is a Must

- THE END -

ANEXO XXIX

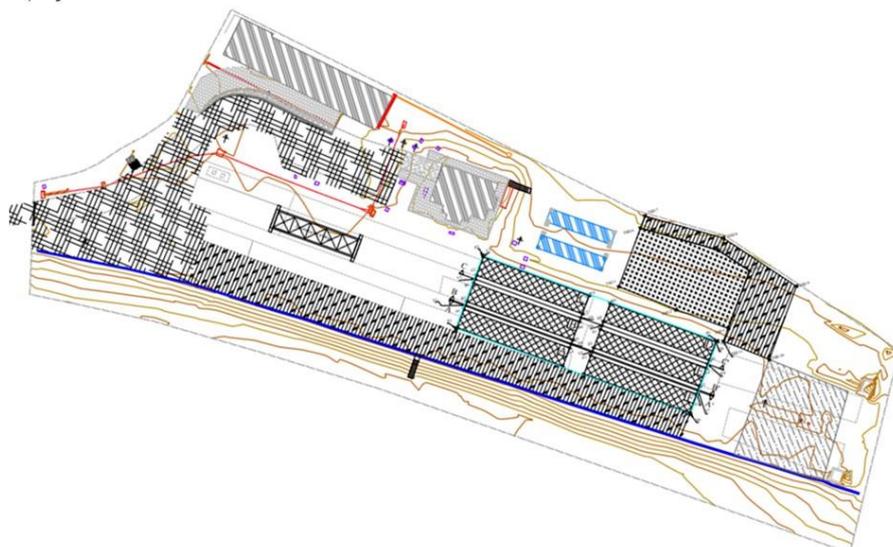
(Apresentação no Sexto Cafezinho Rodoviário: Matheus Matuella)



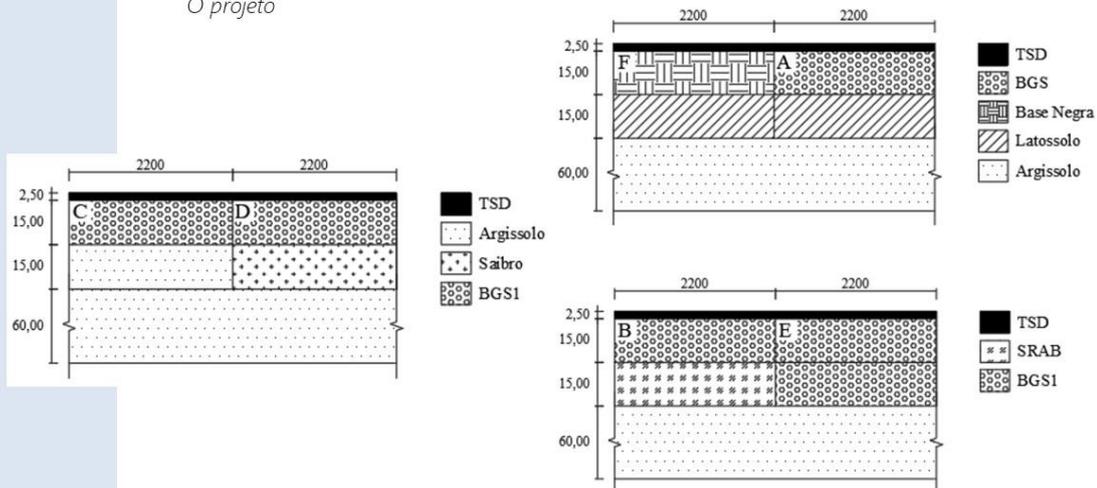
CONSTRUÇÃO DAS NOVAS PISTAS EXPERIMENTAIS



O projeto



O projeto



Mobilização inicial do canteiro de obras

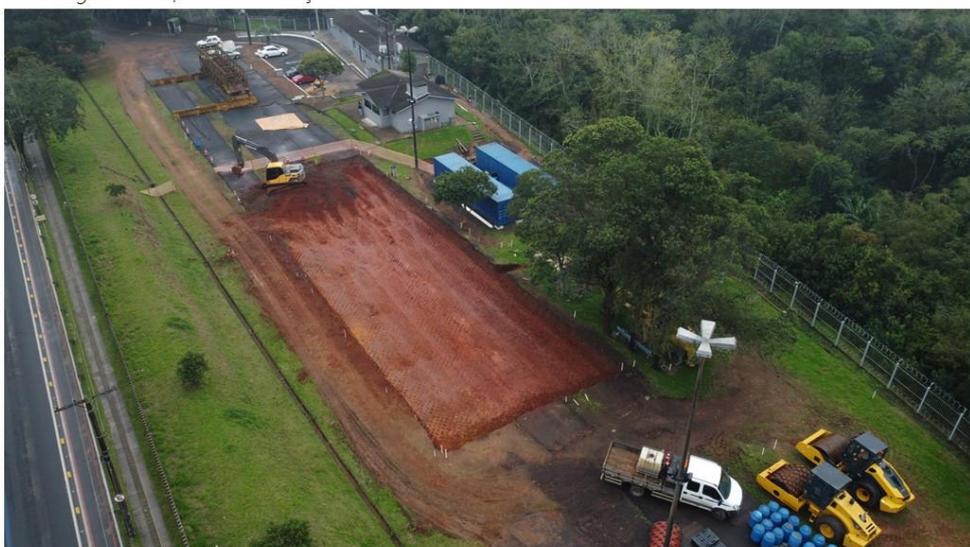


Início da obra - escavação*Início da obra - escavação*

Identificação de áreas com solos problemáticos



Chegando ao fim da escavação



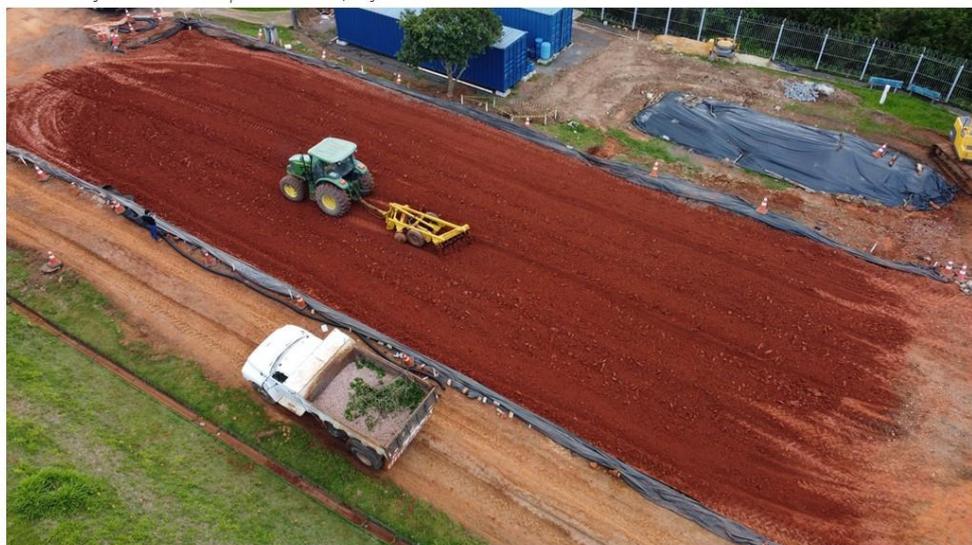
Reparação das áreas com problemas



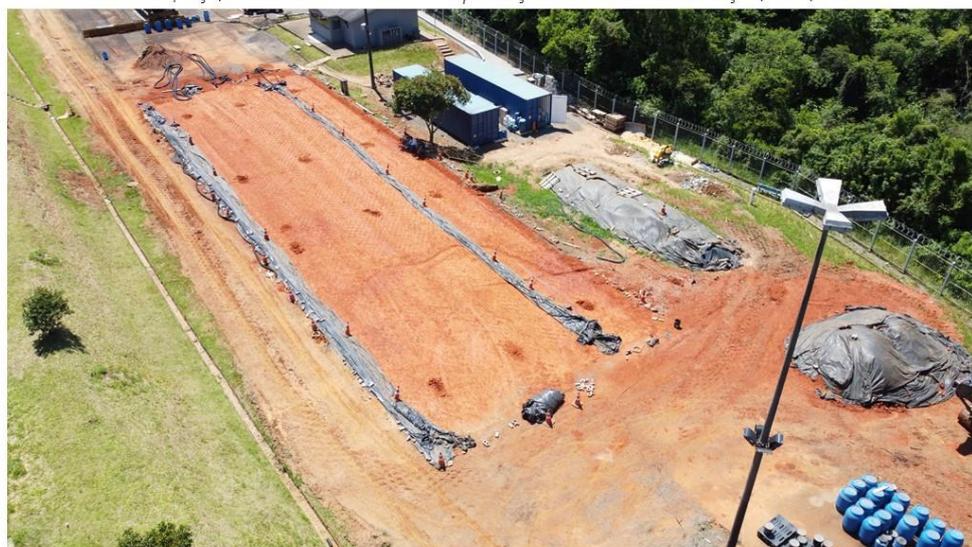
Término do tratamento do subleito, início do reforço



Avanço nas demais partes do reforço



Término do reforço, ensaios de Grau de Compactação – cilindro de cravação, DCP, LWD



Início das camadas de subbase - latossolo



Início das camadas de subbase - saibro



Início das camadas de subbase - argissolo



Tratamento dos materiais para correção do teor de umidade



Início da instalação dos sensores



Início da instalação dos sensores



Continuação das camadas de subbase - SRAB



Continuação das camadas de subbase - BGS



Compactação das bases (BGS) e instalação da rede de drenagem profunda



Imprimação



Compactação base negra



Aplicação de Microrrevestimento asfáltico a frio



Pistas finalizadas

Para fins de levantamento dos afundamentos de trilha de roda, foram definidas 9 seções nas quais está realizada a aquisição de dados: S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8 e Ssensor.

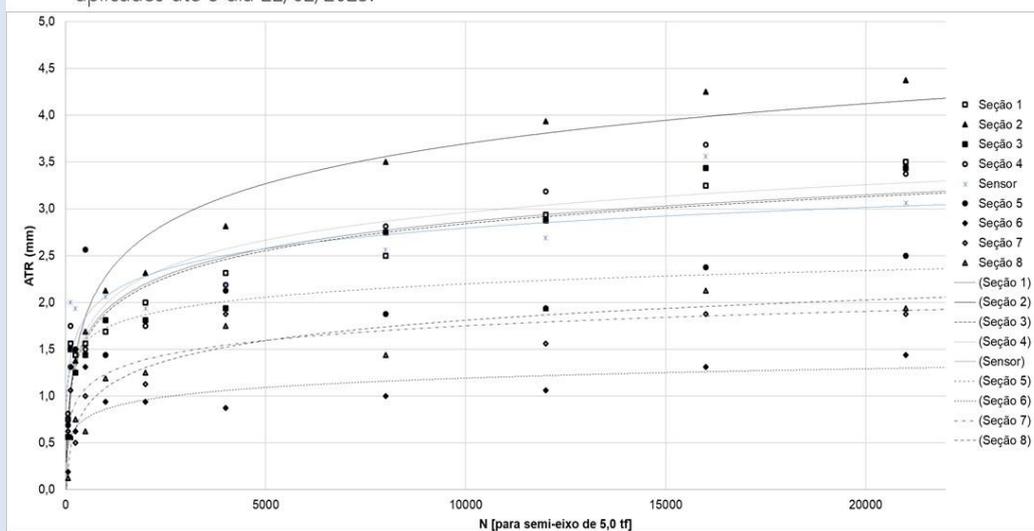
S1 a S8 estão espaçadas 1 metro entre si e a Ssensor é a seção que cruza exatamente sobre o ponto onde foram instalados os sensores, nas camadas inferiores do pavimento.



Para cada seção, estão sendo feitas leituras de ATR de 5 em 5 cm, verificando a distância entre o perfilômetro e a superfície do pavimento, sendo 4 leituras para cada lado, fora da trilha e 16 internas na trilha. Os dados obtidos até o momento são apresentados nas tabelas a seguir.



Abaixo, são apresentadas as médias dos ATR nas trilhas de roda em relação ao numero de ciclos aplicados até o dia 22/02/2023.





ESCOLA DE ENGENHARIA
UFRGS



PPGCI



DECIV



www.ufrgs.br/lapav



Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816.

Bairro Agronomia, CEP 91501-970.

Porto Alegre/RS, Brasil



Fone: +55 51 3308-7049

e-mail: lapav@ufrgs.br



ANEXO XXX

(Apresentação no Sétimo Cafezinho Rodoviário: Afonso Stefanon)



COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE EXTRAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO: ENSAIO DO REFLUXO E ENSAIO DO EXTRATOR SOXHLET

Cafezinho Rodoviário

Autor: Afonso Carlos Stefanon

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito



Justificativa

- Importância para o controle tecnológico das obras;
- Variação entre métodos existentes
- Ensaio de extração
 - Centrífuga – DNER 053/94 (DNER, 1994)
 - Ignição - ASTM D 6307 (ASTM, 2010)
 - Soxhlet – NBR 16208 – Procedimento A (ABNT, 2013)
 - Refluxo – ASTM D2172 (ASTM, 2010) E DAER/RS-EL 213/01 (DAER, 2001)



- Centrífuga ou Rotarex
 - DNER 053/94 (DNER, 1994)
 - Método mais utilizado segundo Mikhailenko e Baaj (2017)
 - Método simples, rápido e de baixo custo
 - Resultados não confiáveis
 - Não adequado para caracterização do ligante recuperado



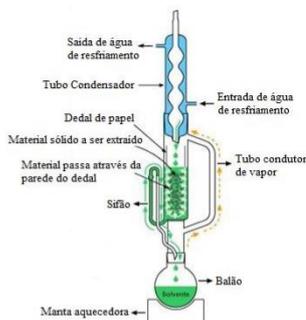
(Pinheiro e Vasconcelos, 2022) 3

- Forno de Ignição
 - ASTM D 6307 (ASTM, 2010)
 - Não utiliza solventes
 - Método mais vantajoso envolvendo aspectos ambientais, de saúde e segurança
 - Não permite análise do ligante extraído



(Pinheiro e Vasconcelos, 2022) 4

- Extrator Soxhlet
 - NBR 16208 – Procedimento A (ABNT, 2013)
 - Simples execução e de baixo custo
 - Alto tempo de execução
 - Altas temperaturas podem alterar propriedades do ligante extraído
 - Riscos de saúde e segurança



(Pinheiro e Vasconcelos, 2022) 5

- Refluxo
 - ASTM D2172 (ASTM, 2010)
 - DAER/RS-EL 213/01 (DAER, 2001)
 - Simples execução e de baixo custo
 - Alto tempo de execução principalmente para RAP ou misturas recicladas
 - Apresenta maior variabilidade de resultados em relação ao método automatizado de extração e por centrifugação
 - Altas temperaturas podem alterar propriedades do ligante extraído
 - Riscos de saúde e segurança



(Pinheiro e Vasconcelos, 2022) 6

Comparar a variabilidade entre os ensaios:

- Refluxo
- Soxhlet

Mistura

- 5,5% de ligante
- CAP 50/70
- Temperatura do agregado 177 °C
- Temperatura do ligante 175 °C



Refluxo

- Cinco amostras
- Confeção de dois cones para cada amostra
- Adicionar cerca de 250g de mistura asfáltica em cada cone
- Adicionar o tricloroetileno no cilindro
- Posicionar os cones no cilindro e posicionar o condensador
- Ligar chapa Aquecedora
- Após clarificação do solvente desligar chapa
- Secar os cones em estufa a 110°C
- Após 24 horas pesar os cones
- Determinar porcentagem de ligante

Observações

- 5 novas amostras foram ensaiadas

Refluxo



Soxhlet

- Cinco amostras
- Confeção de um cartucho para cada amostra
- Adicionar cerca de 500g de mistura asfáltica no cartucho
- Adicionar o tricloroetileno no balão de fundo redondo
- Acoplar o extrator no balão e posicionar o cartucho
- Conectar o condensador e ligar manta elétrica
- Após clarificação do solvente desligar manta
- Secar o cartucho em estufa a 110°C
- Após 24 horas pesar
- Determinar porcentagem de ligante

Soxhlet

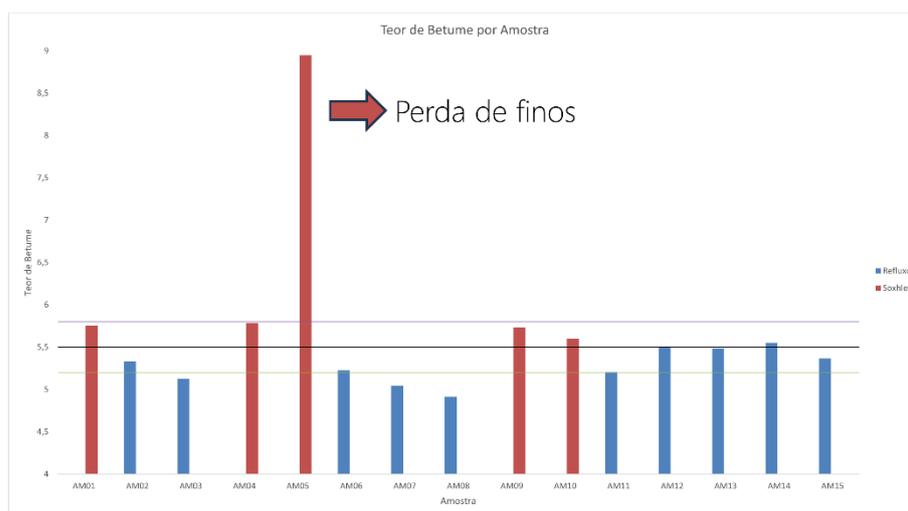


- O teor ideal é de 5,5%, podendo ter uma variabilidade de 0,3%
- Para o refluxo, 2 das 5 amostras iniciais ficaram dentro dessa faixa
- Cinco novas amostras foram ensaiadas para ampliar análises
- Todas 5 novas amostras ensaiadas no refluxo apresentaram resultados satisfatórios
- Para o soxhlet, 4 das 5 amostras iniciais ficaram dentro dessa faixa, sendo a destoante associada a perdas de finos da mistura.
 - Teores 0,22% acima dos 5,5%

Amostra	Teor de ligante (%)			Ensaio
	Individual	Média	Diferença	
AM2-1	5,37	5,33	0,2	Refluxo
AM2-2	5,30			
AM3-1	5,08	5,13	0,37	
AM3-2	5,18			
AM3-1	5,06	5,23	0,27	
AM3-2	5,39			
AM7-1	4,97	5,05	0,45	
AM7-2	5,12			
AM8-1	4,58	4,91	0,59	
AM8-2	5,25			
AM11-1	5,34	5,20	0,30	
AM11-2	5,07			
AM12-1	5,24	5,49	0,01	
AM12-2	5,49			
AM15-1	5,13	5,37	0,13	
AM15-2	5,60			
AM14-1	5,56	5,55	-0,05	
AM14-2	5,55			
AM13-1	5,48	5,48	0,02	
AM13-2	5,49			
AM1	5,76	5,76	-0,26	Soxhlet
AM4	5,78	5,78	-0,28	
AM5	8,95	8,95	-3,45	
AM9	5,73	5,73	-0,23	
AM10	5,60	5,60	-0,10	



Gráfico de Comparação





ESCOLA DE ENGENHARIA
UFRGS



PPGCI



Obrigado pela atenção!

www.ufrgs.br/lapav

Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816,
Bairro Agronomia, CEP 91501-970,
Porto Alegre/RS, Brasil

Fone: +55 51 3308-7049
e-mail: lapav@ufrgs.br



ANEXO XXXI

(Apresentação no sétimo Cafezinho Rodoviário: Giovanna Carvalho)

ANÁLISE COMPARATIVA DO CONTROLE DE QUALIDADE DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO: PROJETO VERSUS EXECUÇÃO

Mistura Asfáltica

Desempenha um papel indispensável na infraestrutura rodoviária

utilizada em revestimentos de pavimentos flexíveis

É capaz de suportar tanto o tráfego intenso e as variações climáticas



Mistura Coletada



Análise Laboratorial



Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência por definição é a relação entre a tensão vertical desviadora e deformação resiliente correspondente, e é obtido para pares de tensões definidos, confinante e desviadora.



Resistência à tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo até fraturar.

Análise Laboratorial



Volumetria

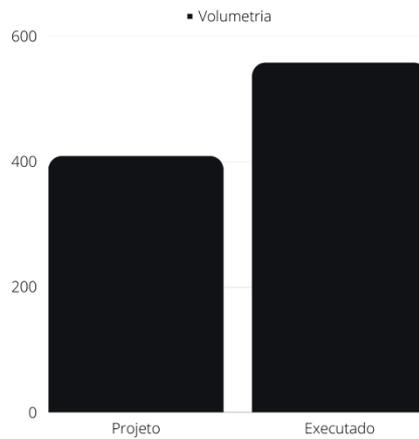
Determina o volume de espaços vazios presentes em uma mistura de asfalto.



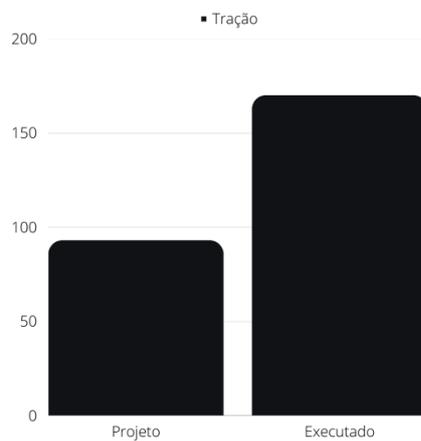
Estabilidade e Fluência

A estabilidade mede a resistência da mistura à deformação plástica, enquanto a fluência examina sua capacidade de suportar cargas constantes sem deformações excessivas ao longo do tempo. Esses testes são fundamentais para garantir a durabilidade e o desempenho adequado das pavimentações asfálticas.

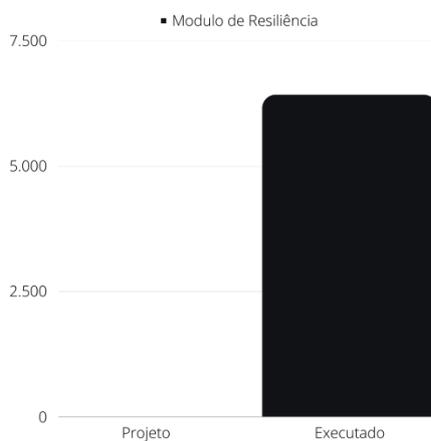
Volumetria



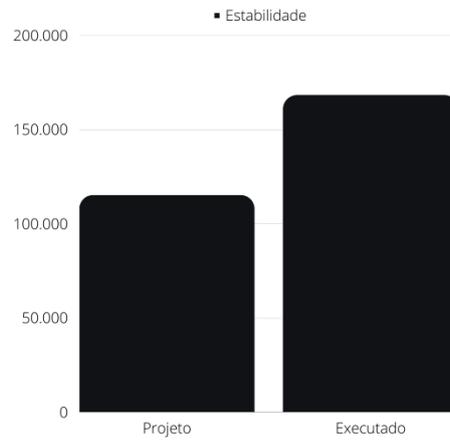
Resistência à tração



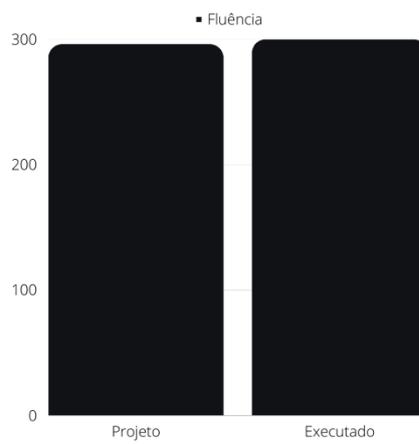
Modulo de Resiliência



Estabilidade



Fluência





A partir das discrepâncias observadas, torna-se evidente a influência direta de fatores específicos, como o teor de ligante e o possível envelhecimento da mistura compactada, nas características e desempenho dos asfaltos.

ANEXO XXXII

(Apresentação no Sétimo Cafezinho Rodoviário: Sophia Hoppe)



Trajetória acadêmica-profissional: experiência PETER e dupla-diplomação



Linha do Tempo

Entrada na UFRGS – início no LAPAV

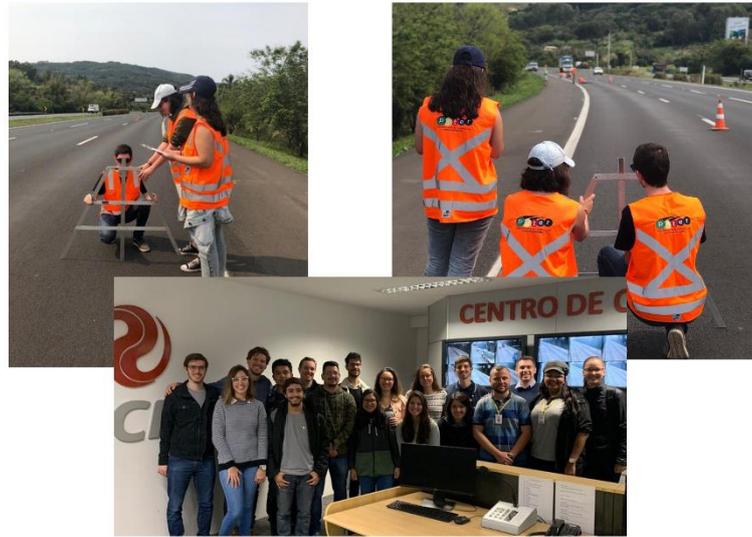
- Ingresso na UFRGS em 2017/2
- Início no LAPAV em junho de 2018
- Peter segundanista



PETER Segundanista

- Auxílio nos ensaios de laboratórios (SETOR 1)
- Cafezinhos Rodoviários
- Saídas de Campo
- PETER com a VIA040





PETER Terceiranista

- Auxílio nos ensaios de laboratórios (SETOR 1 e 2)
- Cafezinhos Rodoviários
- Saídas de Campo
- Apresentação do SIC na UFRGS
- Participação no Portas Abertas









Saída do LAPAV

- Dezembro de 2019
- Oportunidade de estágio no DAER – área de projeto de rodovias
- Participação nos processos seletivos para dupla diplomação – ida em agosto/setembro 2020



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



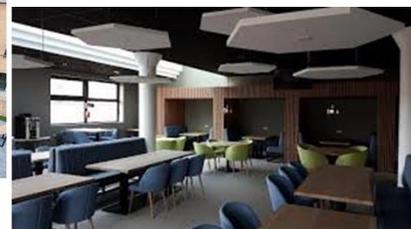
Duplo Diploma – IMT Nord Europe

- Douai – norte da França
- Cidade medieval
- 40 mil habitantes



Duplo Diploma – IMT Nord Europe

- 600 estudantes
- Aulas em blocos de 5 cadeiras
- Pequenas turmas
- Aulas em francês e inglês
- Esporte obrigatório
- Moradia na casa do estudante



Duplo Diploma – IMT Nord Europe

- 2 estágios – de 4 e 6 meses
- Separado das aulas
- Mudança de cidade
- Área de construção e supervisão de obras



Duplo Diploma – IMT Nord Europe

- 2 estágios – de 4 e 6 meses
- Separado das aulas
- Mudança de cidade
- Área de construção e supervisão de obras





Linha do Tempo



Linha do Tempo



Volta pro Brasil – volta pro PETER

- Setembro de 2022
- Início do semestre na UFRGS



PETER 5º ano

- Estágio na CCR ViaSul
- Setor de pavimentos
- Relatórios internos e para ANTT
- Acompanhamento de planilhas das obras de manutenção de pavimentos
- Visitas técnicas – equipe CCR e LAPAV
- Participação nos eventos do laboratório



Formatura e volta pra França

- Formatura 22 de setembro de 2023
- Convite para voltar para França
- Engenheira de Supervisão e controle de projeto e canteiro de obras
- Ida 29 de outubro de 2023



www.ufrgs.br/lapav

Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816,
Bairro Agronomia, CEP 91501-970,
Porto Alegre/RS, Brasil

Fone: +55 51 3308-7049
e-mail: lapav@ufrgs.br

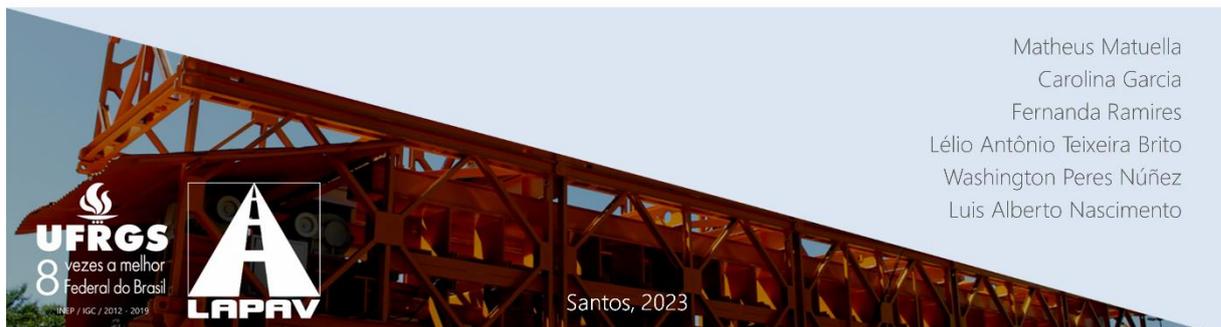


ANEXO XXXIII

(Apresentação no Oitavo Cafezinho Rodoviário: Fernanda Ramires)



ESTUDO LABORATORIAL DAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES EM SOLOS RESIDUAIS CONSIDERANDO NÍVEIS DE TENSÃO ATUANTES EM PAVIMENTOS DELGADOS



JUSTIFICATIVA

- Função do pavimento: resistir e distribuir os esforços provenientes do tráfego.
- Os principais problemas encontrados nos pavimentos são: trincamento por fadiga e afundamento da trilha de roda (ATR).
- Necessidade de estudos sobre os elementos de cada camada da estrutura rodoviária e das propriedades dos solos.
- Importância da análise do comportamento mecânico dos materiais das camadas inferiores de pavimentos delgados.

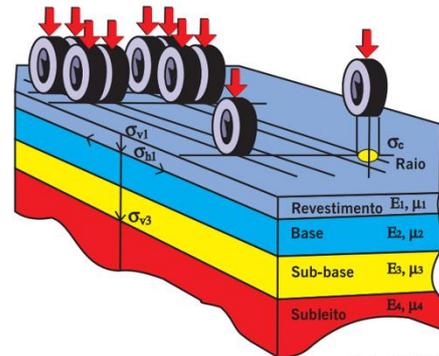


(dos Reis, 2019)



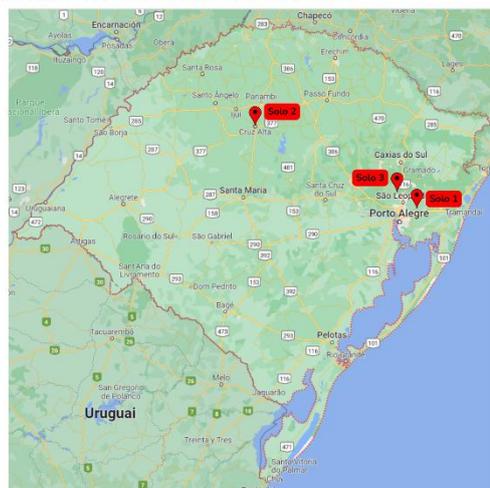
(Bernucci *et al.*, 2008)

- Analisar o desempenho de 3 diferentes solos quanto a deformações irreversíveis em uma condição mais próxima possível da situação real de um pavimento delgado.
- Observar a compatibilidade dos materiais com a função de cada camada da estrutura rodoviária.



(Albernaz, 1997)

- Pontos de coleta: Região Metropolitana de Porto Alegre e Região Noroeste do Rio Grande do Sul.



- Solo 1: argissolo
- Solo 2: latossolo
- Solo 3: solo residual de arenito

- Curva de compactação: ensaio executado conforme a Norma NBR 7182, para a determinação da massa específica aparente seca máxima dos 3 solos e BGS.

Material	Energia	γ_d (g/cm ³)	ω_0 (%)
Solo 1	Normal	1,668	19,6
Solo 1	Intermediária	1,740	17,2
Solo 2	Intermediária	1,650	22,1
Solo 3	Intermediária	1,868	12,6
BGS	Modificada	2,021	7,0



- Comportamento resiliente: ensaio executado conforme norma DNIT 134/2018-ME, para a obtenção do Módulo de Resiliência que permite a determinação dos parâmetros de dimensionamento e avaliação do comportamento de estruturas de pavimentos.

- o Corpos de prova:

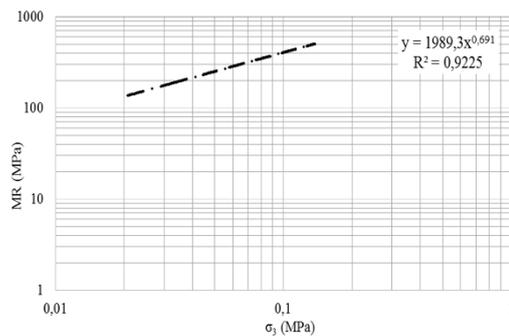
Material	Energia	γ (g/cm ³)	ω (%)	GC (%)
Solo 1	Normal	1,667	19,7	100,2%
Solo 1	Intermediária	1,738	17,2	99,8
Solo 2	Intermediária	1,667	22,1	101,0
Solo 3	Intermediária	1,867	11,9	100,0
BGS	Modificada	2,146	1,90	106,0

- o Ensaio de frasco de areia: ensaio executado conforme norma DNER-ME 092/94, para determinação dos parâmetros da BGS.

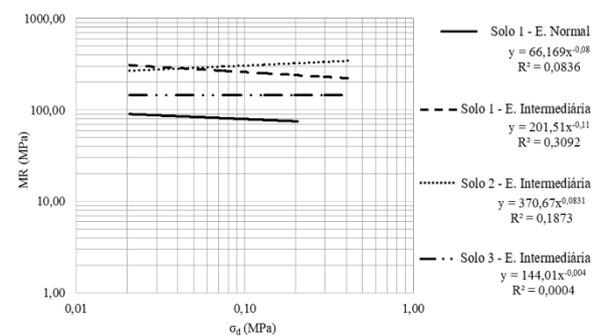
$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2}$$

$$MR = k_1 \times \sigma_d^{k_2}$$

k_1 e k_2 : parâmetros de regressão
 σ_3 : tensão confinante
 σ_d : tensão desvio



Comportamento Resiliente da BGS, na energia modificada, em função da σ_3



Comportamento Resiliente do Solo 1, na energia normal, e dos Solos 1, 2 e 3 em função da σ_d

- Resumo dos parâmetros:

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$$

k_1 , k_2 e k_3 : parâmetros de regressão
 σ_3 : tensão confinante
 σ_d : tensão desvio

Material	Energia	k_1	k_2	k_3	R^2
Solo 1	Normal	175,08	0,49	-0,317	0,793
Solo 1	Intermediária	271,66	0,18	-0,204	0,853
Solo 2	Intermediária	449,56	0,19	-0,067	0,424
Solo 3	Intermediária	195,90	0,22	-0,145	0,244
BGS	Modificada	2088,8	0,55	0,202	0,931

- Avaliação de estruturas de pavimentos com o software AEMC:



- o Solicitação: carga de 5,5 ton., aplicada por um semieixo simples de rodas duplas, simulando um ESRD carregado com 10 ton. e 10% de sobrecarga.
- o Dados para determinação do comportamento dos solos: coeficientes de regressão (k_1 , k_2 e k_3), parâmetros de compactação, pressão de inflação dos pneus de 0,56 MPa e coeficientes de Poisson de 0,35 (base), 0,40 (sub-base) e 0,45 (subleito).



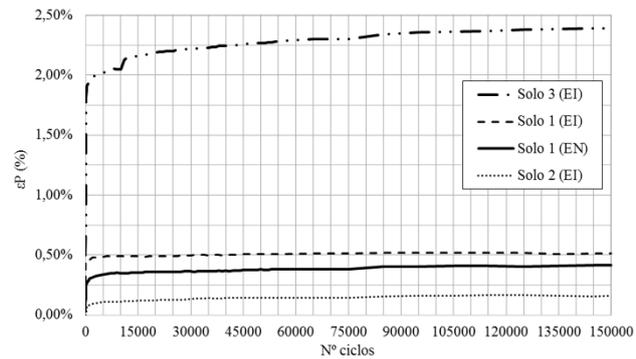
Com a simulação obteve-se o valor médio das tensões principais encontradas no centro da camada de sub-base para os 3 solos – sendo que os pontos avaliados foram embaixo da roda ($x=0$) e pontos localizados entre as rodas ($x=16,2$).

Material	S1 (kPa)	S3 (kPa)
Solo 1	207	18,3
Solo 2	220	17,8
Solo 3	199	19,3

Sendo assim, mesmo divergindo dos pares de tensão indicados pela norma de determinação da deformação permanente (DNIT, 2018), foram arbitrados os valores de 190 kPa para a tensão desvio e de 20 kPa para tensão confinante, a serem utilizados nos ensaios, por serem representativos da situação específica analisada.



- Ensaio de deformação permanente: ensaio executado conforme a norma DNIT 179/2018-IE, em que foram aplicados 50 ciclos de carga iniciais, para acomodação da amostra, e 150.000 ciclos de carga, para o acompanhamento da deformação permanente, a uma frequência de 2 Hz.



- o Taxa de crescimento das deformações:

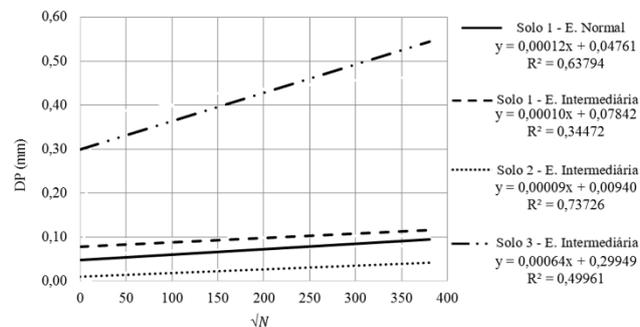
$$y = a + b.x$$

y: deformação permanente

a: deformação de acomodação gerada durante os estágios iniciais do ensaio

b: taxa de crescimento da deformação permanente

x: raiz quadrada do número de ciclos aplicados



- Energia de compactação: comparação do comportamento do Solo 1 quando compactado em diferentes energias (normal e intermediária).
- Taxa de crescimento das deformações: semelhança dos solos 1 e 2 quando comparados com o Solo 3.
- Natureza dos solos: influência na acomodação inicial da amostra e no comportamento resiliente.

Por tanto, foi possível observar: alta taxa de deformação permanente para o solo saprolítico, semelhança no comportamento do argilossolo e latossolo, pouco efeito da energia de compactação na taxa de deformação permanente do argilossolo e destaque do comportamento às deformações permanentes dos solos maduros.



ABNT (2020) ABNT NBR 7182 – Solo - Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

DNIT (1994) DENER-ME 092/94 – Solo - Determinação de massa específica aparente “in situ”, com emprego do fraco de areia – Norma rodoviária - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT (2018a) DNIT 134/2018-ME – Pavimentação - Solos - Determinação módulo de resiliência - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DNIT (2018b) DNIT 179/2018-IE – Pavimentações - Solos - Determinação de deformação permanente - Instrução de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.





www.ufrgs.br/lapav

Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.816,
Bairro Agronomia, CEP 91501-970,
Porto Alegre/RS, Brasil

Fone: +55 51 3308-7049
e-mail: lapav@ufrgs.br



ANEXO XXXIV

(Apresentação no Oitavo Cafezinho Rodoviário: Vítor Teixeira)



CAFEZINHO RODOVIÁRIO:

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO SETOR DE PAVIMENTO NAS CONCESSÕES VIASUL E VIACOSTEIRA

VÍTOR SCHMIDT TEIXEIRA



CONCESSÕES



BR-101/RS:

km 000+000 ao km 087+000

BR-290/RS:

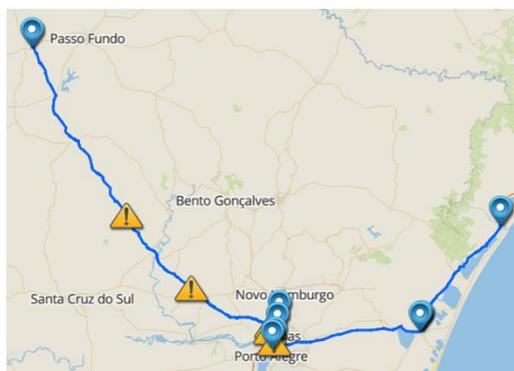
km 000+000 ao km 098+000

BR-386/RS:

km 180+000 ao 446+000

BR-448/RS:

km 000+000 ao 022+000

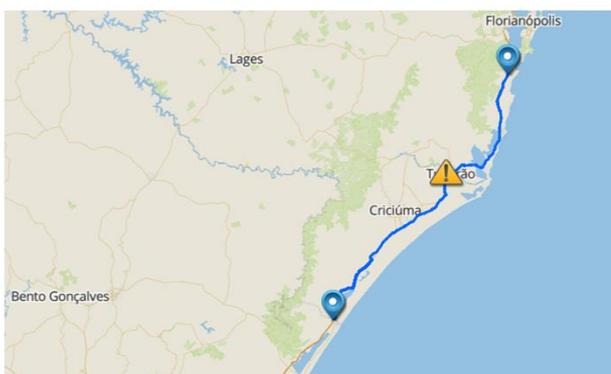


Fonte: <https://www.ccrviasul.com.br/>

CONCESSÕES



BR-101/SC:
km 244+000 ao km 466+000



Fonte: <https://www.ccrviacosteira.com.br/>

PROGRAMA DE EXPLORAÇÃO RODOVIÁRIA - PER

RECUPERAÇÃO:

Conjunto de obras e serviços de recuperação do trecho concedido, imprescindíveis à operação do Sistema Rodoviário e aquelas de cunho estrutural nos pavimentos e melhorias funcionais e operacionais nos demais elementos do Sistema Rodoviário;

MANUTENÇÃO:

Conjunto de obras e serviços de recomposição e aprimoramento das características técnicas e operacionais do Sistema Rodoviário;

- Pavimento
- Sinalização e Elementos de Proteção e Segurança
- Obras-de-Arte Especiais
- Sistema de Drenagem e Obras de Arte Correntes (OACs)
- Terraplenos e estruturas de contenção
- Canteiro Central e Faixa de Domínio
- Implantação e Recuperação das Edificações e Instalações Operacionais
- Sistemas Elétricos e de Iluminação
- Sistemas de Operação e Segurança de Túnel

OBRAS E ATIVIDADES

- Microfresagem
- Fresagem e Recomposição
- Microrrevestimento
- Reforço
- Preenchimento
- Drenos
- Concretagem de placas
- Reparos localizados
- Operação volante



Fresagem e Recomposição



Microrrevestimento



Dreno



Reparo Localizado

ATIVIDADES

1 - PROGRAMAÇÃO DIÁRIA

PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DE OBRAS SERVIÇOS						
LOCAL DO SERVIÇO		TIPO DE OBRA	TIPO DE INTERVENÇÃO	Empreiteira		
Km Inicial	Km Final				Sentido	
RD00VA						
BR-101RS	036+000	036+000	Norte	Reparo Localizado (Equip. E1)	Interação de Faixa	RZF
BR-366RS	265+000	265+000	Norte	Reparo Localizado (Equip. E2)	Interação de Faixa	RZF
BR-250RS	023+000	026+000	Oeste	Reparo Localizado (Equip. SL_V501)	Interação de Faixa	Integração
BR-250RS	045+000	051+000	Oeste	Reparo Localizado (Equip. SL_V502)	Interação de Faixa	Integração
BR-366RS	396+000	392+000	Sul	Reparo Localizado (Equip. SL_V503)	Interação de Faixa	Integração
BR-366RS	288+000	287+000	Sul	Reparo Localizado (Equip. SL_V504)	Interação de Faixa	Integração
BR-111RS	071+000	070+000	Norte	Restauração de Pavimento	Interação de Faixa	Trajado
BR-111RS	016+000	019+000	Sul	Equipe Drenos	Interação de Faixa	Trajado
BR-250RS	035+000	034+000	Leste	Restauração de Pavimento	Interação de Faixa	Trajado
BR-250RS	025+000	024+000	Leste	Sondagem	Interação de Faixa	Trajado
BR-366RS	222+000	221+000	Norte	Restauração de Pavimento	Interação de Faixa	Trajado
BR-366RS	222+000	221+000	Norte	Equipe Drenos	Interação de Faixa	Trajado
BR-366RS	345+000	342+000	Norte	Equipe Drenos	Interação de Faixa	Trajado
BR-366RS	222+000	221+000	Norte	Sondagem	Interação de Faixa	Trajado
BR-250RS				Microrrevestimento	Interação de Faixa	Trajado
BR-366RS				Microrrevestimento	Interação de Faixa	Trajado
BR-366RS	396+000	392+000	Norte	Microrrevestimento	Interação de Faixa	Conservação
BR-250RS	050+000	052+000	Oeste	Pavimento rígido	Interação de Faixa	Ripost
BR-366RS	445+000	443+000	Norte	Restauração de Pavimento	Interação de Faixa	SRS Engenharia
BR-366RS	436+000	437+000	Sul	Equipe Drenos	Interação de Faixa	SRS Engenharia

PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DE OBRAS E SERVIÇOS									
LOCAL DO SERVIÇO		TIPO DE OBRA	TIPO DE INTERVENÇÃO	EMPRESA	HORA INÍCIO	HORA FIM	RESPONSÁVEL		
Sentido	Km Inicial							Km Final	
BR-111RS		Restauração de Pavimento	Sem atividades devido às condições climáticas	JR	07:30	16:30	Mathusa Castro		
BR-111RS		Drenos	Interação de Faixa	JR	07:30	16:30	Mathusa Castro		
BR-111RS	Norte	282+000	280+000	Microrrevestimento	Interação de Faixa	07:30	16:30	Mathusa Castro	
BR-111RS	Sul	350+000	350+000	Microrrevestimento	Interação de Faixa	07:30	16:30	Mathusa Castro	
BR-111RS	Norte	402+000	392+000	Microrrevestimento	Interação de Faixa	07:30	16:30	Mathusa Castro	
BR-111RS	Norte	381+000	380+000	Microrrevestimento	Interação de Faixa	07:30	16:30	Mathusa Castro	
BR-111RS	Sul	383+000	387+000	Microrrevestimento	Interação de Faixa	07:30	16:30	Mathusa Castro	
BR-111RS		Restauração de Pavimento	Sem atividades devido às condições climáticas	SETEP	07:30	16:30	Mathusa Castro		
BR-111RS	Sul/Norte	284+000	320+000	Operação volante com massa FFA	Sem interação	07:30	16:30	Guilherme Pinheiro	
BR-111RS	Sul/Norte	320+000	400+000	Operação volante com massa FFA	Sem interação	07:30	16:30	Guilherme Pinheiro	

ATIVIDADES

2 - REGISTRO DIÁRIO DE OBRAS

Concessionária das Rodovias Integradas do Sul - CCR ViaSul				ANTT AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES	
PAVIMENTO					Dia:
Registro Diário de Atividades Realizadas					21/11/2023
Serviço:	Fresagem e recomp.	Empresa:	Traçado	Clima:	ABERTO
Descrição:					
Fresagem e subsequente reconstituição da camada superior do revestimento asfáltico, como parte dos serviços constituintes da frente de recuperação do pavimento. Em alguns pontos, conforme necessidade de projeto, estão previstos drenos longitudinais e/ou transversais executados					
Locais de execução:					
BR-290/RS Km 094+980 ao 094+000 Leste - Faixas 1 e 2					
Produção:					
124	m ³	CBUQ Aplicado	316	toni	CBUQ Aplicado
			803	m	Restaurados
Registro fotográfico:					
					

Concessionária das Rodovias Integradas do Sul - CCR ViaSul				ANTT AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES	
PAVIMENTO					Dia:
Registro Diário de Atividades Realizadas					21/11/2023
Serviço:	Drenos	Empresa:	SBS Engenharia	Clima:	ABERTO
Descrição:					
Execução de drenos transversais e/ou longitudinais visando a dissipação da água do interior da estrutura do pavimento.					
Locais de execução:					
BR-386/RS Km 442+900 ao 442+855 Norte - Acostamento					
Produção:					
49	m	Dreno executado			
Registro fotográfico:					
					

ATIVIDADES

3 - TERMO DE REGISTRO DE OCORRÊNCIA - TRO

Buracos: 24h
 Afundamentos, escorregamentos,
 deslocamentos: 72h



Fonte: ANTT

ATIVIDADES

3 - TERMO DE REGISTRO DE OCORRÊNCIA - TRO

Buracos: 24h

Afundamentos, escorregamentos,
deslocamentos: 72h

		Concessionária das Rodovias Integradas do Sul - CCR Via Sul	
RESPOSTA AO TERMO DE REGISTRO DE OCORRÊNCIA À Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT/URSC			
Registro da ANTT:			
TRO nº:	30202023	Ocorrência:	Afundamento e Escorregamento
Recebido em:	08/11/2023	Localização:	Rta-101 km 030+540 Norte - Decrescente
Resposta da Concessionária:			
Data da Execução:	09/11/2023		
Solução Adotada:	Fresagem e recomposição localizada		
<p>Em atenção à solicitação recebida, destaca-se que imediatamente esta Concessionária encaminhou as equipes especializadas por esta disciplina para realizarem a verificação do trecho mencionado por esta Agência no documento. Ainda, resalta-se que esta Concessionária está empenhada em realizar as correções ao longo de todo o trecho concedido, alocando materiais e equipamentos diferenciados para tal, visando levar aos usuários de forma célere melhores condições de conforto e segurança ao trafegarem pelas vias concedidas à esta Concessionária.</p>			
Registro fotográfico: 			

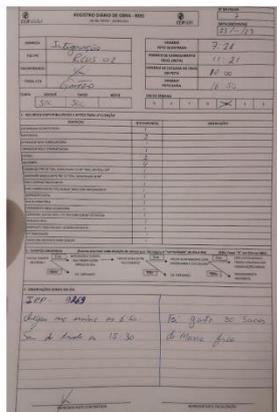
ATIVIDADES

4 - MEDIÇÕES

Realizadas mensalmente
Compreende o dia 11 do mês
anterior ao dia 10 do mês em
questão

Registro Diário de Obras
Registro Diário de Produção

- Serviço
- Rodovia
- Panos
- Quantitativo de material
- Distância de Transporte



REGISTRO DIÁRIO DE OBRA - RDO

Projeto: Integração

Local: Rota 02

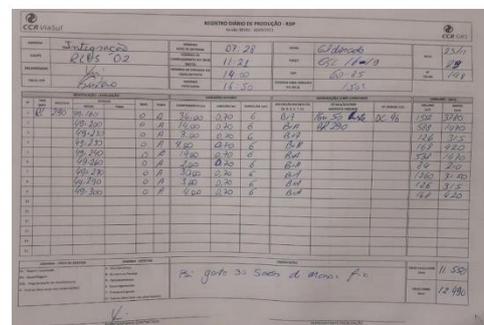
Data: 07/11

Execução: 11/21

Medição: 14/20

Handwritten notes: SEP - 363, depois de iniciar os 2.50, São A. Manh. as 15.30, Pa. Jato 30 Saos d. Mano. f.c.

Registro Diário de Obra



REGISTRO DIÁRIO DE PRODUÇÃO - RDP

Projeto: Integração

Local: Rota 02

Data: 07/28

Execução: 11/21

Medição: 14/20

Nº	Ordem	Descrição	Quantidade	Valor	Valor Unit.	Valor Total
1	01	36.000	0.20	6.72	336.00	
2	02	10.000	0.20	6.72	672.00	
3	03	3.000	0.20	6.72	2016.00	
4	04	18.000	0.20	6.72	12096.00	
5	05	9.000	0.20	6.72	6048.00	
6	06	3.000	0.20	6.72	2016.00	
7	07	3.000	0.20	6.72	2016.00	
8	08	4.000	0.20	6.72	2688.00	
9	09	3.000	0.20	6.72	2016.00	
10	10	4.000	0.20	6.72	2688.00	

Handwritten notes: Pa. Jato 30 Saos d. Mano. f.c.

Registro Diário de Produção

ATIVIDADES

4 - MEDIÇÕES

Escopo de pavimento, sinalização e drenos

Data	Escopo	Bloco	Rodovia	Sentido	Faixa	Km		Km	Extensão (m)	Largura (m)	Espessura 1ª camada (m)	Espessura 2ª camada (m)	Área (m²)	Volume (m³)	Ton
						Inicial	Final								
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	2	023+060	022+899	22,00	161,00	3,90	0,04		627,90	25,12	64,07
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	2	022+879	022+805	22,00	74,00	3,70	0,04		279,80	10,95	27,94
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	2	022+705	022+694	22,00	11,00	3,70	0,04		40,70	1,63	4,15
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	2	022+652	022+621	22,00	11,00	3,70	0,04		40,70	1,63	4,15
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	2	022+600	022+494	22,00	106,00	3,70	0,04		392,20	15,69	40,02
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	1	022+922	022+904	22,00	18,00	3,70	0,04		66,60	2,86	6,80
19/11/23	Fresagem e Recomposição	Bloco 1	BR 101	Norte	1	022+530	022+409	22,00	121,00	3,70	0,04		447,70	17,91	45,68
19/11/23	Preenchimento de Acostamento	Bloco 1	BR 101	Norte	Acost.	022+960	022+908	22,00	52,00	3,00	0,06		156,00	8,58	21,89

3.130.465,37 146.554,27 88.055,05

Medição de pavimento

ATIVIDADES

4 - GESTÃO EXECUTADO

Planilha de reparos localizados

CCR ViaSul														CONTROLE DE EXECUTADO - REPAROS LOCALIZADOS EM PAVIMENTO							
9067														Apurar Dados		TOTAL		53.169,46			
														MÉDIA		6,91		1,71		6,00	
IDENTIFICAÇÃO REPARO				LOCALIZAÇÃO REPARO						DIMENSÕES REPARO				DESCRIÇÃO DO DEFEITO							
CÓDIGO DO DEFEITO	DATA DE EXECUÇÃO	EQUIPE	TIPO SERVIÇO	RODOVIA	ESTACA INICIAL	ESTACA FINAL	ESTACA MÉDIA	SENTIDO	FAIXA	COMPRIMENTO (m)	LARGURA (m)	ESPESSURA (cm)									
9059	31/10/2023	RLVS-03	Reparo Localizado	290	094+410	094+410	094+410	Leste	1	17,00	1,60	6,0	Buraco								
9060	31/10/2023	RLVS-03	Reparo Localizado	290	094+400	094+400	094+400	Leste	1	24,00	1,00	6,0	Buraco								
9061	31/10/2023	RLVS-03	Reparo Localizado	290	094+300	094+300	094+300	Leste	2	5,30	1,10	6,0	Buraco								
9062	31/10/2023	RLVS-04	Reparo Localizado	386	389+430	389+440	389+435	Norte	2	10,30	1,60	6,0	Buraco								
9063	31/10/2023	RLVS-04	Reparo Localizado	386	389+140	389+154	389+147	Norte	2	14,20	2,10	6,0	Afundamento								
9064	31/10/2023	RLVS-04	Reparo Localizado	386	389+100	389+101	389+101	Norte	2	1,80	1,30	6,0	Afundamento								
9065	31/10/2023	RLVS-04	Reparo Localizado	386	389+080	389+088	389+084	Norte	2	8,70	1,30	6,0	Buraco								
9066	31/10/2023	RLVS-04	Reparo Localizado	386	389+070	389+073	389+072	Norte	2	3,50	1,20	6,0	Buraco								
9067	31/10/2023	RLVS-04	Reparo Localizado	386	388+990	388+996	388+993	Norte	2	6,60	1,80	6,0	Afundamento								

ATIVIDADES

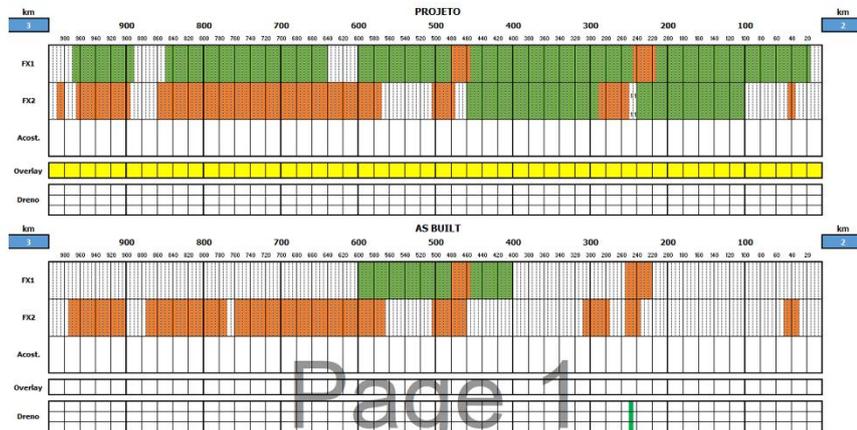
4 - GESTÃO EXECUTADO Planilha de reparos localizados



ATIVIDADES

4 - GESTÃO EXECUTADO: Projetos As Built

- Microfresagem (MF)
- Fresagem e Recomposição 4 cm (FR4)
- Fresagem e Recomposição 6 cm (FR6)
- Reparo Profundo (RP)
- Microrevestimento Asfáltico 8 mm (MRAF)
- Reforço em Concreto Asfáltico (RC)
- GAP Graded (GAP)
- Dreno Longitudinal Profundo (DLP)
- Dreno Longitudinal Raso (DLR)
- Dreno Transversal (DTR)



OBRIGADO!

Vítor Schmidt Teixeira
stvitor1@gmail.com

www.ufrgs.br/lapav

Av. Bento Gonçalves, 9500. Prédio
43.816.
Bairro Agronomia. CEP 91501-970.
Porto Alegre/RS. Brasil

Fone: +55 51 3308-7049
e-mail: lapav@ufrgs.br



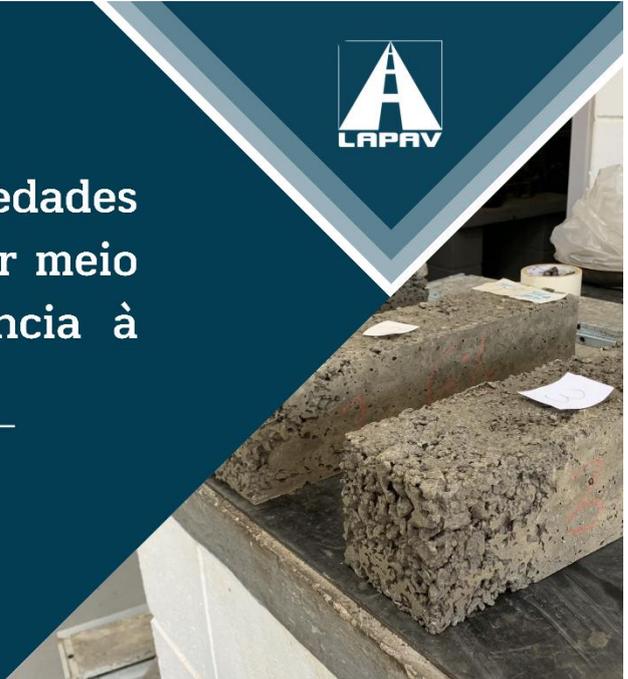
ANEXO XXXV

(Apresentação no Oitavo Cafezinho Rodoviário: Júlia Lenzi)



Análise de propriedades mecânicas da BGTC por meio de ensaios de resistência à tração na flexão

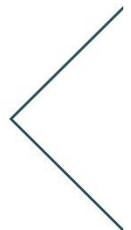
JÚLIA LENZI CARDOSO



Brita Graduada Tratada com Cimento

2

Consiste na associação de agregado mineral, cimento Portland, água e aditivos, ocasionalmente.



Primeiros Passos

DEFINIÇÕES

- Traço utilizado;
- Quantidade de teores de cimento;
- Cálculo do número de vigotas por teor.

TESTE

- Moldagem de uma vigota teste, com teor de 3%, com o propósito de testar o método de compactação por vibratório;
- Ensaios teste na MTS.

ENSAIOS

- 3 vigotas de cada teor;
- Rompimento aos 28 dias, com cura em câmara úmida.

3

Traços utilizados

3% cimento

- 10380g de brita graduada simples;
- 311g de cimento Portland;
- 668g de água

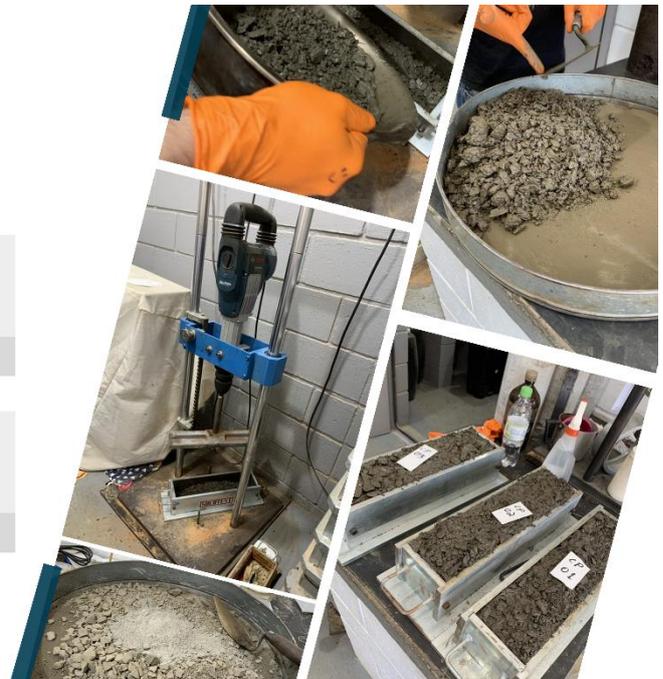
Total: 11359g

6% cimento

- 10380g de brita graduada simples;
- 623g de cimento Portland;
- 688g de água

Valor: 11690g

4



Etapas de moldagem

- 1** Misturar os materiais, a fim de torná-los homogêneos;
- 2** Dividir o material em 3 partes iguais;
- 3** Inserir a primeira parte na forma, e em seguida vibrar para compactar por 30s. Repetir este processo 3x;
- 4** Retirar amostras do material para conferir a umidade da mistura.



5

Vigota 1 - 3% cimento	
Data: 15/09/2023	
Cápsula 1 - C23	
Peso úmido	395,8 g
Peso seco	382,4 g
Peso cápsula	110,1 g
Umidade	4,921 %
Cápsula 2 - C22	
Peso úmido	404,6 g
Peso seco	389,6 g
Peso cápsula	118,1 g
Umidade	5,525 %
Média	5,223 %

Vigota 2 - 3% cimento	
Data: 15/09/2023	
Cápsula 1 - C11	
Peso úmido	282,5 g
Peso seco	271,9 g
Peso cápsula	94,1 g
Umidade	5,962 %
Cápsula 2 - C03	
Peso úmido	362,6 g
Peso seco	350 g
Peso cápsula	126,2 g
Umidade	5,63 %
Média	5,796 %

Vigota 3 - 3% cimento	
Data: 15/09/2023	
Cápsula 1 - C10	
Peso úmido	289,1 g
Peso seco	278,2 g
Peso cápsula	111,4 g
Umidade	6,535 %
Cápsula 2 - C16	
Peso úmido	326,3 g
Peso seco	313,6 g
Peso cápsula	121,7 g
Umidade	6,618 %
Média	6,576 %

Vigota 1 - 6% cimento	
Data: 03/10/2023	
Cápsula 1 - C40	
Peso úmido	267,9 g
Peso seco	258 g
Peso cápsula	83,3 g
Umidade	5,667 %
Cápsula 2 - C19	
Peso úmido	337,7 g
Peso seco	325,7 g
Peso cápsula	112 g
Umidade	5,615 %
Média	5,641 %

Vigota 2 - 6% cimento	
Data: 03/10/2023	
Cápsula 1 - C20	
Peso úmido	320,3 g
Peso seco	308,7 g
Peso cápsula	96,7 g
Umidade	5,472 %
Cápsula 2 - C02	
Peso úmido	465 g
Peso seco	449 g
Peso cápsula	117,2 g
Umidade	4,822 %
Média	5,147 %

Vigota 3 - 6% cimento	
Data: 03/10/2023	
Cápsula 1 - C18	
Peso úmido	440,4 g
Peso seco	425,2 g
Peso cápsula	127,7 g
Umidade	5,109 %
Cápsula 2 - C21	
Peso úmido	461,9 g
Peso seco	444,3 g
Peso cápsula	122,6 g
Umidade	5,471 %
Média	5,29 %

Dados de Umidade

6

Desmoldagem e Tempo de Cura

- Após moldagem, vigotas foram ensacadas;
- Tempo de cura de 28 dias em câmara úmida



**Ensaio de
resistência à tração
na flexão: 4 pontos**

Configuração do ensaio



Carga aplicada: 2,3kN/min

Resultados - 3% cemento



VIGOTA 1
RTF = 0,86 MPa



VIGOTA 2
RTF = 0,97 MPa



VIGOTA 3
RTF = 0,84 MPa

11

Resultados - 6% cemento



VIGOTA 1
RTF = 2,29 MPa



VIGOTA 2
RTF = 1,99 MPa



VIGOTA 3
RTF = 2,61 MPa

12

Dados de Umidade

Moldagem: 15/09/2023 Rompimento: 13/10/2023 Idade: 28	Moldagem: 15/09/2023 Rompimento: 13/10/2023 Idade: 28	Moldagem: 15/09/2023 Rompimento: 13/10/2023 Idade: 28																								
<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Vigota 1 - 3% cimento</th></tr></thead><tbody><tr><td>Peso úmido</td><td>10039,4 g</td></tr><tr><td>Peso seco</td><td>9523,6 g</td></tr><tr><td>Umidade</td><td>5,416 %</td></tr></tbody></table>	Vigota 1 - 3% cimento		Peso úmido	10039,4 g	Peso seco	9523,6 g	Umidade	5,416 %	<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Vigota 2 - 3% cimento</th></tr></thead><tbody><tr><td>Peso úmido</td><td>10502,2 g</td></tr><tr><td>Peso seco</td><td>9958,2 g</td></tr><tr><td>Umidade</td><td>5,463 %</td></tr></tbody></table>	Vigota 2 - 3% cimento		Peso úmido	10502,2 g	Peso seco	9958,2 g	Umidade	5,463 %	<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Vigota 3 - 3% cimento</th></tr></thead><tbody><tr><td>Peso úmido</td><td>10025,4 g</td></tr><tr><td>Peso seco</td><td>9514,1 g</td></tr><tr><td>Umidade</td><td>5,374 %</td></tr></tbody></table>	Vigota 3 - 3% cimento		Peso úmido	10025,4 g	Peso seco	9514,1 g	Umidade	5,374 %
Vigota 1 - 3% cimento																										
Peso úmido	10039,4 g																									
Peso seco	9523,6 g																									
Umidade	5,416 %																									
Vigota 2 - 3% cimento																										
Peso úmido	10502,2 g																									
Peso seco	9958,2 g																									
Umidade	5,463 %																									
Vigota 3 - 3% cimento																										
Peso úmido	10025,4 g																									
Peso seco	9514,1 g																									
Umidade	5,374 %																									
Moldagem: 03/10/2023 Rompimento: 01/11/2023 Idade: 29	Moldagem: 03/10/2023 Rompimento: 01/11/2023 Idade: 29	Moldagem: 03/10/2023 Rompimento: 01/11/2023 Idade: 29																								
<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Vigota 1 - 6% cimento</th></tr></thead><tbody><tr><td>Peso úmido</td><td>10306,8 g</td></tr><tr><td>Peso seco</td><td>9790,7 g</td></tr><tr><td>Umidade</td><td>5,271 %</td></tr></tbody></table>	Vigota 1 - 6% cimento		Peso úmido	10306,8 g	Peso seco	9790,7 g	Umidade	5,271 %	<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Vigota 2 - 6% cimento</th></tr></thead><tbody><tr><td>Peso úmido</td><td>10185,4 g</td></tr><tr><td>Peso seco</td><td>9702,9 g</td></tr><tr><td>Umidade</td><td>4,973 %</td></tr></tbody></table>	Vigota 2 - 6% cimento		Peso úmido	10185,4 g	Peso seco	9702,9 g	Umidade	4,973 %	<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Vigota 3 - 6% cimento</th></tr></thead><tbody><tr><td>Peso úmido</td><td>10212,8 g</td></tr><tr><td>Peso seco</td><td>9727,4 g</td></tr><tr><td>Umidade</td><td>4,990 %</td></tr></tbody></table>	Vigota 3 - 6% cimento		Peso úmido	10212,8 g	Peso seco	9727,4 g	Umidade	4,990 %
Vigota 1 - 6% cimento																										
Peso úmido	10306,8 g																									
Peso seco	9790,7 g																									
Umidade	5,271 %																									
Vigota 2 - 6% cimento																										
Peso úmido	10185,4 g																									
Peso seco	9702,9 g																									
Umidade	4,973 %																									
Vigota 3 - 6% cimento																										
Peso úmido	10212,8 g																									
Peso seco	9727,4 g																									
Umidade	4,990 %																									

13

Próximos passos

MEF

Calcular os módulos de elasticidade à flexão de cada vigota;

DIMENSIONAR

Diferentes opções de configuração de pavimento de acordo com os resultados;

TCC

Escrever tudo isso em formato de artigo e apresentar!

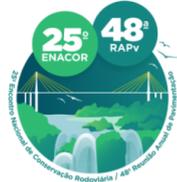
14

OBRIGADA!



ANEXO XXXVI

(Artigo publicado no 25ºENACOR|48ºRAPv: Dorneles et al. (2023))



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

Reciclagem de pavimentos com emulsão asfáltica: efeito da granulometria e da compactação no comportamento resiliente

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

Katlin Modesto Dorneles¹; Lucas Czamanski Meireles¹; Leonardo Lunkes Wagner¹; Thaís Radünz Kleinert¹; Lelio Antônio Teixeira Brito¹; Washington Peres Núñez¹ & Claudio Renato Castro Dias²

RESUMO

A reciclagem asfáltica reutiliza materiais do pavimento para construir novas camadas. Uma técnica é usar o fresado, também conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), obtido ao remover a camada asfáltica deteriorada e incorporá-lo como agregado nas camadas de base ou sub-base. Tal processo tem crescido no Brasil devido a vantagens técnicas, econômicas e ambientais. No entanto, algumas dúvidas persistem, como a consideração da granulometria do fresado e o método de compactação em laboratório. Dessa forma, o objetivo do trabalho consiste em avaliar o efeito da granulometria e do tipo de compactação no comportamento resiliente de misturas recicladas com emulsão asfáltica. Foram estudadas duas misturas de fresado, agregados virgens e emulsão, considerando nas curvas granulométricas o agregado do fresado após a extração do ligante e sem a extração (*black rock*), ambas dentro da faixa granulométrica adequada. As misturas foram compactadas usando energia Proctor Modificada, com dois métodos: vibratório e dinâmico (soquete). Após a compactação, foram realizados ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência, conforme o Método de Ensaio 134 (DNIT, 2018). Os resultados mostraram que a compactação dinâmica foi mais eficiente do que a vibratória, alcançando maior grau de compactação e, conseqüentemente, valores mais altos de módulo de resiliência. Também se verificou que há efeito na forma de consideração da granulometria do RAP, de modo que as amostras considerando o RAP sem extração do ligante asfáltico, ou seja, *black rock*, apresentaram melhores resultados, comportamento que pode estar relacionado à densificação da mistura.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem de pavimentos; BSM; Módulo de resiliência; Compactação; Granulometria

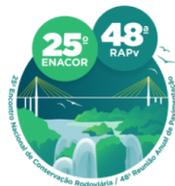
ABSTRACT

Asphalt recycling reuses pavement materials to construct new layers. One technique involves using milled asphalt, also known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), obtained by removing the deteriorated asphalt layer and incorporating it as an aggregate in the base or sub-base layers. This process has been growing in Brazil due to its technical, economic, and environmental advantages. However, some doubts persist, such as considering the gradation of the RAP and the laboratory compaction method. In this way, the objective of this study is to evaluate the effect of gradation and compaction type on the resilient behavior of recycled mixtures with asphalt emulsion. Two mixtures of RAP, virgin aggregates, and emulsion were studied, considering the difference in gradation of the RAP, all within the appropriate gradation range. The mixtures were compacted using Modified Proctor energy, with two methods: vibratory and dynamic (rammer). After compaction, triaxial resilience modulus tests were conducted following Test Method 134 (DNIT, 2018). The results showed that dynamic compaction was more efficient than vibratory compaction, achieving a higher degree of compaction and consequently higher values of resilience modulus. It was also observed that the consideration of RAP gradation had an effect, with samples considering RAP without asphalt binder extraction (*black rock*) showing better results, which may be related to the mixture density.

KEY WORDS: Pavement recycling; BSM; Resilience modulus; Compaction; Gradation.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e-mail: katlinmodestodorneles@gmail.com; czamanskimeireles@hotmail.com.br; leonardo.lunkes@ufrgs.br; thais.kleinert@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br; washington.nunez@ufrgs.br;

² Grupo Ecorodovias, e-mail: claudio.dias@ecorodovias.com.br



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A crescente conscientização ambiental e a busca por redução de custos em projetos têm impulsionado pesquisas e o desenvolvimento de novos materiais no contexto do reaproveitamento de materiais. A reciclagem de pavimento não é uma técnica nova. No entanto, técnicas de recuperação estrutural, considerando a reincorporação do fresado asfáltico (RAP - *reclaimed asphalt pavement*), a adição de agregados virgens e a estabilização com emulsão, ainda carece de estudos e compreensão.

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de reabilitação de rodovias que visa reutilizar materiais envelhecidos, incorporando-os em novas misturas, com ou sem o uso de agentes rejuvenescedores, agregados para correção granulométrica e aditivos como cimento, cal ou outros produtos químicos (BERNUCCI et al., 2022; FEDRIGO, 2015). A utilização desses materiais tem sido cada vez mais demandada devido à sua versatilidade em termos de características mecânicas. No entanto, existe uma escassez de normas e análises que investiguem o comportamento do material, especialmente em relação aos diferentes tipos de granulometria e o comportamento resiliente do material.

Manuais para obtenção de parâmetros e dosagem como TG2 (SABITA, 2020), Reciclagem à Frio (WIRTGEN GROUP, 2012), dosagem FDR - *Full Depth Reclamation* (ARRA, 2018), já trazem diversos conceitos para a utilização de materiais estabilizados com emulsão. Entretanto, deve haver uma maior compreensão do comportamento resiliente desses materiais, uma vez que o módulo de resiliência (MR) é um dos parâmetros para dimensionamento pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) e não é considerado em nenhum dos manuais anteriormente citados.

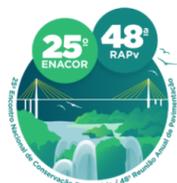
Desta forma, o presente trabalho buscou avaliar o comportamento resiliente de materiais reciclados, oriundos de misturas RAP mais agregados virgens, estabilizados com emulsão asfáltica, com duas considerações de granulometria e dois métodos de compactação.

MATERIAIS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO

Os materiais estabilizados com emulsão fazem parte dos *Bitumen Stabilization Materials* (BSM), ou seja, materiais estabilizados com emulsão. Os BSM são amplamente utilizados em projetos de reabilitação de pavimentos, especialmente quando o desgaste na estrutura do pavimento existente está limitado às camadas superiores (SABITA, 2020; WIRTGEN GROUP, 2012). Assim, a maioria dos projetos de BSM realizados nas últimas duas décadas têm se concentrado na reabilitação e modernização de pavimentos, envolvendo a reciclagem do material *in situ* para reforço e/ou alargamento.

Atualmente, a reciclagem à frio em profundidade total de pavimentos asfálticos antigos usando cimento e emulsão asfáltica é uma das tecnologias de reciclagem mais populares, pois é bastante rápida e relativamente barata, com uso fortemente reduzido de novos materiais (DOLZYCKI; JACZEWSKI; SZYDLOWSKI, 2017). Observa-se que, embora seja uma mistura estabilizada, ainda são identificadas características remanescentes do material granular original, pois a emulsão envolve predominantemente as partículas finas, enquanto as partículas maiores não são revestidas completamente, resultando em uma mistura com emulsão não contínua. Consequentemente, a estabilização com emulsão melhora a sensibilidade à umidade do material original e, diferentemente de outras técnicas de estabilização, não é propensa a apresentar falhas de trincamento por fadiga.

A inclusão de um filer ativo, como cal ou cimento Portland, é frequentemente empregada nas misturas estabilizadas com emulsão. Quando o filer selecionado é o cimento Portland, este material é limitado em 1%, pois quando adicionado em quantidades maiores, o material se torna frágil, perdendo a propriedade flexível (SABITA, 2020). Ainda assim, é importante a adição do filer, uma vez que



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



durante o processo de cura, o cimento Portland reage com a água presente tanto na emulsão quanto adicionado à mistura, colaborando para a quebra da emulsão. Com baixa dosagem de cimento, os produtos de hidratação se dispersam no interior dos filmes de emulsão frescos, aumentando a viscosidade da mistura e melhorando a resistência à deformação permanente (GRAZIANI et al., 2016). A quantidade de cimento deve ser limitada para evitar a diminuição da flexibilidade das misturas (YAN et al., 2017). Materiais estabilizados com emulsão são materiais ligados de forma não contínua, de modo que o comportamento do BSM é semelhante ao de materiais granulares não ligados, contudo apresentam uma coesão melhorada e uma reduzida sensibilidade à umidade (WIRTGEN GROUP, 2012).

A Figura 1 apresenta o comportamento dos materiais estabilizados com emulsão, frente aos demais materiais utilizados na pavimentação. Observa-se que ele apresenta um comportamento intermediário, mesmo contendo cimento e emulsão.

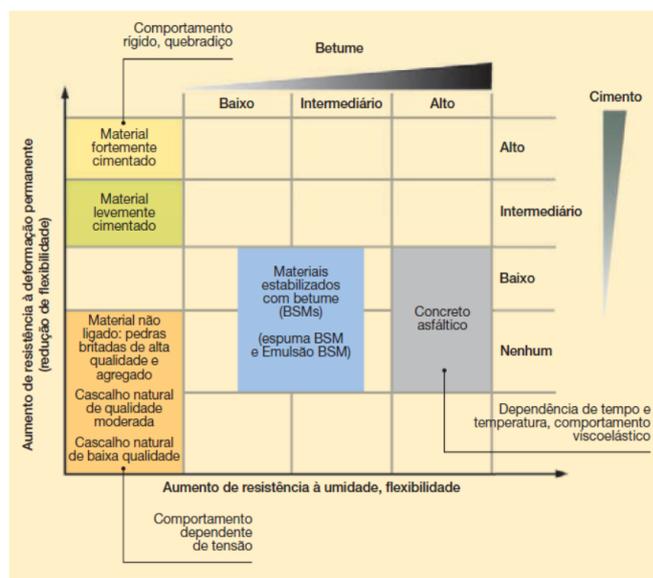
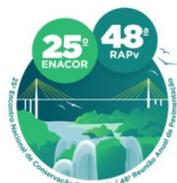


Figura 1: Posicionamento do BSM frente aos demais materiais de pavimentação (WIRTGEN GROUP, 2012)

O sucesso na utilização deste material depende do estudo e seleção de cada componente que será utilizado - o agregado virgem, material fresado, emulsão e filer. Existem diferentes tipos de emulsões disponíveis, tais como as de ruptura rápida, média ou lenta, e a escolha adequada depende de fatores como as condições climáticas, o tipo de agregado utilizado e a condição do pavimento em questão. Ao optar pela emulsão asfáltica apropriada, é possível estabelecer uma sólida ligação entre os materiais reciclados e a nova camada de revestimento, resultando em um pavimento de alta resistência e durabilidade.

A utilização de materiais estabilizados com emulsão está estreitamente associada à reciclagem de pavimentos. Ou seja, consegue-se obter um material com características interessantes no ponto de vista de comportamento de materiais de pavimentação e reintroduzir o RAP em misturas, sem a



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



necessidade de uma mistura a quente. O RAP é obtido por meio da fresagem a frio ou quente da remoção da camada asfáltica desgastada, de forma parcial ou totalmente (NIVEDYA; RAVINDRAN; MURALI KRISHNAN, 2016). Quando o material fresado é misturado com espuma asfáltica ou emulsão e materiais pétreos, o material obtido é conhecido como BSM (SABITA, 2020). No entanto, ainda existem lacunas na consideração da granulometria ao utilizar o RAP. Algumas agências levam em conta a contribuição do ligante envelhecido presente no RAP, mas a maioria delas trata o RAP de forma semelhante a um agregado natural ou pedra britada, ou seja, o ligante presente no material RAP é considerado inerte devido às baixas temperaturas de produção (MONDAL; KUNA, 2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do comportamento resiliente dos materiais BSM, realizou-se a compactação de dois corpos de prova (CP's) para duas granulometrias distintas e duas formas de compactação, totalizando 8 corpos de prova. A Figura 2 apresenta as formas de compactação empregadas neste trabalho, sendo que foram utilizados o martelo vibratório de 23 J, como especificado no TG2 (SABITA, 2020), e o soquete Proctor de 4,54 kg.



a) Martelo vibratório



b) Soquete manual

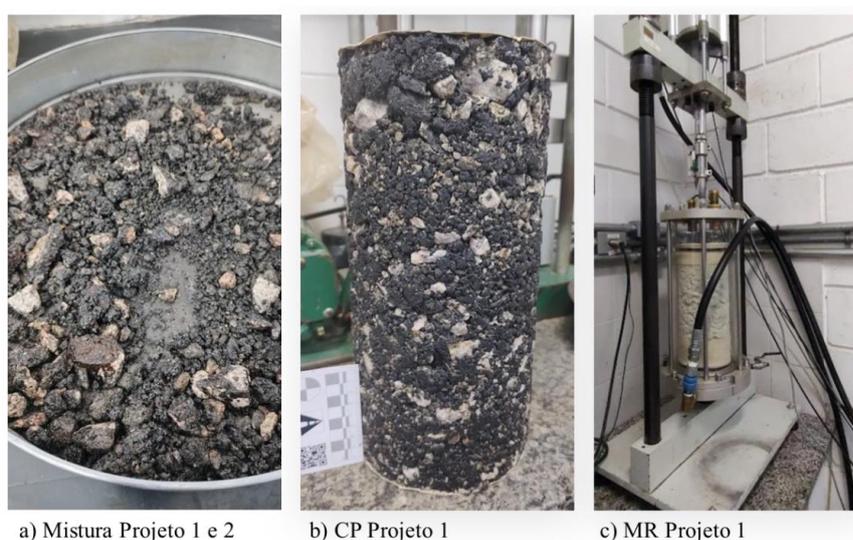
Figura 2: Equipamentos utilizados para compactação das amostras

O primeiro conjunto de corpos de prova utilizou uma dosagem composta por RAP, brita 1 ½", brita ¾" e cimento. Essa configuração será denominada Projeto 1. Salienta-se que a granulometria do RAP foi considerada após a extração do ligante e que a taxa de cimento foi limitada a 1%. A densidade obtida no ensaio de compactação, na energia Proctor modificada, foi de 1,850 g/cm³ e um teor de umidade de 4,8%. Para esse projeto, realizou-se a compactação com martelo vibratório de 23 J.

Para o Projeto 2, foram utilizadas as mesmas composições do Projeto 1, contudo, os corpos de prova foram compactados manualmente com soquete, conforme o método de ensaio 134 (DNIT, 2018). A



Figura 3 apresenta fotos da mistura correspondente aos Projetos 1 e 2; de um CP antes da realização do ensaio triaxial, corresponde ao Projeto 1; e o ensaio de MR triaxial ocorrendo.



a) Mistura Projeto 1 e 2

b) CP Projeto 1

c) MR Projeto 1

Figura 3: Misturas Projetos 1 e 2; CP Projeto 1; ensaio em andamento

O Projeto 3 considerou uma dosagem composta por RAP, brita 1 ½", pó de pedra e cimento. Diferentemente do Projeto 1, o Projeto 3 considerou o RAP como sendo um *black rock*, ou seja, granulometria sem a extração do ligante asfáltico, e a taxa de cimento também foi limitada a 1%. A densidade obtida no ensaio de compactação na energia Proctor modificada, foi de 2,069 g/cm³ e o teor de umidade ótimo de 7,9%. A compactação dos corpos de prova foi realizada com martelo vibratório de 23 J. Para o Projeto 4, utilizou-se a mesma composição do Projeto 3, contudo, os corpos de prova foram compactados manualmente com o soquete.

A Figura 4 apresenta as imagens da mistura dos Projetos 3 e 4; bem como um corpo de prova antes do ensaio, correspondente a um CP do Projeto 3; e a execução dos ensaios de MR triaxial.

Para todos os casos, definiu-se o teor de 2% de emulsão residual do tipo RM-2C, que é uma emulsão de ruptura média. Para melhor compreensão dos dados, a Tabela 1 resume os métodos de compactação e granulometria do RAP utilizados em cada projeto, de modo a informar a codificação adotada neste trabalho para melhor identificação.

Para análise do módulo de resiliência triaxial, foi necessária a compactação de corpos de prova com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo cada corpo de prova compactado em 10 camadas, conforme determina o método de ensaio 134 (DNIT, 2018). Devido ao material analisado, ser estabilizado com emulsão, realizou-se um procedimento de cura, de modo a proporcionar o correto rompimento da emulsão, adaptando o preconizado pelo TG2 (SABITA, 2020), indicado para compactação de corpos de prova para ensaios triaxiais monotônicos. Após a compactação, os corpos de prova permaneceram dentro dos moldes durante a noite, cobertos com um pano úmido; sendo que na manhã seguinte, eles foram removidos dos seus respectivos moldes e identificados.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



a) Mistura Projeto 3 e 4

b) CP Projeto 3

c) MR Projeto 3

Figura 4: Mistura Projetos 3 e 4; CP Projeto 3; ensaio em andamento

Tabela 1: Codificação adotada para cada projeto

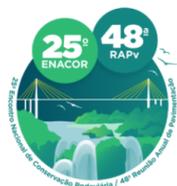
Projeto	Granulometria do RAP	Tipo de compactação	Codificação adotada
1	com extração	vibratória	c_ext_vib
2	com extração	dinâmica	c_ext_din
3	sem extração	vibratória	s_ext_vib
4	sem extração	dinâmica	s_ext_din

Os CP's foram então colocados em estufa a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 8 horas. Finalizado o período, eles foram removidos da estufa, envolvidos por um saco plástico e selados; e novamente colocados na estufa. Após 48 horas eles foram removidos da estufa, sendo realizada a troca do saco por um seco, e permaneceram esfriando a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) por um período mínimo de resfriamento de 12 horas. Destaca-se que as amostras só foram removidas de seus sacos plásticos e pesadas imediatamente antes do ensaio.

Assim, realizou-se o ensaio de módulo de resiliência triaxial conforme o método de ensaio 134 (DNIT, 2018), com 1500 ciclos de condicionamento e os demais ciclos com os 18 pares de tensões estabelecidos na norma.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado de cada ensaio triaxial de cargas repetidas têm-se 18 valores de módulo de resiliência, associados aos pares de tensões aplicados (tensão confinante e desvio). Ao ensaiar dois corpos de



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



prova por projeto, têm-se 36 valores de MR. Dessa forma, se considerou mais representativo trabalhar com modelos que incluíssem todos os resultados de MR para cada projeto.

Ao se aplicarem os dados nos diferentes modelos (em função das tensões confinante, desvio e octaédrica), observou-se que o modelo composto (Equação 1) foi o mais significativo estatisticamente. Isso significa que o módulo de resiliência das misturas ensaiadas é influenciado pelas tensões confinante e desvio simultaneamente.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

Onde:

MR – módulo de resiliência, em MPa;

σ_3 – tensão confinante, em MPa;

σ_d – tensão desvio, em MPa.

Uma vez que a representação gráfica é dificultada em decorrência da necessidade de utilizar gráficos em três dimensões, optou-se por apresentá-los no formato de caixa estreita, mais conhecido como *boxplot*. Os resultados obtidos para as quatro misturas ensaiadas são apresentados na Figura 5.

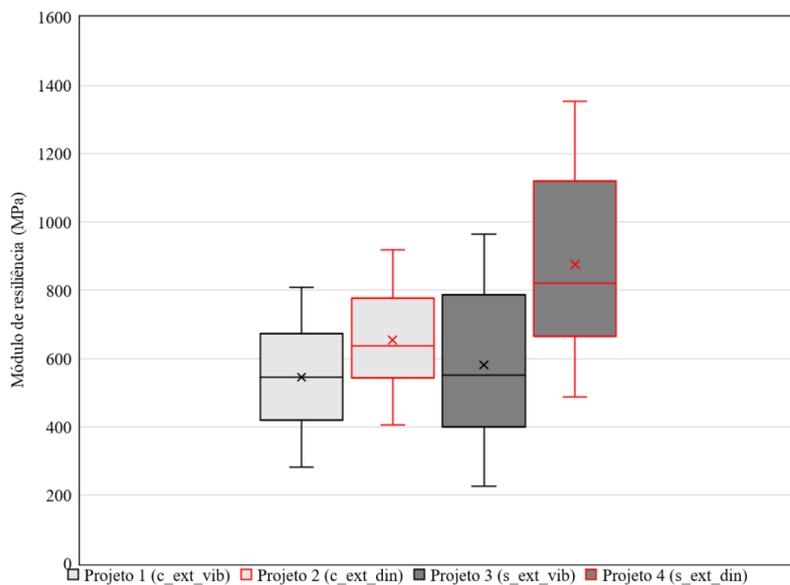
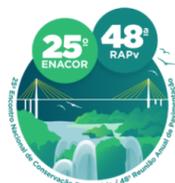


Figura 5: Variação dos módulos de resiliência obtidos para os pares de tensão dos ensaios triaxiais de cargas repetidas considerando as amostras dos projetos estudados



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



Os valores mínimo e máximo de cada resultado representam os limites inferiores e superiores, respectivamente, desconsiderando quaisquer valores atípicos (*outliers*). Entre esses limites e os extremos da caixa estão localizados 25% dos dados obtidos, correspondendo a 50% dos valores que se encontram fora da caixa. O limite inferior é conhecido como primeiro quartil, enquanto o limite superior é denominado terceiro quartil. Os outros 50% dos valores obtidos estão dentro da caixa, sendo a mediana (ou segundo quartil) representada por uma linha horizontal e a média pelo marcador. A Figura 5 traz várias informações acerca dos resultados obtidos, pois além de entender como se dá a variabilidade dos valores de MR para cada projeto, se consegue comparar os resultados obtidos. A primeira consideração a ser feita é que é possível identificar um incremento nos valores de MR quando se realiza a compactação com o uso de soquete (dinâmica) em relação à compactação vibratória. Tal comportamento pode ter ocorrido em função do grau de compactação (GC) alcançado, uma vez que as amostras compactadas de forma dinâmica alcançaram GC superior a 100% e aquelas compactadas por vibração apresentaram GC próximos a 96%. Ou seja, acredita-se que a diferença nos resultados está mais relacionada com a densificação do que com o método de compactação propriamente dito.

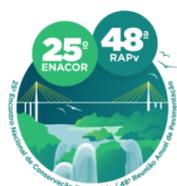
Outro aspecto que pode ser observado no gráfico da Figura 5 é que as amostras consideradas como *black rock*, ou seja, granulometria sem extração do ligante também apresentaram melhores resultados do que aquelas consideradas após a extração do ligante. Neste caso, é importante ressaltar que há uma diferença expressiva nos teores de umidade ótimo, bem como na densidade de projeto. As amostras denominadas aqui por *black rock* (Projetos 3 e 4) foram moldadas com 7,9% de umidade, enquanto as demais (Projetos 1 e 2) com 4,8%. Essa diferença pode ter ocasionado uma redução na lubrificação e consequentemente maior atrito entre as partículas e dificuldade na compactação. Com relação à densidade, as amostras dos Projetos 3 e 4 (2,069 g/cm³) apresentaram maiores valores em comparação às amostras dos Projetos 1 e 2 (1,850 g/cm³), devido a essa se tratar de uma gradação mais aberta, por não levar pó de pedra em sua composição. Pontos esses que influenciaram nos resultados, demonstrando que o Projeto 4 apresenta o melhor comportamento resiliente dentre os estudados. De forma geral, o Projeto 4 apresentou os maiores valores de MR.

Os parâmetros do modelo composto dos projetos estudados, assim como os parâmetros de confiabilidade são apresentados na Tabela 2. Lembra-se que a forma geral do modelo composto foi apresentada na Equação 1.

Tabela 2: Parâmetros do modelo composto de MR e de confiabilidade dos projetos estudados

Projeto	Características	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
1	c_ext_vib	1791	0,40	0,03	0,95
2	c_ext_din	1750	0,34	0,02	0,92
3	s_ext_vib	2726	0,47	0,13	0,98
4	s_ext_din	1793	0,32	0,02	1,00

O parâmetro k₂ explicita a dependência do MR frente à tensão confinante, sendo que todas as amostras apresentaram valores positivos de k₂, evidenciando que o MR aumenta com o confinamento da mistura, como pode ser observado na Figura 6. Destaca-se que esse confinamento é devido ao acréscimo de tensões horizontais geradas pelo tráfego e, em muito menor grau, pelas tensões geostáticas, já que geralmente são muito baixas, pois as camadas de pavimentos não são espessas o suficiente para proporcionar um confinamento considerável.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



O parâmetro k_3 está relacionado à tensão desvio, de modo que, como esperado, à medida que essa tensão aumenta, há aumento nos valores de MR das misturas. Porém, o efeito da tensão desvio é significativamente menor do que da tensão confinante, por isso optou-se por não representá-los graficamente. Ainda, na tabela 2 são apresentados os coeficientes de determinação (R^2), sendo que o R^2 é elevado para todos os projetos estudados, demonstrando a significância dos modelos.

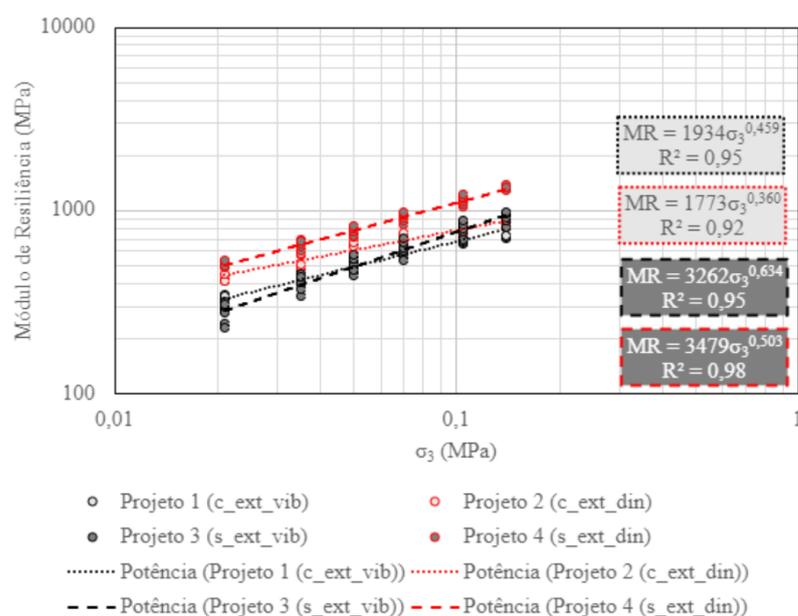
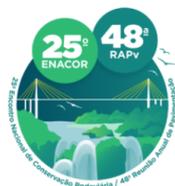


Figura 6: Representação gráfica e equações do modelo módulo de resiliência x tensão confinante

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudado o comportamento resiliente de 4 misturas de RAP, agregados virgens e emulsão asfáltica. Para verificar o efeito de como se considerar a granulometria do RAP, foram realizadas dosagens variando-se a forma de consideração, com ou sem a extração do ligante asfáltico. Além disso, foram estudados dois métodos de compactação das amostras, dinâmico (soquete) e vibratório. Isso resultou em 4 Projetos: Projeto 1 (com extração e compactação vibratória); Projeto 2 (com extração e compactação dinâmica); Projeto 3 (sem extração e compactação vibratória) e Projeto 4 (sem extração e compactação dinâmica).

Com base nos modelos verificados, observou-se que o modelo composto foi o mais significativo estatisticamente para representar o comportamento do módulo de resiliência das misturas ensaiadas, embora o modelo dependente da tensão confinante também tenha apresentado significância elevada. Isso indica que o módulo de resiliência desses materiais é influenciado pelas tensões confinante e desvio simultaneamente. Os parâmetros do modelo composto dos projetos estudados, como k_2 e k_3 , mostram a dependência do módulo de resiliência em relação à tensão confinante e desvio,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



respectivamente. Todos os projetos apresentaram valores positivos de k_2 e k_3 , indicando que o MR aumenta com as variações de tensões da mistura.

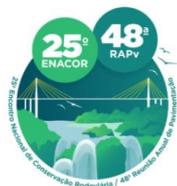
Em relação aos valores de MR obtidos, observou-se que a compactação dinâmica resultou em um melhor comportamento resiliente das misturas, em comparação com a vibratória. Tal resultado pode estar relacionado ao maior grau de compactação alcançado com a compactação dinâmica. As amostras consideradas como *black rock*, ou seja, com granulometria sem a extração do ligante, apresentaram melhores resultados de MR do que aquelas consideradas após a extração do ligante. Essa diferença pode ser atribuída a variações nos teores de umidade ótimo e na densidade de projeto. Desta forma, o Projeto 4 foi o que apresentou o melhor comportamento resiliente entre os estudados, com os maiores valores de MR.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio dos Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT, da Concessionária de Rodovias CCR ViaSul, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. Estende-se os agradecimentos ao Programa Especial de Treinamento em Engenharia Rodoviária (PETER), ao Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que oportunizaram a realização desta pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRA. Recommended Mix Design Guidelines For Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. v. 60137, n. 630, 2018.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 2º ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **NORMA DNIT 134/2018-ME- Pavimentação-Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2018.
- DOLZYCKI, B.; JACZEWSKI, M.; SZYDLOWSKI, C. The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 799–808, 2017.
- FEDRIGO, W. **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND: DEFINIÇÃO DAS BASES PARA UM MÉTODO DE DOSAGEM**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- GRAZIANI, A. et al. Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures. **Materials and Design**, v. 95, p. 358–369, 2016.
- MONDAL, P. G.; KUNA, K. K. Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 326, n. February, p. 126783, 2022.
- NIVEDYA, M. K.; RAVINDRAN, P.; MURALI KRISHNAN, J. Experimental investigations and constitutive modeling of bitumen stabilized mixtures. **International Journal of Engineering Science**, v. 102, p. 36–54, 1 maio 2016. SABITA. **Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)**. 3º ed. [s.l: s.n.], 2020.



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

www.rapvenacor.com.br



WIRTGEN GROUP. **Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen**. [s.l: s.n.]. 2012. Disponível em: <www.wirtgen.com>.

YAN, J. et al. Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 153–159, 2017.

ANEXO XXXVII

(Artigo publicado no 37ºANPET: Dorneles et al. (2023))

**ANÁLISE DE DESEMPENHO À FADIGA DE LIGANTES ASFÁLTICOS
MODIFICADOS POR RESÍDUOS PLÁSTICOS E AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE
TOLERÂNCIA AO TRINCAMENTO DAS MISTURAS MODIFICADAS.**

Katlin Modesto Dorneles ¹

Bethania Machado Correa ¹

Gracieli Bordin Colpo ^{1 2}

Douglas Mocelin ³

Eduarda Fontoura ¹

Lélio Antônio Teixeira Brito ¹

Mônica Regina Garcez ¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul

² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

³ EcoRodovias

RESUMO

O Brasil é o quarto maior produtor de resíduos plásticos do mundo, o que torna importante pesquisas sobre o reaproveitamento desses resíduos em cadeias produtivas. Uma preocupação relacionada ao uso de novos materiais é o dano por fadiga nas camadas asfálticas. O índice de tolerância ao trincamento (CTindex) demonstrou correlação positiva com trincas em campo. O ensaio Ideal-CT (ASTM 8225, 2019) destaca-se pela facilidade de execução na avaliação inicial das dosagens de misturas. Neste estudo, avaliou-se a resistência ao trincamento de misturas com ligantes modificados por resíduos plásticos, usando o CTindex, bem como as correlações com o desempenho dos ligantes no ensaio de LAS (DNIT 439/22 - ME). Os ligantes modificados apresentaram melhores resultados de energia de falha, sugerindo maior resistência ao trincamento. No entanto, devido à maior rigidez, as trincas tendem a se propagar rapidamente. Os valores de módulo de cisalhamento encontrados no ensaio LAS contribuem para essa análise.

ABSTRACT

Brazil is the fourth largest producer of plastic waste in the world, which makes research on the reuse of this waste in productive chains important. One concern related to the use of new materials is fatigue damage in asphalt layers. The cracking tolerance index (CTindex) has shown a positive correlation with field cracks. The Ideal-CT test (ASTM 8225, 2019) stands out for its ease of execution in the initial evaluation of mixture dosages. In this study, the cracking resistance of mixtures with binders modified by plastic waste was evaluated using the CTindex, as well as correlations with binder performance in the LAS test (DNIT 439/22 - ME). The modified binders showed better failure energy results, suggesting greater resistance to cracking. However, due to increased stiffness, cracks tend to propagate rapidly. The shear modulus values obtained in the LAS test contribute to this analysis.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as práticas adotadas na indústria rodoviária nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis vem crescendo, como a utilização de misturas mornas (D'ANGELO et al., 2008; BARROS, 2017; BOHN et al., 2020;), a utilização do fresado em novas misturas asfálticas ou camadas de base e sub-base (GENESSAUX, 2015; HOY et al., 2017). Outra ramificação envolve o aproveitamento de resíduos plásticos em misturas asfálticas, visto que a reintrodução destes resíduos é de preocupação mundial (OECD, 2022).

Segundo Kaza et al. (2018), o Brasil é o quarto maior produtor mundial de resíduos plásticos, com cerca de 11.355.220 milhões de toneladas. A indústria calçadista é uma das principais geradoras de resíduos, com aproximadamente 15% da matéria-prima sendo composta por plásticos e borrachas. Esses números destacam a importância da pesquisa sobre a incorporação

de resíduos, que aborda tanto questões econômicas quanto ambientais.

Diante da crescente necessidade de reduzir o descarte de resíduos poliméricos e promover o reaproveitamento de produtos beneficiados, surge a demanda por pesquisas que possibilitem a incorporação desses resíduos e a sua viabilidade técnica. Uma das preocupações do uso de novos materiais nas misturas asfálticas é em relação ao dano por fadiga e a deformação permanente, principais defeitos que o revestimento apresenta.

Em relação ao dano por fadiga, diversos métodos e critérios têm sido propostos para avaliar a resistência ao trincamento de misturas asfálticas. Conforme Bernucci et.al. (2022): “Entre as geometrias de ensaio de fadiga consideradas (cilindro, trapézio, barras prismáticas ou viga) e, por conseguinte, a forma de carregamento (compressão diametral, tração-compressão, flexão), somente o ensaio por tração-compressão, com carregamento de vaivém, apresenta estados de tensões e de deformações teoricamente homogêneos.”

No entanto, o ensaio de fadiga mais reproduzido no Brasil é por compressão diametral à tensão controlada (DNIT 183/2018), pela grande experiência e base de dados. Além disso, o ensaio por compressão diametral é mais simples de ser realizado comparado ao ensaio por tração-compressão. Ainda assim, a norma DNIT 183 prevê a necessidade de no mínimo 15 corpos de prova (CPs) para a realização do ensaio por compressão diametral, todos devem ser ensaiados até a ruptura, podendo levar muitos dias para se obter os resultados para avaliação de uma mistura asfáltica.

Baseado nisso, é fundamental desenvolver indicadores precisos e confiáveis que permitam uma avaliação rápida e precisa do desempenho de uma mistura asfáltica. Recentemente, o teste *CTindex* (*Cracking Tolerance Index* - Índice de Tolerância ao Trincamento) apresentou boa correlação entre os resultados e dados de teste de desempenho de trincas em campo (Zhou et. al., 2017). A incomplexidade de realização do ensaio somado ao potencial para avaliação de misturas asfálticas, torna o ensaio atrativo para a avaliação inicial em dosagens de misturas.

Considerando o exposto acima, o objetivo deste estudo foi avaliar a resistência ao trincamento de misturas com ligantes modificados por resíduos de plástico, utilizando o ensaio *CTindex*. Além disso, também foi realizado o ensaio de LAS (*Linear Amplitude Sweep*) nos ligantes asfálticos com a finalidade de caracterizar o comportamento à fadiga e verificar possível correlação com a tolerância ao trincamento e a energia de falha.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, onze misturas asfálticas foram analisadas, sendo uma de referência e dez com ligantes modificados com 1 e 2% de teor de cinco polímeros reciclados. Foram utilizados na composição da mistura agregados de origem granítica. Os ensaios realizados seguiram normativas nacionais e estrangeiras, dando preferência as nacionais quando existentes. A seguir são descritos os materiais utilizados, bem como a metodologia e os ensaios realizados.

2.1. Materiais

Para as onze misturas deste estudo foram utilizados os agregados graníticos da Empresa de Mineração Eldorado, localizada no Rio Grande do Sul. A faixa granulométrica adotada

corresponde à Faixa C do DNIT, a qual é amplamente utilizada na pavimentação das rodovias estaduais. A composição dos agregados foi de 25% de brita ¾”, 15% de brita 3/8” e 60% de pó de pedra, conforme a Figura 1.

Os modificadores foram incorporados a um ligante asfáltico CAP 50/70, processo chamado via úmida, antes da mistura final com os agregados e consistem em resíduos do tipo EVA, EVAM, PU, PEAD e PEBD obtidos a partir de empresas que recebem o material oriundo da indústria calçadista. A produção dos ligantes modificados ocorreu através da utilização de um moinho piloto (FONTOURA, 2023, não publicado).

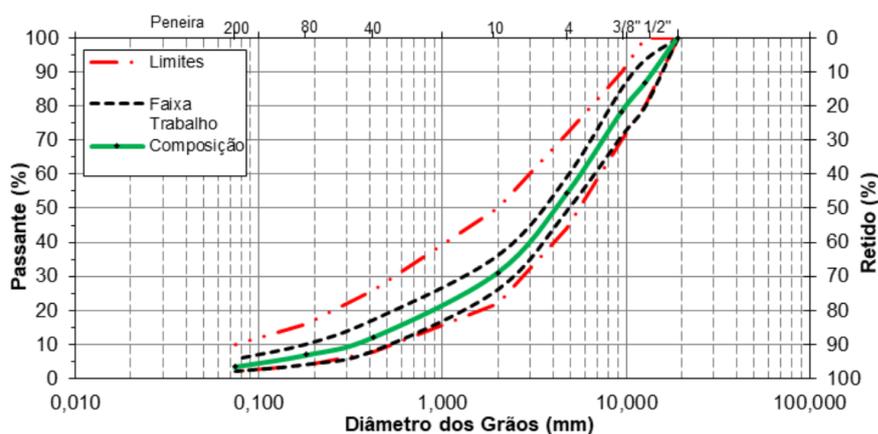


Figura 1: Composição granulométrica das misturas
Fonte: ZAPPE, 2020

Por razão de disponibilidade, o ligante 50/70 utilizado na mistura de referência não foi o lote que recebeu os polímeros modificadores. As características entre os resultados do ligante antes da modificação (FONTOURA, 2023, não publicado), “50/70 base”, e o ligante usado como referência deste estudo, “50/70 Ref.”, podem ser comparadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades CAP 50/70

Propriedades	Método	Especificação	50/70 base	50/70 Ref.
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560:2006	Mín. 46	48	50
Penetração (0,1 mm)	NBR 6576:2007	50 – 70	61	54
Viscosidade Brookfield a 135°C (cP)		Mín. 274	327	312
Viscosidade Brookfield a 150°C (nP)	NBR 15184:2004	Mín. 112	167	161
Viscosidade Brookfield a 177°C (nP)		57 – 285	61	61

Os ensaios de Ponto de amolecimento (NBR 6560:2006), Penetração (NBR 6576:2007), Recuperação elástica (NBR 15086:2006) e Viscosidade Brookfield (NBR 15184:2004) foram realizados para a caracterização dos ligantes modificados. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 2, ligantes modificados com 1% de polímero, e Tabela 3, ligantes modificados com 2% de polímero (FONTOURA, 2023, não publicado). Os resultados encontrados foram comparados aos do ligante antes da modificação (Tabela 1) e aos parâmetros de ligantes

convencionais e modificados (Tabela 4). Observa-se que todos os ligantes apresentaram um aumento do ponto de amolecimento em comparação com o ligante convencional, porém somente o modificado por 2% de PEAD ficou acima do valor mínimo especificado pela norma para ligante modificado 55/75, indicando um aumento no valor de rigidez. Em relação ao ensaio de penetração, todos os ligantes apresentaram valores abaixo das faixas aceitas para ligantes modificados.

Tabela 2: Propriedades ligantes modificados com 1% de polímero

Propriedades	EVA	EM	PU	PEAD	PEBD
Ponto de amolecimento (°C)	51,1	50,9	49,6	54,0	51,3
Penetração (0,1 mm)	39	45	45	35	35
Recuperação elástica (%)	14,5	28	17,5	13,5	13
Viscosidade a 135°C (cP)	565	510	350	492	500
Viscosidade a 150°C (cP)	275	252	180	242	243
Viscosidade a 177°C (cP)	90	90	68	87	85

Tabela 3: Propriedades ligantes modificados com 2% de polímero

Propriedades	EVA	EM	PU	PEAD	PEBD
Ponto de amolecimento (°C)	52,7	53,7	50,5	57,5	54,6
Penetração (0,1 mm)	37	35	45	30	38
Recuperação elástica (%)	16,5	17,5	18	14,5	21,5
Viscosidade a 135°C (cP)	915	625	357	612	515
Viscosidade a 150°C (cP)	420	301	183	296	302
Viscosidade a 177°C (cP)	136	104	75	102	95

Tabela 4: Parâmetros ligante convencional e modificados

Propriedades	50/70	55/75	60/85
Ponto de amolecimento (°C)	Mín. 46	Mín. 55	Mín. 60
Penetração (0,1 mm)	50 – 70	45-70	40-70
Recuperação elástica (%)	-	Mín. 75	Mín. 85
Viscosidade a 135°C (cP)	Mín. 274	Máx. 3000	Máx. 3000
Viscosidade a 150°C (cP)	Mín. 112	Máx. 2000	Máx. 2000
Viscosidade a 177°C (cP)	57 – 285	Máx. 1000	Máx. 1000

2.2. Métodos

2.2.1. Mistura e moldagem

Em todas as misturas foi empregado o teor de 5,6% de ligante, já utilizado em outras dosagens de pesquisas realizadas neste laboratório com esse mesmo agregado (FONTOURA, 2023, não publicado; ZAPPE, 2020). Foram utilizadas as temperaturas mínimas da faixa de trabalhabilidade de mistura e compactação determinados através da curva viscosidade-temperatura, conforme a Tabela 5.

Para a realização do ensaio de *CTindex* foram moldados corpos de prova no compactador giratório, sendo a homogeneização das misturas realizadas previamente em um misturador e seguiu o protocolo de envelhecimento de 2h em estufa na temperatura de compactação antes da moldagem. E seguiu as dimensões especificadas pela norma ASTM D8225, com 150 ± 2 mm de diâmetro, 62 ± 1 mm de altura % (para granulometria que não ultrapassem os 19mm) e 7,0 $\pm 0,5\%$ de volume de vazios.

Tabela 5: Temperaturas de mistura e compactação

Ligantes	Mistura	Compactação
CAP 50/70	150	140
1% PU	149	138
2% PU	150	139
1% EVA	159	148
2%EVA	169	158
1% EM	157	146
2% EM	161	151
1% PEBD	156	146
2% PEBD	160	150
1% PEAD	156	146
2% PEAD	161	150

2.3. Ensaios de desempenho

2.3.1. Caracterização à fadiga dos ligantes asfálticos

Para determinação do desempenho à fadiga dos ligantes, foi realizado o ensaio *LAS* (*Linear Amplitude Sweep*) no reômetro de cisalhamento dinâmico (*DSR*), conforme DNIT 439/22 - ME, com geometria de 8mm e gap de 2mm entre as placas paralelas. Apenas os ligantes 1% PEBD e 1%EVA não foram caracterizados quanto à fadiga devido a sua disponibilidade. Antes de iniciar os ensaios, os ligantes foram envelhecidos na estufa de filme rotativo (*Rolling Thin-film Oven Test - RIFOT*) e então foram ensaiados a uma temperatura de 19°C para que os valores de rigidez ficassem entre 10MPa e 70MPa a 10Hz.

A primeira parte do ensaio consiste na aplicação de um carregamento cisalhante oscilatório, em modo de controle de deformação, com amplitude de deformação constante de 0,1% nas frequências variando de 0,2 até 30Hz. Para cada uma das frequências os valores do módulo de cisalhamento ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) são registrados. Na segunda parte do ensaio, que tem como objetivo determinar as características de dano material, o carregamento cisalhante oscilatório é aplicado a uma frequência de carregamento constante de 10Hz e diferentes amplitudes de deformação. É feita uma rampa linear onde a amplitude de deformação oscilatória do carregamento varia de 0,1% até 30% com 3100 ciclos de carregamento. A cada 10 ciclos de carga são registrados o $|G^*|$, o pico de tensão, o pico de deformação, o tempo e o δ .

O critério de ruptura utilizado neste ensaio é o de máxima pseudoenergia de deformação. Para a análise dos resultados, foi utilizado o modelo de dano contínuo viscoelástico linear (SVECD), a partir das curvas C x S (integridade x dano). Também foi calculado o fator de fadiga do ligante (FFL), que corresponde a área abaixo da curva de fadiga, entre as deformações de 1,25% e 2,50%. O FFL é calculado pela Equação 1.

$$FFL = \frac{\text{Log}(N_{f1,25} \times N_{f2,5})}{2} \times \text{Log}\left(\frac{0,0250}{0,0125}\right) \quad (1)$$

em que, *FFL*: fator de fadiga do ligante a 19 °C;

Log: logaritmo na base 10;

N_{f1,25}: número de ciclos até a ruptura, calculado para uma deformação cisalhante de

1,25%;
 $N_{f2,5}$: número de ciclos até a ruptura, calculado para uma deformação cisalhante de 2,50%.

2.3.2. Índice de tolerância ao trincamento (*CTindex*)

O ensaio *Ideal-CT (Indirect Tensile Asphalt Cracking Test)* é um teste de resistência a tração indireta em CPs cilíndricos, no qual se obtém um índice relacionado ao comportamento das misturas ao trincamento, a partir dos parâmetros obtidos da curva deslocamento versus carga (Figura 2). Quanto maior o valor de *CTindex*, melhor a resistência ao trincamento da mistura. A norma ASTM D8225-19 (2019) especifica que os corpos de prova devem ser condicionados por no mínimo 2 horas a uma temperatura intermediária, indicando a temperatura de 25°C como usual, e o ensaio deve ser realizado a taxa constante de 50 ± 2 mm/minuto.

Os parâmetros utilizados para o cálculo do *CTindex* (Equação 2) de uma mistura são a energia de falha (Equação 3), a inclinação pós-pico do deslocamento de carga curva (m_{75}) e tolerância de deformação a 75% da carga de pico (l_{75}).

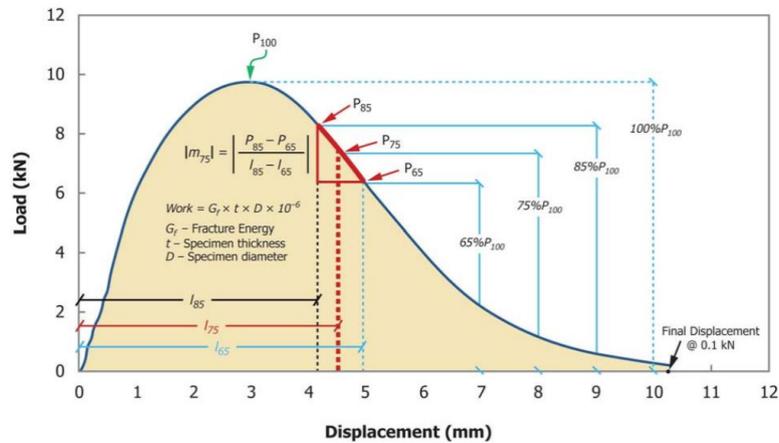


Figura 2: Curva deslocamento vs carga
 Fonte: ASTM, 2019

$$CTi = \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{t}{62} \times 10^6 \quad (2)$$

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6 \quad (3)$$

$$W_f = \sum_{i=1}^{n-1} ((l_{i+1} - l_i) \times P_i + \frac{1}{2} \times (l_{i+1} - l_i) \times (P_{i+1} - P_i)) \quad (4)$$

em que, *CTi*: índice de tolerância ao trincamento;

G_f :	energia de falha [J/m^2];
$ m_{75} $:	valor absoluto da inclinação pós-pico [N/m];
l_{75} :	deslocamento a 75% da carga pós-pico [mm];
D :	diâmetro da amostra [mm];
t :	espessura da amostra [mm];
W_f :	trabalho até a falha [J];
P :	carregamento aplicado [kN];
l :	deslocamento [mm];

Os CPs ensaiados foram condicionados por um período mínimo de 12 horas à temperatura de 25°C e ensaiados na prensa hidráulica, modelo MTS 810 UTM Test System, dentro dos 4 minutos indicados pela normativa. Após os ensaios, foram coletados os dados de tempo, carga e deslocamento e o $CTindex$ foi calculado com auxílio de planilha eletrônica.

3. RESULTADOS

Este item apresenta os resultados obtidos para os ensaios de LAS e $CTindex$, bem como uma análise dos resultados.

3.1. Ensaio de fadiga nos ligantes asfálticos

A avaliação dos ligantes ao dano por fadiga foi realizado através do ensaio LAS. A Figura 3 apresenta as curvas características de dano dos ligantes asfálticos estudados. É possível observar que os ligantes que apresentaram maior acúmulo de dano, e por consequência, maior N_f , foram o 1%PU e o CAP 50/70. Ainda, é possível observar que os ligantes 1%EM e 2%EM apresentaram as curvas mais acentuadas, sendo este primeiro o que apresentou o menor acúmulo de dano.

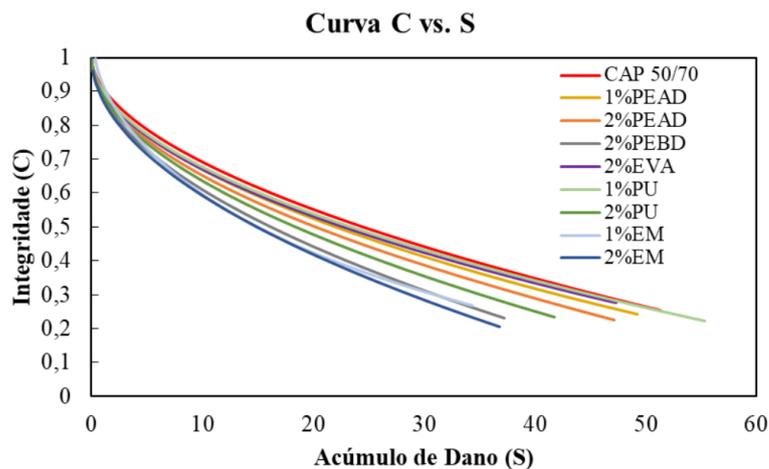


Figura 3: Curva C vs S dos ligantes asfálticos

A Figura 4 apresenta os valores de FFL de forma a permitir uma melhor visualização dos resultados. É possível observar que o CAP 50/70 apresentou menor FFL e que o 2%EVA obteve o maior valor, seguido do ligante 2%EM.

Osmari et al. (2019) classificaram os ligantes do seu estudo a partir dos valores de FFL. Os valores encontrados pelos autores para os ligantes convencionais, CAP 50/70, ficaram entre 1,20 e 1,43. Possebon (2021), em seu estudo, classificou diversos tipos com base nos valores de FFL de ligantes 50/70, estes distribuídos por diferentes refinarias em todo Brasil. A autora encontrou valores que variaram entre 1,36 e 1,85. Para um ligante 60/85, a autora obteve um valor de 1,52. Vestena (2021) obteve um valor próximo a 1,42 para um CAP 50/70, e valores acima de 1,55 para ligantes modificados.

Os ligantes estudados nesta pesquisa apresentaram valores coerentes com os demais ligantes convencionais encontrados na literatura, porém, são valores baixos quando comparados com ligantes modificados por polímeros.

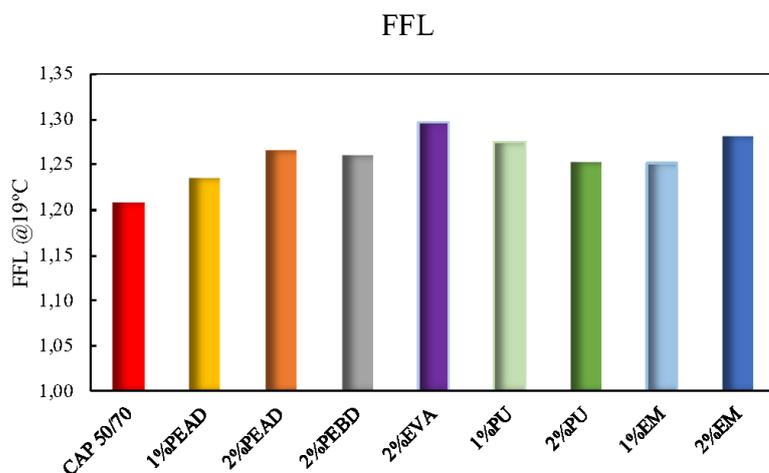


Figura 4: Resultados de FFL encontrados para os ligantes desta pesquisa

3.2. Índice de Tolerância ao Trincamento (*CTindex*)

Os resultados de *Ideal-CT* estão apresentados na Tabela 6, juntamente com os coeficientes de variação (COV). A Tabela também apresenta os resultados dos valores de $|G^*|$ a 10Hz, obtidos do ensaio de LAS a 19°C, e os resultados de FFL encontrado para os ligantes, a fim de facilitar a análise dos resultados.

Em relação aos valores de *CTindex*, observa-se que todas as misturas desse estudo se encontram dentro do intervalo informado em nota pela norma ASTM 8225 (2019), onde consta que os ensaios realizados para a sua elaboração, variaram de 31 a 255. Além disso, os resultados obtidos de *CTindex* ficaram acima de 70, valor indicado como mínimo por Diefenderfer e

Bowers (2019) em um estudo interlaboratorial realizado pelo *Virginia Transportation Research Council* (Estados Unidos), apontando que todas as misturas apresentam tolerância ao trincamento aceitável.

Observa-se que a mistura de referência, CAP 50/70, obteve o melhor resultado de *CTindex*, seguido das misturas com ligante modificado por PU. Porém, ambos apresentaram os valores mais baixos de energia de falha. Em contrapartida, ainda que o ligante composto por 2% de PEAD obteve o maior resultado de energia de falha, manifestou um índice de tolerância ao trincamento baixo, assim como a mistura com 2%EVA. Em relação aos COV, todos ficaram abaixo de 25%, valor limite para considerar boa a repetibilidade do ensaio (Zhou *et al.*, 2016).

Tabela 6: Resultados ensaios LAS e *Ideal-CT*

Ligante	[G*] @19°C, 10Hz [Mpa]	FFL @19°C	Energia de falha [J/m ²]	<i>CTindex</i>	COV [%]
CAP 50/70	21,19	1,21	8585	161	2,4
1% PEAD	25,92	1,24	9928	107	14,6
2% PEAD	32,00	1,27	11796	99	11,9
2%PEBD	27,47	1,26	10811	121	24,0
2%EVA	23,75	1,30	10986	81	18,0
1% PU	21,87	1,28	8345	153	21,8
2% PU	19,94	1,25	8324	135	12,9
1% EM	23,56	1,25	10399	126	19,1
2% EM	24,86	1,28	10543	108	17,5
1%PEBD	-	-	10192	103	2,4
1%EVA	-	-	10284	120	18,6

A energia de falha está relacionada à energia necessária para o material iniciar o processo de trincamento, portanto, ainda que as misturas modificadas apresentem um *CTindex* menor, as energias de falha são em geral superiores à da mistura de referência, sem modificação, com exceção da mistura modificada por PU, que apresenta resultados muito semelhantes à mistura de referência. Na Figura 5, pode-se comparar visualmente a contraposição entre a energia de falha e o *CTindex*.

Lu *et al.* (2023) encontraram um *CTindex* de aproximadamente 400 para uma mistura com 1,5% de PEBD reciclado, enquanto a mistura contendo 2% de PE e PP ultrapassou 500, valores significativamente maiores do que os obtidos anteriormente. Essa diferença pode estar relacionada principalmente aos demais materiais presentes nas misturas, visto que fatores relacionados ao ensaio, como o equipamento e centralização do CP, não são significativos, desde que o carregamento atenda a faixa de carregamento de 47 a 53 mm/minuto, conforme Zhou *et al.* (2022). E, em média, a MTS 810 UTM Test System realizou o ensaio a 49 ±0,3 mm/minuto.

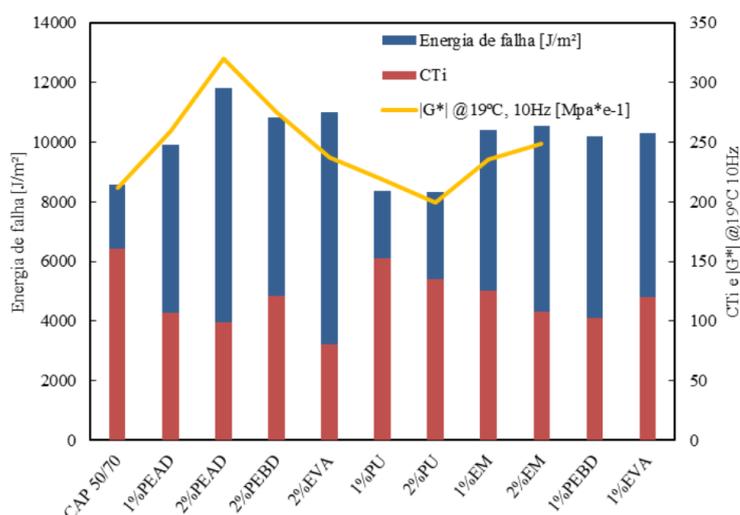


Figura 5: Relação entre Módulo de cisalhamento, Energia de falha e *CTindex*

Vale ressaltar que os agregados utilizados na pesquisa, assim como a composição granulométrica, também influenciam nos resultados. No entanto, é importante evidenciar que ainda são poucos os estudos que abordam o uso de materiais reciclados, e, portanto, não há um valor absoluto estabelecido para essas misturas.

4. CONCLUSÕES

Este estudo buscou avaliar a resistência ao trincamento de misturas com ligantes modificados por resíduos de plástico. Para tal, foram realizados os ensaios de *CTindex* nas misturas asfálticas e os ligantes foram avaliados quanto ao seu desempenho à fadiga através do ensaio *Linear Amplitude Sweep (LAS)*. É importante ressaltar que as análises aqui realizadas são válidas para a composição granulométrica, tipo de agregados e ligantes estudados nesta pesquisa. Com base nos resultados apresentados neste estudo, chegou-se nas seguintes conclusões:

- Devido ao aumento da rigidez dos ligantes modificados, observada pelo ensaio de ponto de amolecimento durante a caracterização, os resultados obtidos pelo teste *Linear Amplitude Sweep (LAS)* mostraram que, no geral, os ligantes com resíduos plásticos apresentam um menor acúmulo de dano quando comparados ao CAP 50/70;
- A partir dos resultados obtidos pelo LAS, foi possível obter o fator de fadiga dos ligantes (FFL), que indicam que a modificação por resíduos plásticos tende a aumentar a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos, apesar de ter diminuído o acúmulo de dano;
- Em relação às misturas asfálticas contendo ligantes modificados, os resultados de *CTindex* indicam menor resistência ao trincamento para as misturas com ligante modificado. Contudo, por ser um ensaio monotônico, o *CTindex* tende a apresentar maiores valores para misturas com menor rigidez. Dessa forma, foram analisados os

valores de rigidez obtidos pelo teste LAS, o que corroborou o comportamento encontrado nos resultados de *CTindex*;

- Os ensaios de Ideal-CT das misturas asfálticas indicam que, apesar de apresentarem um *CTindex* inferior, as misturas contendo ligantes modificados apresentam maior energia de falha até a ruptura. Desta forma, estas misturas se mostram mais resistentes ao trincamento, porém uma vez que o trincamento é iniciado, a evolução das trincas poderá ocorrer de maneira mais rápida;
- Os valores encontrados de energia de falha no ensaio Ideal-CT são coerentes ao observado nos resultados de módulo de cisalhamento complexo e FFL obtidos pelo ensaio LAS, comprovando o aumento da rigidez dos ligantes após a incorporação dos polímeros. É necessário que ensaios de curva mestra sejam conduzidos nos ligantes para melhor caracterizar a rigidez destes;
- Além dos benefícios ambientais, a reciclagem de resíduos plásticos com utilização em ligantes asfálticos se mostra uma solução viável do ponto de vista técnico, pois as misturas modificadas apresentaram um desempenho satisfatório. Mais estudos e ensaios devem ser realizados para caracterizar a rigidez e o desempenho à deformação permanente destas misturas;
- Também deve ser analisado a viabilidade de inserção de maiores teores desses resíduos como forma de melhorar o desempenho desses ligantes e aumentar os benefícios ambientais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio dos Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT, da Concessionária de Rodovias CCR ViaSul, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. Estende-se os agradecimentos ao Programa Especial de Treinamento em Engenharia Rodoviária (PETER), ao Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que oportunizaram a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2019) ASTM D8225: Standard test method for determination of cracking tolerance index of asphalt mixture using the indirect tensile cracking test at intermediate temperature. Philadelphia, USA.
- Barros, L. (2017) M. de. Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas. 2017. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2022) Pavimentação Asfálticas: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2ª edição, 2022. 750 p.
- Bohn, K. A. A., Specht, L. P., Brondani, C., Correa, B. M., Pinheiro, G. dos S., Eidt, K. G., Barboza Junior, V. dos S., Boeira, F. D., & Pereira, D. da S. (2020). Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. TRANSPORTES, 28(1), 18–32. <https://doi.org/10.14295/transportes.v27i4.1740>
- D'Angelo, J. et al. (2008) Warm-Mix Asphalt: European practice. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte – DNIT- Relatório da Rede Nacional Viária. - DNIT-ME 439/2022 - Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio, Brasília, 2022.
- DNIT-ME 183/2018 - Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

- ECOLINK. (2022) Ecolink: Reciclagem: como o asfalto plástico abre caminhos para o futuro? Disponível em: <https://www.ecolinksolutions.com.br/blog/noticias/reciclagem-como-oasfalto-plastico-abre-caminhos-para-o-futuro>.
- Fontoura, E. (2023) Incorporação de resíduos poliméricos em misturas asfálticas: análise técnica e potenciais impactos ambientais. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Não publicado.
- Genesseeaux, M. M. L. (2015). Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- Hoy, M., Rachan, R., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Mirzababaei, M. (2017). Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement – Fly ash geopolymers. *Construction and Building Materials*, v. 144. P. 624-634.
- Mashaan, N., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2021). Laboratory properties of waste PET plastic-modified asphalt mixes. *Recycling*, 6(3).
- OECD (2022), *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*, OECD Publishing, Paris.
- Possebon, E. P. (2021). Advanced characterization of Brazilian bitumens and mixtures. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Vestena, P. M. (2021). Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAFLEX, HIMA e 55/75-e (sbs): caracterização avançada e monitoramento. 273p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Zappe, A. P. S. (2020) Avaliação de diferentes fontes de material fresado com ligantes não convencionais na reciclagem a quente. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Zhou, F., Newcomb, D., Gurganus, C., Banihashemrad, S., Park, E.S., Sakhaeifar, M., and Lytton, R. (2016) Experimental design for field validation of laboratory tests to assess cracking resistance of asphalt mixtures (Final Report). National Cooperative Highway Research Program Project 9-57. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, DC, USA.
- Zhou, F., Im, S. Sun, L., and Scullion, T. (2017) Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mixture Design, Quality Control and Quality Assurance, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Newport Beach, California, USA.
- Zhou, F., Newcomb D., Hu S. (2022). Ruggedness of Laboratory Tests for Asphalt Mixture Cracking Resistance. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The National Academies Press. Washington, DC, USA.

Katlin Modesto Dorneles (katlinmodestodorneles@gmail.com) ¹

Bethania Machado Correa (bethania.machadocorrea@gmail.com) ¹

Gracieli Bordin Colpo (gracieli.colpo@ufrgs.br) ^{1, 2}

Douglas Mocelin (douglas.mocelin@ecorodovias.com.br) ³

Eduarda Fontoura (efontoura08@gmail.com) ¹

Lélio Antônio Teixeira Brito (lelio.brito@ufrgs.br) ¹

Mônica Regina Garcez (monica.garcez@ufrgs.br) ¹

¹ Laboratório de Pavimentação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 43816 - Agronomia, Porto Alegre - RS, Brasil

² Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Av. Ipiranga, 6681 - Partenon, Porto Alegre - RS, Brasil

³ EcoRodovias

Rodovia Dos Imigrantes, Nº S/N - Km 28,5 - 1 e 2 Andar -Alvarenga, São Bernardo do Campo - SP, Brasil

ANEXO XXXVIII

(Artigo publicado no 37ºANPET: Matuella et al. (2023))

ESTUDO LABORATORIAL DAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES EM SOLOS RESIDUAIS CONSIDERANDO NÍVEIS DE TENSÃO ATUANTES EM PAVIMENTOS DELGADOS

Matheus Matuella

Carolina Garcia

Fernanda Ramires

Lélio Antônio Teixeira Brito

Washington Peres Núñez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luis Alberto Nascimento

CENPES/PETROBRAS

RESUMO

No dimensionamento de pavimentos, frequentemente, ênfase é dada à fadiga de camadas asfálticas, focando-se menos em mecanismos de degradação como os afundamentos, decorrentes de deformações permanentes em bases e sub-bases. Este mecanismo tem notável importância em pavimentos com baixo volume de tráfego (PBVT), com revestimentos asfálticos muito delgados (tratamentos superficiais). Discutindo essa deficiência, este trabalho analisa, por meio de ensaios laboratoriais, a deformação permanente de dois solos residuais maduros (argissolo e latossolo) e um solo saprolítico de arenito. As tensões utilizadas nos ensaios foram obtidas por análise mecanística, empregando-se módulos determinados experimentalmente. Observou-se, nos solos residuais maduros, taxas de deformação permanente muito inferiores às registradas no solo saprolítico. Em uma análise complementar, constatou-se que a energia de compactação teve leve efeito na taxa de deformação permanente do argissolo. Globalmente, destaca-se o bom comportamento a deformações permanentes dos solos mais abundantes no país, latossolos e argissolos, estimulando seu emprego em PBVT.

ABSTRACT

In pavement design, frequently, emphasis is given to the fatigue life of asphalt layers, focusing less in degradation mechanisms such as rutting, resulting from permanent deformation in bases and subbases. This mechanism is of notable importance on pavements with low traffic volume (PLTV), with thin asphalt coatings. Discussing this deficiency, this work analyzes, through laboratory testing, the permanent deformation of two mature residual soils (ultisol and oxisol) and a saprolitic sandstone soil. The stresses used in the tests were obtained by mechanistic analysis, using experimentally determined modules. It was observed, in mature residual soils, much lower permanent deformation rates than those registered in the saprolitic soil. In a complementary analysis, it was found that the compaction energy has a slight effect on the permanent deformation rate of the argisol. Globally, the excellent permanent deformation behavior of the most abundant soils in the country, oxisols and argisols, is highlighted, stimulating its use in PLTV.

1. INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura projetada para garantir mais segurança e conforto ao usuário. De modo que, para assegurar que o pavimento obtenha um bom desempenho, é necessário que suas camadas estejam executadas de maneira adequada, com o propósito de resistir e distribuir os esforços provenientes do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2022). Deste modo, faz-se necessário o estudo sobre os elementos de cada camada da estrutura, além das propriedades do solo. Os principais problemas encontrados no pavimento são o trincamento por fadiga e o afundamento pela deformação permanente, originados pela redução da capacidade das camadas suportarem as tensões e distribuírem carga.

Segundo Medina e Motta (2015), a deformação permanente, ou afundamento de trilha de roda (ATR), é um defeito comumente encontrado nas vias – é caracterizado pelas depressões

longitudinais irreversíveis, provocadas pela passagem de repetidas cargas proveniente do tráfego. A análise do comportamento de um solo buscando prever o ATR é feita através do ensaio triaxial de deformação permanente com carregamento repetido, que fornece de forma mais real as propriedades de campo, já que através dele é possível avaliar as condições de confinamento sob diferentes condições de carga, temperatura e tensão de desvio, período de repouso e carregamento.

De acordo com Guimarães (2009), o ensaio de deformação permanente avalia a deformação plástica acumulada dos materiais ao longo de diversos ciclos, a fim de determinar suas propriedades mecânicas e a resposta estrutural do pavimento. Os problemas de afundamento de trilha de roda podem ser evitados se for realizada uma seleção dos materiais e compactação adequada, além de um eficiente projeto estrutural, de forma a limitar as tensões atuantes (BERNUCCI *et al.*, 2022).

O ensaio de módulo de resiliência (MR) tem o objetivo de submeter o corpo de prova (CP) a condições similares às que ocorrem nos pavimentos causadas pelo tráfego. Conforme a norma DNIT 134/2018-ME (DNIT 2018a), este ensaio gera uma resposta – o próprio MR – frente aos carregamentos aplicados. Com uma modelagem adequada dos valores de MR em função das tensões aplicadas ao longo do ensaio, obtém-se os parâmetros necessários tanto para dimensionamento como para avaliação do comportamento de estruturas de pavimentos, utilizando-se ferramentas computacionais como o MeDiNa e o AEMC.

Pavimentos delgados são estruturas dimensionadas para situações onde o volume de tráfego é suficientemente pequeno, não justificando o emprego de camada de revestimento de concreto asfáltico (LEISCHNER *et al.*, 2016). Consequentemente, na ausência de uma camada de revestimento de razoável resistência, as tensões atuantes do tráfego são transmitidas quase que em totalidade à camada de base. Dessa forma, o comportamento mecânico dos materiais das camadas inferiores do pavimento é de total importância (NÚÑEZ *et al.*, 1999).

Assim, o presente trabalho buscou observar o desempenho de 3 diferentes solos, comumente encontrados nas regiões sul e sudeste do Brasil, com a finalidade de analisar a compatibilidade da escolha do material com as necessidades das camadas estudadas, em relação às deformações permanentes, focando seu emprego em pavimentos de baixo volume de tráfego.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na construção das camadas de um pavimento asfáltico devem ser preliminarmente caracterizadas, visto que, o comportamento natural influencia as características no estado compactado. Esse processo tem o objetivo de verificar se as características de deformabilidade elástica, deformabilidade plástica e permeabilidade, são adequadas para garantir a integridade da rodovia após o processo de construção e a compatibilidade do solo com a função de cada camada da estrutura rodoviária.

No presente trabalho foram analisados os comportamentos quanto à deformação permanente de três diferentes solos. Dois deles com características predominantemente argilosas e um mais silteoso, coletados em três municípios do Rio Grande do Sul. Dois destes solos são provenientes da Região Metropolitana de Porto Alegre e um da Região Noroeste do estado. Baseando-se no estudo dos solos do Rio Grande do Sul (STRECK *et al.*, 2018), o Solo 1 é um argissolo, o Solo 2 é um latossolo e o Solo 3 é um solo residual de arenito. A Figura 1 mostra a localização

aproximada dos pontos de coleta.

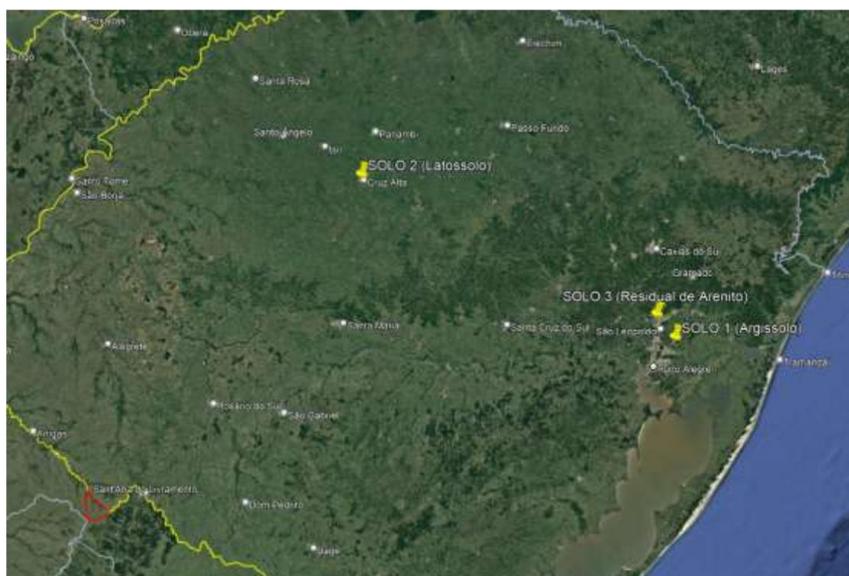


Figura 1: Pontos de coleta de cada um dos solos estudados (fonte: Google Earth)

Com o objetivo final de estudar a deformação no regime plástico (irreversíveis) desses materiais em uma condição o mais próximo possível de uma situação real, ou seja, analisar a deformação permanente desses solos quando empregados na estrutura de uma rodovia, foram realizados os processos descritos na sequência.

2.1. Curva de compactação

Inicialmente, para obter-se os parâmetros necessários para moldagem dos CPs, realizou-se o ensaio de compactação, conforme a Norma NBR 7182 (ABNT, 2020), para a determinação da massa específica aparente seca máxima, que consequentemente fornece o comportamento de maior densidade do material. Foram utilizadas amostras de aproximadamente seis ou sete quilogramas, dependendo se o solo era silteoso/argiloso ou arenoso/pedregulhoso, para cada corpo de prova ensaiado.

Para realização dos ensaios, os materiais foram inicialmente secos ao ar livre e, posteriormente, adicionou-se água até atingirem um valor de umidade próximo a umidade desejada para realização da moldagem, com teores variando aproximadamente 2% entre si. Ao chegarem na umidade preterida, os materiais foram colocados, por 24 horas, em sacos plásticos fechados, armazenados em uma câmara úmida, na intenção de homogeneizar o solo com a água. Em seguida, compactou-se o material em molde cilíndrico de peso conhecido. Os 3 solos foram ensaiados na energia intermediária (EI), visando seu emprego em camadas de sub-base. Além deles, foram também realizados ensaios de compactação para uma brita graduada simples (BGS) para ser utilizada em camada de base e no Solo 1, na energia normal (EN), para ser

utilizado como solo de subleito. Os pesos específicos aparente secos máximos (γ_d) e as umidades ótimas de compactação (ω_o), são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros ótimos de compactação dos solos utilizados no trabalho

Material	Energia	γ_d (g/cm ³)	ω_o (%)
Solo 1	Normal	1,668	19,6
Solo 1	Intermediária	1,740	17,2
Solo 2	Intermediária	1,650	22,1
Solo 3	Intermediária	1,868	12,6
BGS	Modificada	2,021	7,0

2.2. Comportamento Resiliente

De posse dos parâmetros de compactação, foram moldados e ensaiados, conforme a norma DNIT 134/2018-ME (DNIT 2018a) para cada tipo de solo, 3 corpos de prova. Assim como no ensaio de compactação, ao chegarem na umidade desejada de ensaio, os materiais foram armazenados por 24h em câmara úmida, buscando homogeneidade no teor de umidade. No dia seguinte, cada solo foi compactado em molde cilíndrico, de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (para do Solos 1, 2 e 3) e 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, conforme a granulometria máxima da amostra, para a BGS.

Como parâmetro de moldagem, utilizou-se a altura por camada – 2 cm de altura por camada, quando usado o molde pequeno, com 10 camadas de material. Para o molde de maior dimensão, em virtude da elevada quebra de material percebida visualmente, optou-se por trabalhar com 5 camadas de 6 cm de altura por camada, com uso de compactador vibratório, garantindo-se manutenção da granulometria e densidade mínima respeitada. A Tabela 2 resume os parâmetros de moldagem alcançados.

Tabela 2: Média dos parâmetros de moldagem

Material	Energia	γ (g/cm ³)	ω (%)	GC (%)
Solo 1	Normal	1,667	19,7	100,2%
Solo 1	Intermediária	1,738	17,2	99,8
Solo 2	Intermediária	1,667	22,1	101,0
Solo 3	Intermediária	1,867	11,9	100,0
BGS	Modificada	2,146	1,90	106,0

Salienta-se que, para a BGS, em virtude de dificuldades de se trabalhar nas condições ótimas da curva de compactação (exsudação e falta de coesão), optou-se por trabalhar com parâmetros obtidos a partir de ensaio de frasco de areia (DNIT, 1994), realizados em campo, em uma pista experimental onde essa BGS foi empregada. Os parâmetros utilizados para a BGS foram $\omega = 2\%$ e $\gamma = 2,14$ g/cm³, estando, dessa forma, o mais próximo possível às condições de trabalho desse material na pista experimental.

Após a moldagem de cada um dos CPs, foram aferidas suas dimensões e estes foram imediatamente levados à câmara triaxial, envoltos em membrana de látex, para dar-se início ao ensaio. A Figura 2 mostra o ensaio em andamento.



Figura 2: Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas em andamento

Após a realização dos ensaios, os valores encontrados de MR para cada par de tensão aplicado foram avaliados em relação à tensão confinante (σ_3), seguindo o modelo apresentado na Equação 1, e em relação à tensão desvio (σ_d), modelo apresentado na Equação 2. Entretanto, apenas a BGS apresentou um ajuste razoável. Nas figuras 3 e 4 são apresentados os valores de MR obtidos para a BGS em função da tensão confinante e para os solos finos em função da tensão desvio.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \quad (1)$$

$$MR = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

onde:

k_1 e k_2 são parâmetros de regressão;

σ_3 é a tensão confinante; e

σ_d é a tensão desvio.

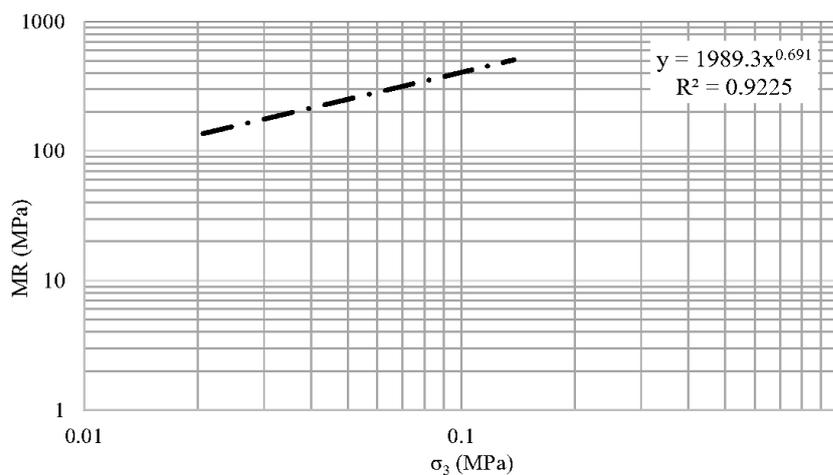


Figura 3: Comportamento Resiliente da BGS, na energia modificada, em função da σ_3

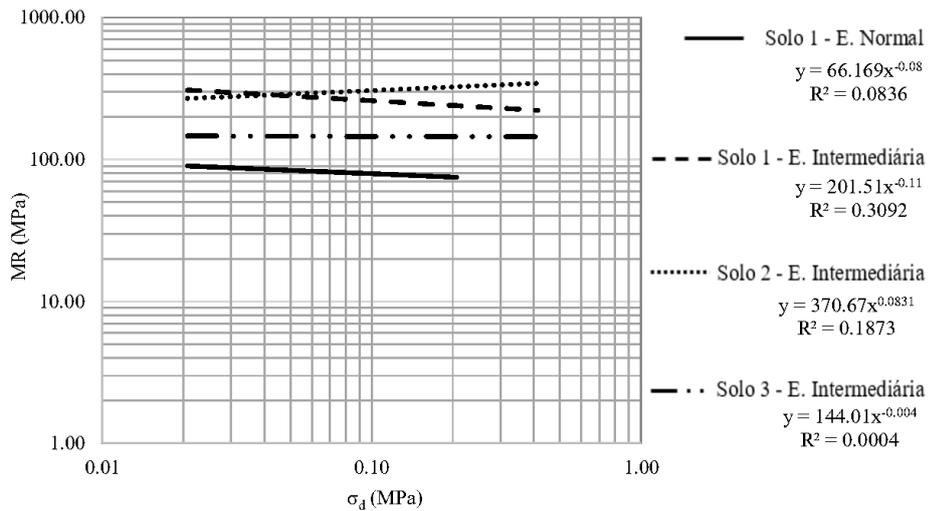


Figura 4: Comportamento Resiliente do Solo 1, na energia normal, e dos Solos 1, 2 e 3, na energia intermediária, em função da tensão desvio

Tendo em vista que apenas a BGS se ajustou de forma aceitável aos modelos avaliados, optou-se por trabalhar com outro modelo que melhor se ajustasse aos dados obtidos. Assim, escolheu-se trabalhar com o modelo composto, apresentado na Equação 3, para obtenção de parâmetros de regressão que melhor representasse o comportamento desses solos.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (3)$$

onde:

k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

σ_3 é a tensão confinante; e

σ_d é a tensão desvio.

A partir da análise com o modelo composto, com auxílio de planilha eletrônica (Excel) obteve-se os parâmetros de regressão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de regressão obtidos com o modelo composto para os solos estudados

Material	Energia	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
Solo 1	Normal	175,08	0,49	-0,317	0,793
Solo 1	Intermediária	271,66	0,18	-0,204	0,853
Solo 2	Intermediária	449,56	0,19	-0,067	0,424
Solo 3	Intermediária	195,90	0,22	-0,145	0,244
BGS	Modificada	2088,8	0,55	0,202	0,931

2.3. Avaliação de estruturas de pavimentos com o *software* AEMC

Para determinar os pares de tensão a serem utilizados nos ensaios de Deformação Permanente, foco desse estudo, definiu-se uma estrutura de pavimento padrão, composta por 3 camadas: uma base granular de 15 cm, uma sub-base de 15 cm, composta por cada um dos solos analisados na pesquisa e, por fim, um subleito. Em virtude do estudo se desenvolver focado em pavimentos delgados, onde os revestimentos aplicados são tratamentos superficiais, optou-se por não adotar uma camada de revestimento típica, com capacidade estrutural própria, considerando que todas as solicitações são transmitidas diretamente para a camada de base. Essa estrutura genérica é apresentada na Figura 5.



Figura 5: Estrutura-tipo do pavimento analisado

Com auxílio do *software* AEMC, plataforma de análise elástica de múltiplas camadas integrada ao MeDiNa para cálculo de tensões, deformações e deslocamentos nas estruturas de pavimentos, realizou-se a avaliação da resposta estrutural dessa estrutura. Uma carga de 5,5 ton., aplicada por um semieixo simples de rodas duplas, simulando um ESRD carregado com 10 ton. e 10% de sobrecarga, foi a solicitação aplicada. O comportamento dos solos foi delimitado pelos coeficientes de regressão apresentados anteriormente na Tabela 3 (comportamento não-linear no *software*), pelos parâmetros de compactação apresentados na Tabela 2, pressão de inflação dos pneus de 0,56 MPa e coeficientes de *Poisson* de 0,35, 0,40 e 0,45, respectivamente, para a base, a sub-base e o subleito.

A partir dessa simulação, foi possível obter as tensões principais geradas no centro da camada de sub-base para os 3 solos utilizados, em pontos avaliados abaixo de uma das rodas ($x = 0$) e pontos localizados entre as rodas ($x = 16,2$). As médias dessas tensões são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Valor médio das tensões principais encontradas no centro da camada de sub-base.

Material	S1 (kPa)	S3 (kPa)
Solo 1	207	18,3
Solo 2	220	17,8
Solo 3	199	19,3

Com base nos valores obtidos com o software e levando em conta os pares de tensão

determinados pela norma de determinação da deformação permanente (DNIT, 2018), foram arbitrados os valores de 190 kPa para a tensão desvio e de 20 kPa para tensão confinante, a serem utilizados nos ensaios de deformação permanente.

2.4. Ensaio de deformação permanente

Tendo sido definidos os valores a serem utilizados para a realização do ensaio de deformação permanente, partiu-se para a preparação das amostras de solo. Uma do Solo 1, na umidade ótima referente à energia normal e uma para cada um dos três solos, na umidade ótima referente à energia intermediária, foram separadas e armazenadas em câmara úmida por 24h antes da moldagem. Após a moldagem, foram aferidas as dimensões dos corpos de prova e cada amostra foi imediatamente envolvida em membrana de látex e levada à câmara triaxial para realização do ensaio. A Tabela 5 resume os parâmetros de moldagem dos CPs ensaiados.

Tabela 5: Parâmetros de moldagem dos CPs ensaiados à Deformação Permanente

Material	Energia	γ (g/cm ³)	ω (%)	GC (%)
Solo 1	Normal	1,68	18,8	100,7
Solo 1	Intermediária	1,75	16,6	100,5
Solo 2	Intermediária	1,65	22,3	99,8
Solo 3	Intermediária	1,87	12,7	99,9

Para a sua realização, foram aplicados, inicialmente, 50 ciclos de carga para acomodação da amostra e, posteriormente, 150.000 ciclos de carga para acompanhamento da deformação permanente. A frequência de aplicação de carga utilizada foi de 2 Hz, conforme a norma 179/2018-IE (DNIT, 2018b). A Figura 6 apresenta o resultado desse ensaio.

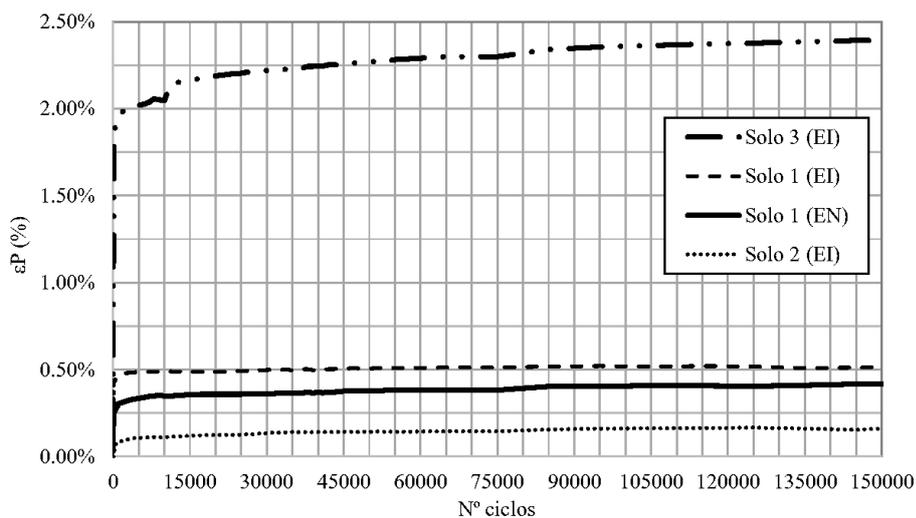


Figura 6: Resultado do ensaio de Deformação Permanente pra os 3 solos

Para analisar o crescimento da deformação permanente após a acomodação inicial que ocorre ao longo dos primeiros estágios do ensaio, optou-se por analisar a taxa de crescimento das deformações permanentes. Para isso, os valores dessas deformações lidas ao longo do ensaio foram plotados em função da raiz quadrada do número de ciclos. Dessa forma, torna-se razoável a representação dessa taxa a partir de um ajuste linear, apresentado na Equação 4, no qual as deformações desenvolvidas nos estágios iniciais do ensaio são representadas pela constante a , ao passo que a taxa de crescimento das deformações é apresentada pela inclinação da reta (b). A Figura 7, na sequência, apresenta as taxas de crescimento das deformações permanentes desenvolvidas pelos solos 1, compactado na energia normal, 1, 2 e 3, compactados na energia intermediária, respectivamente.

$$y = a + b.x \quad (4)$$

onde:

y é a deformação permanente;

a é a deformação de acomodação gerada durante os estágios iniciais do ensaio;

b é a taxa de crescimento da deformação permanente;

x é a raiz quadrada do número de ciclos aplicados.

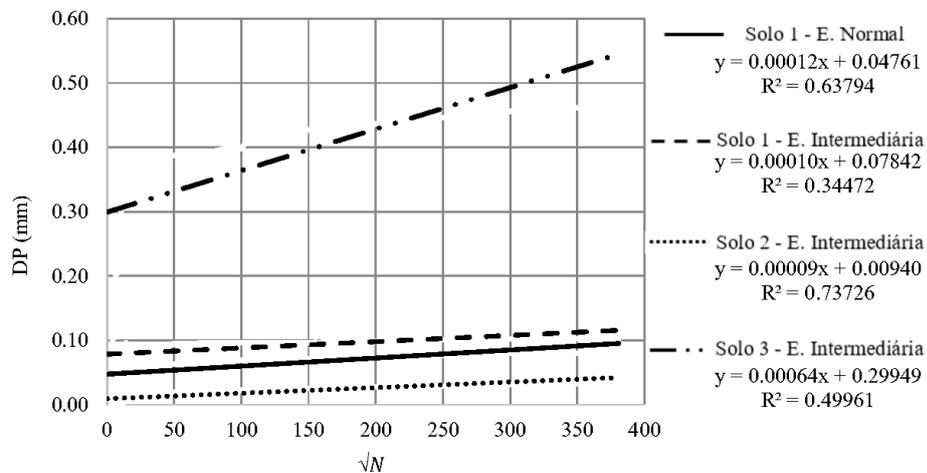


Figura 7: Taxa de deformação permanente para os 3 solos estudados

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Analisando o comportamento dos 3 solos frente ao ensaio de deformação permanente, foi possível verificar que, em relação à energia de compactação, o Solo 1, quando compactado na energia normal, se mostrou mais suscetível ao acúmulo de deformações permanentes, quando comparado ao mesmo solo compactado na energia Intermediária. Esse comportamento era esperado, visto que o material quando compactado em uma energia menor, apresenta maior volume de vazios. Isso é percebido na variação da taxa de deformação permanente, que se mostrou 20% maior para a condição de energia de compactação mais baixa.

Embora a visualização da Figura 7, em uma avaliação rápida, possa indicar que a deformação permanente inicial do Solo 1 tenha sido maior na condição de compactação à energia intermediária, isso não reflete necessariamente o que ocorreu com a amostra. Se analisarmos com detalhe os ciclos iniciais, percebe-se que o Solo 1 (EN) apresentou deformações permanentes que cresceram de maneira homogênea até aproximadamente 300 ciclos, enquanto o Solo 1 (EI) mostrou um grande acúmulo de deformação permanente nos primeiros 25 ciclos. Isso ocorreu, possivelmente, em virtude de irregularidades no topo e na base do corpo de prova, além da acomodação da amostra no equipamento, durante a aplicação dos ciclos iniciais.

Ao comparar-se os 3 diferentes solos, todos compactados à energia intermediária, foi possível observar que os solos 1 e 2 apresentaram taxa de crescimento das deformações não recuperáveis muito semelhantes entre si, ao passo que o Solo 3 apresentou uma taxa quase 7 vezes maior. Ainda, verificou-se que o solo 3 apresentou uma acomodação inicial muito superior aos demais. Tal comportamento pode ser explicado pela natureza do material, visto que é o solo 3 é um solo siltoso.

A natureza dos solos também mostrou influência no comportamento resiliente. O solo 3, saprolítico, não se mostrou influenciado pelo estado de tensões, mantendo um valor de MR estável. Já o solo 2 apresentou valores de MR crescentes em função da tensão desvio, ao passo que o solo 1 demonstrou decréscimo de MR com o aumento das tensões desvio.

4. CONCLUSÕES

Com o estudo realizado, foi possível observar que, para os solos residuais maduros, argissolo e latossolo (respectivamente, Solo 1 e Solo 2), as taxas de deformação permanente se mostraram muito inferiores à registrada no solo saprolítico. Tal comportamento, muito possivelmente, seja explicado pela estrutura do solo, uma vez que há presença de siltes em sua composição. É importante ressaltar que as deformações iniciais apontadas na Figura 7 para a situação onde \sqrt{N} é igual a zero, não representam as deformações permanentes que ocorreriam no pavimento pela passagem do tráfego ao longo do tempo em um pavimento, mas sim correspondem à passagem dos primeiros carregamentos, em um estágio de acomodação.

Ao comparar-se individualmente os comportamentos do argissolo e do latossolo, foi possível verificar uma forte semelhança, tanto em termos de acomodação da amostra, como em termos do valor da taxa de deformação permanente. Em uma análise complementar, observou-se que a energia de compactação teve um efeito pouco expressivo (embora existente) na taxa de deformação permanente do argissolo. Essa variação pode ser explicada pela diferença na acomodação do material ao longo do ensaio, visto que a densidade de partículas é maior no corpo de prova compactado na energia intermediária, quando comparada à energia normal.

Em termos mais amplos, destaca-se o comportamento à deformações permanentes dos solos mais maduros, que se mostrou muito mais adequado à aplicação em estruturas de pavimentos, visto seu menor crescimento das deformações permanentes em comparação com o solo residual de arenito. É, ainda, importante destacar que o argissolo e o latossolo são materiais encontrados em grande volume no território nacional e deveriam, portanto, levando em consideração seu comportamento mecânico, ter mais estímulo seu emprego em pavimentos de baixo volume de tráfego.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS, pelo apoio concedido por meio do TERMO DE COOPERAÇÃO Nº 5850.0106876.18.9. Estende-se os agradecimentos ao Programa Especial de Treinamento em Engenharia Rodoviária (PETER) – RDT da Concessionária de Rodovias CCR ViaSul, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que oportunizaram a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2020) *ABNT NBR 7182 – Solo - Ensaio de compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G. da; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2022) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, Rio de Janeiro.
- DNIT (1994) *DENER-ME 092/94 – Solo - Determinação de massa específica aparente “in situ”, com emprego do fraco de areia – Norma rodoviária - Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018a) *DNIT 134/2018-ME – Pavimentação - Solos - Determinação módulo de resiliência - Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018b) *DNIT 179/2018-1E – Pavimentações - Solos - Determinação de deformação permanente - Instrução de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Guimarães, A. C. R. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Rio de Janeiro, 2009.
- Leischner, S.; Wellner, F.; Falla, G. C.; Oeser, M.; Wang, D. (2016) *Design of Thin Surfaced Asphalt Pavements*. Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics. Volume 143, Páginas 844-853.
- Medina, J.; Motta, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 3ª ed., 2015.
- Núñez, W. P.; Ceratti, J. A.; Nakahara, S. M.; Oliveira, J. A. (1999). *Um estudo experimental sobre os fundamentos de trilhas de rodas em pavimentos delgados com basaltos alterados*. Transportes, 7(1).
- Streck, E. V.; Kämpf, N.; Dalmolin, R. S. D.; Klant, E.; Nascimento, P. C.; Giasson, E.; Pinto, L. F. S. *Solos do Rio Grande do Sul*. 3. ed., rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018. 252 p. il. color. ISBN 978-85-98842-20-2.

Matheus Matuella (matheus.matuella@ufrgs.br)
Carolina Garcia (carolinamolinsjardim@gmail.com)
Fernanda Ramires (00330189@ufrgs.br)
Lélio Antônio Teixeira Brito (lelio.brito@ufrgs.br)
Washington Peres Núñez (Washington.nunez@ufrgs.br)
Laboratório de Pavimentação – LAPAV, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 43816 - Agronomia, Porto Alegre - RS, 91501-970, Brasil

Luis Alberto Nascimento (luisnascimento@petrobras.com.br)
Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello - CENPES/PETROBRAS
Av. Horácio Macedo, 950 - Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 21941-915, Brasil.