

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)

EFEITO DO HISTÓRICO DE TENSÕES NA RESPOSTA ELÁSTICA DE SOLOS SOB A PERSPECTIVA DE ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE

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

Gabriel Grassioli Schreinert^{1,2}; Camila Kern¹; Washington Peres Núñez¹ & Lélío Antônio Teixeira Brito¹

RESUMO

O pavimento, no decorrer de sua vida útil, é submetido a muitos ciclos de carga, impondo aos materiais constituintes estados de tensões de intensidade bastante variada e ampla. Nesse sentido, a análise do efeito do histórico de tensões no comportamento mecânico dos materiais, em especial na resposta resiliente, mostra-se de elevada importância. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de dois solos residuais para emprego em pavimentação, com ênfase na avaliação do efeito do histórico de tensões na resposta resiliente, levando em consideração a umidade ótima de compactação e as variações de +1% e -2%. Realizou-se uma análise comparativa entre os dados experimentais e os respectivos modelos de regressão obtidos a partir dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP), ambos executados no equipamento triaxial de cargas repetidas. Constatou-se que, para o solo SA, houve uma significativa proximidade entre os dados experimentais e os respectivos modelos obtidos, não indicando um efeito relevante do histórico de tensões. Considerando o solo AS, os resultados obtidos relativos ao ensaio de DP se mostraram bastante superiores aos dados do ensaio de MR propriamente dito, indicando um possível efeito de enrijecimento. Mesmo que ainda os resultados de MR obtidos através do ensaio de DP não sejam claros quanto ao comportamento do material, é importante estudar a possibilidade de simplificar protocolos de ensaios que visem otimizar as análises realizadas em laboratório.

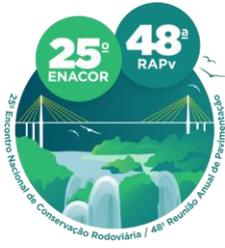
PALAVRAS-CHAVE: Comportamento mecânico; solos.

ABSTRACT

The pavement, in the course of its useful life, is subjected to many load cycles, imposing to the constituent materials states of tensions of quite varied and wide intensity. In this sense, the analysis of the effect of the stress history on the mechanical behavior of the materials, especially on the resilient response, is of great importance. The objective of this research was to evaluate the mechanical behavior of two residual soils for use in paving, with emphasis on the evaluation of the effect of the stress history on the resilient response, taking into account the optimal compaction moisture and the variations of +1% and -2%. A comparative analysis was carried out between the experimental data and the respective regression models obtained from the modulus of resilience (MR) and permanent deformation (DP) tests, both performed on the triaxial equipment with repeated loads. It was found that for the SA soil there was a significant proximity between the experimental data and the respective models obtained, not indicating a relevant effect of the stress history. Considering the AS soil, the results obtained for the DP test were much higher than the data from the MR test itself, indicating a possible stiffening effect. Even if the MR results obtained through the DP test are still unclear as to the behavior of the material, it is important to study the possibility of simplifying test protocols aimed at optimizing the analyzes performed in the laboratory.

KEY WORDS: Mechanical behavior; soils.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. ² Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade – SC (SIE-SC), Florianópolis, Brasil. E-mails: gabrielgrassioli@sie.sc.gov.br; camilakern@yahoo.com.br; washington.nunez@ufrgs.br; lelio.brito@ufrgs.br.



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A relevância de uma ampla compreensão acerca do comportamento resiliente de materiais para pavimentação, em especial de solos e agregados, já representa uma unanimidade no campo técnico-científico. Nesse sentido, o módulo de resiliência (MR) permanece sendo a propriedade mecânica mais estudada na pavimentação moderna, fato esse justificável, visto que está diretamente relacionado à rigidez e à capacidade de suporte dos materiais, assim como rege a resposta estrutural das diferentes camadas e do pavimento como um todo frente aos variados carregamentos impostos pelo tráfego. Além do mais, a modelagem do MR a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas representa uma ferramenta fundamental na caracterização elástica não-linear de materiais em análises estruturais.

Esse âmbito de pesquisa, contudo, ainda apresenta diversas lacunas de conhecimento, em função, essencialmente, da elevada complexidade associada ao modo como se dá o desenvolvimento das deformações resilientes geradas pelos carregamentos cíclicos, levando em consideração, ainda, materiais de diferentes propriedades e uma vasta gama de variáveis influentes. Entre essas diversas variáveis que influenciam o MR de solos e agregados, cabe destacar, em geral, os seguintes fatores: estado de tensões, densidade, propriedades granulométricas (distribuição, teor de finos, tamanho máximo das partículas, etc.), teor de umidade e grau de saturação, histórico de tensões, composição e formato das partículas e, por fim, duração, frequência e sequência das cargas cíclicas aplicadas (PREUSSLER, 1978; SVENSON, 1980; LI e SELIG, 1994; LEKARP, ISACSSON e DAWSON, 2000; REZENDE, 2003; CERATTI *et al.*, 2004; MEDINA e MOTTA, 2015).

A estrutura de um pavimento, no decorrer de sua vida útil, é submetida a um grande número de ciclos de carga, impondo aos materiais constituintes estados de tensões de intensidade bastante variada e ampla e estabelecendo, assim, um histórico de tensões relativo a cada material. Neste cenário, a análise e compreensão do efeito do histórico de tensões no comportamento mecânico dos materiais, em especial na resposta resiliente, mostra-se fundamental.

O histórico de tensões está diretamente associado ao número de ciclos de carga, cujo crescimento pode gerar tanto aumento quanto diminuição no MR, sendo esse comportamento influenciado pelo índice de vazios crítico, densidade e grau de saturação, assim como pela magnitude da tensão desvio atuante. Em geral, com base na literatura, as deformações resilientes em solos argilosos tendem a diminuir com o acréscimo do número de ciclos de carga, possivelmente em função de um enrijecimento do material associado a um aumento da densidade e ao rearranjo estrutural das partículas. Nesse sentido, Ribeiro (2013) constatou o aumento na magnitude dos valores de MR após o ensaio de deformação permanente em um solo arenoso laterítico. Conclusões semelhantes também foram encontradas nas pesquisas de Motta (1991), Guimarães (2001, 2009) e Lima (2016). No caso de solos granulares, segundo Preussler (1978), os valores de MR podem tanto aumentar como diminuir com o número de ciclos de carga, sendo que essa variação depende diretamente de um índice de vazios crítico do material.

Neste contexto, o presente trabalho contempla o estudo do comportamento mecânico de dois solos residuais para emprego em pavimentação, com ênfase na avaliação do efeito do histórico de tensões na resposta resiliente, levando em consideração a umidade ótima de compactação e as variações de +1% e -2% em relação a esse teor ótimo. Para isso, realizou-se uma análise comparativa entre os dados experimentais e respectivos modelos de regressão obtidos a partir dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP), ambos executados no equipamento triaxial de cargas repetidas.



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



METODOLOGIA

Programa Experimental

Em síntese, o programa experimental foi desenvolvido visando a caracterização mecânica dos dois solos residuais a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Buscando uma melhor visualização e entendimento do programa elaborado, na Figura 1 é apresentado um fluxograma sintetizando os materiais adotados, os ensaios realizados e as variáveis controláveis estabelecidas. Cada um desses aspectos é discutido de modo mais aprofundado na sequência.

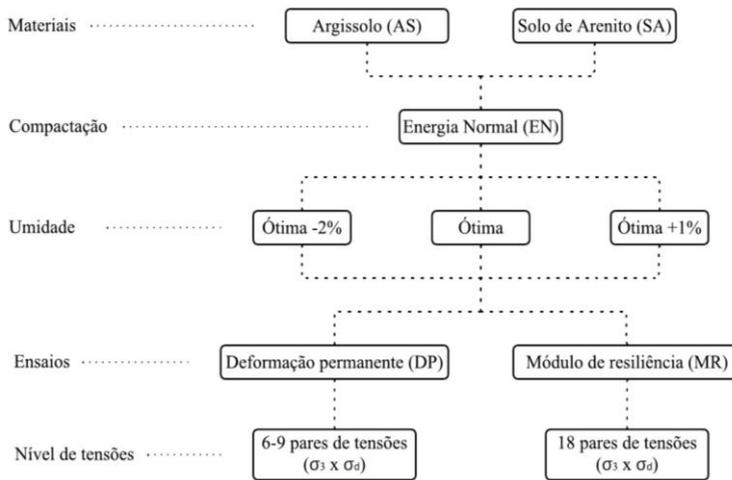


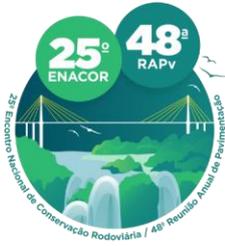
Figura 1. Fluxograma do programa experimental

Materiais

Os materiais correspondem a dois solos residuais – Argissolo (AS) e Solo de Arenito (SA), os quais foram coletados em jazidas nos municípios de Gravataí/RS e São Leopoldo/RS, respectivamente. A definição dos materiais ocorreu com base em diversos fatores, dos quais se destacam: variabilidade (características físicas e mecânicas distintas), disponibilidade (já explorados em jazidas existentes) e aplicabilidade (passíveis de emprego em camadas inferiores de pavimentos). A Figura 2 apresenta o aspecto dos solos após os processos de secagem e destorroamento. A Tabela 1 apresenta uma síntese da caracterização física realizada. Por fim, na Figura 3 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica obtidas a partir dos ensaios de peneiramento e sedimentação.



Figura 2. Aspecto dos solos residuais em estudo: (a) AS e (b) SA



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Síntese da caracterização física

Parâmetros		AS	SA	Referências	
Granulometria	ρ_s (g/cm ³)	2,76	2,65	ABNT NBR 6508:1984	
	Pedregulho (%)	0	0		
	Areia (%)	30	79	ABNT NBR 7181:2016	
	Silte (%)	17	9	e	
	Argila (%)	53	12	ABNT NBR 6502:1995	
	Cu	-	357		
Limites	LL (%)	50	32	ABNT NBR 6459:2016	
	LP (%)	30	21	ABNT NBR 7180:2016	
	IP (%)	20	11	ABNT NBR 7180:2016	
Classif.	SUCS	MH	SC	ASTM D2487-17	
	AASHTO	A-7-5 (16)	A-2-6 (0)	AASHTO M 145-91	
	MCT	LG'	NA'	Nogami e Villibor (1981)	
Compact.	Energia Normal	$\omega_{ót}$ (%)	23,3	12,1	
		$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	1,539	1,912	ABNT NBR 7182:2016
		$S_{ót}$ (%)	81,2%	82,7%	

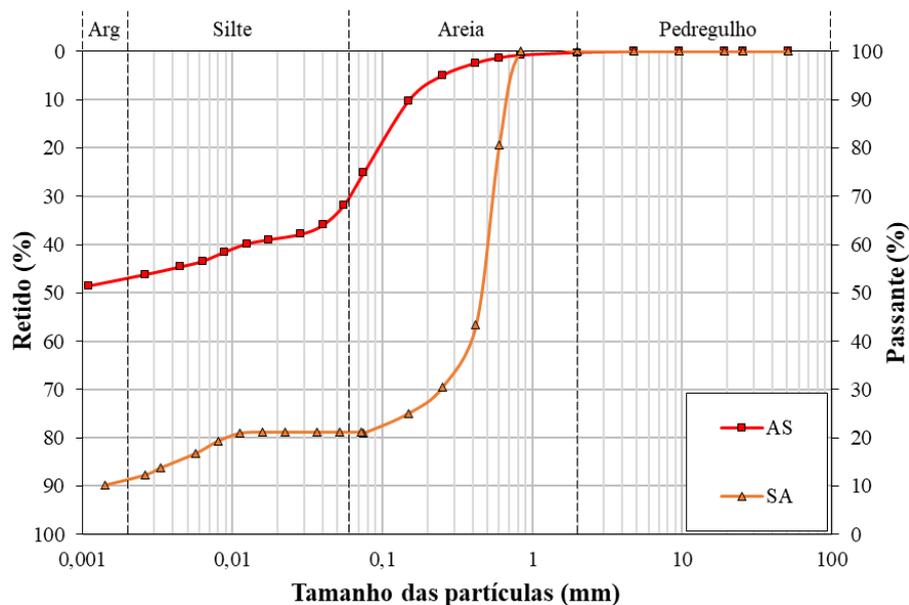
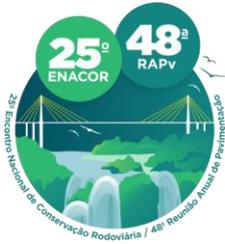


Figura 3. Curvas de distribuição granulométrica

Embora consagrados internacionalmente, os dois sistemas de classificação de solos usualmente adotados na pavimentação (AASHTO e SUCS) apresentam uma série de limitações quando aplicados aos solos tropicais, tipicamente encontrados no Brasil. Sendo assim, os dois solos residuais em estudo também foram classificados segundo a metodologia MCT, elaborada por Nogami e Villibor (1981). O solo AS apresentou um comportamento laterítico, sendo classificado como LG' (solo argiloso laterítico), característico de materiais provenientes de horizontes B podzólicos. Já o solo SA demonstrou um comportamento não-laterítico, sendo definido como um NA' (solo siltoso não-laterítico), algo esperado tendo em vista o seu caráter saprolítico.



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

www.rapvenacor.com.br



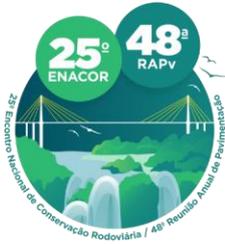
Métodos

A caracterização do comportamento resiliente dos materiais foi realizada integralmente por meio do equipamento triaxial de cargas repetidas, o qual permite, conforme a rotina experimental praticada, executar ambos os ensaios de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP). As principais referências metodológicas tidas como base foram, respectivamente, as normas brasileiras DNIT 134/2018-ME e DNIT 179/2018-IE, implementadas pelo DNIT (2018).

Apesar das referências normativas estabelecidas, ressalta-se que os ensaios triaxiais cíclicos apresentam uma série de particularidades intrínsecas a sua complexidade, envolvendo desde a preparação dos materiais e subsequente compactação dos CPs até as diversas especificidades relacionadas ao equipamento, instrumentação e coleta de dados. Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta uma síntese das especificações e procedimentos adotados nesta pesquisa.

Tabela 2. Síntese dos métodos adotados

Material / CP	Tipo de material	Solos
	Diâmetro máximo das partículas	1/4 do diâmetro do CP
	Dimensões do CP (D x A) (cm)	10 x 20
	Método de compactação	Dinâmica por impacto (AS) e vibratória (SA)
	Número de camadas na compactação	10
	Tempo de homogeneização	No mínimo 24 h
Equipamento	Tensão de confinamento	Estática
	Tensão desvio	Cíclica
	Meio de confinamento	Ar
	Sistema de carregamento	Pneumático
	Posição da célula de carga	Interna (em contato direto com o <i>top-cap</i>)
	Medição dos deslocamentos permanentes	1 RDT externo
	Medição dos deslocamentos resilientes	2 LVDTs internos
	Medição/controla da poro-pressão	Não
	Tensão de assentamento (constante)	Não
Ensaio de MR	Drenagem	Aberta
	Frequência de carregamento	1 Hz
	Duração do pulso de carga	Pulso de 0,1 s (repouso de 0,9 s)
	Forma do pulso de carga	<i>Haversine</i>
	Pré-condicionamento	Sim
	Estágios (pares de tensões)	18
	Ciclos por estágio (mínimo)	100
	Amplitude de tensões (σ_3 , σ_d) (kPa)	(20-140, 20-420)
Ensaio de DP	Drenagem	Aberta
	Frequência de carregamento	2 Hz
	Duração do pulso de carga	Pulso de 0,1 s (repouso de 0,4 s)
	Forma do pulso de carga	<i>Haversine</i>
	Sequência de carregamento	Estágio Único
	Pré-condicionamento	Sim
	Estágios (pares de tensões)	6 - 9
	Ciclos por estágio (mínimo)	145.000
	Amplitude de tensões (σ_3 , σ_d) (kPa)	(40-120, 40-360)



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

www.rapvenacor.com.br



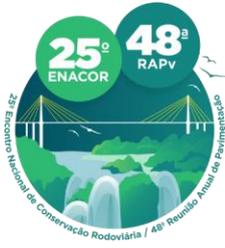
Com relação à compactação, adotou-se a energia Normal (EN), prescrita pelo DNIT (2009) como referência na compactação do corpo de aterro estradal, constituindo majoritariamente o subleito. Nesta pesquisa buscou-se adotar o procedimento que melhor reproduza a compactação executada nas camadas *in situ*, condicionada ao tipo de material. Desse modo, para o solo SA, tendo em vista sua composição granulométrica predominantemente granular (79% areia), optou-se pelo emprego da compactação vibratória, por meio de um marteleto vibratório associado a uma sapata circular. Para o solo AS (70% finos), por outro lado, adotou-se compactação por impacto (soquete Proctor). No tocante à umidade de compactação, essa foi uma das variáveis controláveis consideradas no programa experimental. Sendo assim, além de avaliar os resultados de MR em relação ao efeito do histórico de tensões nos dois diferentes ensaios utilizando a umidade ótima de compactação, foi proposta a mesma análise considerando uma variação da umidade de +1% e -2% com relação ao teor ótimo, simulando as possíveis variações de umidade que ocorrem na compactação em campo. Com isso, foi possível expandir a base de dados para a análise do efeito do histórico de tensões na resposta resiliente, além de permitir a correlação com a influência da umidade de compactação. Conforme já mencionado, a caracterização mecânica foi realizada por meio dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP), sendo que no ensaio de DP foi realizado o acompanhamento dos deslocamentos elásticos (pelos LVDTs internos), sendo registrada a evolução do MR com o número de ciclos. Ressalta-se que ambos os ensaios submetem os materiais a uma ampla gama de níveis de tensões, os quais representam outra variável controlável fundamental no programa experimental. Com base nas normas DNIT 134/2018-ME e DNIT 179/2018-IE (DNIT, 2018), os ensaios de MR e DP envolvem a aplicação de 18 e 9 pares de tensões ($\sigma_3 \times \sigma_d$), respectivamente. Contudo, destaca-se que, para os CPs submetidos à variação da umidade de compactação (-2% e +1%), optou-se por realizar os ensaios de DP em apenas 6 pares de tensões, que é o mínimo recomendado pela norma na parametrização de modelos. A partir dos resultados obtidos, foi possível a calibração de modelos analíticos relacionados à resposta elástica dos solos frente aos diferentes níveis de tensões impostos, com ênfase no ajuste dos parâmetros de modelos de MR usuais na literatura, conforme Tabela 3, por meio de regressão não-linear múltipla. Por fim, objetivando-se uma melhor compreensão do programa experimental desenvolvido, a Tabela 4 apresenta uma síntese desse em termos de materiais, variáveis e ensaios.

Tabela 3. Modelos de MR adotados

Modelo	Referência
$MR = k_1 \cdot (\sigma_3^{k_2})$	(HICKS, 1970)
$MR = k_1 \cdot (\sigma_d^{k_2})$	(SVENSON, 1980)

Tabela 4. Síntese do programa experimental

Solo - Energia	Umidade	Ensaio	Pares de tensões	Nº Ensaios
AS-EN	Ótima	MR	18	3
	Ótima	DP	9	9
	Ótima +1%	MR	18	3
	Ótima +1%	DP	6	6
	Ótima -2%	MR	18	3
	Ótima -2%	DP	6	6
SA-EN	Ótima	MR	18	3
	Ótima	DP	9	9
	Ótima +1%	MR	18	3
	Ótima +1%	DP	6	6
	Ótima -2%	MR	18	3
	Ótima -2%	DP	6	6



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

www.rapvenacor.com.br



RESULTADOS

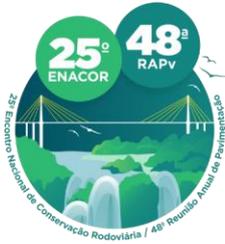
Buscando-se avaliar o efeito do histórico de tensões e explorar melhor as possibilidades quanto à modelagem do MR com relação a diferentes ensaios triaxiais cíclicos, decidiu-se elaborar uma análise comparativa entre os dados experimentais e respectivos modelos obtidos a partir dos ensaios de MR e DP. Em síntese, foram definidos e comparados os seguintes cenários quanto à obtenção dos dados incorporados em cada caso:

- a) Por meio do ensaio convencional de MR, seguindo a norma DNIT 134/2018-ME;
- b) Por meio dos ensaios de DP, sendo que os valores de MR foram estimados a partir da média dos dados coletados entre $N = 1.000$ e 145.000 ciclos de carga para cada um dos 6 ou 9 ensaios/pares de tensões considerados;
- c) Por meio dos ensaios de DP, sendo que os valores de MR foram estimados a partir do valor final coletado em $N=145.000$ ciclos de carga para cada um dos 6 ou 9 ensaios/pares de tensões considerados.

De posse dos dados de MR procedentes de cada um dos três cenários descritos, realizou-se o ajuste dos modelos de regressão em função do estado de tensões. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os gráficos englobando os dados experimentais e os respectivos modelos obtidos a partir de cada cenário para os dois solos residuais compactados na energia Normal nas três umidades de compactação consideradas.

Em um primeiro momento, considerando a possibilidade de otimizar o processo e tornar possível criar um protocolo de ensaio de DP onde seja possível avaliar em apenas um ensaio dados de MR e DP, percebe-se que, para o solo AS, as modelagens ficaram mais próximas aos dados coletados no ensaio de MR propriamente dito. Percebe-se uma pequena variação nas curvas quando avaliado o solo SA com a variação de umidade ao se comparar com as curvas obtidas na umidade ótima, porém, não tão significativas. Em contrapartida, ao avaliar as respostas obtidas para o solo AS, temos que há uma diferença perceptível nos dados, mais evidente para as análises com variação de umidade. Desta forma, fica evidente que o tipo de solo apresenta influência na obtenção de diferentes valores de MR dentre os cenários avaliados, porém, há de se considerar que a proximidade dos resultados obtidos para um solo arenoso demonstra que os dados possuem relevância e que se pode no atual momento utilizar desta análise de dados de MR no ensaio de DP para pesquisas a título de comparação.

Outro ponto de análise dos gráficos apresentados é em relação ao efeito teórico do histórico de tensões. Em suma, para os dois materiais, considerando a umidade ótima, constatou-se uma significativa proximidade entre os dados experimentais e respectivos modelos obtidos (como citado no parágrafo anterior e mais evidente para o solo SA), não indicando um efeito relevante do histórico de tensões na resposta elástica desses solos nos diferentes cenários. Contudo, ao se avaliar o impacto da variação de umidade na compactação foi evidenciada uma representativa diferença entre os dados e os modelos obtidos a partir do ensaio de DP com relação ao ensaio de MR, mais evidente para o solo AS. A consideração da média dos valores de MR obtidos entre $N = 1.000$ e 145.000 ciclos de carga e a consideração do valor final de MR coletado em $N=145.000$ apresentou valores bastante superiores aos dados do ensaio de MR, indicando um provável efeito de enrijecimento proporcionado pelo efeito contínuo das cargas cíclicas após um elevado número de aplicações.



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

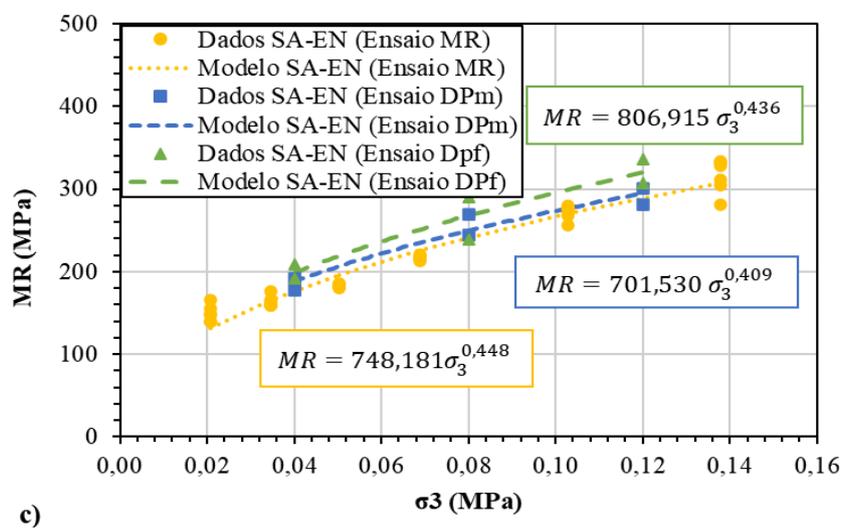
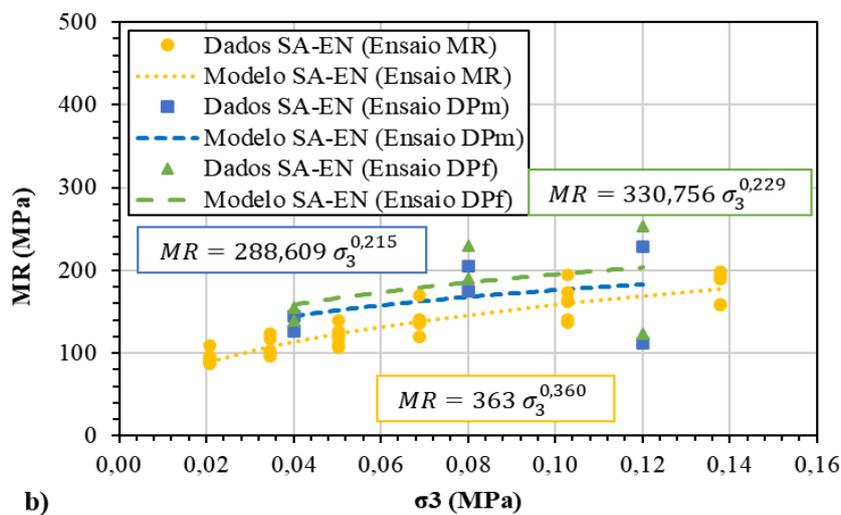
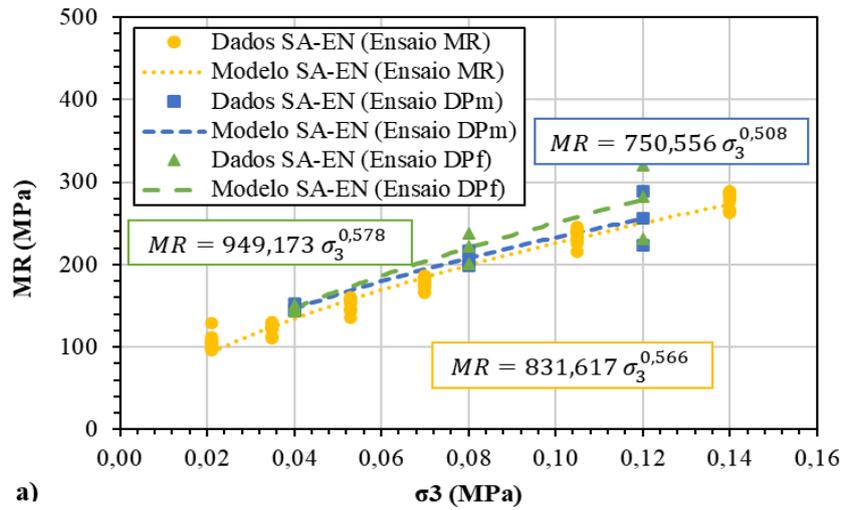
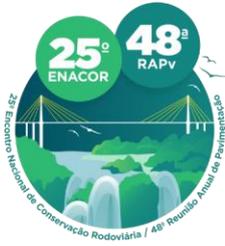
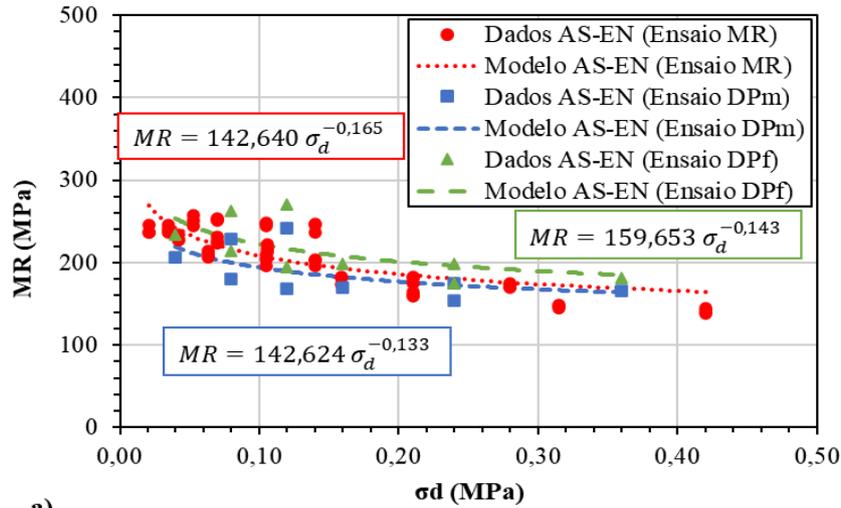


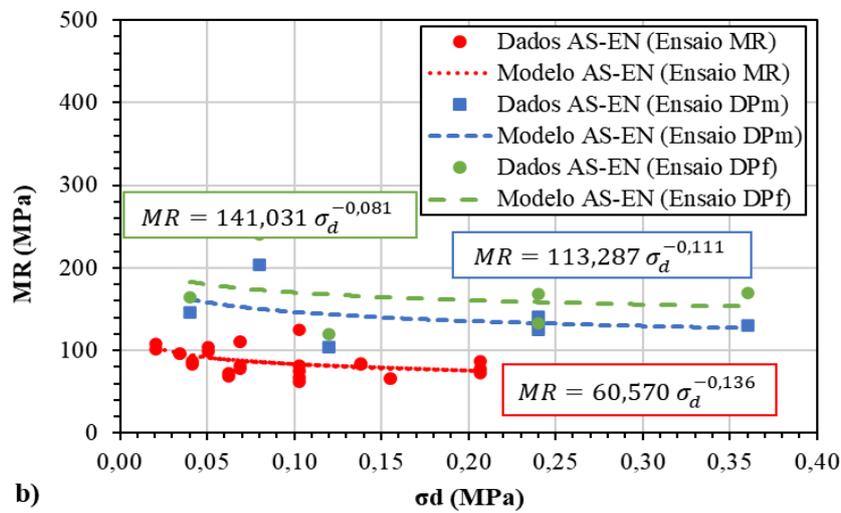
Figura 4. Análise comparativa dos dados de MR e respectivos modelos obtidos a partir dos ensaios de MR e DP (MR médio e final) para o SA-EN: a) umidade ótima; b) +1%; c) -2%



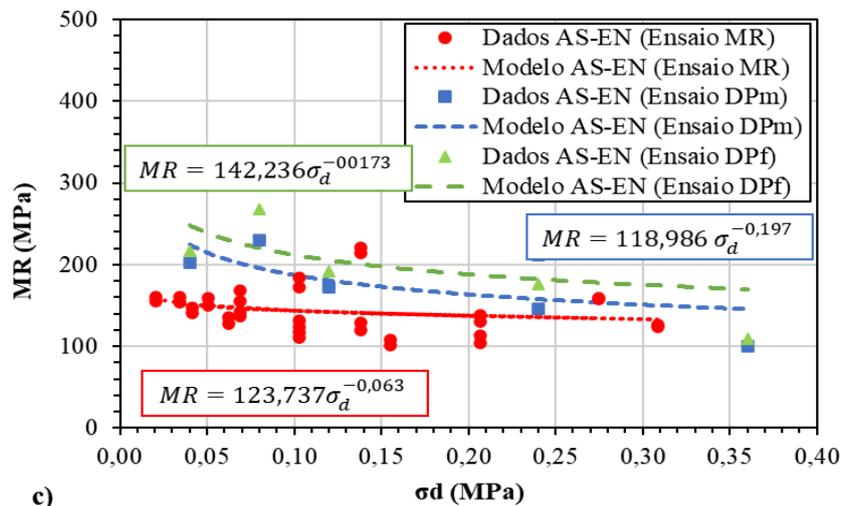
19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



a)

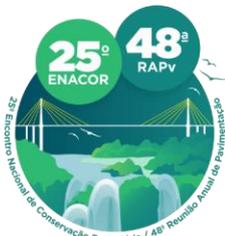


b)



c)

Figura 5. Análise comparativa dos dados de MR e respectivos modelos obtidos a partir dos ensaios de MR e DP (MR médio e final) para o AS-EN: a) umidade ótima; b) +1%; c) -2%



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



Na prática, esse enrijecimento expressa que em campo, à medida que o pavimento vai sendo solicitado pelo tráfego de veículos, o material se torna mais resistente às deformações elásticas, reduzindo os danos associados à fadiga, o que, de fato, é bastante favorável ao desempenho do pavimento (SANTOS, 2020). Esta maior diferenciação dos valores de MR para os dados obtidos com variação de umidade também foi verificada por Santos (2020) e Zago (2016) para solos com a mesma classificação MCT e por Ribeiro (2013) para um solo de comportamento laterítico arenoso (LA'). Para auxiliar no entendimento, na Figura 6 são apresentados os valores de MR máximo, médio e mínimo, considerando os três cenários avaliados para os dois solos e três umidades.

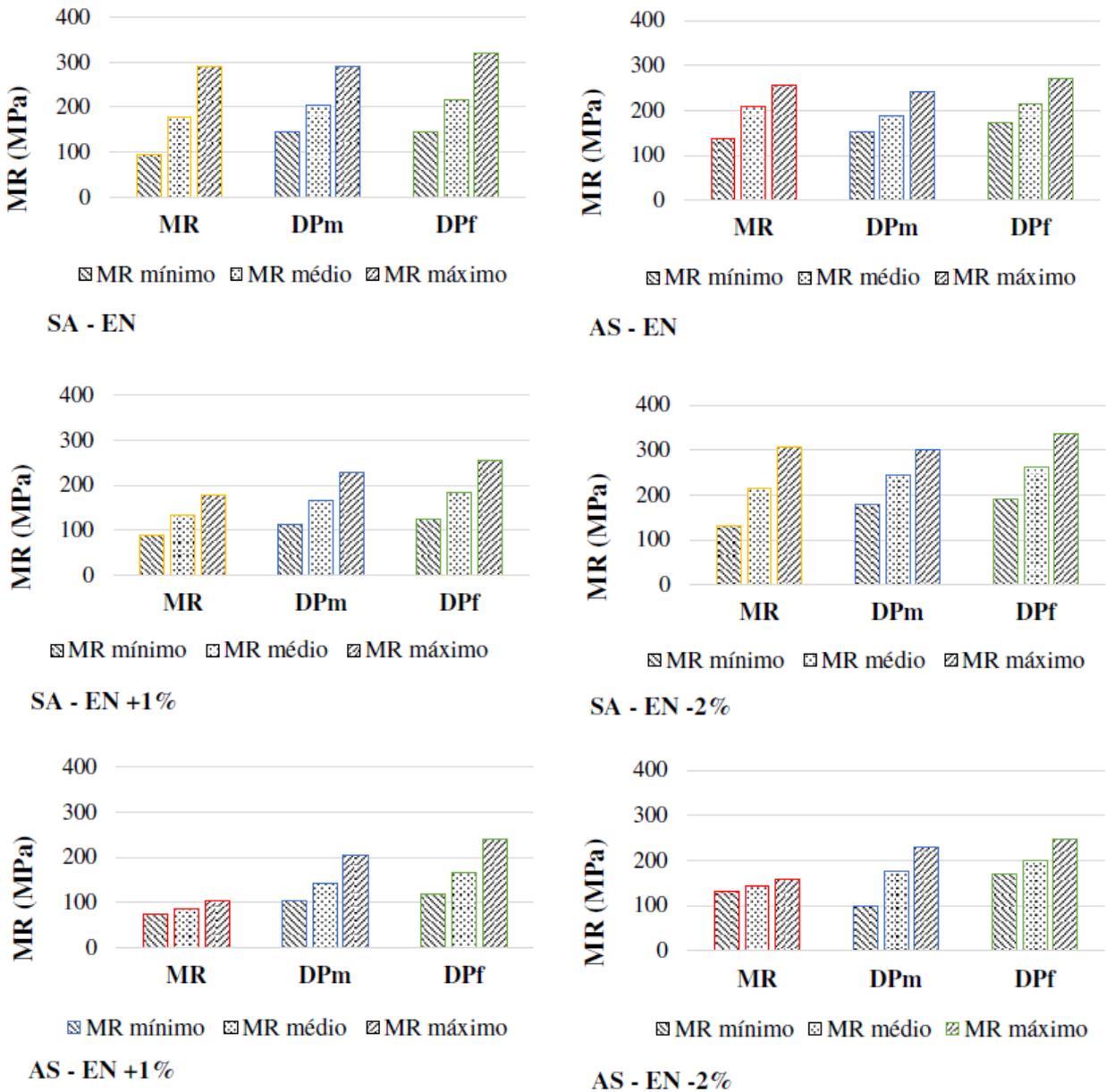
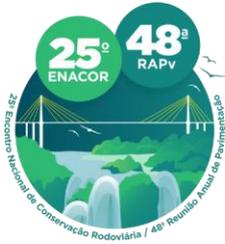


Figura 6. Análise comparativa global entre todas as variáveis analisadas

Segundo a Figura 6, avaliando apenas os valores de MR máximos, médios e mínimos obtidos pelos três cenários, reitera-se novamente que a menor variação de MR houve para os solos na sua devida



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



umidade ótima. Considerando a variação de umidade, o solo AS novamente apresentou uma maior dispersão dos dados ao se comparar os três cenários, fato esse que possui ligação direta com o enrijecimento do material, em parte proporcionado pela sua natureza coesiva.

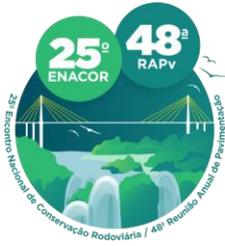
CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo sobre o comportamento mecânico de dois solos residuais utilizados em pavimentação, enfatizando o efeito do histórico de tensões na resposta resiliente, considerando a umidade ótima de compactação e variações de +1% e -2% em relação ao teor ótimo. A partir da análise comparativa relativa à modelagem do módulo de resiliência por meio dos ensaios de MR e DP, onde considerou-se para o ensaio de DP o MR médio e o MR final, constatou-se que, para o solo SA, houve uma significativa proximidade entre os dados experimentais e os respectivos modelos obtidos, não indicando um efeito relevante do histórico de tensões na resposta elástica deste material nos diferentes cenários. Para o solo AS, por outro lado, os dados relativos ao ensaio de DP considerando o MR médio e o MR final se mostram próximos e bastante superiores aos dados do ensaio de MR, indicando um possível efeito de enrijecimento fornecido pelo efeito das cargas cíclicas após um grande número de aplicações.

De modo geral, fica explícito que o tipo de solo foi um fator determinante para esta diferenciação entre os dados e os modelos obtidos, assim como a variação de umidade. Mesmo que ainda os resultados de MR obtidos no ensaio de DP não sejam claros quanto ao comportamento do material, é importante estudar a possibilidade de simplificar protocolos de ensaios que visem otimizar as análises realizadas em laboratório. Além disso, a coleta de dados conjunta de MR e DP no mesmo ensaio torna o processo mais condizente e representativo com o campo, onde as deformações permanentes que já ocorreram no pavimento podem influenciar diretamente nas deformações resilientes obtidas.

REFERÊNCIAS

- CERATTI, J. A.; GEHLING, W. Y. Y.; NÚÑEZ, W. P. Seasonal variations of a subgrade soil resilient modulus in southern Brazil. In: *Geology and Properties of Earth Materials*, Washington, D. C., Journal of the Transportation Research Board, No. 1874, pp. 165-173, 2004.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 108/2009-ES: Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT IE 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 20p., 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT ME 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 18p., 2018.
- GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de deformação permanente em solos e teoria do *shakedown* aplicada a pavimentos flexíveis. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 279p., 2001.
- GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 352p., 2009.
- HICKS, R. G. Factors influencing the resilient properties of granular materials. PhD Thesis - University of California. Berkley, 1970.
- LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates. *American Society of Civil Engineers (ASCE) Journal of Transportation Engineering*, v. 126, n. 1, 2000.



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

www.rapvenacor.com.br



LI, D.; SELIG, E. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 120, No. 6, pp. 939-957, 1994.

LIMA, C. D. A. Estudo da deformação permanente de brita graduada. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência. 3ª ed., 638p., 2015.

MOTTA, L. M. G. Método e dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 366p., 1991.

PREUSSLER, E. S. Ensaio triaxiais dinâmicos em um solo arenoso. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 141p., 1978.

REZENDE, L. R. de. Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, DF, 372p., 2003.

RIBEIRO, M. M. P. Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 119p., 2013.

SVENSON, M. Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1980.

ZAGO, J. P. Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria – RS. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 225p., 2016.