



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)

ESTIMATIVA DE DEFEITOS E ANÁLISE FINANCEIRA FRENTE À VARIAÇÃO DA UMIDADE DE PÓS-COMPACTAÇÃO DE UM SUBLEITO RODOVIÁRIO

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

*Angelo Dotto Ragagnin Prior¹; Paula Taiane Pascoal¹; Leonardo Alberto do Nascimento¹;
Magnos Baroni¹; Luciano Pivoto Specht¹ & Vinicius Marafiga¹*

RESUMO

Diante da necessidade de compreender o comportamento dos constituintes de camadas terrosas em pavimento, o artigo em questão tem por objetivo estimar os defeitos em uma estrutura rodoviária submetida a variações da umidade de pós-compactação da camada de subleito, como também, realizar uma análise financeira referente as implicações destas alterações. A metodologia consistiu em dimensionar uma estrutura rodoviária previamente definida por meio do Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa para diferentes níveis de variação de umidade de pós-compactação, com posterior quantificação da área trincada, do afundamento de trilha de roda e mês de referente à extrapolação do previsto. Ainda, verificou-se as espessuras necessárias para suportar o período de projeto e as solicitações sem extrapolar os defeitos, realizando também um orçamento de implantação da rodovia frente as alterações de umidade. Os resultados indicaram que ao passo que se eleva a umidade de pós-compactação do subleito ocorrem aumentos nos defeitos do pavimento. Além disso, à medida que se aumenta estas variações de umidade, a espessura do concreto asfáltico amplia-se conjuntamente. Ainda, como consequência mais radical, no caso de umidade ótima e +4% de umidade, existiu um aumento orçamentário de 9,5% no custo por km de implantação da via. Tais premissas evidenciam a necessidade de estudos prévios da região onde a via será implementada, com a intenção de se permitir a correta construção de drenos que suprem a necessidade de um aumento da espessura das camadas ou alteração da estrutura rodoviária por completo.

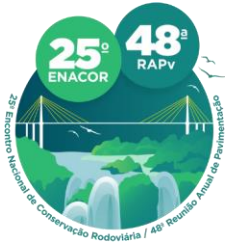
PALAVRAS-CHAVE: MeDiNa, afundamento de trilha de roda, área trincada, dimensionamento, solo laterítico.

ABSTRACT

Given the need to understand the behavior of the materials of the subgrade layer in Brazil, this paper aims to estimate the defects in a road structure subjected to variations in the post-compaction moisture content of the subgrade layer, as well as to perform a financial analysis regarding the implications of these changes. The methodology consisted in dimensioning a previously defined road structure using the National Design Method - MeDiNa for different levels of post-compaction moisture variation, with subsequent quantification of the cracked area, rutting and month of extrapolation. In addition, the thicknesses required to support the design period and the stresses without extrapolating the defects were verified, and a budget for the implementation of the highway in the face of moisture alterations was also prepared. The results indicated that as the subgrade post-compaction moisture increases, there is an increase in sidewalk defects. Furthermore, as these moisture variations increase, the thickness of the asphalt concrete also increases. Moreover, as a more radical consequence, in the case of optimal and +4% moisture, there was a 9.5% budget increase in the cost per km of road implementation. Such assumptions highlight the need for prior studies of the region where the road will be implemented, with the intention of allowing the correct construction of drains that supply the need for an increase in the thickness of the layers or a complete change in the road structure.

KEY WORDS: MeDiNa, rutting, cracked area, dimensioning, lateritic soil.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, angelodrprior@hotmail.com; paulatpascoal@gmail.com; leo_ladn@yahoo.com.br; magnos.baroni@gmail.com; luspecht@ufsm.br; viniciusmarafiga077@gmail.com



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura com múltiplas camadas de espessuras finitas, com o intuito de resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, como também, propiciar aos usuários boas condições de rolamento, segurança e economia (BERNUCCI *et al.*, 2010). Entretanto, no Brasil, estas premissas não estão sendo atingidas totalmente, pois cerca de 51,76% da extensão da malha rodoviária do país apresenta problemas, ou seja, apenas 48,24% estão em condições satisfatórias (CNT, 2022).

Desse modo, em vista de minimizar os empecilhos existentes e prevenir possíveis novos que venham a ocorrer, é necessário analisar os métodos de dimensionamento dos pavimentos flexíveis. Ainda em uso no país desde 1966 e atualizado em 1981 (DNER, 1981), o método proposto pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) baseia-se em ensaios completamente empíricos, ao correlacionar o potencial de ruptura do solo, por meio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), com as solicitações de carga que o pavimento estará submetido durante a sua vida útil. Tal método encontra-se defasado, pois não considera os efeitos de fadiga na estrutura do pavimento, bem como, preterir as particularidades do comportamento dos solos tropicais (FRANCO, 2007; CERNI *et al.*, 2012).

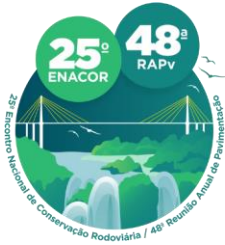
Nessa perspectiva, surge a carência por novos sistemas que se fundamentem em análises mecanistas-empíricas. Dentre estas novas metodologias, o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) mostra-se sobressalente ao associar as características dos materiais utilizados na pavimentação, as condições ambientais da localidade e o tráfego aplicado para o pavimento em questão. Diante disso, ao relacionar valores críticos de espessura de camadas com os defeitos que as solicitações do tráfego originam no pavimento, a rotina de análises elásticas de múltiplas camadas (AEMC) permite a definição dos melhores materiais e suas adequadas espessuras de camadas (CHIARELLO *et al.*, 2019).

Nesse sentido, mostra-se imprescindível investigar as camadas e os materiais constituintes de um pavimento (CARVALHO, 1997). Segundo Oliveira e Motta (2021) existem poucos estudos a respeito de materiais utilizados nas camadas de subleito, sub-base e base de pavimentos, em geral, as pesquisas são mais direcionadas às misturas asfálticas e seus constituintes. Portanto, urge a necessidade de se estudar e compreender o comportamento do subleito de estruturas rodoviárias.

Quando empregados em pavimentos, os solos em subleitos são compactados na umidade ótima, em vista de se aumentar a resistência ao cisalhamento, ganhar estabilidade e reduzir a deformabilidade do material (CRISPIM *et al.*, 2011). Contudo, em países tropicais, como o Brasil, os quais possuem um índice pluviométrico elevado, a influência da água no pavimento é deveras importante. Uma vez que, mesmo que compactado na umidade ótima e atingida a máxima densificação do material, se caso a drenagem não tenha sido considerada de forma adequada, a capacidade de suporte do material diminui consideravelmente.

Diante do exposto, a investigação da influência da variação da umidade pós-compactação de camadas geotécnicas é objeto de estudo de inúmeras pesquisas na comunidade científica. Conforme Takeda (2006) à medida que se aumenta a umidade de pós-compactação em 1%, o módulo de resiliência diminui cerca de 37% para alguns solos do estado de São Paulo. Dessa forma, quantificar o quanto essa perda de resiliência contribui para as danificações e no custo do pavimento mostra-se relevante.

Com base no exposto, no presente artigo buscou-se quantificar os defeitos de área trincada e de afundamento de trilha de roda em uma estrutura rodoviária predeterminada, mediante a variação da umidade de pós-compactação do subleito, como também, o correto dimensionamento da rodovia



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

www.rapvenacor.com.br



considerando as modificações de umidade impostas ao solo, por meio do *software* MeDiNa. Além disso, realizou-se uma análise financeira das diferenças existentes entre cada dimensionamento, através do Sistema de Custos Rodoviários (SICRO), o qual é responsável pela orçamentação de pavimentos asfálticos no Brasil e utilizado em licitações e projetos rodoviários.

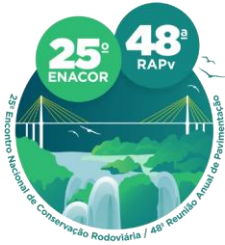
MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de verificar a interferência das variações de umidade do subleito em estruturas de pavimento, refletindo este comportamento nos defeitos apresentados por este, foi realizado um estudo mecanístico-empírico através de um conjunto de análises em uma estrutura rodoviária, a qual foi submetida a diferentes condições de subleito, constituído de solo compactado, a fim de se compreender, em partes, o comportamento de estruturas sujeitas a ação contínua ou intermitente da água. Sendo assim, o material analisado na presente pesquisa foi coletado na zona de transição entre a Planície Litorânea e o Escudo Sul-Riograndense, no estado do Rio Grande do Sul, e a caracterização física, classificação, construção da curva de compactação do solo do subleito pode ser visualizadas através da Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização e classificação do solo (PASCOAL, 2023, no prelo)

Limite de liquidez (%)	45
Limite de plasticidade (%)	33
Índice de plasticidade (%)	12
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,75
% pedregulho (>2,0 mm)	7
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	10
% areia média (0,2 – 0,6 mm)	9
% areia fina (0,06 – 0,02 mm)	20
% silte (2,0 µm – 0,06 µm)	20
% argila (< 2,0 µm)	34
Classificação MCT	LG'
Classificação AASHTO	A-7-5
Classificação SUCS	MH
Energia de compactação	Intermediária
Umidade ótima (%)	20,1%
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,685

Para avaliar este solo frente às variações de umidade, Pascoal (2023, no prelo) realizou ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente, seguindo as diretrizes das normas DNIT 134 (2018) e DNIT 179 (2018), respectivamente, para compreender o comportamento do material e obter parâmetros de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP), por meio do modelo Composto (PEZO *et al.*, 1992) e de Guimarães (2009). Na Tabela 2 pode-se verificar os parâmetros de regressão para ambos, nas condições de compactação e ensaio na umidade ótima, condição de compactação na umidade ótima com variação da umidade pós compactação em +2% e +4%, e compactação na umidade ótima com variações de -2% e -4% de umidade pós-compactação. Para as condições de -4% e +4% foram utilizados apenas os resultados de módulo de resiliência, já os valores de deformação permanente foram completados com os parâmetros das condições -2% e +2%, respectivamente.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 2. Parâmetros de regressão (PASCOAL, 2023 no prelo)

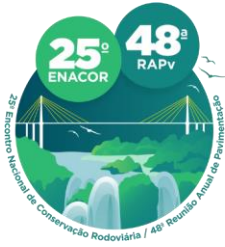
Condição	Módulo de resiliência $M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$				Deformação permanente $\epsilon_p (\%) = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$				
	k_1	k_2	k_3	R^2	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R^2
Wót -4%	2999,69	0,539	0,164	0,910	-	-	-	-	-
Wót -2%	796,11	0,322	0,408	0,682	0,035	-0,936	1,451	0,090	0,875
Wót	696,07	0,491	-0,101	0,762	0,179	1,069	0,742	0,076	0,863
Wót +2%	234,39	0,533	-0,319	0,756	0,170	-0,021	2,233	0,108	0,977
Wót +4%	254,57	0,580	-0,253	0,850	-	-	-	-	-

Em que: M_R : módulo de resiliência; σ_3 : tensão confinante; σ_d : tensão desvio; k_1, k_2, k_3 : parâmetros de resiliência determinados experimentalmente; ϵ_p : deformação permanente/plástica; N: número de ciclos de repetição; $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$: parâmetros dos modelos, relacionados ao material; ρ_0 : pressão atmosférica (tensão de referência).

Para a avaliação do desempenho dos solos nas cinco condições analisadas, foi utilizado o *framework* de cálculo do MeDiNa, que realiza a verificação e o dimensionamento de uma estrutura de pavimentos asfálticos, por meio da Análise Elásticas de Múltiplas Camadas (AEMC). O período de projeto considerado foi de 10 anos, considerando o sistema arterial principal, para dois tráfegos diferentes: N médio (5×10^6) e um N alto (1×10^7), definidos por Ceratti, Bernucci e Soares (2015). Sendo assim, foi proposta uma estrutura composta pelo subleito em questão, e as suas variações, camada de base granular (BGS C1) e um revestimento de concreto asfáltico, ambos do *default* da ferramenta computacional MeDiNa, sendo Classe 1 ou Classe 3, respectivamente para o N médio e para o N alto, conforme recomendado pelo DNIT (2020). Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros considerados nas análises e a Figura 1 retrata o modelo de pavimento utilizado em cada N.

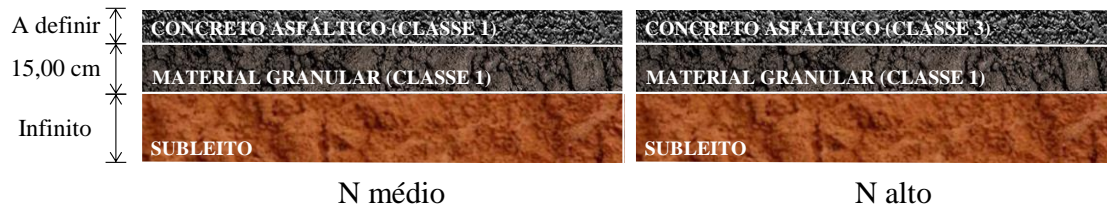
Tabela 3. Parâmetros da base e dos concretos asfálticos

Parâmetros	Base (C1)	Concreto asfáltico (C1)	Concreto asfáltico (C3)
Coefficiente de Poisson	0,35	0,3	0,3
Contato	Não aderido	Não aderido	Não aderido
Energia de Compactação	Modificada	-	-
Abrasão Los Angeles (%)	41,00	-	-
Massa específica (g/cm ³)	2,27	2,40	2,40
Umidade ótima (%)	5,80	-	-
Módulo de Resiliência (MPa)	259,00	5764	8000
DP – Coeficiente de regressão (k_1)	0,1608	-	-
DP – Coeficiente de regressão (k_2)	-0,0970	-	-
DP – Coeficiente de regressão (k_3)	0,5250	-	-
DP – Coeficiente de regressão (k_4)	0,0752	-	-
Fadiga – Coef. de regressão (k_1)	-	$5,495 \times 10^{-11}$	1×10^{-12}
Fadiga – Coef. de regressão (k_2)	-	-3,253	-3,750



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

www.rapvenacor.com.br



N médio

N alto

Figura 1. Estrutura do pavimento.

Dado que o objetivo foi analisar o subleito frente às solicitações e a variação de parâmetros oriundos das diferentes umidades, foi utilizada a menor espessura permitida no MeDiNa para a camada de base, sendo esta de 15 cm. Em contrapartida, a espessura do revestimento foi dimensionada conforme a necessidade para cada uma das condições em análise.

Após as definições iniciais, o procedimento de análise do subleito frente as suas modificações foram realizadas basicamente em duas etapas. A primeira consistiu em dimensionar a camada de revestimento asfáltico para a umidade ótima do subleito e, posterior avaliação do comportamento do pavimento ao manter a espessura do concreto asfáltico dimensionada para a $W_{ót}$, alterando apenas os parâmetros do subleito. Já a segunda, baseou-se no dimensionamento da espessura do revestimento asfáltico para todas as variações de umidade de pós-compactação do subleito.

Para a avaliação das estruturas, de acordo com Franco e Motta (2018), para este tipo de sistema, a área trincada (AT) está limitada em 30% e a deformação permanente (afundamento de trilha de roda – ATR) de 10 mm no final do período de projeto. Nesse sentido, será possível compreender a influência das variações de umidade no pavimento, uma vez que, ao dimensionar considerando a umidade ótima do subleito, o MeDiNa adota uma determinada espessura que corrobora com os valores limitantes de 30% de AT e 10 mm para ATR. Porém, ao variar a umidade do subleito sem alterar a espessura do revestimento, estes danos não são mais atendidos, podendo ser melhorados ou agravados. Ainda, em virtude destas incompatibilidades, quando dimensionada a espessura para cada modificação de umidade do subleito, pode-se visualizar o quanto necessitava-se aumentar ou diminuir a camada de concreto asfáltico, para que a condição máxima preconizada pudesse voltar a acontecer.

Orçamento das estruturas dimensionadas

Ao considerar os diferentes dimensionamentos realizados frente a variação do comportamento do subleito em relação a alteração da umidade, foram realizados dez orçamentos. Posto isto, foram consideradas as cinco variações da umidade ótima, para o N médio e N alto, visando a comparação da variação custos entre eles. A Tabela 4 resume os dados da pista de rolamento e do acostamento considerados para o orçamento e a Tabela 5 mostra o custo unitário de cada item considerado no levantamento de custos, obtidos através do Sistema de Custos de Referências de Obras (SICRO) do DNIT (2023), cuja versão mais atualizada para o estado do Rio Grande do Sul é de Janeiro de 2023.

Tabela 4. Dados da pista de rolamento e acostamento

	Parâmetro	Valor
Pista	Comprimento da via	1,00 km
	Largura da via	7,20 m
	Espessura do revestimento	Variável
	Espessura da base	15,00 cm
	Pinturas de ligação	3



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

www.rapvenacor.com.br



Acostamento	Comprimento	1,00 km
	Largura	5,00 m
	Espessura do revestimento	6,10 cm
	Espessura da base	15,00 cm

Tabela 5. Custos unitários por serviço (Fonte: DNIT, 2023)

Serviço		Valor unitário	Unidade
Terraplanagem	Escavação, carga e transporte de material de 1ª cat.	R\$ 7,67	m³
	Compactação de aterros a 100% do Proctor intermediário	R\$ 7,59	m³
Pavimentação	Regularização do subleito	R\$ 1,06	m²
	Reforço do subleito com material da jazida	R\$ 10,92	m³
	Base ou sub-base de macadame seco com brita produzida	R\$ 173,43	m³
	Base ou sub-base de brita graduada com brita produzida	R\$ 103,71	m³
	Imprimação do asfalto diluído	R\$ 5,18	m²
	Pintura de ligação	R\$ 1,34	m²
	Concreto asfáltico	R\$ 388,27	t
	Concreto asfáltico com asfalto polímero	R\$ 439,33	t
Sinalização	Pintura de faixa	R\$ 39,59	m²
	Fornecimento e implantação de placa de advertência	R\$ 522,84	un.
	Fornecimento e implantação de placa de regulamentação	R\$ 238,35	un.
	Fornecimento e implantação de tacha refletiva bidirecional	R\$ 25,77	un.

Cabe apontar que, como o comprimento da via foi adotado como 1,00 km, o orçamento apresentado para os diferentes dimensionamentos será para cada km de rodovia a ser implantado. Ressalta-se também que foram considerados apenas os custos diretos de implantação da rodovia, vide Tabela 4, sendo desconsiderado os Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) e o custo de canteiro.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Avaliação da estrutura

Ao dimensionar o pavimento para o subleito na umidade ótima, a espessura do revestimento asfáltico situou-se em 11,10 cm para o N médio, e 13,40 cm para o N alto, além de 15 cm de brita granular na base. Nessa perspectiva, como pode-se observar na Figura 2, ao avaliar o comportamento do pavimento frente as variações de umidade, os resultados mostraram um acréscimo nos defeitos à medida que a umidade foi aumentada, bem como, o evidenciado por Drumm *et al.* (1997) para solos do *Tennessee*. Vale ressaltar, que o oposto ocorre quando o solo passa pela secagem e diminuição da umidade, tal premissa é esclarecida ao se verificar o aumento de resistência do solo quando seco, tendo em vista um maior atrito entre os grãos (LAMBE E WHITMAN, 1991).



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

www.rapvenacor.com.br



Em geral, os solos são compactados na umidade ótima em decorrência do melhor arranjo e lubrificação das partículas. A compactação na umidade ótima deve impedir, pelo menos em grande escala, a percolação da água no maciço terroso, entretanto, em condições severas e de grande exposição, o excesso de água pode influenciar negativamente a resposta do subleito às solicitações do tráfego.

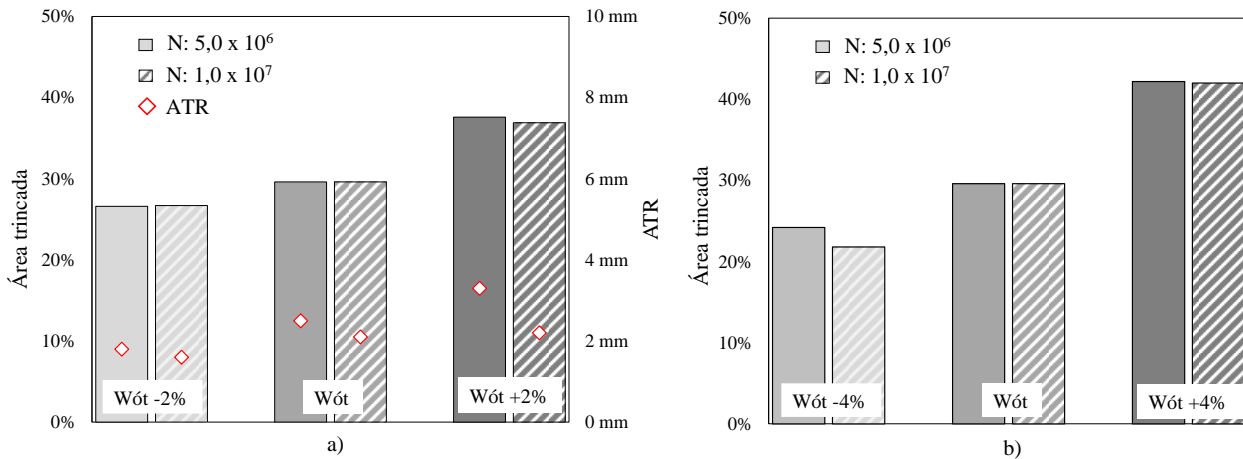


Figura 2. Resultados da avaliação da estrutura

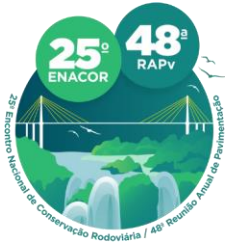
A Tabela 6 demonstra os dados contidos também na Figura 2, em que, a parcela (a) consiste nos resultados para as variações Wót -2% e Wót +2%, já o fragmento (b) remete às informações de Wót -4% e Wót +4%. Vale mencionar, que não foram computados os valores correspondentes ao ATR para as condições de Wót -4% e Wót +4%, visto que os parâmetros de regressão utilizados para a DP são os mesmos das situações de Wót -2% e Wót +2%, respectivamente.

Tabela 6. Resultados da avaliação da estrutura

Condição do subleito	Espessura do revestimento	N médio		N alto	
		ATR	Área Trincada	ATR	Área Trincada
Umidade ótima -4%	11,1 cm	-	24,2 %	-	21,8 %
Umidade ótima -2%		1,8 mm	26,6 %	1,6 mm	26,6 %
Umidade ótima		2,5 mm	29,6 %	2,1 mm	29,6 %
Umidade ótima +2%		3,3 mm	37,6 %	2,2 mm	36,9 %
Umidade ótima +4%		-	42,2 %	-	42,0 %

Ainda, evidencia-se que os defeitos encontrados para o N alto são menores do que os representados no N médio, isso ocorre pois o concreto asfáltico recomendado pelo manual do MeDiNa, para o N de $1,0 \times 10^7$, possui um melhor comportamento frente ao módulo de resiliência e à curva de fadiga com relação ao aconselhado para o N médio. Esta diferença entre classes interfere em grande escala no comportamento do pavimento, visto que, a camada de concreto asfáltico tem a maior influência na resposta do conjunto frente as demais que o compõem.

Além disso, as únicas condições que ultrapassaram o prescrito pelo manual (30% de área trincada ou 10 mm de ATR), foram as condições de Wót +2% e Wót +4%, as quais superaram o requerido, respectivamente, no 101º mês e 93º mês de uso da via para o N médio, e no 102º mês e 93º mês para o N alto.



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

www.rapvenacor.com.br



Dimensionamento da estrutura

Na etapa de dimensionamento considerando o N médio e as variações de umidade, existiu uma redução de 0,8 cm da espessura do concreto asfáltico para a condição Wót -2%, e um aumento de 1,5 cm para a condição Wót +2%. Para o N alto, houve a diminuição de 0,7 cm e o aumento de 1,2 cm, respectivamente, para as variações de Wót -2% e +2%.

Ademais, quando ponderada as variações da espessura do revestimento asfáltico para a condição de Wót -4%, ocorreu uma diminuição de 1,6 cm para o N médio e de 1,3 cm para o N alto. Quando observada as modificações para a condição de Wót +4%, fez-se necessário o aumento de 2,2 cm para o N médio e de 1,6 cm para o N alto. Nesta última circunstância, a espessura do revestimento asfáltico atingiu a máxima dimensão permitida pelo *framework* (15,0 cm), portanto, foi necessário aumentar em 7,0 cm a camada de base, tais resultados podem ser observados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Resultados do dimensionamento da estrutura para o N médio

Condição do subleito	N médio			
	Espessura do revestimento	ATR	Área trincada	Mês
Umidade ótima -4%	9,5 cm	-	30,0	
Umidade ótima -2%	10,3 cm	1,9 mm	29,7%	
Umidade ótima	11,1 cm	2,5 mm	29,6%	120
Umidade ótima +2%	12,6 cm	2,7 mm	29,7%	
Umidade ótima +4%	13,3 cm	-	29,9%	

Tabela 8. Resultados do dimensionamento da estrutura para o N alto

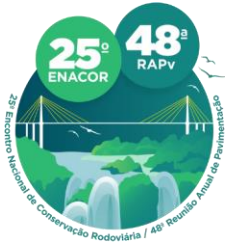
Condição do subleito	N alto			
	Espessura do revestimento	ATR	Área trincada	Mês
Umidade ótima -4%	12,1 cm	-	29,8%	
Umidade ótima -2%	12,7 cm	1,7 mm	29,8%	
Umidade ótima	13,4 cm	2,1 mm	29,6%	120
Umidade ótima +2%	14,7 cm	2,0 mm	30,0%	
Umidade ótima +4%	15 cm (RA) e 22 cm (Base)	-	30,0%	

Tais dados corroboram com o que foi fundamentado acima, em que nas condições que a umidade de pós-compactação foi diminuída, o subleito reagiu de forma mais resistente, o que implica em um decréscimo da camada de concreto asfáltico. Já na condição em que a umidade de pós-compactação foi acrescida, verifica-se um aumento na espessura, diante da interferência da água nos vazios do subleito.

Vale ressaltar, que quanto maior o decréscimo da umidade, maiores são as variações de espessura no revestimento asfáltico, bem como, quanto maior a umidade de pós-compactação, maiores são os acréscimos na espessura do concreto asfáltico, visto que os resultados encontrados para as condições com variação de $\pm 4\%$ encaminharam-se mais radicalmente. Tais valores serão desenvolvidos no próximo item, no qual foram realizados o orçamento e a análise financeira da rodovia ao se elevar ou diminuir a espessura das camadas.

Análise financeira

Após a obtenção da espessura do revestimento asfáltico frente ao dimensionamento do pavimento com a consideração da variação da umidade no subleito, o orçamento de cada uma das estruturas



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

www.rapvenacor.com.br



está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Quadro resumo do orçamento de implantação

Solicitações	Condição do subleito	Espessura do revestimento (cm)	Valor unitário do revestimento asfáltico (R\$/km)	Quantidade (t)	Custo do revestimento (R\$/km)	Custo total (R\$/km)
N médio - Concreto asfáltico classe 1	Wót -4%	9,5	R\$ 388,27	2373,60	921.597,25	1.794.250,27
	Wót -2%	10,3		2511,84	975.271,67	1.847.924,69
	Wót	11,1		2650,08	1.028.946,09	1.901.599,11
	Wót +2%	12,6		2909,28	1.129.585,62	2.002.238,65
	Wót +4%	13,3		3030,24	1.176.550,74	2.049.203,77
N alto - Concreto asfáltico classe 3	Wót -4%	12,1	R\$ 439,33	2822,88	1.240.180,46	2.112.833,49
	Wót -2%	12,7		2926,56	1.285.730,36	2.158.383,39
	Wót	13,4		3047,52	1.338.871,92	2.211.524,95
	Wót +2%	14,7		3272,16	1.437.563,37	2.310.216,40
	Wót +4%	15,0		3324,00	1.460.338,33	2.421.558,18

Considerando como variável entre os orçamentos apenas o revestimento asfáltico, a Figura 3 apresenta a comparação do valor minorado e valorado do orçamento de implantação da rodovia frente a variação da espessura da camada asfáltica.

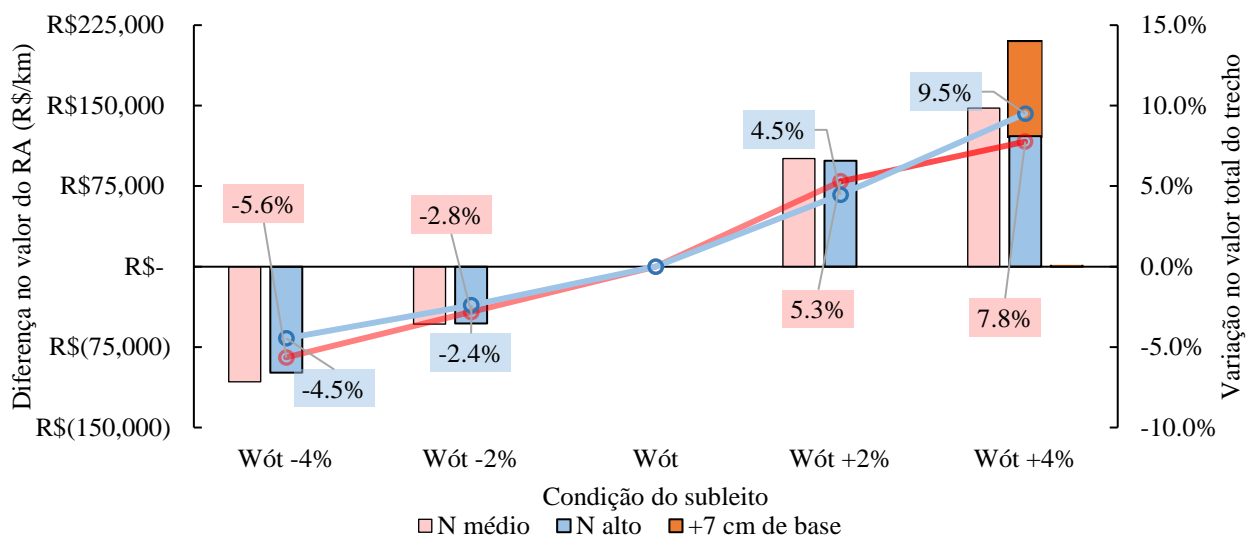
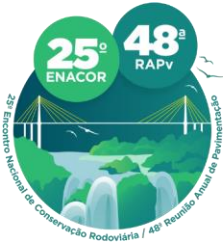


Figura 3. Variação do preço da implantação frente a variação da espessura da camada asfáltica

Tendo em conta todos os custos, exceto o revestimento asfáltico, todos os orçamentos resultaram em R\$ 872.653,03, com exceção do pavimento com consideração do N alto e com umidade Wót +4%, que resultou em um custo sem o revestimento asfáltico de R\$ 961.219,85, devido a necessidade de um acréscimo da espessura da base. Deste modo, tendo como base o orçamento do dimensionamento do pavimento com a umidade ótima, houve considerável variação do preço da implantação, sendo que os extremos foram para o N médio com Wót -4%, no qual existiu uma



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

www.rapvenacor.com.br



diminuição de R\$ 107.348,84 (-5,6%), e para o N alto com Wót +4%, no qual houve um aumento de R\$ 210.033,23 (+9,5%), devido ao acréscimo de R\$ 121.466,41 pelo revestimento asfáltico e R\$ 88.566,82 frente ao aumento da espessura da base. Vale ressaltar que os valores obtidos são para cada trecho de 1 km de implantação da rodovia, tornando o resultado mais significativo se considerado por um longo trecho de obra.

Dessa forma, pode-se entender que em regiões onde não foram realizados estudos prévios para a implantação da rodovia, não foi possível computar locais em que a água agisse de modo permanente ou em períodos intercalados, e por conseguinte, não se considerou a construção particular de drenos nestas localidades. Com isso, o solo de subleito sofre intensas deteriorações por conta da umidade que está submetido, diante disso, espessuras de concreto asfáltico devem ser retificadas para atenuar o comportamento desequilibrado do subleito, ou até mesmo novas estruturas precisam ser implantadas, gerando maiores custos para o responsável e necessidade de reparos constantes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

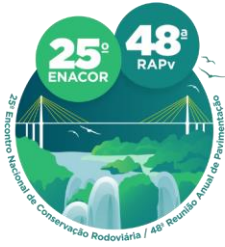
A implementação do Novo Método de Dimensionamento Nacional carrega consigo uma eminente consideração ao setor rodoviário e suas suposições transportam recomendações pertinentes em relação aos materiais empregados na pavimentação. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo apresentar em termos qualitativos e orçamentários a influência da variação da umidade no subleito já compactado. Para isso, fez a variação em $\pm 2\%$ e $\pm 4\%$ da umidade ótima após a compactação do solo em análise e encontrou-se o potencial de área trincada e afundamento de trilha de roda no final de 10 anos de projeto de uma rodovia previamente determinada.

Pode-se inferir através das investigações que ao passo que se aumentou a umidade de pós-compactação do subleito, os defeitos na estrutura intensificaram-se, tendo em vista a ação da água na camada. Diante disso, as variações de Wót +2% e Wót +4% foram as responsáveis por ultrapassar o nível de defeitos aceitáveis ao final de 10 anos (120 meses) de vida útil da rodovia, ao atingir o requerido, respectivamente, no 101º mês e 93º mês de uso da via para o N médio, e no 102º mês e 93º mês para o N alto. Ainda, relativamente aos danos obtidos, foram maiores para o N médio comparativamente ao N alto, já que o concreto asfáltico utilizado para o N alto responde melhor ao módulo de resiliência e a curva de fadiga do que o empregado para o N médio.

Na etapa de dimensionamento da estrutura frente as variações, tanto para o N médio, quanto para o N alto, a espessura da camada de concreto asfáltico aumentou ao passo que se amplificou a umidade de pós-compactação do subleito. Vale ressaltar, que no caso do N alto, para a umidade de Wót +4%, foi necessário o ganho de espessura da camada de base, em conjunto com a do revestimento asfáltico.

Ainda, ao orçar os custos de implantação da rodovia frente as variações, pode-se identificar para os extremos, que para a condição de Wót -4% com N médio, o preço da rodovia decaiu cerca de 5,6%, já para a condição Wót +4% com N alto, o custo da obra se intensificou 9,5%. Vale ressaltar, que estes valores são condizentes para apenas 1 km de via construída, ou seja, a diferença entre estes aumenta demasiadamente ao se realizar o orçamento da rodovia em análises de viabilidade econômica de trechos de maior extensão.

Por fim, pode-se compreender que mesmo atingindo os requisitos da compactação para solos de subleito, em casos em que a drenagem da via não consegue suprir a necessidade da mesma, ocorrem relevantes defeitos no pavimento, que levam à diminuição da vida útil do mesmo. Nessa perspectiva, caso a rodovia já tenha sido realizada sem a drenagem correta, consertar ou modificar



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

www.rapvenacor.com.br



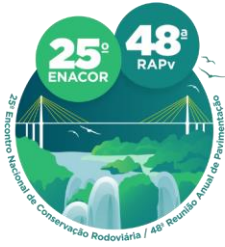
toda a estrutura da rodovia para a construção de drenos, pode não ser a solução mais econômica ou utilizada, fato que demonstra a imensa necessidade de um estudo prévio para a implantação da via. Segundo as análises feitas no *software* MeDiNa, ao se elevar a espessura da camada de concreto asfáltico pode-se atingir o requerido de 30% de área trincada e 10 mm de ATR nestas áreas ou regiões que sofrem com a variação de umidade pós-compactação, porém, estas alterações de espessura geram gastos adicionais na implantação do pavimento que devem ser ponderadas para a conquista de condições adequadas de rolamento, segurança e economia e que poderiam ser evitadas caso houvesse a correta análise antecedente.

AGRADECIMENTOS

Os autores deixam aqui seu agradecimento ao Conselho de Desenvolvimento Científico (CNPq) pela bolsa de estudo do primeiro autor, a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de estudo do segundo e terceiro autores, a ANP/Petrobras e também, o apoio recebido ao desenvolvimento desta pesquisa através do Termo de Execução Descentralizada - TED No 00545/2022/IPR/DPP/DNIT SEDE (SEI 12931123), celebrado entre esta Autarquia e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA, 2010.
- CARVALHO, C. A. B. Estudo da Contribuição das Deformações Permanentes das Camadas de Solo na Formação das Trilhas de Roda num Pavimento Flexível. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B. Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2015.
- CERNI, G., CARDONE, F., VIRGILI, S., CAMILLI, S. Characterization of Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials Under Repeated Triaxial Loading. *Construction and Building Materials*, p. 28, 79-87, 2012.
- CHIARELLO, G. P., PASCOAL, P. T., SANTOS, T. A., PEREIRA, D. S., BARONI, M., GERING, R. P. Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MEDINA (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287 – Trecho Santa Cruz do Sul à Tabaí/RS. In: 33º ANPET, 2019.
- CRISPIM, F. A., LIMA, D.C., SHAEFER, C. E. G.R., SILVA, C. H. C., CARVALHO, C. C. B., BARBOSA, P. S. A., BRANDÃO, E. H. The influence of laboratory compaction methods on soil structure: mechanical and micromorphological analysis. *Soils and Rocks*, 2011.
- CNT - Confederação Nacional do Transporte. Conjuntura do Transportes: Investimentos da União e das Concessionárias em infraestrutura de transporte. Brasil, 2022.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Rio de Janeiro, 1981.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes. DNIT 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método do ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes. DNIT 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução do ensaio. Rio de Janeiro, 2018.



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

www.rapvenacor.com.br



DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-procedimentos-para-transicao-do-metodo-dedimensionamento-de-pavimentos>, 2020.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Relatório analítico de composição de custos-região sul. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/sul/rio-grande-do-sul/2023/janeiro/janeiro-2023, 2023.

DRUMM, E. C., REEVES, J. S., MADGETT, M. R., TROLINGER, W. D. Subgrade resilient modulus correction for saturation effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, n. 7, p. 663-71, 1997.

FRANCO, F. A. C. P. Método de dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos - SisPav. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007

FRANCO, F. A. C. P., MOTTA, L. G. MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de utilização. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, 2018.

GUIMARÃES, A.C.R. Um método mecânico 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, 2009.

LAMBE, W. T., WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, p 576, 1991.

OLIVEIRA, N. A. C., MOTTA, L. G. Influência da variação de umidade pós-compactação na deformação permanente de dois solos típicos de subleitos rodoviários brasileiros. In: 35º ANPET, 2021.

PASCOAL, P. T. Impactos da Variação de Umidade em Laboratório e Campo na Deformabilidade de Solos do Subleito. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, (2023, no prelo).

PEZO, R. F., CLAROS, G, HUDSON, W. R., STOKOE II, K. H. Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. *Research Report*, 1992.

TAKEDA, M. C. A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos -Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.