

Influência da saturação pós-compactação no comportamento resiliente de um solo laterítico empregado em subleito rodoviário

Almejando a melhoria do desempenho dos pavimentos brasileiros frente aos defeitos de fissuração por fadiga e deformação permanente, está sendo proposta uma nova metodologia de dimensionamento, batizada de Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), que visa substituir a abordagem empírica aplicada às rodovias pelo método do DNER. O MeDiNa promove uma análise mecanicista e requer informações precisas das propriedades de cada um dos materiais constituintes das camadas do pavimento, dentre elas, o módulo de resiliência (MR) do subleito, propriedade influente na deformabilidade e na vida de fadiga da estrutura, cujo estudo é fundamental para o sucesso dos projetos rodoviários. A fim de agregar conhecimento referente ao MR de solos, a presente pesquisa busca avaliar a influência da saturação pós-compactação no comportamento resiliente de um solo empregado em subleito rodoviário do Rio Grande do Sul. Para este fim, selecionou-se um solo argiloso com comportamento laterítico para ser o objeto deste estudo. Após compactação nas condições ótimas, foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação do MR em amostras com a umidade ótima de compactação e amostras inundadas, que foram imersas em água por um período de quatro dias. A pesquisa constatou drástica diminuição nas capacidades resilientes desse material, chegando a uma redução de até 80,5% provocada pelo período de imersão em água. As simulações com o software MeDiNa, em estrutura de um pavimento típico, comparando a vida útil de fadiga, com MR de subleito na umidade ótima e inundado mostrou que tal decréscimo no MR do subleito, pela falta ou ineficiência de drenagem, conduz à fissuração precoce do pavimento, com redução estimada de 20% na vida útil de fadiga frente às condições simuladas. Relacionando essa diminuição no desempenho a parâmetros monetários, a incapacidade de suportar as solicitações de projeto e redução da durabilidade resultaram em aumento de custo de 29%, em termos de preço/km.Neq.

Palavras-chave: Solos; Subleito; Módulo de resiliência; Saturação pós-compactação.

The influence of post-compactation saturation on the resilient behavior of a lateritic soil used in road subgrade

Aiming to improve the performance of Brazilian pavements regarding fatigue cracking and permanent deformation defects, a new dimensioning methodology is being proposed, the National Dimensioning Method (MeDiNa), which aims to replace the empirical approach applied to highways by the DNER method so far. MeDiNa promotes a mechanistic analysis and requires precise information on the properties of each material used in the pavement layers, including the subgrade resilient modulus (MR), an influential property on the structure deformability and fatigue life, whose study is fundamental for the success of highway projects. To add knowledge regarding soils MR, the present research seeks to evaluate the influence of post-compactation saturation on the resilient behavior of a soil used in road subgrade of Rio Grande do Sul. For this purpose, a clay soil with lateritic behavior was selected to be the object of this study. After compaction under optimal conditions, repeated load triaxial tests were performed to determine the MR in samples with the optimum compaction moisture and soaked samples, which were immersed in water for a period of four days. The research found a drastic decrease in the resilient capacities of this material, reaching a reduction of up to 80.5% caused by the period of immersion in water. The simulations with the MeDiNa software, in a typical pavement structure, comparing the fatigue life, with subgrade MR in optimum moisture content and soaked showed that such decrease in the subgrade MR, due to lack or inefficiency of drainage, leads to early cracking in the pavement, with an estimated reduction of 20% in the fatigue life under the simulated conditions. Relating this performance decrease to monetary parameters, the inability to support design loads and reduced durability resulted in 29% increase of the construction cost, in terms of price/km.Neq.

Keywords: Soils; Subgrade; Resilient modulus; Post-compactation saturation.

Topic: **Engenharia Geotécnica**

Received: **03/02/2021**

Approved: **26/02/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Diego Agnelo da Silva Custódio 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6401810826923226>
<http://orcid.org/0000-0002-6324-4198>
diegoagnelo@hotmail.com

Paula Taiane Pascoal 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1255803160730856>
<http://orcid.org/0000-0003-0565-9667>
ptpascoal@hotmail.com

Magnos Baroni 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4977419778481897>
<http://orcid.org/0000-0002-1026-3467>
magnos.baroni@ufsm.br

Deividi da Silva Pereira 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9639329922610388>
<http://orcid.org/0000-0002-7200-7813>
dsp@ufsm.br

Luciano Pivoto Specht 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8038412953408618>
<http://orcid.org/0000-0002-8709-6273>
luspecht@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0025

Referencing this:

CUSTÓDIO, D. A. S.; PASCOAL, P. T.; BARONI, M.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.. Influência da saturação pós-compactação no comportamento resiliente de um solo laterítico empregado em subleito rodoviário. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.2, p.265-278, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0025>

INTRODUÇÃO

A capacidade de um país transportar pessoas e produtos em seu território é essencial para seu desenvolvimento socioeconômico, sobretudo se possuir dimensões continentais, como o Brasil, onde o transporte ocorre principalmente por meio das rodovias. Embora o modo rodoviário seja predominante, os pavimentos asfálticos vêm apresentando deficiências estruturais, como deformações permanentes plásticas e fissuração do revestimento por fadiga, sendo a segunda o defeito mais recorrente, causado pelo acúmulo de deformações elásticas sucessivas no pavimento (CNT, 2019).

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos vigente no Brasil visa a proteção do subleito frente à ruptura por cisalhamento (DNIT, 2006). Contudo, tendo em vista o aumento no volume de tráfego do setor rodoviário no país, as inovações tecnológicas na área de projeto e materiais para pavimentação, além da crescente ocorrência de defeitos estruturais, surge a necessidade de elaborar uma nova rotina de dimensionamento. Visando corrigir essas deficiências, desenvolveu-se o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), que aborda a metodologia empírica-mecanicista, representando uma evolução no dimensionamento de pavimentos flexíveis, contemplando a prevenção dos defeitos de deformação permanente e trincamento por fadiga, conforme descrito por Franco et al. (2018). Para que possa ser plenamente utilizado, o MeDiNa requer informações precisas das propriedades mecânicas dos materiais empregados em cada camada do pavimento, dentre elas a rigidez. No que tange ao subleito, constituído pelo solo de fundação da rodovia, a rigidez é medida através do Módulo de Resiliência (MR), que é um dos fatores que contribuem para a rigidez global da estrutura e conseqüentemente sua vida de fadiga. Pode ser obtido através de ensaios triaxiais de cargas repetidas, sendo seu estudo essencial para o correto dimensionamento e previsão de desempenho da estrutura.

Nesse contexto, é evidente a importância do estudo laboratorial para definir as características resilientes dos solos presentes no subleito do pavimento. A partir desses estudos, constata-se a influência do teor de umidade do solo em seu comportamento mecânico, apresentado melhores resultados quando camadas são executadas sob condições de umidade ótima, conforme apontado por Medina et al. (2005). Por esse motivo, a fim de reproduzir o comportamento mecânico dos solos empregados em obras rodoviárias, busca-se realizar o ensaio na mesma condição da compactação de campo, com teores de umidade próximos ao ótimo para determinada energia.

Contudo, Medina et al. (2006) alertam que o comportamento resiliente dos solos é prejudicado quando submetido a condições de umidade superiores às ótimas, alterando as respostas de deformação do subleito quando solicitado pelas tensões do tráfego. A variação da umidade é um problema real, uma vez que a água pode atingir o subleito através de infiltração por trincas pré-existentes, percolação ou ascensão inesperada do nível freático (SILVA, 2009). Suzuki et al. (2013) ressaltam a importância da drenagem dos pavimentos, visando evitar o aumento de umidade e saturação de suas camadas, o que pode ocorrer após o período de chuvas da região. No caso do estado do Rio Grande do Sul, conforme o Atlas Socioeconômico (RIO GRANDE DO SUL, 2020), seu clima subtropical úmido é marcado por precipitações bem distribuídas ao longo

de todo ano, apresentando maiores volumes e alta umidade relativa nos meses entre outono e primavera, período também com maior ocorrência de enchentes e inundações no estado (WOLLMANN, 2014).

Caso a estrutura não conte com um eficiente sistema de drenagem, a presença da água no pavimento provocará mudanças no comportamento resiliente do subleito, aumentando as deflexões frente às solicitações de tráfego, que pode ser visualizada na forma de trincamento por fadiga do revestimento. Além disso, a umidade em excesso do subleito está relacionada à maior ocorrência de afundamento de trilha de roda (ATR) no pavimento, bem como torna bases granulares suscetíveis à contaminação por finos plásticos, reduzindo a resistência das camadas e reações às cargas atuantes, intensificando o defeito de ATR (BALBO, 2007; SUZUKI et al., 2013).

Dessa maneira, o presente estudo busca contribuir para o conhecimento da variação das características resilientes de solos empregados em subleito rodoviário provocada pelo aumento da umidade pós-compactação. Para isso, determinou-se o comportamento resiliente de um solo compactado nas condições ótimas e realizou-se um comparativo com amostras submetidas à saturação pós-compactação por imersão em água por quatro dias. Os resultados obtidos pelo ensaio foram analisados de acordo com os modelos de previsão do comportamento resiliente da AASHTO (NCHRP, 2004), de Svenson (1980) e de Pezo et al. (1992), buscando verificar qual deles representa melhor o desempenho desse solo, seja na condição ótima e após submetido à saturação. Com o intuito de avaliar os efeitos da variação do MR do subleito na vida de fadiga de um pavimento, foram realizadas simulações do desempenho de uma estrutura através do software MeDiNa, comparando a evolução da área fissurada no pavimento com subleito nas condições ótimas de umidade, nas condições de compactação e umidade de campo e os danos estimados nesse pavimento com subleito saturado, bem como a influência da maior ocorrência de danos nessa condição no custo da rodovia, considerando a capacidade de atender as solicitações do tráfego, uma análise essencial para o sucesso e durabilidade dos projetos de pavimentos e administração das rodovias, como apontado por Martins et al. (2018).

REVISÃO TEÓRICA

Módulo de resiliência de solos

Segundo Balbo (2007), resiliência é a capacidade de um corpo deformado elasticamente armazenar energia e devolvê-la quando cessam as tensões aplicadas, não resguardando deformações. O módulo de resiliência caracteriza o comportamento elástico dos materiais e é essencial para realizar uma abordagem mecanicista dos pavimentos. No que se refere aos solos, em especial os lateríticos, Gomes et al. (2018) observam que sua abundância no Brasil e bom desempenho resiliente os tornam viáveis para aplicação na pavimentação. O MR pode ser obtido em laboratório através de ensaios triaxiais de carga repetida, simulando as condições de carregamento cíclico atuantes em campo e é definido como a relação entre a tensão desvio aplicada e a deformação resiliente axial resultante. Conforme Medina (1997), uma vez que o MR apresenta um comportamento não linear, dependendo da natureza do solo, foram elaborados diversos modelos

matemáticos com o intuito de prever o comportamento resiliente dos solos. Esses modelos devem ser aplicados adequadamente ao material estudado. Na presente pesquisa, optou-se por analisar alguns modelos já consolidados na literatura, que tem suas equações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos matemáticos para previsão do comportamento resiliente.

Modelo	Equação
Modelo Universal – AASHTO (2004)	$MR = k_1 \cdot \rho_a \left(\frac{\theta}{\rho_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{\rho_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$
Modelo de Svenson (1980)	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2)$
Modelo Composto – Pezo et al. (1992)	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3)$

Onde: MR é o módulo de resiliência; σ_3 é a tensão confinante; σ_d é a tensão desvio; θ é a soma das tensões principais; τ_{oct} é a tensão octaédrica cisalhante; ρ_a é a pressão atmosférica; k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros do modelo, determinados experimentalmente.

O efeito da variação da umidade no módulo de resiliência dos materiais empregados em subleitos rodoviários é objeto de diversos estudos, sendo possível citar:

Ceratti et al. (2004) apontam diminuição no módulo de resiliência de um solo laterítico argiloso ao aumentar a umidade pós-compactação de corpos de prova moldados na umidade ótima submetidos a um processo de secagem e umedecimento, observando que o MR pode ser reduzido em até quatro vezes, alertando para a influência da sazonalidade no desempenho desse material.

Motta et al. (1990) estudaram solos lateríticos pedregulhosos e um de seus objetivos foi verificar a influência do aumento de umidade pós-compactação no módulo de resiliência. Os corpos de prova foram compactados nas condições ótimas de umidade sob as energias intermediária e modificada, sendo que alguns receberam adição de 10% e 30% de areia. Para aumentar a umidade, os corpos de prova foram imersos em água durante 4 dias, provocando diminuição do MR em 40% a 60%, observando os maiores decréscimos nos casos com maior teor de areia.

Medina et al. (2006) avaliaram solos lateríticos pedregulhosos do estado de Rondônia, onde também buscaram relacionar mudanças no módulo de resiliência através da variação da umidade pós-compactação. Os corpos de prova foram compactados sob condições de saturação ótimas e alguns foram imersos em água durante 4 dias antes da realização do ensaio, constatando que a saturação dos corpos de prova resultou na perda de cerca de 50% do MR quando comparado aos valores ótimos.

Ao estudarem solos finos, Thadkamalla et al. (1995) observaram grande influência da saturação pós-compactação no módulo de resiliência desses materiais, que reduziu drasticamente de 50% a 75%, dependendo do grau de saturação. Da mesma maneira, Naji (2018) verificou o impacto da saturação pós-compactação no MR de solos argilosos, constatando redução em torno de 55% a 58%, quando ensaiados em situações de grau de saturação acima de 90%.

Embora a literatura apresente um consenso acerca da diminuição do módulo de resiliência causada pela saturação do solo pós-compactação, percebe-se uma variabilidade na magnitude dessa influência, indicando a necessidade da realização de estudos e investigações para cada material. Ainda é necessário entender, a partir de modelagens numéricas, qual o impacto no desempenho do pavimento em caso de inundação do subleito, causada por exemplo, por problemas de drenagem.

METODOLOGIA

Para desenvolvimento da presente pesquisa, selecionou-se uma jazida lindeira à RS-342 que foi utilizada na construção de um aterro rodoviário na mesma rodovia, nas adjacências do município de Cruz Alta, no Rio Grande do Sul, sob as coordenadas 28° 37' 39,40" sul e 53° 37' 30,50" oeste (Figura 1), no horizonte pedológico B. O material será identificado como 'solo CA', fazendo referência ao seu município de origem. Ainda foram coletadas amostras indeformadas da camada final de terraplanagem, que foi compactada na energia intermediária, a fim de verificar se a umidade de compactação do solo em campo causa diferenças significativas no comportamento resiliente do material quando compactado em laboratório.

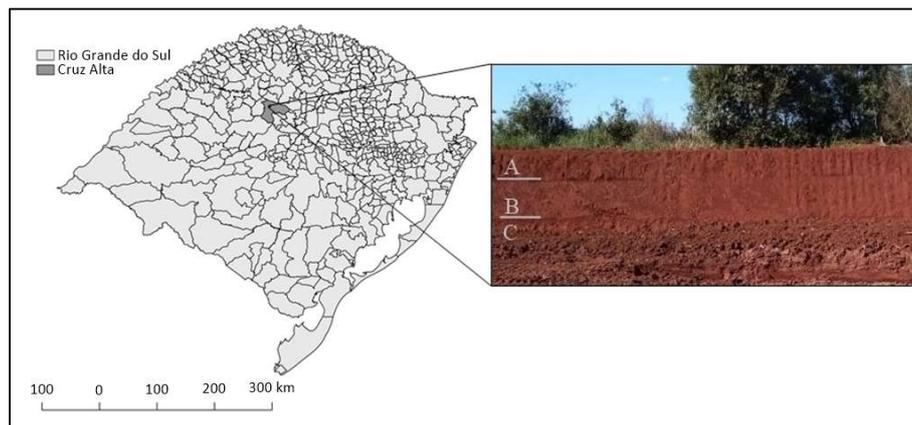


Figura 1: Localização da jazida onde o solo foi coletado.

O material trata-se de uma argila arenosa. Para sua caracterização, após preparação das amostras de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016), foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: peso específico real dos grãos, de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016); Limites de Atterberg, em conformidade com as normas NBR 6459 e 7180 (ABNT, 2016); bem como a análise granulométrica, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016).

O ensaio de compactação foi realizado em conformidade com a norma do DNIT 134 (DNIT, 2018) nas energias normal, intermediária e modificada, para obter os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo. Contudo, para a análise do comportamento resiliente, levou-se em consideração apenas a energia intermediária. A decisão sobre a energia a ser utilizada se baseou nas especificações usuais de serviço do DNIT, que facultam a escolha a critério do projetista. Salienta-se que a energia de compactação intermediária é usualmente utilizada na camada final de terraplanagem. Com os resultados obtidos, foram moldados corpos de prova no molde cilíndrico tripartido de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura na condição de umidade ótima, de acordo com o método de ensaio DNIT 134 (DNIT, 2018). As amostras indeformadas de campo foram esculpidas com espátulas e linhas de aço, obtendo três corpos de prova nas dimensões adequadas ao ensaio triaxial de cargas repetidas.

Para avaliar a alteração do módulo de resiliência do solo na condição saturada, foram ensaiados 6 corpos de prova, sendo três corpos de prova submetidos a um período de imersão em água de 4 dias e três corpos de prova mantidos com suas características ótimas de umidade, permitindo avaliar os efeitos da alteração dessa condição em seu módulo de resiliência. Visando evitar a perda de material, na base e no topo

dos corpos de prova submetidos aos quatro dias de imersão foram colocados papéis filtro, sendo então encamisados com a membrana de borracha, mesma utilizada no ensaio triaxial de cargas repetidas. Os corpos de prova foram acompanhados diariamente e ao fim do quarto dia, retirados dos recipientes e pesados. Dessa maneira, foi possível verificar a quantidade de água absorvida pelos corpos de prova por diferença de massa e determinar indiretamente o teor de umidade após a imersão, que por sua vez foi utilizado para calcular o grau de saturação dos corpos de prova.

Após o protocolo de quatro dias em imersão, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio triaxial de cargas repetidas, seguindo os preceitos da norma do DNIT 134 (DNIT, 2018). As amostras moldadas nas condições ótimas e os corpos de prova esculpados a partir das amostras indeformadas também foram encaminhados ao ensaio de módulo de resiliência. Assim, os corpos de prova foram submetidos a um procedimento de condicionamento e, na sequência, aos 12 pares de tensões confinante e desvio, específicos para subleito, conforme determinado pela norma supracitada. O equipamento triaxial utilizado opera automaticamente, gerenciado pelo software SEEPAV 8200 para aquisição dos dados.

Os resultados foram analisados através dos modelos matemáticos apresentados na Tabela 1, com o auxílio do software de métodos estatísticos Statistica 13.2, através de ferramentas de modelagens preditivas, baseadas em regressões não-lineares múltiplas, proporcionando a obtenção dos parâmetros resilientes e a representação gráfica bi e tridimensional. O critério considerado para avaliação dos modelos foi o coeficiente de correlação, também denominado coeficiente de determinação (R^2).

Para observar os efeitos da mudança no MR do subleito na vida de fadiga de um pavimento, foram realizadas simulações através do software MeDiNa v. 1.1.3.0, versão de setembro de 2019, por meio do dimensionamento da estrutura de um pavimento para proteção do subleito composto pelo solo em estudo, cujo MR foi modelado conforme os resultados desta pesquisa, sendo inicialmente utilizados os coeficientes resilientes obtidos nos ensaios do material na umidade ótima para definição das espessuras das camadas. Os coeficientes de regressão que definem o comportamento frente à deformação permanente (DP) desse solo (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4) foram obtidos por Pascoal (2020), tanto para as condições ótimas de umidade como para as amostras compactadas em campo. Uma vez que o foco da pesquisa foi avaliar o MR do solo saturado após a compactação e seu impacto na vida de fadiga de um pavimento, sem analisar o afundamento em trilha de roda (ATR), optou-se por não realizar o ensaio de DP do material nessa condição, tendo em vista que a severidade do estado de tensões desse ensaio causaria interrupção do teste, tornando-o inconclusivo. Dessa maneira, para prosseguir com a simulação, foram adotados os mesmos coeficientes de DP apresentados pelo solo ensaiado nas condições ótimas de umidade. Para as demais camadas, foram adotados materiais presentes na base de dados do programa, escolhidos de acordo com o MR, buscando valores médios, optando-se por projetar uma estrutura típica dos pavimentos do estado do Rio Grande do Sul, composta por revestimento em concreto asfáltico, base e sub-base de material granular e subleito em solo, cujas propriedades mecânicas são listadas na Tabela 2.

Tabela 2: Descrição dos materiais adotados nas simulações.

Camada	Material	MR (MPa)	Fadiga (k1; k2)	DP (ψ_1 ; ψ_2 ; ψ_3 ; ψ_4)	Poisson	Contato
Revestimento	Concreto Asfáltico Classe 2	6743	1,11E ⁻¹³ ; -3,98	-	0,30	Não aderido
Base	Brita graduada (Gnaiss C5)	381	-	0,087; -0,282; 0,893; 0,096	0,35	Não aderido
Sub-base	Brita graduada (Gnaiss C1)	259	-	0,161; -0,097; 0,525; 0,075	0,35	Não aderido
Subleito (1)	Solo estudado compactado em laboratório	Conforme resultados da pesquisa	-	0,017; 0,699; 0,517; 0,103	0,45	-
Subleito (2)	Solo estudado compactado em campo		-	0,023; -0,090; 0,590; 0,089	0,45	-
Subleito (3)	Solo estudado compactado em laboratório e imerso por 4 dias		-	0,017; 0,699; 0,517; 0,103	0,45	-

O período de projeto foi definido em 10 anos e o Número de Equivalência de Eixos (N) foi adotado conforme proposto por Klamt (2014), a partir dos dados da praça de pedágio Retiro, localizada no Km 510 da BR-116/RS, sendo utilizado nessa simulação um N estimado para dez anos de $1,16 \cdot 10^7$. Uma vez que foi adotado o tráfego da BR-116/RS, definiu-se o tipo de via a ser simulada como arterial primária, o que conduz a uma análise com nível de confiabilidade de 95%, cujos critérios de aceitação são definidos em função do percentual de área trincada, que deve ser inferior a 30%, e da deformação permanente total, inferior a 10 mm. Uma vez definidas as espessuras das camadas que atendessem os critérios estipulados, os parâmetros resilientes do subleito na umidade ótima foram substituídos pelos parâmetros apresentados pelo solo CA saturado pós-compacção e realizou-se novamente a análise, mantendo a estrutura previamente dimensionada, a fim de verificar se a vida de fadiga desse pavimento é prejudicada na nova condição. Da mesma maneira, em outra simulação na mesma estrutura, foram inseridos os coeficientes resilientes e de deformação permanente referentes ao material indeformado, o que permite observar se as condições de compactação de campo causam mudanças significativas na vida útil do pavimento em relação ao pavimento com um subleito compactado nas condições ótimas de umidade.

Tabela 3: Preço unitário dos serviços considerados.

Serviço	Preço unitário
Regularização do subleito	0,77 R\$/m ²
Sub-base de Macadame Seco com brita produzida	103,66 R\$/m ³
Base de brita graduada com brita produzida	115,80 R\$/m ³
Imprimação com asfalto diluído	4,48 R\$/m ²
Pintura de ligação	0,97 R\$/m ²
Concreto asfáltico Faixa C – Areia extraída, brita produzida	272,95 R\$/t
CAP convencional 50/70	2328,13 R\$/t

Fonte: ANP (2020); SICRO, janeiro de 2020.

A fim de avaliar como a mudança na vida útil do pavimento provocada pelo aumento de umidade do subleito impacta nos custos da obra, orçou-se a estrutura simulada, tomando como referência os preços para o estado do Rio Grande do Sul apresentados pelo Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT, de janeiro de 2020, e pela Agência Nacional do Petróleo, de junho de 2020 (ANP, 2020; DNIT, 2020). O preço por quilômetro foi calculado para uma via de 7,20 m de pista de rolamento e 5,00 m de acostamento, considerando apenas os custos de implantação e sinalização, listados na Tabela 3. Uma vez definido o custo por quilômetro, julgou-se oportuno realizar a comparação entre as situações de pavimento com subleito na

umidade ótima e subleito saturado em termos de R\$/km.Neq, isto é, em função do número de solicitações equivalentes suportadas até atingir o limite de projeto de 30% de área trincada do revestimento, análise possibilitada pelo relatório de danos do MeDiNa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização e compactação

A Tabela 4 apresenta uma síntese dos valores médios da caracterização física e da classificação do material estudado, onde observa-se que o solo CA se trata de uma argila arenosa, com considerável presença da fração silte, além de apresentar comportamento laterítico, sendo classificado como um solo laterítico argiloso (LG'). As curvas de compactação do solo estão ilustradas na Figura 2, para as três energias especificadas. Como era de se esperar na medida que se aumenta a energia há um aumento da massa específica aparente seca máxima e redução da umidade ótima.

Tabela 4: Síntese da caracterização e classificação do solo CA.

Solo CA	Média das amostras
% pedregulho (>2,00mm)	0
% areia grossa (0,60 - 2,00mm)	0
% areia média (0,20 - 0,6mm)	8
% areia fina (0,06 - 0,20mm)	25
% silte (2µm - 0,06mm)	26
% argila (<2µm)	41
Peso Específico (KN/m³)	27,80
Limite de Liquidez (%)	55
Limite de Plasticidade (%)	44
Índice de Plasticidade (%)	11
Classificação SUCS	MH
Classificação TRB	A-7-6
Classificação MCT	LG'

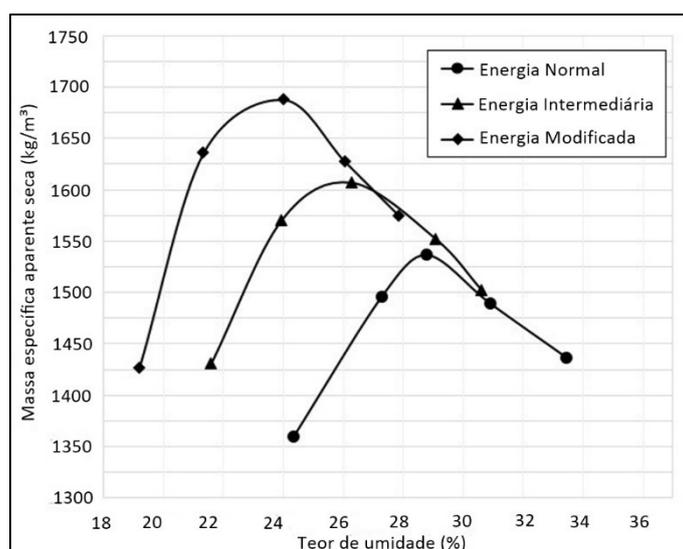


Figura 2: Curvas de compactação do material.

A Tabela 5 apresenta o resumo da situação dos corpos de prova mantidos na umidade ótima, dos corpos de prova esculpidos a partir das amostras indeformadas e dos corpos de prova submetidos à imersão, enfatizando seu aumento no teor de umidade. Ao calcular o grau de saturação dos corpos de prova após a imersão, obtiveram-se resultados ligeiramente superiores a 100%, admitindo-se, dessa forma, que os corpos

de prova atingiram essa condição. Destaca-se ainda o aumento nas dimensões dos corpos de prova, causado pela absorção de água. As três amostras saturadas apresentaram relativa estabilidade e integridade, estando aptas a serem ensaiadas no equipamento triaxial de cargas repetidas.

Tabela 5: Situação dos corpos de prova após 4 dias submersos em água (S), dos corpos de prova na umidade ótima e dos corpos de prova esculpido a partir das amostras indeformadas de campo (I).

	AM01S	AM02S	AM03S	AM04	AM05	AM06	AM07I	AM08I	AM09I
Umidade de compactação (%)	25,20	25,30	25,10	25,70	25,10	25,31	-	-	-
Umidade média de coleta e antes do ensaio (%)	-	-	-	-	-	-	21,52	20,08	20,15
Massa específica aparente seca (kg/m ³)	1630,20	1628,90	1631,50	1626,90	1631,50	1628,90	1645,33		
Grau de compactação (%)	100,32	100,24	100,40	100,12	100,40	100,28	-	-	-
Massa do CP após compactação (g)	3066	3068	2998	-	-	-	-	-	-
Massa após 4 dias imerso (g)	3236	3244	3196	-	-	-	-	-	-
Massa de água absorvida (g)	170	176	198	-	-	-	-	-	-
Umidade após imersão (%)	31,93	32,38	33,36	-	-	-	-	-	-
Diâmetro médio (cm)	10,09	10,11	10,11	9,99	10,00	10,00	10,03	10,00	10,05
Altura média (cm)	20,27	20,61	20,40	20,08	20,06	20,07	19,79	19,96	20,02

S - Amostras imersas em água por 4 dias.

I - Amostras indeformadas coletadas em campo na camada final de terraplanagem.

Obtenção dos parâmetros resilientes e do solo

Em posse dos resultados do ensaio triaxial de módulo de resiliência, analisou-se no software Statistica cada amostra isoladamente e o conjunto de amostras, o que proporciona maior representatividade na análise. A partir dessas análises, obtiveram-se os parâmetros resilientes para cada situação. A Tabela 6 traz os coeficientes para cada modelo, de cada amostra e do conjunto delas, bem como o MR médio apresentado pelo conjunto de amostras e o R² de cada análise.

O Modelo de Svenson, que considera apenas a influência da tensão desvio, não representou bem o comportamento resiliente do solo, tanto na umidade ótima como nas amostras com umidade de campo e após saturação, uma vez que foi obtido um valor baixo de R² e, portanto, não deve ser preferido para avaliar o módulo de resiliência desse material. Os Modelos Composto e Universal, por outro lado, mostraram-se eficientes na previsão do comportamento resiliente do solo na umidade ótima e de campo, dado os valores de R² relativamente elevados, indicando a acurácia dessas metodologias para o material nessas condições. Ao saturar o solo, contudo, percebe-se que o Modelo Composto é o mais eficiente na descrição do MR do material. Dessa maneira, adotou-se o Modelo Composto como base para as análises, visto que é adequado para as todas situações de umidade impostas, além de considerar em sua equação, as duas tensões atuantes no material.

Sendo o Modelo Composto adequado, elaboraram-se os gráficos tridimensionais que representam o comportamento resiliente do solo na umidade ótima e saturado pós-compactação em função das tensões confinante e desvio, ilustrados na Figura 3. A representação gráfica permite visualizar a variação não-linear do módulo de resiliência, dada a superfície irregular obtida e evidencia a mudança no comportamento resiliente do solo frente às tensões atuantes, uma vez que, na umidade ótima, o valor de MR aumenta com

o acréscimo da tensão desvio, embora em menor magnitude do que com a tensão confinante, enquanto que na condição de saturação do solo, há significativa diminuição no MR com o aumento da tensão desvio.

Tabela 6: Parâmetros resilientes a partir dos Modelos de Svenson, Composto e Universal para as condições de análise.

Amostra	Modelo Svenson			Modelo Composto				Modelo Universal			
	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²	k1	k2	k3	R ²
AM01S	47,83	-0,10	0,16	113,18	0,45	-0,33	0,88	277,04	0,54	-1,84	0,77
AM02S	47,45	-0,12	0,20	111,53	0,45	-0,34	0,87	281,67	0,53	-1,86	0,74
AM03S	49,78	-0,09	0,10	124,48	0,48	-0,32	0,83	297,21	0,59	-1,86	0,74
AM 1+2+3S	48,33	-0,10	0,15	116,14	0,46	-0,33	0,85	284,93	0,55	-1,85	0,74
MR médio (MPa)	63			63				64			
AM04	411,80	0,20	0,57	776,65	0,33	0,030	0,94	705,90	0,34	-0,18	0,92
AM05	379,94	0,16	0,42	766,61	0,37	-0,021	0,90	822,71	0,57	-0,84	0,94
AM06	373,40	0,16	0,46	578,50	0,31	0,004	0,86	687,88	0,50	-0,67	0,90
AM 4+5+6	387,90	0,17	0,48	739,20	0,34	0,004	0,90	727,29	0,53	-0,69	0,93
MR médio (MPa)	249			247				248			
AM07I	448,67	0,11	0,32	803,61	0,31	-0,048	0,94	928,63	0,45	-0,79	0,99
AM08I	415,87	0,16	0,41	834,48	0,37	-0,030	0,94	906,49	0,56	-0,85	0,98
AM09I	436,02	0,13	0,42	753,74	0,29	-0,018	0,92	803,71	0,45	-0,67	0,97
AM 7+8+9I	433,04	0,13	0,28	792,87	0,32	-0,032	0,69	875,11	0,49	0,76	0,72
MR médio (MPa)	309			310				309			

S - Amostras imersas em água por 4 dias.

I - Amostras indeformadas coletadas em campo na camada final de terraplanagem.

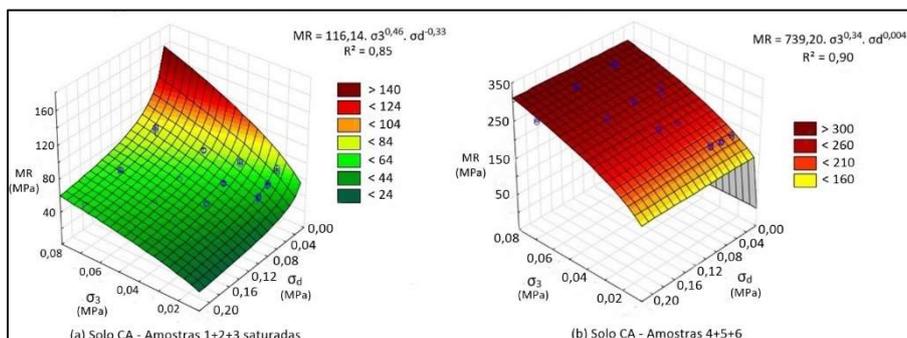


Figura 3: Gráficos tridimensionais do modelo composto do solo CA: (a) saturado pós-compactação e (b) umidade ótima.

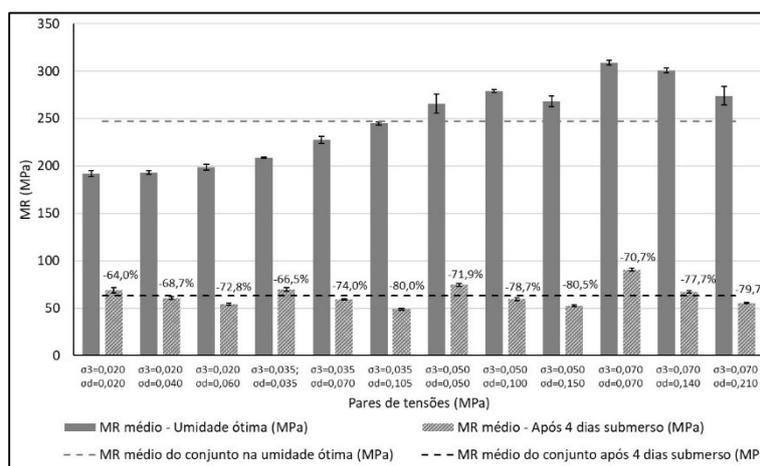


Figura 4: Valores médios de MR para cada par de tensões e para o conjunto de amostras.

Proseguiu-se a análise da resiliência do solo em estudo através da comparação entre os valores de MR na condição de compactação e ensaio na umidade ótima e os valores de MR do material ensaiado após 4 dias de imersão em água. Comparou-se a média aritmética entre os valores de módulo das três amostras, para cada par de tensões e para o conjunto delas, nas duas condições de umidade, conforme ilustrado na

Figura 4, onde constatou-se elevada redução nas capacidades resilientes do material saturado em relação ao material ensaiado na umidade ótima, variando de 64,0% (para $\sigma_3:0,02$ MPa e $\sigma_d:0,02$ MPa) até 80,5% (para $\sigma_3:0,05$ MPa e $\sigma_d:0,15$ MPa). Ao considerar a média do conjunto de amostras, a redução de 247 MPa para 63 MPa representa uma diminuição de 74,5% no MR do subleito quando saturado.

Dessa forma, verifica-se que se não projetada e executada corretamente, falhas na drenagem podem prejudicar o desempenho do material pois, ao entrar em contato com a água, sua capacidade de suporte fica comprometida. A precipitação é um outro fator que pode prejudicar o comportamento mecânico dos pavimentos, principalmente das camadas compostas por solos. No município de Cruz Alta, origem do solo em questão, as médias pluviométricas mensais são bem semelhantes, contudo, na primavera há ocorrência de uma precipitação maior bem como eventos extremos, que corroboram com a elevação dos níveis dos rios, do nível do lençol freático e dos corpos d'água. Às variações das condições ambientais tendem a modificar a umidade nos pavimentos seja pelas águas provenientes do lençol freático, capilaridade, infiltração lateral pelas bordas, infiltração vertical ou por percolação, como ilustrado na Figura 5.

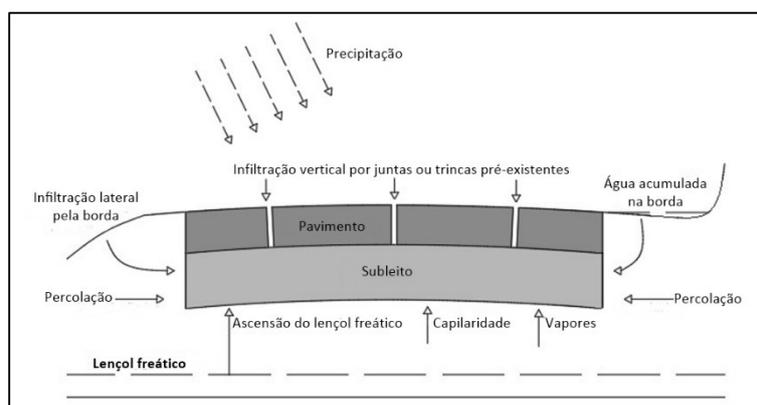


Figura 5: Origem da água na estrutura de pavimentos.

Simulação da vida de fadiga

A estrutura projetada, de acordo com os critérios do MeDiNa e as condições de projeto estabelecidas, ou seja, com o solo na umidade ótima, pode ser visualizada na Figura 6. O subleito de solo CA, conforme os resultados, possui MR não-linear, sendo adotados os coeficientes obtidos por meio do modelo Composto, para as condições de umidade estudadas.

Com a estrutura dimensionada inicialmente para o subleito nas condições de umidade ótima e densidade máxima, e mantendo as espessuras de revestimento e camadas granulares, substituíram-se os coeficientes resilientes da condição ideal pelos coeficientes do material compactado em campo e do solo saturado. Ao inserir os parâmetros de campo, a vida de fadiga sofreu poucas alterações, conforme a evolução da área trincada apresentada na Figura 7, atingindo um percentual ligeiramente inferior ao fim do período de projeto simulado de 10 anos, o que indica que as condições ótimas de laboratório são representativas do comportamento em campo.

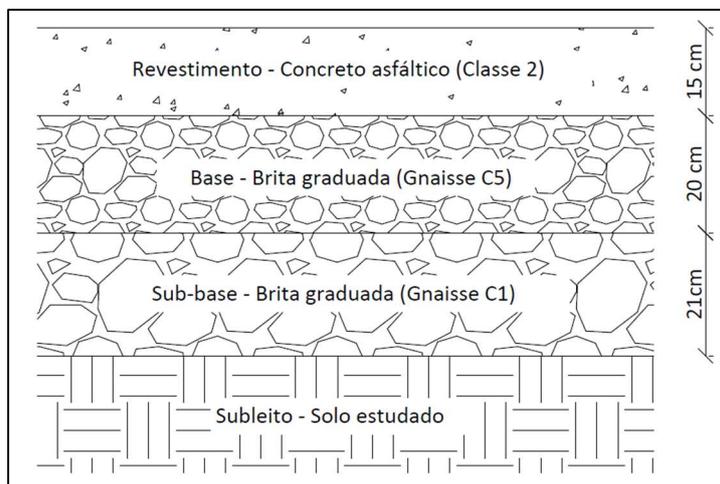


Figura 6: Estrutura do pavimento dimensionado para proteção do subleito na umidade ótima.

Similarmente, ao utilizar os coeficientes do material saturado e realizando nova análise, constatou-se que nessa condição a estrutura deixa de atender o critério de fadiga, atingindo o percentual de área trincada limite de 30% antes do oitavo ano de serviço, resultando em uma diminuição na vida de fadiga desse pavimento em 20% e atingindo um percentual de 41% de área trincada ao completar 10 anos, representando a falência desse pavimento frente ao critério da fadiga. As regressões lineares mostraram ótimas correlações e, a partir dos coeficientes angulares das retas geradas, observou-se que a diminuição no MR provocada pela saturação do subleito, e conseqüentemente redução da rigidez, causou uma taxa de surgimento de fissuras 1,5 vezes maior quando comparado com a estrutura cujo subleito foi mantido nas condições ótimas de umidade. Deve-se ser observado que o resultado da simulação está estritamente relacionado às condições adotadas, como o volume de tráfego, materiais empregados e pelo grau de confiabilidade, além de considerar o subleito continuamente saturado.

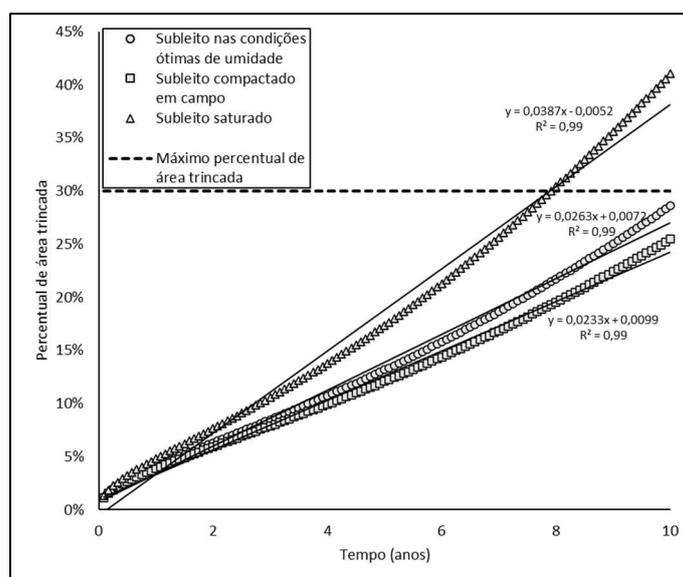


Figura 7: Evolução do percentual de área trincada dos pavimentos simulados.

Em relação ao custo de implantação, a estrutura dimensionada requer investimento de R\$1.996.264,12 por quilômetro. Os resultados do software MeDiNa permitem relacionar o custo ao desempenho, possibilitando estimar o custo por solicitação equivalente (Neq) referente ao período de

projeto de 120 meses, no caso do pavimento com subleito nas condições ótimas de umidade, e 95 meses, quando o pavimento com subleito saturado atinge o percentual limite de 30% de área trincada, conforme Tabela 7. Desse modo, observou-se que a redução do MR do subleito, que leva o pavimento a suportar menos solicitações do que o esperado, refletiu em um aumento de 29% no custo dessa rodovia e ainda gerando a necessidade de manutenções e intervenções nessa situação.

Tabela 7: Número de solicitações equivalentes suportadas pelo pavimento e custo/km.Neq.

Condição do pavimento	Mês	Área trincada (%)	N _{eq}	Custo (R\$/km.N _{eq})	Diferença de custo
Subleito nas condições ótimas de umidade	120	28,61	1,16E+07	0,17	-
Subleito saturado	95	30,01	9,18E+06	0,22	+29%

CONCLUSÕES

Foi observada elevada redução no MR médio do material quando comparado com os resultados apresentados pelo solo ensaiado nas condições ótimas de umidade, de forma coerente com os resultados obtidos por autores que adotaram metodologias semelhantes.

As simulações realizadas mostraram que as condições de compactação do subleito de laboratório e campo geram resultados semelhantes no que se refere à vida de fadiga do pavimento, bem como apresentaram o potencial risco da diminuição do MR do subleito devido à saturação para a vida útil da estrutura, levando a uma diminuição estimada de 20% na vida de fadiga do pavimento quando comparado com o desempenho apresentado com o subleito nas condições ótimas de umidade. O mau desempenho se reflete nos custos da operação, uma vez que uma parcela significativa do investimento passa a ser insuficiente para as necessidades do projeto.

Portanto, pode-se evidenciar a relevância da realização dos ensaios sob condições adversas, auxiliando na previsão das respostas mecânicas dos materiais. Além disso, fica clara a importância da excelência no projeto, na execução e na manutenção da drenagem das rodovias, visando manter o comportamento ótimo dos materiais empregados no pavimento, diminuindo a necessidade de intervenções, bem como do monitoramento preventivo da rigidez e condições de umidade no interior da estrutura, sobretudo após períodos chuvosos, permitindo observar as variações de umidade no campo ao longo do ano. Ademais, o conhecimento das propriedades dos componentes do pavimento é fundamental para robustecer o banco de dados de informações dos materiais para pavimentação disponível, auxiliando a implantar o Método de Dimensionamento Nacional, cuja consolidação contribuirá na correção das deficiências estruturais apresentadas pela maioria das rodovias brasileiras.

AGRADECIMENTOS: À Rede de Tecnologia em Asfalto ANP/PETROBRAS e ao MCTI/CNPq pelo apoio às pesquisas.

REFERÊNCIAS

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Preços de Distribuição de Produtos Asfálticos**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457:**

Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm:

- Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BALBO, J. T.. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de textos, 2007.
- CERATTI, J. A.; GEHLING, W. Y. K.; NUÑEZ, W. P.. Seasonal Variations of a Subgrade Soil Resilient Modulus in Southern Brazil. **Transportation Research Record**, n.1874, p.165-173, 2004. DOI: <https://doi.org/10.3141/1874-18>
- CNT. Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Brasília: CNT, 2019.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 134/2018-ME**: Pavimentação: Solos: Determinação do módulo de resiliência: Método de ensaio. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 2018.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**: Publicação IPR 179. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, 2006.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema de custos Referenciais de Obras**. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2020.
- FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G.. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: COPPE, 2018.
- GOMES, M. S.; GUIMARÃES, A. R.; MARQUES, M. E. S.. Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.5, p.78-87, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0008>
- KLAMT, R. A.. **A Influência da Ação do Tráfego no Custo de Construção e Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- MARTINS, C. A.; SILVA, B.-H. A.; MARQUES, M. E. S.. Definição de segmentos homogêneos para o trecho da BR-040 que compreende a cidade de Congonhas/MG. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.5, p.146-158. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0014>
- MEDINA, J.. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.. **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; SANTOS, J. D. G.. Deformability characteristics of Brazilian laterites. **Geotechnical & Geological Engineering**, v.24, n.4, p.949-971, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-005-8507-z>
- MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J.; MATOS, M. V. M.; VIANNA, A. A. D.. Resiliência de solos pedregulhosos lateríticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 24. **Anais**. Belém: UFPA, 1990.
- NAJI, K.. Resilient Modulus-moisture Content Relationships for Pavement Engineering Applications. **International Journal of Pavement Engineering**, v.19, n.7, p.651-660, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199877>
- NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. Champaign: Transportation Research Board, 2004.
- PASCOAL, P. T.. **Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.
- PEZO, R. F.; CLAROS, G.; HUDSON, W. R.; STOKOE II, K. H.. **Development of a reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design**. Austin: Center for Transportation Research, 1992.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2020.
- SILVA, B.-H. A.. **Análise Mecânica de um Pavimento Rodoviário Submetido à Oscilação do Lençol Freático Simulada em Modelo Físico de Verdadeira Grandeza**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; JUNIOR, F. I. K.. **Drenagem subsuperficial de pavimentos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- SVENSON, M.. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1980.
- THADKAMALLA, G. B.; GEORGE, K. P.. Characterization of Subgrade at Simulated Field Moisture, **Transportation Research Record**, n.1481, p.21-28, 1995.
- WOLLMANN, C. A.. Enchentes no Rio Grande do Sul do século XXI. **Mercator**, v.13, n.1, p.79-91, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4215/RM2014.1301.0006>