

## DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

**Daniel Martins Barbosa Begonha**  
**Isadora Guimarães dos Santos**  
**Francisco Thiago Sacramento Aragão**  
Programa de Engenharia Civil  
COPPE/UFRJ

### RESUMO

O Módulo de Resiliência (MR) é uma propriedade indicativa da rigidez de misturas asfálticas, representada pela razão entre as magnitudes da tensão aplicada repetidamente e a deformação específica recuperável em ensaios de laboratório. A avaliação da rigidez de misturas asfálticas ganhou ainda mais destaque com o desenvolvimento de métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos. Embora não considere o comportamento viscoelástico do material, o MR é atualmente o parâmetro de projeto mais difundido no Brasil, presente no novo Método de Dimensionamento Nacional, o MeDiNa. Diante disso, o emprego de equações preditivas pode ser útil para estimativas iniciais de MR em fases de pré-projeto e seleção de materiais. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa é desenvolver um modelo de previsão para o MR de misturas asfálticas brasileiras. Para isso, foi reunido um banco de dados com propriedades de 63 misturas brasileiras, 56 destas utilizadas nas etapas de desenvolvimento e calibração e sete para a validação do modelo. Por meio de análises estatísticas, utilizando coeficiente de determinação, erro padrão de estimativa, coeficiente de correlação e p-valor de variáveis em regressões lineares, foram avaliados inicialmente os parâmetros que possuem correlação mais forte com o MR das misturas. Parâmetros relacionados à composição granulométrica da mistura, teor de ligante e vazios no agregado mineral apresentaram boas correlações e foram adotados na formulação de equações preditivas. Os resultados obtidos indicam que as equações desenvolvidas apresentam bom potencial preditivo e podem ser ferramentas úteis nas fases iniciais de projetos rodoviários.

### ABSTRACT

The Resilient Modulus (RM) is a property that indicates the stiffness of asphalt mixtures, represented by the ratio between the magnitudes of the applied cyclic stress and the recoverable deformation in laboratory tests. The evaluation of the stiffness of asphalt mixtures has gained even more attention with the development of mechanistic-empirical pavement design methods. Although it does not consider the viscoelastic behavior of the material, RM is currently the most widespread design parameter in Brazil, present in the new National Design Method, MeDiNa. Therefore, the use of predictive equations can be useful for initial MR estimations in the pre-design and material selection phases. Thus, the objective of this research is to develop a predictive model for MR of Brazilian asphalt mixtures. For this purpose, a database was assembled with properties of 63 Brazilian mixtures, from which 56 were used in the development and calibration steps and seven for model validation. By means of a statistical analysis based on coefficient of determination, standard error of estimate, correlation coefficient and p-value of variables in linear regressions, the parameters that have the strongest correlation with the MR of the mixtures were initially evaluated. Parameters related to the gradation of the mixture, binder content and voids in the mineral aggregate presented good correlations and were adopted in the formulation of predictive equations, which were later calibrated. The results obtained indicate that the developed equations have good predictive potential and can be useful tools in the early stages of road projects.

### 1. MÓDULO DE RESILIENCIA

A avaliação da rigidez de misturas asfálticas ganhou ainda mais destaque com o desenvolvimento de métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos. Embora não considere o comportamento viscoelástico do material, o Módulo de Resiliência (MR) é atualmente o parâmetro de projeto mais difundido no Brasil, presente no novo Método de Dimensionamento Nacional, o MeDiNa.

Indicativo de rigidez da mistura, o MR é representado pela razão entre a tensão aplicada repetidamente e a deformação específica recuperável. Os valores de MR podem variar de acordo com características da mistura e pelo modo de condução do ensaio. Marques (2004) em

seu trabalho quantificou o efeito de alguns desses fatores: granulometria, tipo de ligante, teor de ligante, tipo de compactação e temperatura, no valor do módulo de resiliência de misturas analisadas no estudo. Segundo Motta *et al.* (2002), em geral, o MR não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem e é influenciado pela relação asfalto/fíler e pela própria natureza do fíler. Ademais, segundo os autores, o MR tende a apresentar maiores valores para misturas com faixas granulométricas mais graúdas, com partículas de agregados maiores, e para ligantes asfálticos que apresentem menor índice de penetração ou maior viscosidade.

O MR de misturas asfálticas pode ser obtido em laboratório ou por meio de modelos de previsão. Em laboratório, a propriedade pode ser determinada a partir de ensaios de flexão, carregamento axial e compressão diametral, o mais empregado no Brasil. Este último procedimento é padronizado pelas normas DNER 133/94 e ASTM D4123, que preconizam cargas iguais ou inferiores a 30% da resistência à tração do material, obtida pelo ensaio de tração indireta estático.

Modelos de previsão do MR foram desenvolvidos por diversos autores (Leahy, 1989; Motta, 1998; Marques, 2004; Ozsahin e Oruc, 2007; Tabatabaie *et al.*; 2008; Kavussi e Modarres, 2010; Modarres e Hamedí, 2014; Pourtahmasb *et al.*, 2015), com base em banco de dados experimentais de misturas. Alguns destes modelos serão detalhados a seguir.

## 2. MODELOS DE PREVISÃO

A existência de modelos preditivos não dispensa a realização de ensaios de laboratório, mas essa tem se mostrado uma alternativa viável para a estimativa do parâmetro em fases de anteprojeto, quando não se dispõe dos equipamentos necessários. Uma outra possibilidade é o uso destes modelos como ferramentas auxiliares na dosagem de misturas similares às do banco de dados, voltada para a estimativa de determinado MR (Motta, 1998; Marques, 2004).

O modelo desenvolvido por Leahy (1989) na University of Maryland, nos Estados Unidos, utilizou 251 amostras de misturas asfálticas, apresentando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,82. A fórmula foi obtida por meio de regressão logarítmica e considerou tensão aplicada, temperatura de ensaio, viscosidade do ligante, teor de asfalto efetivo e volume de vazios.

O modelo proposto por Ozsahin e Oruc (2007) prevê o MR de misturas frias por meio de redes neurais com retropropagação, utilizando três camadas. A rede neural foi treinada com 168 valores experimentais, diferentes quanto ao teor residual de asfalto, ao nível de adição de cimento Portland e ao tempo de cura da emulsão em dias, parâmetros esses considerados no modelo. Paralelamente, os autores produziram modelo de previsão por meio de regressões estatísticas para os mesmos dados amostrais. Os resultados de previsão da rede neural foram comparados a 15 valores experimentais de MR e aos valores previstos pelo modelo de regressão. Ambos os modelos conseguiram prever bem os valores de MR das emulsões do trabalho, mas o modelo que utiliza redes neurais apresentou erro máximo relativo e erro médio menores em relação ao modelo de regressões estatísticas.

Alguns modelos foram desenvolvidos para misturas com características específicas, buscando compreender seu comportamento e identificar quais fatores teriam maior influência nos valores de MR experimentais. Tabatabaie *et al.* (2008) deram enfoque às variações térmicas em

pavimentos na região tropical do Irã. Kavussi e Modarres (2010) avaliaram misturas recicladas com uso de emulsão asfáltica e cimento Portland a partir de valores do ensaio estático de tração indireta. Foram produzidas em laboratório 36 amostras, variando tempo de cura, tipo e teor de cimento empregados e temperaturas de ensaio. Já Modarres e Hamedi (2014) estudaram em seu modelo misturas asfálticas modificadas com uso de garrafas PET. O banco de dados foi composto por 24 misturas buscando avaliar a influência do teor de PET, do nível de tensão aplicado e das temperaturas de ensaio nos valores de MR.

O modelo recente de Pourtahmasb e Shamshirband (2015) propôs prever o MR de misturas quentes (HMA) e do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) com uso de agregados de concreto reciclados (RCA). A metodologia baseia-se em um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptado (ANFIS), alimentado pelas informações de MR, teor de RCA e temperaturas de ensaio. A eficácia do modelo foi verificada com ensaios de previsão apresentando, segundo os autores, melhor acurácia na previsão para as misturas SMA contendo RCA e pior acurácia ao prever MR para HMA contendo agregados graúdos de RCA.

Destacam-se, ainda, os modelos desenvolvidos pelos autores brasileiros Marques (2004) e Motta (1998). Marques (2004) desenvolveu uma metodologia para utilizar o módulo de resiliência como um critério de dosagem de misturas asfálticas, possibilitando projetá-las para atingirem um determinado valor de MR. O autor também obteve equação de previsão do teor de ligante em função do valor do módulo de resiliência, do teor de vazios, da temperatura, do tipo de ligante e do modo de compactação. O estudo envolveu 270 corpos de prova, confeccionados no laboratório da COPPE/UFRJ, para os ensaios de MR realizados. Foram consideradas as seguintes variáveis independentes: três granulometrias, três tipos de ligantes, três teores de ligante, duas formas de compactação (Marshall e Superpave) e três temperaturas de ensaio. O autor ressaltou, no entanto, que a aplicação dos modelos se restringe a materiais e combinações semelhantes aos estudados em sua pesquisa e que a extrapolação do modelo para outros fatores requer cuidados especiais.

Motta (1998) propôs duas equações de previsão do MR, uma para misturas a quente e uma para pré-misturado a frio. Ambas foram obtidas por meio de regressões lineares para dados obtidos no setor de pavimentos do laboratório da COPPE/UFRJ. A Equação 1, para misturas a quente, usando ligantes convencionais, recém compactadas, considerou 78 misturas e obteve coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,74. A Equação 2, para pré-misturado a frio, após dois meses de moldagem, considerou apenas 10 misturas e apresentou  $R^2$  de 0,945. A Tabela 1 apresenta os limites das variáveis empregadas.

$$MR = 7568,92 - 39,82P + 527,56V_v + 71,91RBV - 243P_b + 112,63P_{3/4} - 189P_{3/8} + 136,71P_4 - 169,91P_{200} - 423,57T \quad (1)$$

$$MR = 2677,28 + 600,7544 P_b - 50,82P_{3/4} + 12,04 P_{1/2} - 25,08P_{3/8} + 10,41P_4 - 41,9T \quad (2)$$

em que *MR*: módulo de resiliência [MPa];  
*P*: penetração do ligante [25°C, 0,1mm];  
*V<sub>v</sub>*: volume de vazios [%];  
*RBV*: relação betume vazios [%];  
*P<sub>b</sub>*: teor de asfalto [%];  
*P<sub>3/4</sub>*: porcentagem de agregado passante na peneira 3/4", em relação ao

- agregado total;
- $P_{1/2}$ : porcentagem de agregado passante na peneira 1/2", em relação ao agregado total;
- $P_{3/8}$ : porcentagem de agregado passante na peneira 3/8", em relação ao agregado total;
- $P_4$ : porcentagem de agregado passante na peneira n°4, em relação ao agregado total;
- $P_{200}$ : porcentagem de agregado passante na peneira n°200, em relação ao agregado total;
- $T$ : temperatura de ensaio [°C].

**Tabela 1: Limites para as variáveis empregadas no modelo de Motta (1992)**

| Misturas a quente |             | Pré-misturado a frio |             |
|-------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Variável          | Valores     | Variável             | Valores     |
| MR [MPa]          | 487 a 14900 | MR [MPa]             | 290 a 1200  |
| P                 | 27 a 92     | Emulsão              | RL1C e RM2C |
| Vv [%]            | 1,6 a 9,6   | T [°C]               | 21 a 30     |
| RBV [%]           | 44 a 88     | Pb [%]               | 4,4 a 7,5   |
| Pb [%]            | 3 a 9       | $P_{3/4}$ [%]        | 80 a 100    |
| $P_{3/4}$ [%]     | 75,5 a 100  | $P_{3/8}$ [%]        | 15 a 79,1   |
| $P_{3/8}$ [%]     | 50 a 99,4   | $P_4$ [%]            | 6,3 a 43,4  |
| $P_4$ [%]         | 37 a 79,3   | $P_{1/2}$ [%]        | 40,5 a 99   |
| $P_{200}$ [%]     | 3 a 8       |                      |             |

Apesar dos múltiplos modelos disponíveis para a previsão do MR, o banco de dados utilizado nem sempre é representativo dos materiais presentes em nosso país. O uso destes modelos exigiria uma calibração, adaptando o modelo ao local de aplicação. Os modelos propostos por autores brasileiros foram produzidos a partir de amostras ensaiadas em um único laboratório. A partir de dados de pesquisas desenvolvidas em várias universidades do país, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de previsão para o MR de misturas asfálticas brasileiras como uma ferramenta auxiliar no dimensionamento de pavimentos e dosagens de misturas.

### 3. BANCO DE DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 Banco de Dados

Para o estudo, foi composto um banco de dados com informações de 63 misturas asfálticas brasileiras. Entre estas, 14 são da região Nordeste, 14 da região Centro-Oeste, 11 da região Sudeste e 24 da região Sul. Trata-se de misturas asfálticas convencionais, com uso de ligantes do tipo CAP 50/70 e CAP 60/85, encontradas na literatura. A Tabela 2 sumariza estas referências, separando-as por região do país.

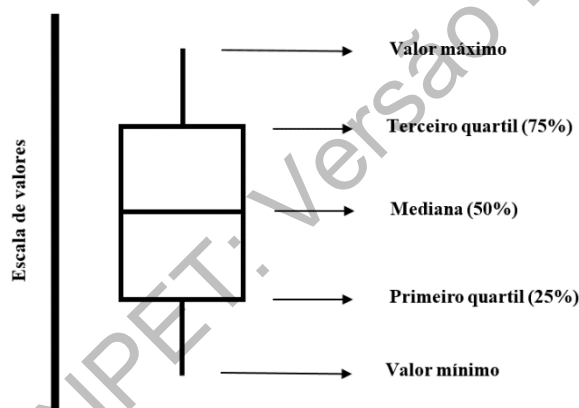
**Tabela 2: Referências utilizadas para compor o banco de dados**

| Região       | Referências   |
|--------------|---|
| Nordeste     | Vasconcelos (2004), Vale (2007), Oliveira Filho (2017)                              |
| Centro-Oeste | Falcão (2007), Silva (2011), Prudente (2015), Gomes (2018), Rodrigues (2018)        |
| Sudeste      | Magalhães (2004), Nascimento (2015), Arêdes (2016), Batista (2017), Fengler (2018), |
| Sul          | Almeida Júnior (2016), Centofante (2016), Bohn (2017), Possebon (2018)              |

As informações sobre as misturas foram organizadas em parâmetros de granulometria, índice de penetração (P) e parâmetros de dosagem das misturas. A distribuição granulométrica foi

considerada na forma de percentuais passantes nas peneiras 1", ¾", ½", 3/8", n4, n10, n40 e n200. Os parâmetros de dosagem usados foram: teor de ligante (Pb), volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV). Ademais, o banco de dados reuniu valores médios dos MRs de todas as misturas, obtidos em laboratório. Para a avaliação da abrangência do banco de dados, utilizou-se de *boxplots*.

Como ilustra a Figura 1, o *boxplot* é composto por um retângulo e por traços verticais. A escala apresenta as unidades do parâmetro. No retângulo estão representados os percentis, medidas de posição que indicam a porcentagem dos dados com valor inferior ou igual ao valor de referência. Percentis de ordem 25%, 50% e 75% recebem os nomes primeiro quartil (Q<sub>1</sub>), segundo quartil (Q<sub>2</sub>) ou mediana e terceiro quartil (Q<sub>3</sub>). Na base do retângulo são apresentados dados do Q<sub>1</sub> e no topo dados do Q<sub>3</sub>, ou seja, entre o primeiro e o terceiro quartis há 50% dos dados. Dentro do retângulo está posicionada a mediana, uma medida de tendência central interessante por não ser tão afetada por valores extremos. Particularmente, quando a mediana se encontra no centro do retângulo, diz-se que a distribuição dos dados é simétrica. O traçado vertical que intercepta a caixa representa a amplitude total dos dados, cujos extremos são valores de máximo e de mínimo do parâmetro avaliado.



**Figura 1:** Representação de gráficos *boxplot*

O banco de dados foi dividido em 2 grupos: um grupo composto por 56 misturas e um segundo grupo composto por 7 misturas. O primeiro grupo foi utilizado para o desenvolvimento do modelo preditivo por meio de análises estatísticas. O segundo grupo foi criado com o intuito de testar a capacidade preditiva do modelo proposto, utilizando neste processo misturas diferentes daquelas usadas durante o desenvolvimento da equação. Para o grupo teste, foram selecionadas aleatoriamente misturas representativas de todas as regiões.

### 3.2 Metodologia

O processo para obtenção de uma equação para prever o MR de misturas asfálticas brasileiras foi realizado em algumas etapas, começando pela identificação de variáveis que estivessem relacionadas com os valores de MR e seguindo com regressões lineares múltiplas para compor a equação do modelo preditivo. Por fim, um esforço adicional de validação foi realizado a partir da comparação entre os resultados previstos e os experimentais de MR das sete misturas que não foram usadas no processo de calibração.

Para identificar quais variáveis apresentam melhor correlação com os valores de MR e que possivelmente seriam mais relevantes na composição de uma equação preditiva para este



estudo, foram realizadas análises estatísticas utilizando os dados do grupo de desenvolvimento. Uma vez identificadas as propriedades mais relevantes, buscou-se, por meio de regressões lineares múltiplas, a combinação de propriedades que fornecessem uma equação com boa capacidade preditiva. Foram utilizados nesse processo uma planilha eletrônica e o software *Statistica*. Os recursos estatísticos utilizados para avaliação das regressões são detalhados a seguir.

### 3.2.1. Coeficiente de Correlação ( $r$ )

O coeficiente de correlação pode ser definido pela Equação 3. É um número adimensional, com valores entre -1 e 1, que indica a relação linear entre duas variáveis quantitativas. Valores próximos de zero indicam baixa associação linear, enquanto valores próximos a 1 e -1 indicam forte relação linear crescente ou decrescente, respectivamente.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left( \frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right) \quad (3)$$

em que  $x_i$ : variável;  
 $\bar{x}$ : média dos valores da variável;  
 $y_i$ : MR medido em laboratório;  
 $\bar{y}$ : média dos valores de MR medidos em laboratório;  
 $n$ : tamanho da amostra;  
 $S_x$ : desvio padrão da variável;  
 $S_y$ : desvio padrão do MR.

### 3.2.2. Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) permite avaliar o quanto da alteração dos valores da variável dependente uma regressão é capaz de explicar. Definido pela Equação 4, esse coeficiente varia de 0 a 1. Valores próximos de 1 indicam boa representação da relação entre as variáveis.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

em que  $\hat{y}_i$ : previsão dos valores de MR.

### 3.2.3. Erro padrão de estimativa ( $S_e$ )

O erro padrão de estimativa é expresso pela Equação 5 e trata-se do desvio padrão dos valores da variável dependente em torno da curva de regressão. Mostra o quão dispersos estão os resíduos, definidos como a diferença entre os valores real e previsto.

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

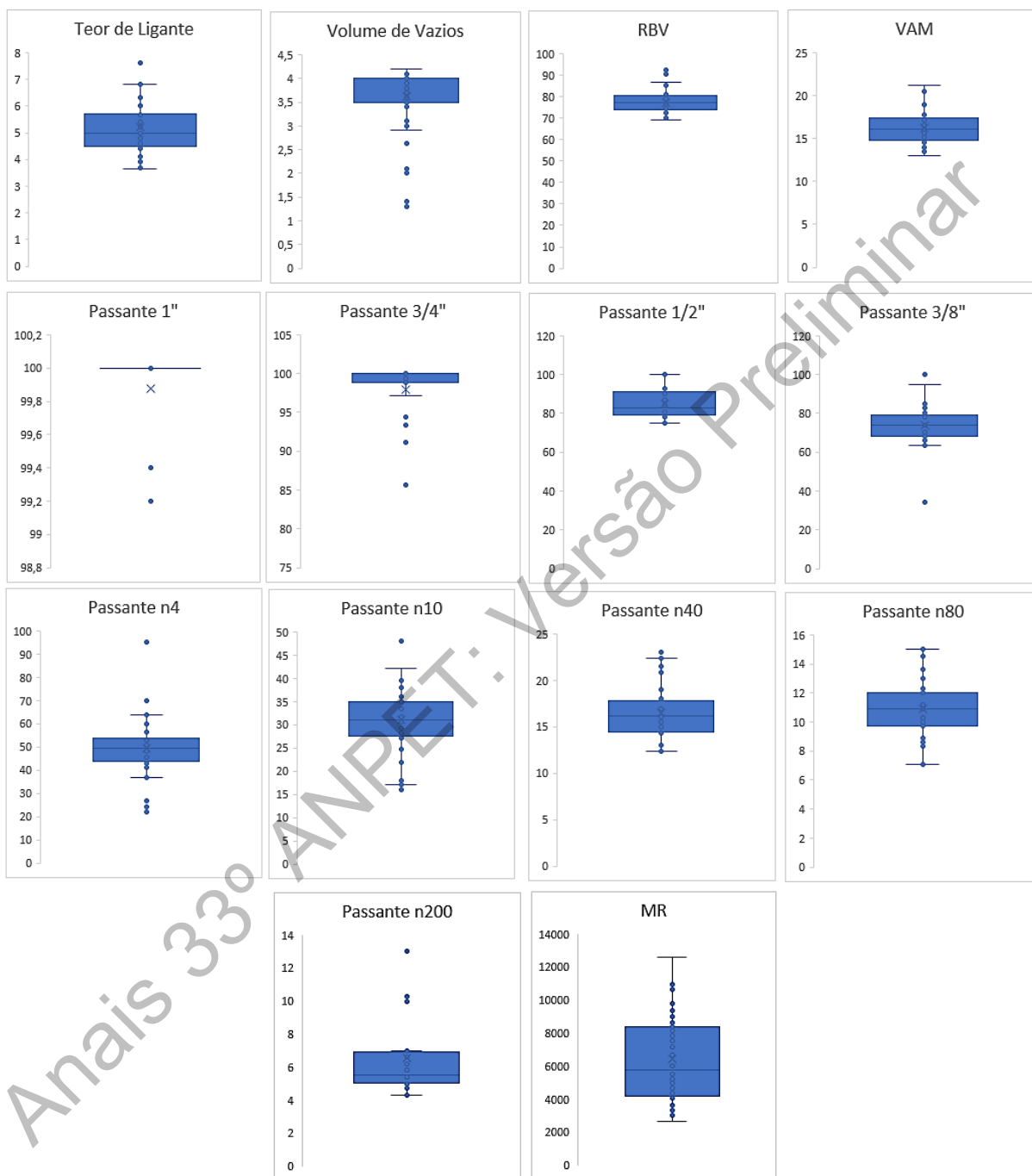
### 3.2.4. P-valor

Em um Teste de Hipótese, o P-valor indica qual deve ser o menor nível de significância ( $\alpha$ ) para o qual a hipótese nula ( $H_0$ ) deve ser rejeitada. A hipótese nula é aquela em que determinada variável explicativa da equação não tem relação significativa com o MR, ou seja, tem coeficiente zero. Considera-se um nível de significância pequeno, usualmente em torno de 0,05. Em outras palavras, são considerados estatisticamente significantes a nível  $\alpha$  dados com evidência forte o bastante para que a hipótese nula ( $H_0$ ) ocorra em menos de 5% dos casos.

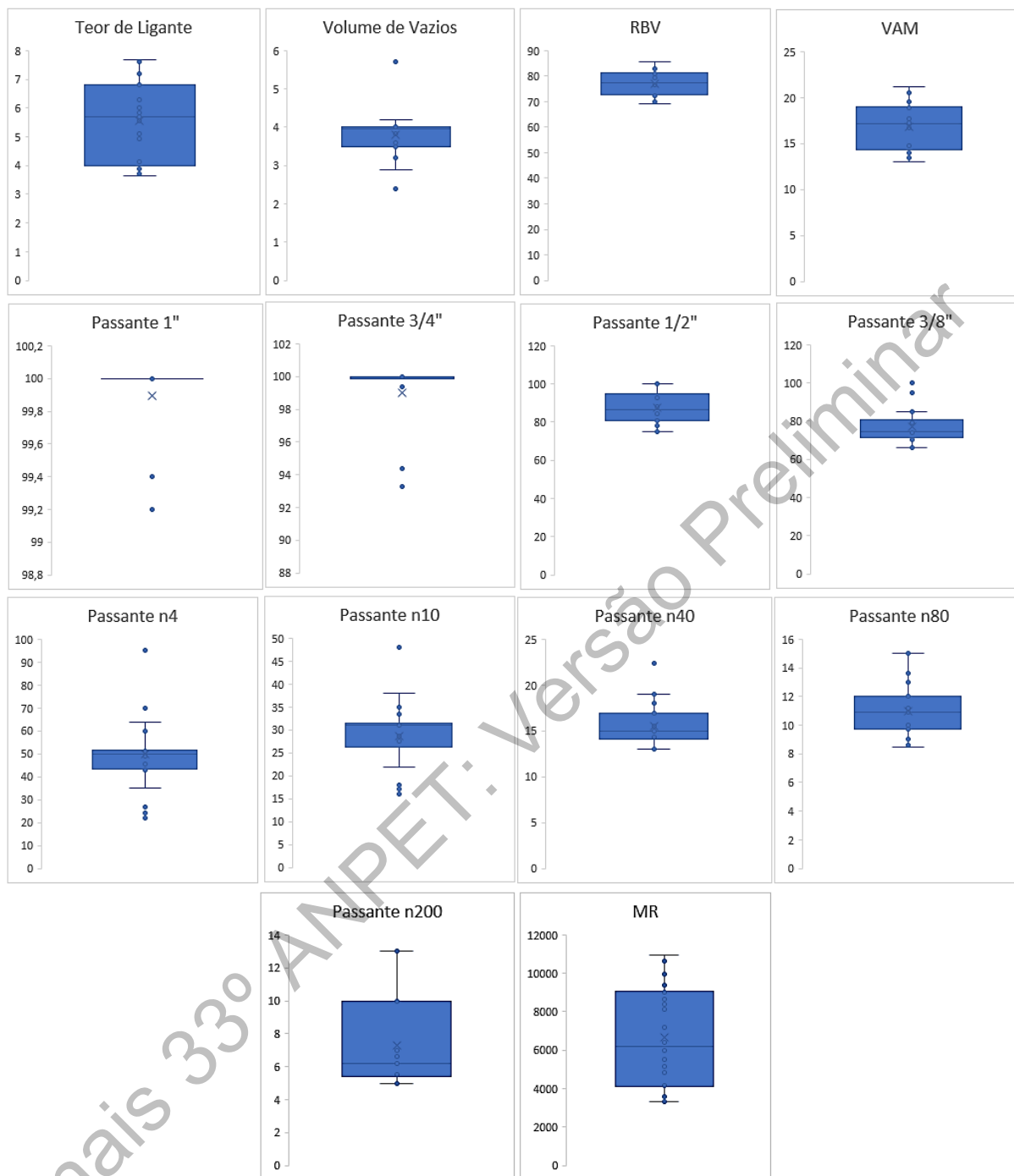
## 4. RESULTADOS

Ao analisar o banco de dados, foi observado que algumas misturas foram submetidas a envelhecimento antes da realização do ensaio de MR. Dessa forma, foi decidido acrescentar uma variável de envelhecimento ( $env$ ) no modelo. Esta variável apresentará valor unitário para

misturas envelhecidas e valor nulo para as misturas não envelhecidas. As Figuras 2 e 3 apresentam gráficos *boxplot* com a distribuição dos parâmetros para as misturas não envelhecidas e envelhecidas, respectivamente.



**Figura 1:** Gráficos *boxplot* com os limites das variáveis de misturas não envelhecidas



**Figura 2:** Gráficos *boxplot* com os limites das variáveis de misturas envelhecidas

Como observado, em função dos procedimentos de dosagem especificados, as variáveis de dosagem volume de vazios, RBV e VAM apresentaram grande porção dos dados concentrados em pequenos intervalos das variáveis. Algumas peneiras apresentaram pontos externos aos limites calculados, mas ressalta-se que estes pontos não apresentaram comportamento de *outliers* para a previsão do MR das misturas e, portanto, foram mantidos no banco de dados.



A Tabela 3 apresenta os coeficientes de correlação ( $r$ ) do MR para cada uma das variáveis avaliadas. Nota-se que as variáveis que apresentaram melhor coeficiente de correlação com o MR foram principalmente propriedades de dosagem. Percentuais passantes nas peneiras  $P_4$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{40}$  e  $P_{3/4}$  apresentaram os menores valores de  $r$ .

**Tabela 3:** Coeficientes de correlação ( $r$ ) do MR com as variáveis avaliadas

| Variável                           | $r$   |
|------------------------------------|-------|
| Teor de Ligante ( $P_b$ )          | -0.69 |
| Relação Betume Vazios (RBV)        | -0.67 |
| % Passante na $P_{1/2}$            | -0.62 |
| % Passante na $P_{200}$            | -0.59 |
| % Vazios no Agregado Mineral (VAM) | -0.54 |
| % Passante na $P_{3/8}$            | -0.48 |
| % Passante na $P_{80}$             | -0.46 |
| % Passante na $P_1$                | -0.41 |
| % Volume de Vazios                 | +0.36 |
| % Passante na $P_4$                | +0.21 |
| % Passante na $P_{40}$             | -0.18 |
| % Passante na $P_{10}$             | +0.11 |
| % Passante na $P_{3/4}$            | -0.07 |

A equação de previsão foi obtida por meio de regressões múltiplas lineares com auxílio do software *Statistica*. Foram exploradas diversas configurações de equações, utilizando regressões logarítmicas e regressões múltiplas lineares usando todas as variáveis ou apenas parte delas. A seguir são apresentadas duas equações sugeridas: um modelo completo (Equação 6) e um simplificado (Equação 7).

$$MR = 171279,9 - 2414,0P_b - 2712,0V_v - 497,8RBV + 1295,0VAM - 1356,3P_1 + 168,0P_{3/4} - 13,7P_{1/2} - 69,0P_{3/8} + 51,5P_4 - 141,1P_{10} + 233,9P_{40} - 125P_{80} - 178,9P_{200} + 1189,9Env \quad (6)$$

$$MR = 47011,5 - 2505,6P_b - 2090,8V_v - 490RBV + 1040,82VAM + 1571,6Env \quad (7)$$

Para o modelo completo, foram consideradas todas as variáveis nas regressões. O  $R^2$  foi de 0,87 e o  $Se$ , 1015. A Tabela 4 apresenta os coeficientes obtidos para essa regressão e os p-valores, cuja maioria manteve-se abaixo de 0,05. A Figura 4a mostra a relação entre os valores previstos e os resíduos, enquanto que a Figura 4b mostra a relação entre os valores previstos e os experimentais para o modelo completo.

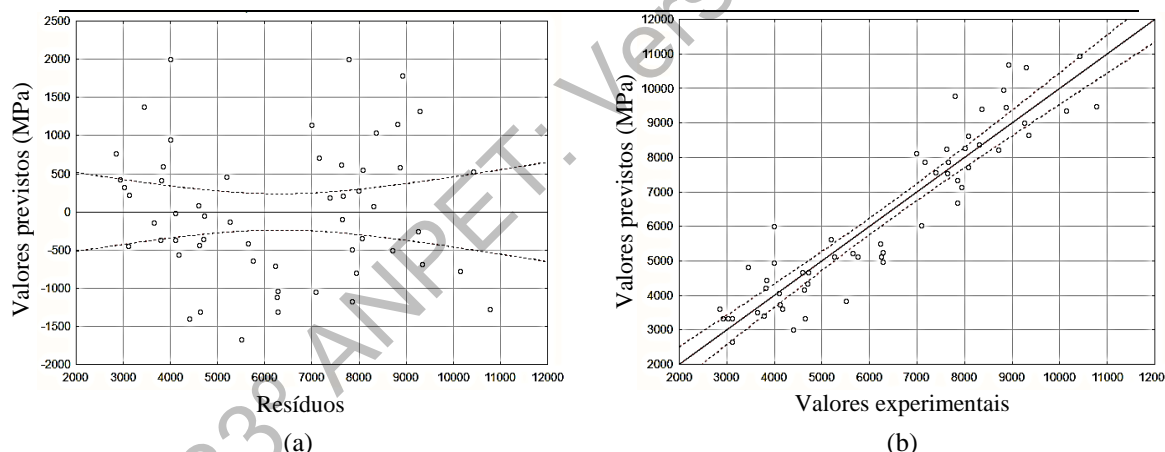
A presença de altos p-valores sugere que a retirada de algumas variáveis pode melhorar o ajuste do modelo. Assim, o modelo simplificado considera apenas cinco variáveis nas regressões: teor de ligante, volume de vazios, RBV, VAM e Env, que define se a mistura foi envelhecida ou não antes do ensaio de MR. Embora o p-valor tenha se mantido abaixo de 0,05, neste modelo houve redução do  $R^2$  para 0,78 e o  $Se$  foi igual a 1168. A Tabela 5 mostra os coeficientes obtidos para essa regressão e os p-valores.

Por fim, foi feita a validação para os modelos completo e simplificado, utilizando o banco de dados adicional contendo sete misturas não usadas nas etapas anteriores. Vale ressaltar que os dados destas misturas estão contidos entre os limites apresentados nos *boxplots* das Figuras 1 e 2.

A Figura 6 apresenta os resultados da validação. Como mostram os gráficos, ambos os modelos propostos forneceram boas previsões do módulo de resiliência das misturas avaliadas e podem potencialmente ser usados como ferramentas em fases preliminares de seleção de materiais e pré-projeto de pavimentos.

**Tabela 4:** Valores para as regressões lineares do modelo completo

| N=56               |       |                   |          |                  |        |         |
|--------------------|-------|-------------------|----------|------------------|--------|---------|
| Variáveis          | b*    | Erro Padrão de b* | b        | Erro Padrão de b | t (41) | P-valor |
| Intercepto         |       |                   | 171279,9 | 74161,37         | 2,31   | 0,03    |
| Pb                 | -0,99 | 0,18              | -2414,0  | 437,64           | -5,52  | 0,00    |
| Vv                 | -0,74 | 0,28              | -2712,0  | 1038,69          | -2,61  | 0,01    |
| RBV                | -0,98 | 0,33              | -497,8   | 168,58           | -2,95  | 0,01    |
| VAM                | 1,02  | 0,20              | 1295,0   | 258,54           | 5,01   | 0,00    |
| Env                | 0,23  | 0,07              | 1189,9   | 363,63           | 3,27   | 0,00    |
| P <sub>1</sub> "   | -0,14 | 0,08              | -1356,3  | 795,26           | -1,71  | 0,10    |
| P <sub>3/4</sub> " | 0,27  | 0,08              | 168,0    | 51,08            | 3,29   | 0,00    |
| P <sub>1/2</sub> " | -0,04 | 0,14              | -13,7    | 48,96            | -0,28  | 0,78    |
| P <sub>3/8</sub> " | 0,29  | 0,15              | -69,0    | 36,10            | -1,91  | 0,06    |
| P <sub>4</sub> "   | 0,29  | 0,15              | 51,5     | 26,84            | 1,92   | 0,06    |
| P <sub>10</sub> "  | -0,40 | 0,16              | -141,1   | 58,84            | -2,40  | 0,02    |
| P <sub>40</sub> "  | 0,27  | 0,21              | 233,9    | 182,56           | 1,28   | 0,21    |
| P <sub>80</sub> "  | -0,11 | 0,24              | -125,0   | 288,74           | -0,43  | 0,67    |
| P <sub>200</sub> " | -0,17 | 0,17              | -178,9   | 183,08           | 0,98   | 0,33    |



**Figura 4:** Gráficos fornecidos pelo programa para o modelo completo: (a) resíduos em função de valores previstos; (b) relação entre valores previstos e obtidos em laboratório

**Tabela 5:** Valores para as regressões lineares do modelo simplificado

| N=56       |       |                   |         |                  |        |         |
|------------|-------|-------------------|---------|------------------|--------|---------|
| Variáveis  | b*    | Erro Padrão de b* | b       | Erro Padrão de b | t (50) | P-valor |
| Intercepto |       |                   | 47011,5 | 13438,86         | 3,50   | 0,00    |
| Pb         | -1,03 | 0,17              | -2505,7 | 408,41           | -6,14  | 0,00    |
| Vv         | -0,57 | 0,2               | -2090,8 | 1038,32          | -2,01  | 0,05    |
| RBV        | -0,96 | 0,32              | -490,9  | 163,52           | -3,00  | 0,00    |
| VAM        | 0,82  | 0,20              | 1040,8  | 254,58           | 4,09   | 0,00    |
| Env        | 0,30  | 0,07              | 1571,6  | 362,95           | 4,33   | 0,00    |

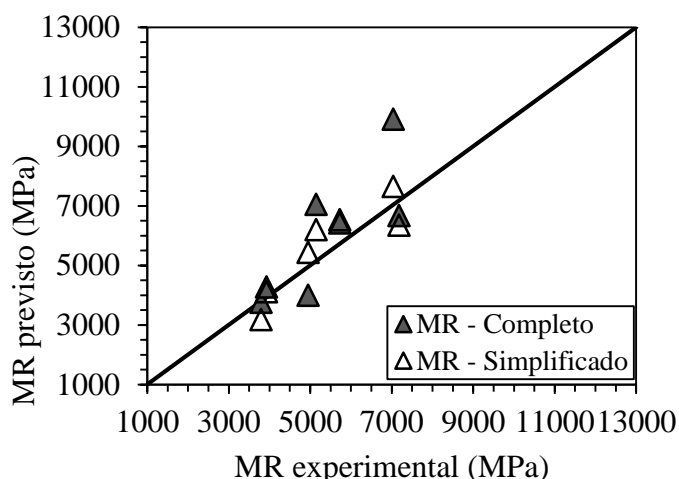


Figura 6: Resultados da validação com as misturas teste

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidos dois modelos de previsão para o MR de misturas asfálticas brasileiras. As equações preditivas foram obtidas por meio de regressões múltiplas lineares de variáveis relacionadas à granulometria e a parâmetros de dosagem de 56 misturas nacionais. Para validação do modelo, foi previsto o MR de sete misturas que não fizeram parte das regressões. O modelo apresentou boas estimativas para o MR das misturas teste.

Ressalta-se que os modelos propostos têm aplicação restrita às misturas asfálticas convencionais com características semelhantes às do banco de dados utilizado nas regressões. Os modelos propostos não consideram efeitos da temperatura, tampouco variações no comportamento mecânico do material ao longo do tempo (envelhecimento), parâmetros a serem incorporados em pesquisas futuras. Ademais, os autores estão ampliando a abrangência do banco de dados, incluindo uma maior variedade de ligantes, modelos para misturas mornas e modificadas.

Espera-se que as versões calibradas dos modelos possam servir como boas ferramentas de previsão para estimar o módulo de resiliência de misturas em fases como o pré-projeto e a seleção de materiais. Isso pode levar a uma significativa economia de tempo, materiais e recursos, pois reduz o processo de tentativa e erro tipicamente adotado, em que diversas combinações de constituintes, como agregados e ligantes, têm que ser avaliadas para se identificar alguma que resulte em características de rigidez esperadas das misturas. Adicionalmente, estes modelos podem ser eventualmente inseridos no programa do novo método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis recentemente lançado no país, o que torna a relevância deste estudo ainda maior.

### Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

STM D7369-11, Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, [www.astm.org](http://www.astm.org)  
DNER-ME 133/94 (1994) – *Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*. Departamento

Nacional de Estradas e Rodagem.

- Almeida Júnior, P. O. B. (2016) *Comportamento Mecânico de Concretos Asfálticos com Diferentes Granulometrias, Ligantes e Métodos de Dosagem*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- Arêdes, M. L. A. (2016) *Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Minério de Ferro*. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, RJ, Brasil.
- Batista, K. B. (2017) *Desenvolvimento de Ligantes Asfálticos Modificado com Lignina como Aditivo Antienvelhecimento*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil.
- Bohn, K. A. (2017) *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- Centofante, R. (2016) *Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas a quente*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- Falcão, P. R. F. (2007) *Estudo das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas de Concretos Asfálticos para Aplicação em Barragens*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, DF, Brasil.
- Fengler, R. Z. (2018) *Caracterização de Ligantes e Misturas Asfálticas Modificados com a Adição de Trinidad Lake Asphalt*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Gomes, J. F. (2018) *Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas Mornas com Agregados de Escória de Aciaria*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, Brasil.
- Kavussi, A., Modarres, A. (2010). *A Model for Resilient Modulus Determination of Recycled Mixes with Bitumen Emulsion and Cement from ITS Testing Results*. Construction and Building Materials, n. 24 p. 2252–2259
- Leahy, R., (1989). *Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete*. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD, USA.
- Magalhães, S. T. (2004) *Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Marques, G. L. O. (2004) *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Modarres, A. Hamed, H. (2014). *Developing Laboratory Fatigue and Resilient Modulus Models for Modified Asphalt Mixes with Waste Plastic Bottles (PET)*. Construction and Building Materials, n. 68 p. 259–267
- Motta, L.M.G. (1998). *Contribuição para a estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas*, 14º Encontro de Asfalto.
- Motta, L.M.G.; Medina, J.; Souza, A.M. (2002). *Características de Fadiga e Resiliência de Concretos Asfálticos Brasileiros*. In: Anais do 16º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro.
- Nascimento, F. A. C. (2015) *Estudo Comparativo sobre Deformação Permanente em Misturas Asfálticas a partir de Ensaio de Tração Indireta e Simulador de Tráfego*. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, RJ, Brasil.
- Oliveira Filho, C. M. S. (2007) *Estudo do Efeito de Diferentes Granulometrias no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Densas Descontínuas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil.
- Ozsahin, T. S., Oruc, S. (2007). *Neural Network Model for Resilient Modulus of Emulsified Asphalt Mixtures*. Construction and Building Materials, v.22, p. 1436–1445
- Possebon, E. P. (2018) *Estudo Laboratorial das Propriedades Mecânicas de Misturas com Diferentes Cimentos Asfálticos de Petróleo Produzidos no Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- Prudente, C. Q. A. (2015) *Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Quente Utilizadas em Goiás*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, GO, Brasil.
- Rodrigues, I. A. (2018) *Análise do Dano em Mistura de Agregados Finos (MAF)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, Brasil.
- Silva, J. P. S. (2011) *Avaliação dos Efeitos de Produtos Rejuvenescedores em Misturas Asfálticas*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, DF, Brasil.
- Tabatabaie, H., Ziari, H., Khalili, M. (2008). *Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran*. Asian Journal of Scientific Research, v.1 p. 579-588. Asian Network for Scientific Information, ISSN 1992-1454
- Vale, A. C. (2007) *Estudo Laboratorial da Viabilidade do Uso de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas do Tipo SMA*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil.
- Vasconcelos, K. L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil.