

UTILIZAÇÃO DE REGRESSÃO NÃO-LINEAR SIMPLES NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS

USE OF SIMPLE NON-LINEAR REGRESSION IN THE STRUCTURAL ASSESSMENT OF ASPHALT PAVEMENTS HIGHWAYS

Antonia Fabiana Marques Almeida^{1,2}
Francisco Heber Lacerda de Oliveira^{1,3}

Resumo: Pavimentos flexíveis rodoviários com condições estruturais inadequadas proporcionam o surgimento de afundamentos de trilhas de rodas excessivos. Para garantir vida útil, conforto ao rolamento dos veículos e segurança das operações e dos usuários, é necessário que esses pavimentos sejam avaliados adequadamente com uma frequência apropriada, considerando o contexto da gerência de pavimentos. Nesse sentido, a avaliação estrutural destaca-se por permitir o conhecimento da capacidade de carga da infraestrutura, muito embora ainda ocasione impactos sobre o fluxo de tráfego e custos elevados durante os levantamentos de campo, devido, sobretudo, aos equipamentos e técnicas envolvidos. Diante desse contexto, este artigo tem o objetivo de efetuar uma análise dos parâmetros de afundamentos de trilhas de rodas e deflexão característica de pavimentos asfálticos rodoviários nacionais, de modo que se obtenha um modelo de correlação satisfatório. O método de correlação não-linear simples entre os parâmetros foi utilizado, pois a correlação linear não se mostrou adequada. Como resultados foram obtidos o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,74$) e a validação do modelo de regressão, que atendeu às premissas. Pode-se concluir que o modelo de regressão desenvolvido é aceitável e pode auxiliar o gestor no planejamento dos levantamentos de campo e na tomada de decisão de um Sistema de Gerência de Pavimentos.

Palavras-chaves: Deflexão. Afundamento. Pavimento. Correlação. Levantamento. Modelo.

Abstract: Inadequate structural conditions provide the appearance, among other distress in flexible pavements, of excessive rutting and deformations greater than those allowed by the infrastructure. To ensure their useful life, the rolling comfort of vehicles, the operations, and users' safety, the pavements must be appropriately evaluated with an appropriate frequency, considering the context of pavement management. In this sense, the structural assessment stands out for allowing knowledge of the infrastructure's load capacity. However, it still impacts traffic flow and high costs during field surveys, mainly due to the equipment and techniques. Given this context, this paper aims to analyze the parameters of rutting and characteristic deflection of national highway pavements to obtain a satisfactory correlation model. We use a simple non-linear correlation between the parameters because the linear correlation was not adequate. The results we got were the coefficient of determination ($R^2 = 0,74$) and the regression model validation, which met the premises. We can conclude that the regression model developed is acceptable and can help the manager plan the field survey and the decision-making of a Pavement Management System.

Keywords: Deflections. Rutting. Pavement. Correlation. Survey. Model.

1 Introdução

No meio técnico rodoviário nacional, é comum buscar-se uma associação direta (linear) entre defeitos estruturais de pavimentos flexíveis rodoviários. Em muitos casos, entende-se que revestimentos asfálticos que possuem afundamentos de trilhas de rodas

¹Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Brasil

²fabiana@det.ufc.br

³heber@det.ufc.br

devem, por consequência, apresentar deflexões de campo superiores à deflexão admissível pela estrutura.

No entanto, estudos como os de Leiva-Villacorta *et al.* (2017) e Huang *et al.* (2020), dentre outros, têm constatado correlações diversas entre os parâmetros mencionados, e a associação direta parece não ser válida, devido às especificidades das deformações. Além disso, o comportamento mecânico do pavimento, as avaliações de campo e de laboratório e a análise das causas que promovem o surgimento dos defeitos, indicam que os afundamentos de trilhas de rodas e as deflexões características são deformações de caráter plástico e elástico (permanente e recuperável), respectivamente. Ainda assim, algumas pesquisas (Huang, 2004) buscaram obter as deflexões características por meio dos afundamentos de trilhas de rodas, mas a obtenção limitou a região de estudo àquela com deformações permanentes. Desse modo, as condições estruturais do pavimento têm efeito nas medições, ou seja, deflexões em áreas com afundamento de trilha de roda tendem a ser maiores quanto comparadas às áreas sem defeitos.

Uma relação, seja linear ou não-linear, porém possível e confiável, entre deflexão característica e afundamento de trilha de roda, pode evitar uma maior quantidade de levantamentos das deflexões em campo, geralmente demorados, de custos elevados e com restrições ao fluxo de tráfego da rodovia. Além disso, no contexto da gerência de pavimentos em nível de rede, a frequência de obtenção das condições estruturais dos pavimentos pode ser melhor planejada, controlada e constante por meio dos afundamentos de trilha de roda que se relacionassem satisfatoriamente com as deflexões características, uma vez que aqueles utilizam equipamentos mais simples do que estas nos levantamentos.

Diante do exposto, este artigo objetiva analisar o emprego da correlação não-linear entre os dados obtidos de levantamentos de campo dos afundamentos de trilha de rodas e das deflexões características em rodovias nacionais executadas em pavimentação asfáltica, de diferentes regiões do país.

2 Referencial teórico

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a ação do tráfego na estrutura do pavimento causa dois tipos de deformações: a recuperável e a permanente. As deformações (ou deflexões) recuperáveis representam um indicativo de comportamento elástico da estrutura, deixando de existir alguns momentos após a retirada da carga oriunda do tráfego. Essas deflexões provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e sua repetição ao longo do tempo é a responsável pelo trincamento por fadiga das camadas asfálticas.

As deformações permanentes, por sua vez, são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga do tráfego, ou seja, tem caráter residual, conforme descreve DNIT (2006). A deformação permanente pode ocorrer tanto no revestimento quanto no subleito, ou como contribuição de todas as camadas do pavimento, e resulta no afundamento de trilha de roda (ATR). Essa medida é um dos critérios de definição da vida útil de um pavimento, pois, a partir de certo valor, interfere na condição de conforto do usuário e na segurança do tráfego, podendo ser o resultado do acúmulo das deformações permanentes.

O ATR é um defeito que tende a aumentar o consumo de combustível devido ao aumento do atrito, causar desconforto aos usuários e, devido à capacidade de retenção de água, aumentar o risco do efeito de aquaplanagem, comprometendo a segurança do tráfego, de acordo com Leiva-Villacorta *et al.* (2017). O ATR pode ser ocasionado devido à baixa densidade da compactação inicial das camadas do pavimento, condições de aplicação das tensões, número de aplicações das cargas oriundas do tráfego, tipo de ligante, teor dos componentes do revestimento (ligante, agregados e volume de vazios) e temperatura (XU; HUANG, 2012).

Para Du *et al.* (2008), existe uma tendência de maior ocorrência (ou de maior magnitude) de deflexões em áreas com deformação permanente pré-existente. Tem-se, também, a premissa que a ação repetida de cargas dinâmicas do tráfego desenvolve deformações verticais compressivas, em uma estrutura que apresentará deformação permanente no futuro.

Gopalakrishnan e Thompson (2007) analisaram a correlação entre a deflexão máxima e o ATR em um pavimento flexível para testar a quantidade de aplicações necessárias que causa a falha no topo do subleito. Embora o pavimento do estudo desses autores fosse aeroportuário, o comportamento esperado é o mesmo em pavimentos rodoviários, com alteração da magnitude e distribuição das cargas aplicadas e, conseqüentemente, das espessuras das camadas da pista. Os autores encontraram uma correlação linear simples com Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,574, valor considerado não ideal por eles.

Um estudo de Leiva-Villacorta *et al.* (2017) analisou correlação linear e não-linear (exponencial) entre a deformação permanente e a deflexão máxima medidas em campo, em quatro diferentes seções de um pavimento rodoviário, com a aplicação de carga de um caminhão dotado de um eixo-padrão de 8,2 tf. Os autores realizaram a análise dos dados com uso de uma série temporal de evolução dos defeitos, por meio de um modelo de autorregressão, e obtiveram um R^2 ajustado global de 0,831 e erro quadrático médio de 1,81. Além disso, os mesmos autores identificaram que deformações permanentes mais elevadas estão diretamente correlacionadas às deflexões mais altas, pois a capacidade estrutural de um pavimento tende a diminuir ao longo do tempo. Recomendaram, em contrapartida, que outros modelos fossem desenvolvidos para auxiliar na previsão da deformação permanente, com o uso de mais parâmetros.

De acordo com Huang *et al.* (2020), a deflexão da superfície do pavimento asfáltico reflete a resistência e a rigidez de toda a estrutura, e pode ser usada para avaliar a vida útil com base no ATR, porém, com o envolvimento de outras variáveis, como cargas de tráfego, propriedades do material e estrutura do pavimento. Esses autores propuseram um modelo que avaliou a influência das variáveis estocásticas do pavimento para prever as deformações permanentes que apresentou um erro inferior a 6%, considerado preciso no estudo.

2.1 Levantamento da deflexão característica

O método não-destrutivo para levantamento das condições estruturais de um pavimento é o mais recomendado por permitir a realização dos ensaios em grandes extensões, e com considerável quantidade de pontos levantados. Uma vantagem importante é a possibilidade de fazer ensaios no mesmo ponto, em períodos distintos, permitindo um acompanhamento da influência da variação do tráfego ao longo do tempo (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No Brasil, o levantamento da deflexão característica nas rodovias federais é indicado por DNIT (2010), que recomenda o uso de Viga Benkelman ou qualquer outro aparelho normalizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), desde que seja estabelecida uma correlação com as deflexões recuperáveis medidas com a viga. Em DNIT (2010), além da Viga Benkelman, utiliza-se um caminhão com 8,2 tf de carga no eixo traseiro (eixo simples de rodas duplas – ESRD), simetricamente distribuída em relação às rodas.

Os pontos nos quais têm-se as deflexões medidas, ainda segundo DNIT (2010), devem ser marcados e localizados a uma distância que varia entre 0,45 m a 0,90 m da borda do revestimento, a depender da largura da faixa de tráfego. Um dos conjuntos das rodas duplas do eixo traseiro deve estar centrado sobre o ponto selecionado na trilha de roda externa, e o eixo do caminhão deve permanecer perpendicular ao eixo da pista de rolamento.

A deflexão característica é um parâmetro importante, pois, seu produto por um fator

sazonal fornece a deflexão de projeto que, para análise estrutural, conforme DNER (1979), deve ser inferior a deflexão admissível, essa calculada com base no número de operações do eixo-padrão rodoviário (ESRD, de 8,2 tf). Além disso, a deflexão característica pode ser calculada por segmentos homogêneos, com base nos parâmetros estatísticos, média e desvio padrão.

Outro equipamento utilizado no Brasil para o levantamento estrutural de pavimentos rodoviários é o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), um deflectômetro de impacto que simula a aplicação dinâmica de cargas oriundas do tráfego, cujo procedimento de levantamento é recomendado por DNER (1996). A aparelhagem necessária para a realização dessa determinação é composta de: (i) um veículo propulsor que abriga um sistema de controle do sistema hidráulico, de dados e de geração de energia para recarga de baterias instaladas em um reboque, (ii) o equipamento FWD instalado em um reboque tracionado, com placa de carga e barra de suporte dos sensores e (iii) um sistema de aquisição de dados constituído de célula de carga, sensores, termômetros e odômetro de precisão.

Existem outros equipamentos que podem ser utilizados para a determinação das deflexões características, porém, como destacado por Bernucci *et al.* (2010), os dois descritos anteriormente são os mais utilizados para avaliação estrutural em pavimentos rodoviários brasileiros. Embora válidos, os equipamentos não apresentam os mesmos valores de deflexão característica, sendo, na opinião de Farias e Monteiro (1996), o FWD de maior benefício com relação à Viga Benkelman, pois tem capacidade de avaliar as condições de uma carga curta em termos de magnitude e frequência. Por sua vez, Macêdo (1996) *apud* Fonseca (2002), também considera que, em termos de resposta dos pavimentos às cargas, o FWD é o que mais se aproxima dos deslocamentos na superfície produzidos por um caminhão em movimento, sendo possível encontrar correlação com os dados da Viga Benkelman.

Segundo Paiva e Causim (2000), outra vantagem no uso do FWD em relação à Viga Benkelman, é a possibilidade de leituras rápidas e acuradas, sendo mais preciso, porém com maior custo de execução, o que pode não compensar seu uso em trechos de curta extensão.

2.2 Levantamento dos afundamentos de trilhas de rodas

As deformações permanentes nas trilhas de roda (ou afundamentos de trilhas de rodas) são obtidas conforme procedimento recomendado por DNIT (2003) para avaliação objetiva da superfície de pavimentos rodoviários flexíveis e semirrígidos. Para esse levantamento, são utilizados uma treliça de alumínio, padronizada, com 1,20 m de largura na base de contato com o pavimento, dotada de régua móvel instalada em seu ponto médio com capacidade de realizar medidas das flechas dos afundamentos nas trilhas de roda, em milímetros, e material auxiliar para demarcação e localização das estações de avaliação.

As superfícies de avaliação devem ser localizadas a cada 20 m alternados em relação ao eixo da pista de rolamento (ou seja, a cada 40 m em cada faixa de tráfego) nas rodovias de pista simples, e a cada 20 m na faixa de tráfego mais solicitada de cada pista, nas rodovias de pista dupla. As estações de trabalho devem ser demarcadas com o número correspondente à estaca ou à distância ao marco quilométrico, pintado junto à borda do revestimento, além de delinear traços transversais, com a distância de 3,0 m à vante e à ré; assim, cada estação deverá possuir a largura da faixa de tráfego e extensão de 6,0 m, e somente no interior de cada estação é que os afundamentos de trilhas de roda devem ser medidos com a treliça padronizada.

Essas medidas devem ser tomadas na trilha de roda interna (mais próxima do eixo) e na trilha de roda externa (mais próxima do acostamento), adotando o maior dentre os valores medidos. Caso na estação exista algum remendo ou panela que dificulte a medição das

flechas, a treliça pode ser deslocada dentro da área limitada pela estação previamente definida.

3 Aplicação da regressão não-linear em pavimentos rodoviários nacionais

De modo a se analisar o emprego da correlação não-linear entre os dados obtidos de levantamentos de campo dos afundamentos de trilha de rodas (ATR) e das deflexões características (D_c) em rodovias nacionais executadas em pavimentação asfáltica, foram cumpridas as etapas a seguir determinadas: (i) apresentação e caracterização dos dados obtidos, (ii) estimativa do modelo de regressão e (iii) validação do modelo de regressão selecionado.

3.1 Apresentação e caracterização dos dados obtidos

Foram obtidos dados de levantamentos estrutural e funcional realizados em seis rodovias de jurisdições estadual e federal localizadas nos estados de Alagoas, Ceará, Goiás e Rio Grande do Sul. Todas as rodovias estudadas são classificadas como de pavimentação flexível, executadas em revestimento de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Essas rodovias foram selecionadas por possuir segmentos com vida útil aproximada e apresentar, para o mesmo ponto de coleta do levantamento, os pares de informações de ATR e D_c num total de 1.141 informações. A Tabela 1 apresenta um resumo quantitativo das informações coletadas.

Tabela 1 – Resumo das informações referentes às rodovias analisadas.

Rodovia	Estado	Quantidade de informações (ATR e D_c)
BR-116	Ceará	196
BR-158	Rio Grande do Sul	144
BR-424	Alagoas	72
CE-065	Ceará	216
GO-060	Goiás	395
RSC-480	Rio Grande do Sul	118
Total		1.141

Fonte: Os autores, 2020.

Após unificar os dados de ATR e D_c , foi possível caracterizá-los do ponto de vista da estatística descritiva. A Tabela 2 apresenta um resumo dessa caracterização nas rodovias estudadas.

Tabela 2 – Caracterização dos dados dos levantamentos de ATR e D_c das rodovias.

Parâmetro descritivo	ATR (mm)	D_c ($\times 10^{-2}$ mm)
Desvio Padrão	4,880	29,0
Média Aritmética	5,470	70,0
Valor Mínimo	0,000	6,0
Valor Máximo	39,000	150,0
Coefficiente de Variação (adimensional)	0,893	0,412

Fonte: Os autores, 2020.

Uma observação realizada com base na caracterização apresentada na Tabela 2 está nos valores de Coeficiente de Variação. Pode-se pressupor uma elevada heterogeneidade dos dados, sobretudo do ATR, quando comparado à D_c . Nos gráficos da Figura 1 pode ser visualizada a relação entre esses parâmetros nas rodovias individualmente. A Figura 2 apresenta o gráfico dos dados unificados, nos quais a suposição de alta dispersão pode ser mais bem visualizada.

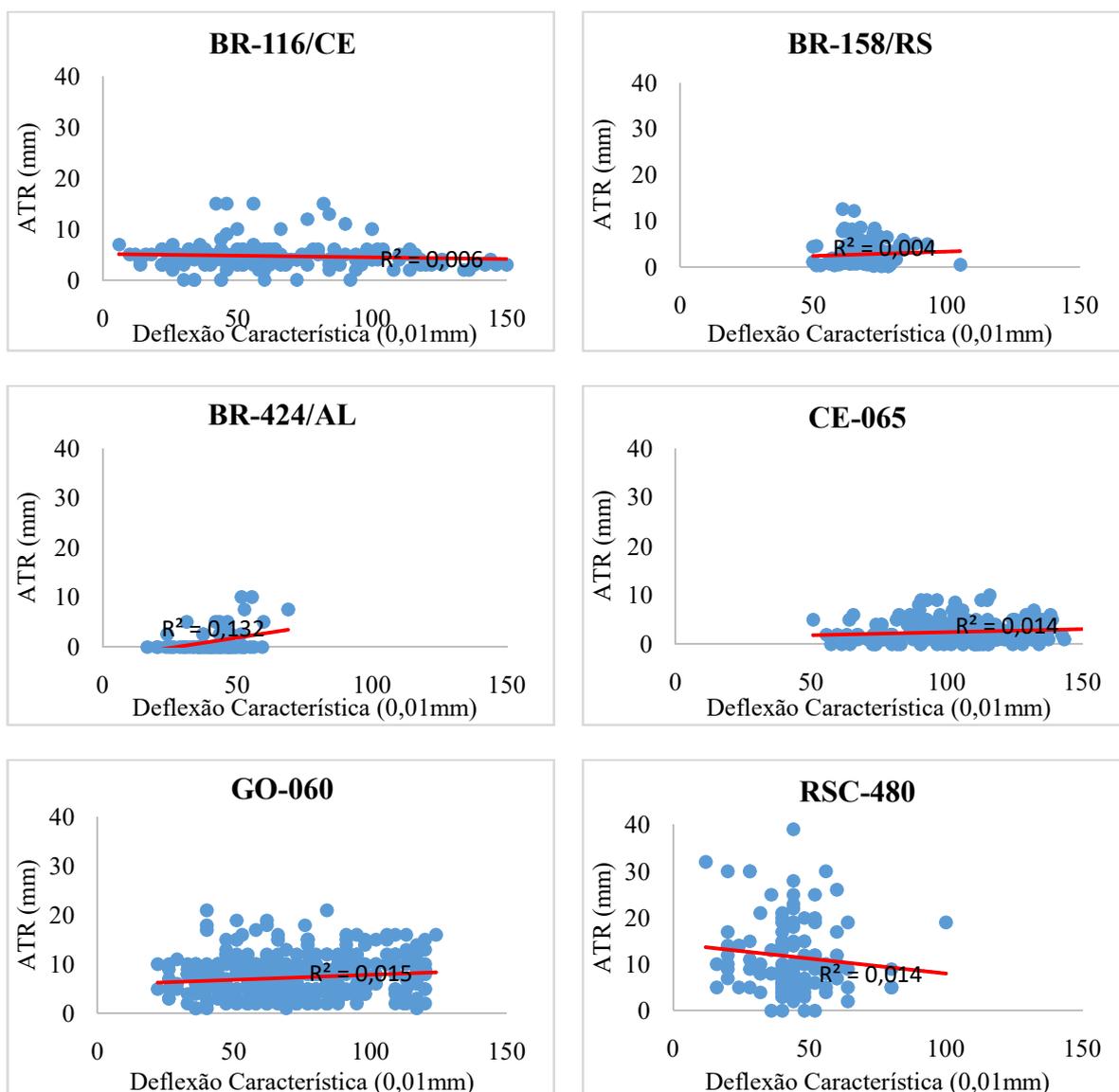


Figura 1. Dispersão dos dados de ATR e D_c e tendência linear, com dados individuais.

Fonte: Os autores, 2020.

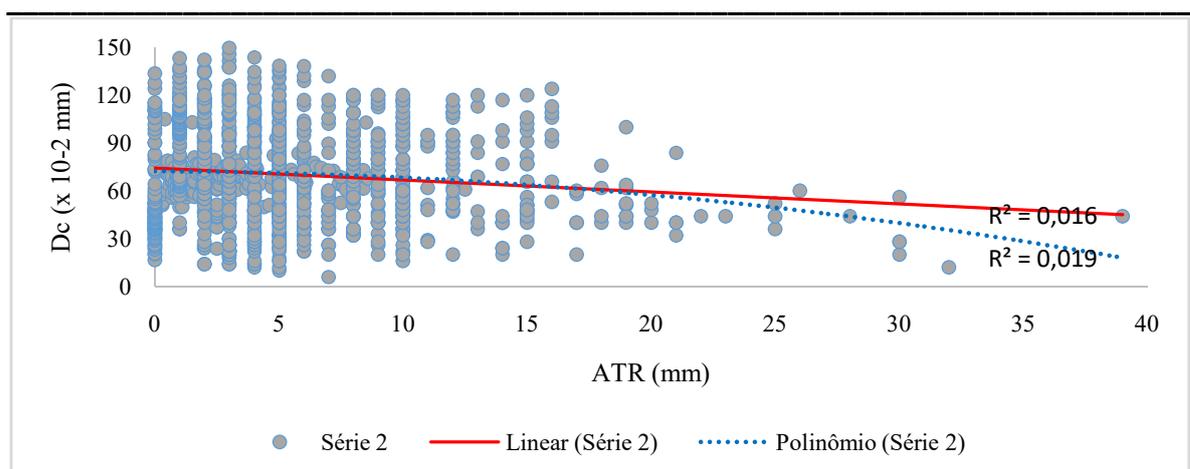


Figura 2. Dispersão dos dados de ATR e D_c , com dados unificados de todas as rodovias.

Fonte: Os autores, 2020.

Na análise dos gráficos individuais das seis rodovias em questão (Figura 1), pode-se observar, além da dispersão dos dados de ATR e D_c , que a verificação da tendência linear tem resultados de Coeficiente de Determinação (R^2) considerados baixos, com o valor mínimo de 0,0045 na rodovia BR-158/RS e máximo de 0,1325 na rodovia BR-424/AL.

Considerando-se, portanto, essa tendência linear fraca nas rodovias estudadas, os dados de ATR e D_c foram unificados e igualmente analisados, porém, com a adição da tendência não-linear do tipo Polinomial de Grau 2 (Figura 2). Ainda assim, observa-se que a alta dispersão de D_c quando dependentes de ATR é mantida, pois o R^2 apresenta valores muito baixos, da ordem de 0,0161 se a equação de ajuste dos dados for Linear, chegando a um valor máximo de 0,0194, se Polinomial de Grau 2. Mesmo com um discreto aumento quando a regressão é não-linear, o valor de R^2 ainda é insatisfatório, porquanto espera-se valores de R^2 mais próximos de 1, pois há melhor resposta do valor de D_c com relação ao ATR. Vale ressaltar, que neste trabalho não foram testados os modelos não-lineares cuja equação de regressão seja Logarítmica ou de Potência, em função dos valores nulos (zero) de ATR em alguns pares de dados.

3 2 Estimativa do modelo de regressão

Os valores insatisfatórios de Coeficiente de Determinação (R^2) apresentados para a correlação linear dos parâmetros (D_c e ATR) podem ser justificados pela existência de diferentes valores de D_c para um mesmo valor de ATR. Para realizar a análise de regressão, foi utilizado, então, o ATR como variável independente (eixo x) e, para a dependente (eixo y), foi considerada a relação entre o ATR e a D_c , com as deflexões características utilizadas na unidade de milímetros a partir daqui, para análise gráfica realizada na mesma unidade, conforme Equação (1).

$$y = \frac{ATR}{D_c} \quad (1)$$

No gráfico da Figura 3 podem ser verificados os dados conforme descrição anterior. Observa-se que a dispersão dos dados foi reduzida, o que implicou num incremento dos valores de R^2 de 0,5702 e 0,6241 para equações Linear e Polinomial de Grau 2, respectivamente.

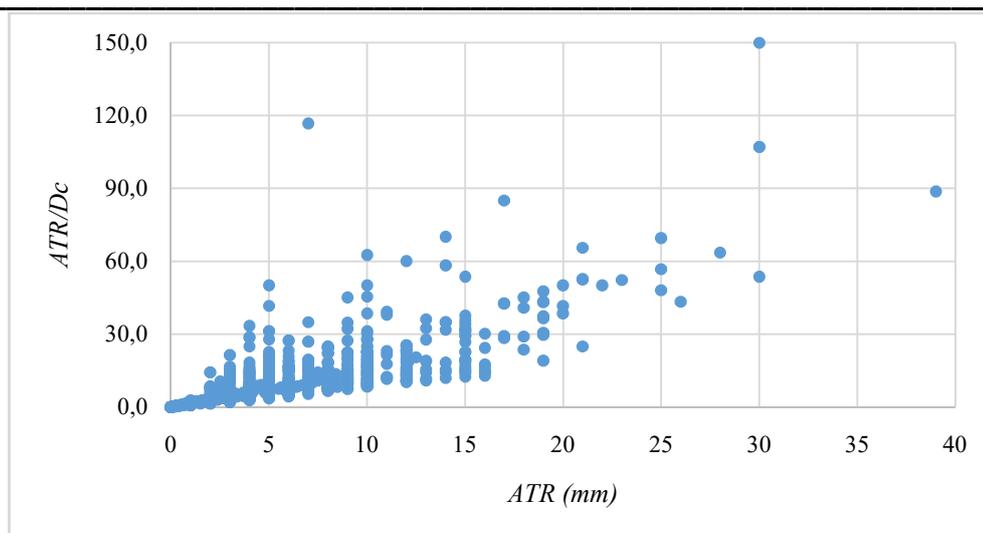


Figura 3. Dispersão dos dados pós-ajuste.

Fonte: Os autores, 2020.

Para estimar o modelo mais apropriado para relacionar os parâmetros de ATR e D_c , foram selecionados, aleatoriamente, 60% dos dados, sendo os 40% restantes utilizados para validar o modelo desenvolvido. Os gráficos das figuras 4 e 5 apresentam as estimativas realizadas por meio de regressão linear e não-linear, respectivamente.

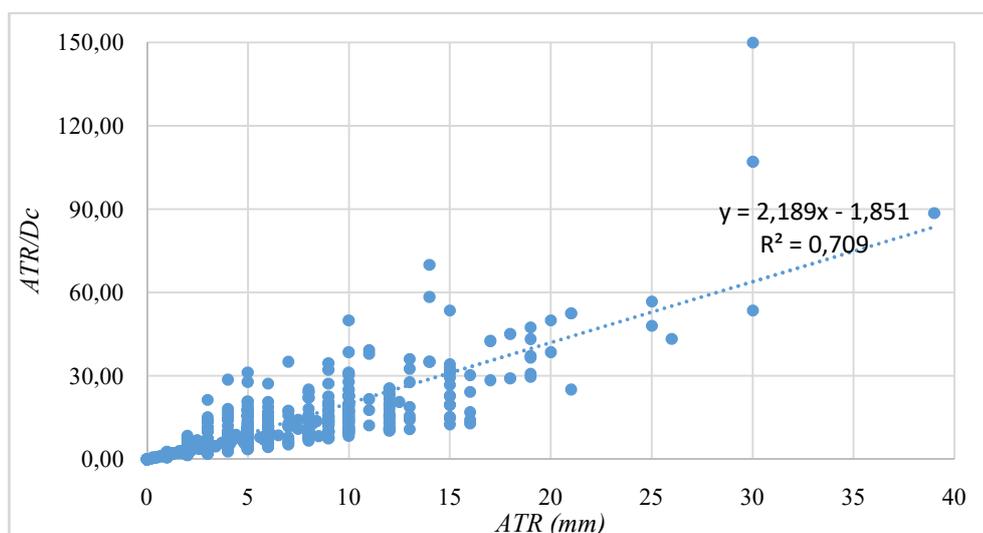


Figura 4. Estimativa obtida do ajuste linear da amostra.

Fonte: Os autores, 2020.

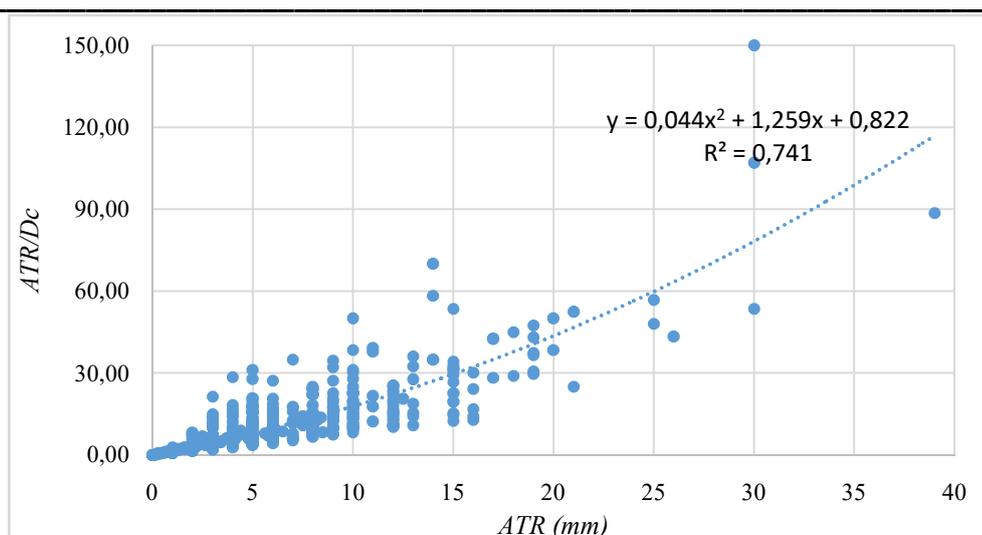


Figura 5. Estimativa obtida do ajuste não-linear da amostra.

Fonte: Os autores, 2020.

Observa-se, pelo gráfico da Figura 4, que a equação linear obteve um R^2 de 0,7099. Por sua vez, a equação de ajuste do tipo Polinomial de Grau 2, visualizada na Figura 5 e obtida da regressão, tem um R^2 igual a 0,7415, ou seja, cerca de 74% dos dados do eixo x explicam os dados do eixo y . Desse modo, constata-se que os valores de R^2 são próximos e, portanto, não se pode confirmar qual dos dois gera melhores resultados. Para isso, é necessário avaliar os resíduos gerados na etapa de validação, e escolher aquele que possui os menores valores.

Como x foi definido como sendo igual a ATR e y foi apresentado como a razão entre ATR e D_c (Equação (1)), a forma de obter a D_c com base no ATR quando a equação de ajuste é linear está descrita na Equação (2) e para a equação polinomial na Equação (3).

$$D_c = \frac{ATR}{-1,852 + 2,189 * ATR} \quad (2)$$

$$D_c = \frac{ATR}{0,04408 * ATR^2 + 1,259 * ATR + 0,8225} \quad (3)$$

3.3 Validação do modelo de regressão

Nesta etapa, 40% dos dados foram escolhidos aleatoriamente para serem utilizados na etapa de validação do modelo. Para tanto, foram calculados valores de D_c com base nas equações (2) e (3) e os resíduos (considerados erros) podem ser determinados pela diferença entre os valores de deflexão característica obtidos nos levantamentos de campo e o valor de deflexão característica calculado pelas equações (2) e (3). Os gráficos das figuras 6 e 7 apresentam as distribuições dos resíduos calculados com o uso dos modelos das equações Linear e Polinomial de Grau 2, respectivamente.

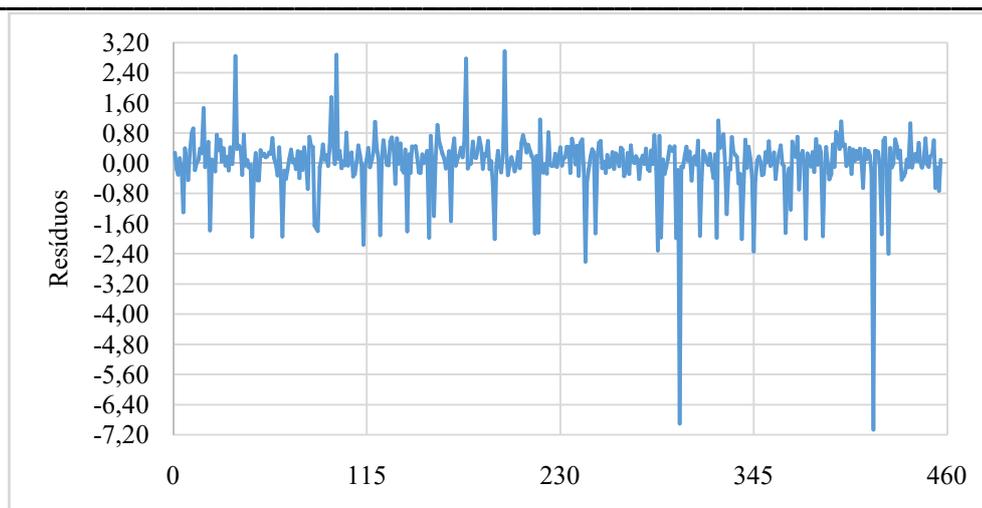


Figura 6. Distribuição dos resíduos obtidos do modelo Linear.

Fonte: Os autores, 2020.

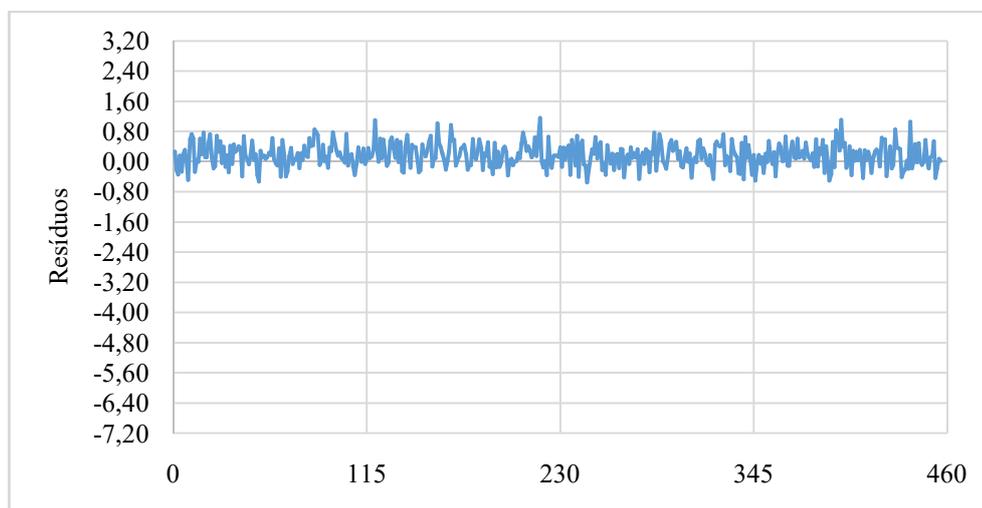


Figura 7. Distribuição dos resíduos obtidos do modelo Polinomial de Grau 2.

Fonte: Os autores, 2020.

No caso dos resíduos obtidos do modelo Linear (Figura 6), observa-se que há uma dispersão elevada dos dados, e, possivelmente, a presença de *outliers*, o que pode evidenciar alguma tendência não adequada para resíduos de regressão. Pela distribuição dos resíduos obtidos do modelo Polinomial de Grau 2 (Figura 7), pode ser observado pouca dispersão entre os dados e que os resíduos são independentes entre si, pois não apresentam uma tendência bem definida, atendendo, assim, a uma das premissas dos resíduos oriundos da análise de regressão. Outro requisito é que esses resíduos tenham distribuição do tipo normal, que pode ser verificada com o uso de testes de hipóteses.

Para os testes de hipóteses, foi utilizado o *software* estatístico *Gretl*, que executa quatro testes para verificar a normalidade: *Jarque-Bera*, *Doornik-Hansen*, *Shapiro-Wilk* e *Lilliefors*. A hipótese nula de todos os testes mencionados é que os dados sob análise seguem distribuição normal, com um nível de significância de 5%.

Nesse sentido, os resíduos obtidos do modelo linear tiveram, para os quatro testes realizados, a hipótese nula rejeitada, ou seja, não seguem distribuição normal. Assim, por não atender à premissa de normalidade, o modelo Linear será desconsiderado neste estudo a partir daqui. Por sua vez, os resíduos obtidos do modelo Polinomial de Grau 2, para todos os testes,

constatarem que a hipótese nula não pôde ser rejeitada, o que leva à possibilidade de supor que os dados seguem uma distribuição normal. O histograma da Figura 8 apresenta uma melhor análise visual, com a aproximação da curva normal correspondente.

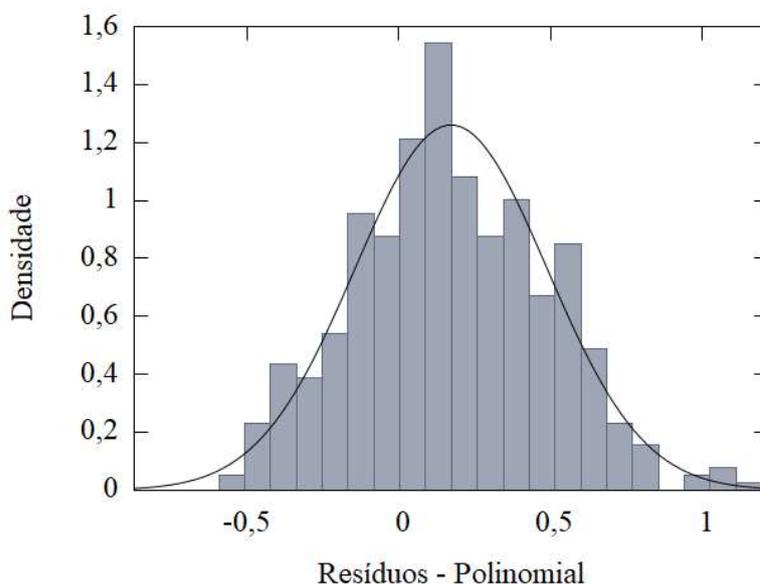


Figura 8. Histograma dos resíduos obtidos da aplicação do modelo polinomial.

Fonte: Os autores, 2020.

Esses resíduos apresentam uma média de 0,1812 e um desvio padrão de 0,3134. Observa-se que, apesar da normalidade, existe um enviesamento nos resíduos para a direita, no valor de 0,187 (muito próximo de zero, que é considerado ideal).

No *software* Minitab, foi realizado o teste de *Grubbs*, que testa, como hipótese nula, se a amostra provém da mesma população normal, ou seja, que os valores extremos não são do tipo *outlier*. O gráfico da Figura 9 apresenta o resultado do teste que, pelo *p-valor* calculado, aponta indícios para não rejeitar a hipótese nula, a um nível de significância de 5%.

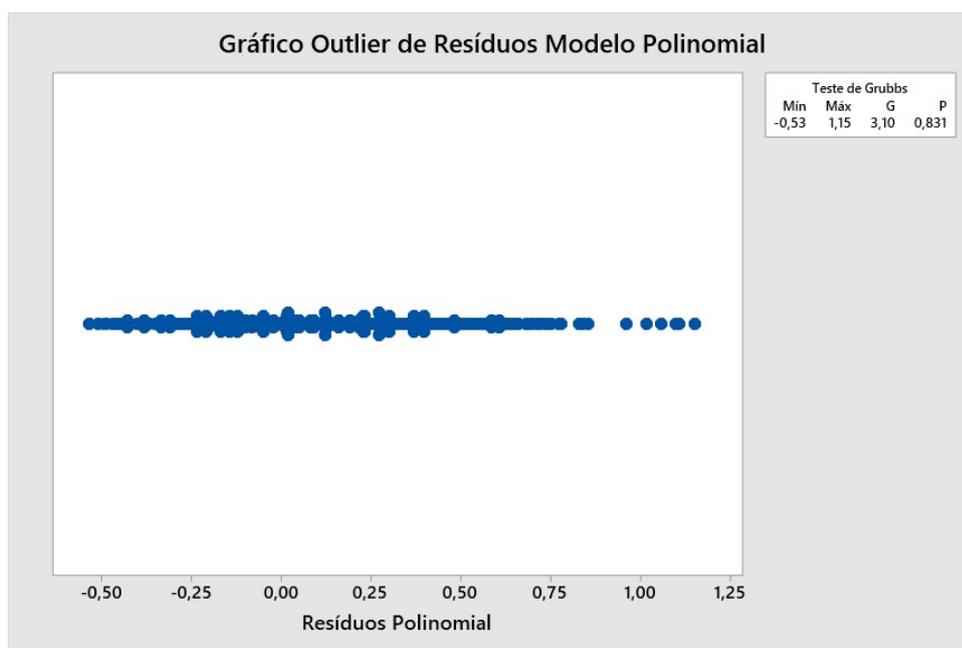


Figura 9. Gráfico da análise de existência de *outliers* dos resíduos do modelo polinomial.

Fonte: Os autores, 2020.

A última premissa dos resíduos oriundos de modelos estimados por meio de regressão é que a média e a variância dos dados sejam constantes. Ao observar o gráfico da Figura 9, pode-se constatar que os dados apresentam distribuição com característica homocedástica, ou seja, a variância dos erros é constante.

Como a equação proveniente do modelo não-linear Polinomial de Grau 2 foi a que melhor atendeu às condições da análise de regressão (Equação 3), e nela a D_c foi considerada para a unidade de milímetros (mm), a Equação (4) apresenta um ajuste necessário, para o cálculo da D_c na unidade mais comum obtida nos levantamentos de campo e descritas nos relatórios técnicos, ou seja, centésimo de milímetro ($\times 10^{-2}$ mm).

$$D_c = \frac{100 * ATR}{0,04408 * ATR^2 + 1,259 * ATR + 0,8225} \quad (4)$$

Com o atendimento às premissas da análise de regressão estatística, pode-se afirmar que os modelos de previsão obtidos para as rodovias analisadas, sobretudo o Polinomial de Grau 2, podem ser desenvolvidos e aplicados por gestores rodoviários, no intuito de auxiliar o planejamento de levantamentos da condição estrutural de pavimentos rodoviários que são mais demorados e de maior custo (como os levantamentos defletoométricos, com o uso de Viga Benkelman, por exemplo). O recomendado, no entanto, é que esses levantamentos não sejam dispensados, visto que os modelos de previsão demandam dados para melhorar sua acurácia e garantir sua aplicabilidade no contexto de uma rede de infraestrutura rodoviária.

4 Considerações finais

Com as análises dos dados efetuadas neste trabalho, foi possível obter a deflexão característica de rodovias em pavimentação flexível, com revestimento em Concreto Asfáltico Usinado a Quente, a partir de dados de afundamentos de trilhas de rodas, por meio de um modelo de regressão não-linear simples (Polinomial de Grau 2), com valor de coeficiente de determinação satisfatório.

Todavia, é importante ressaltar que os levantamentos de deflexão característica em campo, seja por *Falling Weight Deflectometer* ou por Viga Benkelman, não devem ser desconsiderados, pois o modelo desenvolvido abrange o universo de dados das rodovias estudadas neste trabalho. Assim, o desenvolvimento e uso do modelo proposto ocorre na tentativa de possibilitar a redução dos custos das atividades de levantamentos de campo, como auxílio ao planejamento e ao pré-projeto em apoio à gerência de pavimentos em nível de rede.

Além disso, a retroalimentação do modelo auxilia na sua melhoria, pois, com maior quantidade de dados, melhores valores de coeficiente de determinação são obtidos e, por consequência, mais preciso pode ser o modelo desenvolvido. Vale ressaltar, que, também poderiam ser incluídos outros parâmetros ao modelo (tais como ambientais, de tráfego, de materiais) e, com isso, utilizada a regressão múltipla, que permitiria um modelo com cenários mais próximos da realidade.

Espera-se que este trabalho contribua para o conjunto das avaliações dos pavimentos rodoviários nacionais, sobretudo no panorama específico da avaliação estrutural, permitindo um acompanhamento efetivo para a garantia da vida útil da infraestrutura, a qualidade de rolamento dos veículos e a segurança dos usuários.

Referências

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Ed. ABEDA/PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Norma rodoviária DNER 011/1979 – PRO: Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro. DNER, 1979.

_____. **Norma rodoviária DNER 273/1996 – PRO: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”**. Rio de Janeiro. DNER, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. IPR-720. 2ª ed. Rio de Janeiro. DNIT, 2006.

_____. **NORMA DNIT 006/2003 – PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento**. Rio de Janeiro. DNIT, 2003.

_____. **NORMA DNIT 133/2010 – ME: Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. DNIT, 2010.

DU, J.C.; SHEN, D.H.; CROSS, S. Pavement rutting dynamic prediction model, **International Journal of Pavement Research and Technology**, Cingapura. Vol. 1, Nº 2: 64–71, 2008.

FARIAS, M. M.; MONTEIRO, S. A. Utilização de Modelos Elásticos Lineares e Não Lineares na Retroanálise de Propriedades do Pavimento. **30ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação**, Salvador, BA, 1996.

FONSECA, J. L. G. **Um Método de Retroanálise de Bacias de Deflexão de Pavimentos**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

GOPALAKRISHNAN, K.; THOMPSON, M. R. Use of Nondestructive Test Deflection Data for Predicting Airport Pavement Performance. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, United States of America. Vol. 133, Issue 6, June, 2007. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:6(389).

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall, New Jersey, USA, 2004.

HUANG, W.; LIANG, S.; WEI, Y. Surface deflection-based reliability analysis of asphalt pavement design. **Science China Technological Sciences**, China. January, 2020. doi.org/10.1007/s11431-019-1480-8.

LEIVA-VILLACORTA, F.; VARGAS-NORDCBECK, A.; AGUIAR-MOYA, J. P. Permanent deformation and deflection relationship from pavement condition assessment.

International Journal of Pavement Research and Technology, Cingapura. Vol. 10, Issue 4: 352-359, July, 2017. doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.005.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de Ensaio Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1996.

PAIVA, C. E. L., CAUSIM, P. B. Estudo de Avaliações das Condições Estruturais de um Pavimento a Partir de Bacias de Deformação. **32ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação**. Vol. 1 pp. 297-307, Brasília, DF, 2000.

XU, T., HUANG, X. Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, Holanda. 28(1), 525–530, 2012. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.09.007.