



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

OBTENÇÃO DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE RETROANALISADOS DE PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO POR MEIO DOS *SOFTWARES* BACKCAP E BAKFAA

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

JOSÉ WÉMENSON RABELO CHAVES¹; GUSTAVO ANTONIO SOUSA PAZ E MOTA² & FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA³

RESUMO

O dimensionamento de camada de reforço em pavimentos aeroportuários requer uma série de informações tais como os módulos de elasticidade de todas as camadas e do subleito. Uma das formas de obtê-los é por meio do processo de retroanálise, usando bacias deflectométricas medidas, por exemplo, pelo *Heavy Weight Deflectometer* - HWD. No entanto, a falta de uma solução única é uma das desvantagens, já que diferentes *softwares* utilizam metodologias de cálculo distintas. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar os valores de módulos de elasticidade obtidos pelos *softwares* BAKFAA e BackCAP para os materiais que compõem uma pista de pouso e decolagem brasileira. Para isso, foram utilizadas as bacias deflectométricas medidas pelo equipamento HWD com carga de impacto de 200 KN, nos *offsets* $\pm 3\text{m}$ e $\pm 6\text{m}$ a partir do eixo com espaçamento de 25 m, para obter-se os módulos de elasticidade. Os resultados mostraram que os módulos de elasticidade para as camadas de revestimento e de base apresentaram valores aproximados, mas com variações de amplitude entre os resultados. Para a sub-base e subleito, o BAKFAA estimou valores maiores em comparação com o BackCAP. Embora os *softwares* permitam a determinação do parâmetro de elasticidade, as divergências de valores podem dificultar a avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários por parte de operadores de aeródromos e da autoridade de aviação civil.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estrutural, HWD, Método Dos Elementos Finitos, Teoria do Sistema de Camadas Elásticas.

ABSTRACT

The design of the reinforcement layer in airport pavements requires a series of information such as the elastic modulus of all layers and the subgrade. One of the ways to obtain them is through the process of retroanalysis, using deflectometric basins measured, for example, by the Heavy Weight Deflectometer - HWD. At the However, the lack of a single solution is one of the disadvantages, as different software use different methodologies. different calculation. Given the above, this work aims to analyze the values of modulus of elasticity obtained by BAKFAA and BackCAP software for the materials that make up a landing and takeoff runway Brazilian. For this, the deflectometric basins measured by the HWD equipment with a load of impact of 200 KN, in the of sets $\pm 3\text{m}$ and $\pm 6\text{m}$ from the axis with a spacing of 25 m, to obtain the modules of elasticity. The results showed that the modulus of elasticity for the coating and base layers showed approximate values, but with variations in amplitude between the results. For the subbase and subgrade, the BAKFAA estimated higher values compared to BackCAP. Although the software allows the determination of the parameter of elasticity, the divergences of values can hinder the structural evaluation of pavements by airport operators and by the civil aviation authority.

KEY WORDS: Structural analysis, HWD, Finite Element Method, Elastic Layer System Theory.

^{1,3} Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici – Bloco 703 (1º andar) – CEP 60455-760 – Fortaleza – CE, wemenson.chaves@det.ufc.br; heber@det.ufc.br

² Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici – Bloco 910 (1º andar) – CEP 60455-760 – Fortaleza – CE, gustavomota953@alu.ufc.br;



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Os pavimentos aeroportuários devem propiciar aos seus usuários conforto e segurança durante as operações em solo. Para isso, os sistemas de pistas e pátios precisam apresentar capacidade de suporte para resistir aos esforços impostos pelas aeronaves. Nesse sentido, segundo ANAC (2021), é necessário avaliar os aspectos estruturais e funcionais dessas áreas, visando verificar se atende as condições mínimas de segurança operacional.

Dentre as técnicas de avaliação estrutural de pavimento aeroportuário, tem-se os ensaios destrutivos e não destrutivos. Os destrutivos são métodos executados por meio de sondagens, com extração de corpos de prova a serem analisados em laboratório para avaliação das camadas do pavimento, procedimento oneroso e demorado (CABRAL, 2005). Por sua vez, os não destrutivos são realizados medindo as bacias deflectométricas dos pavimentos com equipamentos *Falling Weight Deflectometer* - FWD e *Heavy Weight Deflectometer* - HWD. A partir dos dados de deflexão coletados, realiza-se o procedimento de retroanálise para prever os módulos de elasticidade dos materiais que constituem as camadas e o subleito da estrutura.

Conforme Rahim e George (2003), os valores advindos da retroanálise servem como parâmetros de entrada para os projetos de dimensionamento, reforço e avaliação estrutural dos pavimentos aeroportuários, sem necessidade de interrupção prolongada das operações de tráfego das aeronaves. Em razão disso, é o procedimento mais empregado para a aferição da capacidade de suporte a partir de ensaio não destrutivo. Entretanto, ressalta-se que para o processo de retroanálise, existem diversos *softwares* que utilizam variadas metodologias de cálculos, como a Teoria das Multicamadas Elásticas (comportamento elástico e linear) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Um exemplo de *software* de retroanálise que utiliza o MEF é o BackCAP, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará - UFC. A vantagem da utilização do MEF em processo iterativo desse tipo é sua generalidade, tanto em relação ao número de camadas quanto ao uso de diferentes modelos constitutivos e tipos de carregamento. Entretanto, não é uma ferramenta comumente usada para retroanálise das bacias deflectométricas medidas por HWD para obtenção dos módulos de elasticidade dos materiais que compõem pavimentos aeroportuários. Em contrapartida, tem-se o *software* BAKFAA, desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA) que adota metodologia baseada na Teoria de Sistema das Camadas Elásticas (TSCE), amplamente utilizado no setor de aviação civil pelos operadores de aeródromo.

Além dos *softwares* BackCAP e BAKFAA, no mercado existe uma diversidade de ferramentas desenvolvidas, com diferentes algoritmos de cálculos para ajustar as bacias deflectométricas medidas com teóricas visando estimar os módulos de elasticidade dos materiais do pavimento. Contudo, conforme ANAC (2019), a ausência de uma solução única para esse tipo de problema iterativo pelos *softwares* pode influenciar nos resultados finais. Diante disso, este trabalho tem como objetivo comparar os valores de módulos de elasticidade obtidos por meio dos *softwares* de retroanálise BAKFAA (desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* – FAA) e BackCAP (Desenvolvido pela a Universidade Federal do Ceará - UFC) para uma pista de pouso e decolagem brasileira.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A retroanálise é definida como o processo de estimativa do módulo de elasticidade das camadas e do subleito de um pavimento com base nas bacias deflectométricas encontradas em campo medidas por meio de ensaios não destrutivos (PEREIRA, 2007). Nesse procedimento, apenas as variáveis ambientais, cargas aplicadas, geometria do pavimento e formato da bacia deflectométrica medida são conhecidas (SALTAN, TERZI e KÜÇÜKSILLE, 2011; CAMARINI *et al.*, 2019).

De acordo com Villela e Marcon (2001), são diversos os equipamentos utilizados para a realização de ensaios não destrutivos visando a obtenção dos valores de módulos de elasticidade em pavimento. Todavia, nos pavimentos aeroportuários, FAA (2011) e ANAC (2021) recomendam o emprego de equipamentos deflectométricos de carregamento dinâmicos, como o FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e o HWD (*Heavy Weight Deflectometer*). Esses equipamentos aplicam uma carga na superfície do pavimento e os deslocamentos verticais (deflexões) são medidos por uma série de sensores (*geofones*). As deflexões capturadas por cada um dos sensores, formam a bacia deflectométrica, parâmetro que possibilita estimar os módulos de elasticidade das camadas e do subleito do pavimento a partir do processo de retroanálise (SALTAN, TERZI e KÜÇÜKSILLE, 2011).

A avaliação da capacidade estrutural de pavimento aeroportuário por meio de retroanálise vem sendo cada vez mais empregada para a obtenção dos módulos de elasticidade. Contudo, ainda é um processo trabalhoso, pela falta de consenso e padronização no tocante à interpretação dos resultados, podendo variar significativamente conforme o usuário e o *software* computacional (TERZI *et al.*, 2013). Cada *software* de retroanálise tem suas vantagens e desvantagens no que referente a utilização. Nesse sentido, segundo a FHWA (2002), distintos *softwares* não resultam em valores modulares iguais, mas, tais resultados devem ser próximos.

De acordo com Medina (1997), os primeiros *softwares* de retroanálise foram desenvolvidos com base na Teoria do Sistema de Camadas Elásticas (TSCE) desenvolvida por Burmister (1943). Nesse método os principais parâmetros de entradas são os módulos de elasticidade e o coeficiente de Poisson das camadas do pavimento analisado, e são adotadas algumas hipóteses: materiais são elásticos, isotrópicos, homogêneos, não se considera o peso das camadas, as camadas são ilimitadas transversalmente e espessuras são finitas (BALBO, 2007; BACELAR *et al.*, 2017). Exemplo de *softwares* baseados na TSCE são o BackMedina, Evercalc, Modulus, Wesdef, Bisar, Illi-Pave E Julea.

Scherer (2018) discorre que os *softwares* baseados na TSCE usam considerações mais simplificadas, com modelagens mais simples e menores capacidades de processamento. Diante disso, surgiram outras metodologias de dimensionamento e avaliação de pavimentos, embasadas em Método dos Elementos Finitos - MEF (*Finite Element Method* - FEM), Redes Neurais Artificiais (RNA) e algoritmos genéricos. Esses procedimentos resultam em valores de módulo de elasticidade mais preciso quando comparado com os métodos tradicionais de retroanálise (TUTUMLUER e SARKER, 2014). No entanto, a precisão desses métodos para o cálculo de módulo de elasticidade com base em bacias deflectométricas depende da confiabilidade do algoritmo e da calibração de alguns parâmetros internos (LOGANATHAN *et al.*, 2019; CAMACHO-GARITA *et al.*, 2019).



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Segundo Scherer (2018), *softwares* que se utilizam do método dos elementos finitos possibilitam uma modelagem avançada e podem representar de maneira precisa o meio real, desde que a malha seja discretizada em um grande número de elementos. Contudo, é necessário considerar que tais programas demandam um elevado poder de processamento. Entre as opções disponíveis, destacam-se o Panda, Cracktip e CAP3D.

Software de retroanálise BAKFAA

O *software* BAKFAA foi desenvolvido pela Federal Aviation Administration (FAA) que possibilita a obtenção de módulos de elasticidade das camadas e do subleito de pavimentos aeroportuários, a partir das bacias deflectométricas obtidas por equipamento FWD ou HWD. O *software* pode analisar um pavimento com até dez camadas (LARKIN e HAYHOE, 2009; SILVA, 2016).

O BAKFAA é baseado na teoria das multicamadas elásticas e para o cálculo das dos módulos de elasticidade, o *software* BAKFAA estima uma bacia deflectométrica para os sensores do equipamento deflectométrico, com base nos módulos iniciais assumidos, a partir disso, vai alterando o parâmetro elástico até que as deflexões calculadas estejam próximas das bacia deflectométrica medidas em campo (Press *et al.* 2007). Esse processo de convergência utiliza a soma dos quadrados das diferenças (*Root Mean Square* - RMS) entre as deflexões medidas e calculadas como métrica de parada do processo iterativo (Press *et al.* 2007).

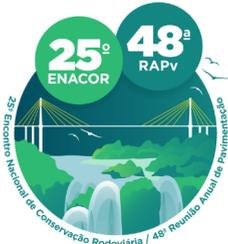
Larkin e Hayhoe (2009) e Silva (2016) acrescentam que uma das desvantagens do *software* é não calcula a profundidade de um possível material rígido abaixo do subleito e não leva em conta o efeito da temperatura no cálculo dos módulos (LARKIN e HAYHOE, 2009; SILVA, 2016). Por fim, estudo realizado por Bueno (2016) aponta que é necessário sensibilidade do usuário na obtenção de resultados com valores razoáveis, uma vez que o *software* permite encontrar valores fora da realidade, com módulos muito altos ou até mesmo negativos.

Software de retroanálise BackCAP

O *software* de retroanálise BackCAP foi desenvolvido a partir da implementação de uma rotina no programa de análise CAP3D (*Computational Analysis of Pavements* – 3D) e do aprimoramento do pré-processador PMG (*Pavement Mesh Generator*) (Cavalcante *et al.*, 2008; Coutinho *et al.*, 2008; Botelho *et al.*, 2009), ambos desenvolvidos no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará - LMP/UFC. Além disso, foram feitas alterações na interface para possibilitar a inserção das bacias deflectométricas por parte do usuário (SILVA *et al.*, 2014).

O PMG foi modificado de modo a possibilitar a geração de malhas axissimétricas específicas para o procedimento de retroanálise. Para isso, são criados nós da malha posicionados nas coordenadas dos sensores do equipamento, de maneira que se possa extrair a deflexão teórica nessas posições. A malha desenvolvida é composta de elementos finitos quadrilaterais quadráticos (Q8) e infinitos (lagrangeanos de 6 nós) (SILVA *et al.*, 2014).

Com a geração de nós nas malhas e das propriedades dos materiais, o processamento determina os módulos de elasticidade das camadas que condizem com as bacias deflectométricas fornecidas pelo ensaio não destrutivo. Para verificação do ajuste entre as deflexões medidas e calculadas é adotado o critério *Root Mean Square Error* (RMSE) (SILVA *et al.*, 2014).



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Framework para análise visual de módulos de elasticidade

Pigozzi *et al* (2014) propõem um *framework* para avaliar a capacidade estrutural de pavimentos aeroportuários usando dados de deflexão coletados por HWD. Os dados são coletados e analisados de forma padronizada e, então, é realizada a representação por mapas de calor da distribuição dos valores ao longo da pista. A classificação dos dados para gerar mapas de calor nesse *framework* é por meio do sistema RAG (vermelho-âmbar-verde, em inglês) proposto por Horak e Emery (2009).

Horak e Emery (2009) utilizam dados de deflexão para classificar a medição em três níveis simplificados que revelam se a condição da camada está em condições ideais, que requerem atenção ou em severas. Um mapeamento simples de acordo com a região da medição é realizado e então colorido para que haja uma representação visual que auxilie a tomada de decisão quanto às áreas de interesse. Pigozzi *et al* (2014), no entanto, ampliaram a proposta a um *framework* que mapeia detalhadamente no pavimento as regiões classificadas pelos dados.

MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção, é realizada a descrição da PPD estudada, além de descrever o procedimento para a obtenção das bacias deflectométricas e como os módulos de elasticidade foram obtidos. Por fim, também é descrito o *framework* proposto para estruturação dos dados aferidos.

Procedimento de coleta e retroanálise

Neste estudo foram utilizados os levantamentos deflectométricos efetuados com o uso do equipamento HWD em uma pista de pouso e decolagem (PPD) de concreto asfáltico em um aeroporto brasileiro. A PPD possui uma extensão de 2.950 m e foi dividida em dois trechos (Figura 1), conforme as características dos materiais obtidos por sondagem (ANAC, 2018). O Trecho 1 possui 2.100 m de extensão (0 a 2.100 m), e o Trecho 2 possui 850 m de extensão (2.100 a 2.950 m).

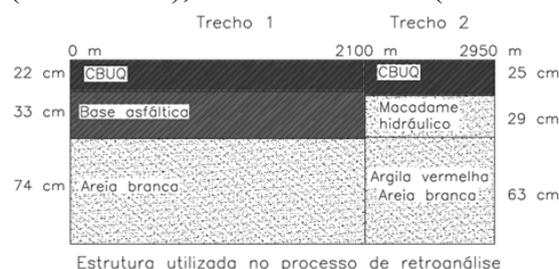


Figura 1. Características e materiais que constituem o pavimento estudado (AUTORES, 2023)

Obtiveram-se bacias deflectométricas em ambos os lados direito (+) e esquerdo (-) a 3 m e 6 m (*offset* $\pm 3\text{m}$ e $\pm 6\text{m}$) a partir do eixo central da pista. Com bacias deflectométricas medidas por nove sensores (geofones) espaçados 0, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 cm do ponto de aplicação da carga, espaçadas em 25 m, totalizando 478 bacias. Durante o levantamento foi empregado uma carga de impacto de 200 KN (Figura 2).

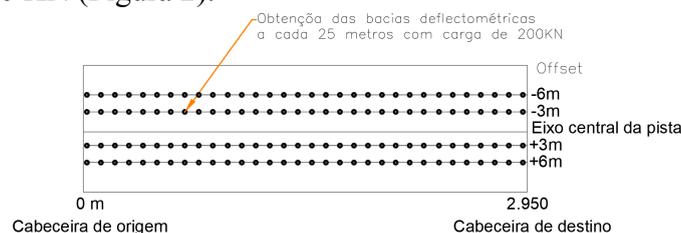


Figura 2. Planta-baixa dos *offsets* ao longo da extensão do eixo do pavimento estudado (AUTORES, 2023)



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



A partir dos levantamentos deflectométricos normalizados para a carga de referência, foi executada a retroanálise por meio dos *softwares* iterativos BAKFAA (v. 1.2.0) e BackCAP (v 6), adotando como parâmetros de entrada os módulos de elasticidade e o coeficiente de Poisson indicados pelo DER/SP (2006) e FAA (2011). Considerou-se, ainda, que durante o procedimento as interfaces entre as camadas dos materiais estão totalmente aderidas em si, pois o BackCAP adota essa configuração como padrão. Além disso, como esses procedimentos buscam convergir as deflexões calculadas e as deflexões medidas, adotou-se como critério de parada da retroanálise valores da raiz média quadrática (*Root Mean Square Error* - RMSE) das diferenças entre os valores de deflexões inferiores a 5%.

Objetivo e novo *framework* proposto

Após a determinação dos módulos de elasticidade pelo processo de retroanálise e tratamento dos dados, gráficos de linhas são gerados para a verificar o comportamento de valores ao longo do pavimento pelos *softwares* empregados (BAKFAA e BackCAP). Além disso, mapas de calor são obtidos atribuindo as cores verde, amarelo ou vermelho às regiões de medição dos valores. Essas cores indicam a resposta estrutural do pavimento para os módulos de elasticidade.

No entanto, cada quadrante classificado é colorido com uma *bolha*, maior em área em relação ao seu quadrante, em tonalidade translúcida. O objetivo é que as bordas de uma bolha se sobreponham às das vizinhas e suas tonalidades se unam gerando uma nova de acordo com a mistura. Dessa forma, regiões que transacionam de uma classificação ideal (verde) para severa (vermelha), e vice-versa, são mais notórias que as demais. A tonalidade resultante (marrom) é mais perceptível que a de verde-amarelo ou amarelo-vermelho que são mais harmônicas entre si. Além disso, a translucidez permite a sobreposição do mapeamento da classificação dos dados de um *software* sobre outro. Isso permite analisar a concordância e a discordância entre as classificações seguindo com a intensificação de tonalidade de uma bolha (concordância) por possuírem mesma tonalidade, ou presença de bolhas inteiras de tonalidade incongruente com as tonalidades originais de classificação (tonalidades diferentes ocasionam tons diferentes).

O objetivo do mapa de calor é possibilitar uma análise das camadas e do subleito do pavimento indicando as regiões que devem receber maior atenção do operador do aeródromo, como também o grau de concordância/discordância entre os indicadores estruturais (Tabela 1). A representação dos módulos de elasticidade retroanalizados pode auxiliar no diagnóstico mais completo da pista.

Tabela 1. Índice de resposta estrutural para os módulos de elasticidade das camadas que compõe os pavimentos aeroportuários (PIGOZZI *et al*, 2014)

Material	Fraca	Razoável	Boa
Betuminoso	<1.250 MPa	1.250 - 2.250 MPa	> 2.250 MPa
Granular	< 100 MPa	100 - 200 MPa	> 200 MPa
Subleito	< 50 MPa	50 - 100 MPa	> 100 MPa

Após obter a imagem final, a concordância/discordância pode ser observada pela análise direta das figuras geradas e suas semelhanças ou diferenças. Acrescenta-se que os gráficos de mapa de calor foram desenvolvidos em códigos escritos na linguagem *Python* 3.5 com uso das bibliotecas *OpenCV* e *Matplotlib Pyplot*. O equipamento utilizado foi um computador com processador Intel i5 9º geração com 8gb de RAM.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra os valores do método RMSE para os *softwares*. Observou-se que os dados advindos do BackCAP apresentaram maior percentual (32,10%) de bacias deflectométricas fora do intervalo $\leq 5\%$ durante os processos iterativos.

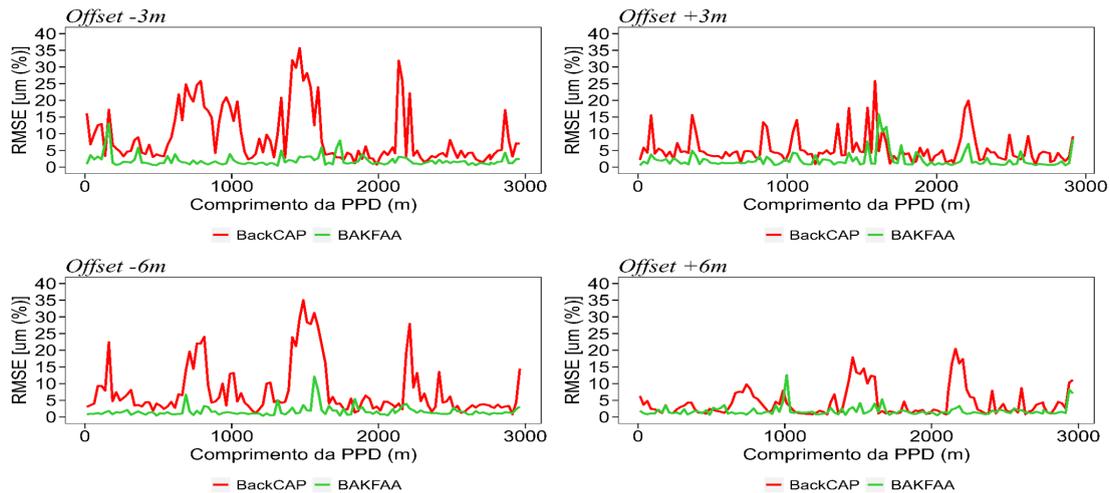
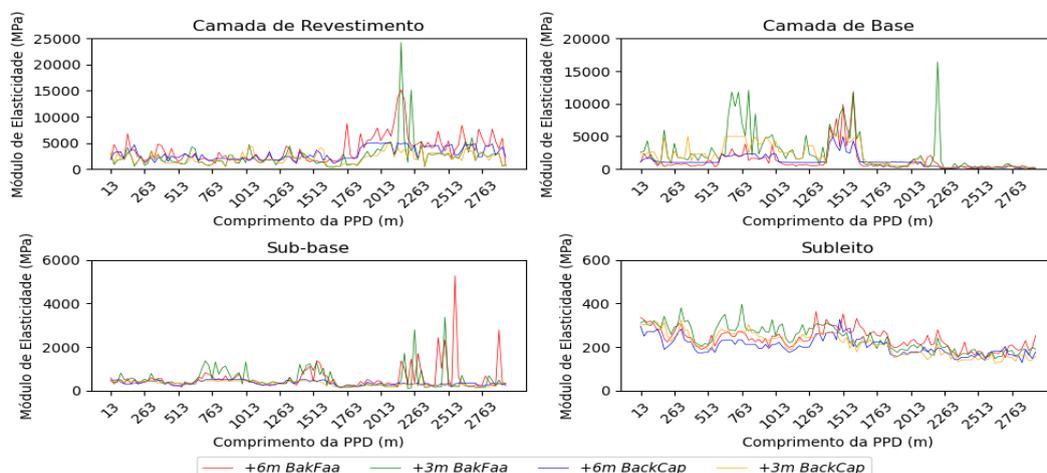
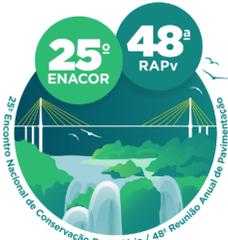


Figura 5. RMSE resultantes dos *softwares* BackCAP e BAKFAA (AUTORES, 2023).

De acordo com a distribuição espacial dos módulos de elasticidade retroanalizados pelos *softwares* empregados mostrados nas figuras 6 e 7, apesar de 95,40% dos ajustes das deflexões no BAKFAA ficarem abaixo do valor de tolerância ($\leq 5,00 \mu\text{m} (\%)$), a retroanálise resultou em 32,65% dos pontos avaliados com valores elevados em comparação aos recomendados pelo DER/SP (2006) e FAA (2011). Os módulos de elasticidade para a mistura asfáltica do revestimento, foram próximos a 15.842 MPa, superiores ao usual de 3.500 MPa. Em relação ao BackCAP, os módulos determinados apresentam menor dispersão em relação aos estimados pelo BAKFAA. Além disso, 100% dos valores foram inferiores a 5.000 MPa. Por outro lado, no Trecho 1 da camada de base, constituída de concreto asfáltico, os módulos de elasticidade obtidos no BackCAP foram superiores aos do BAKFAA em 85,75% dos locais medidos pelo HWD.





19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Figura 6. Módulos de elasticidade retroanalizados pelos *softwares* BackCAP e BAKFAA para os *offsets* +6m e +3m ao longo das 4 camadas de revestimento (AUTORES, 2023)

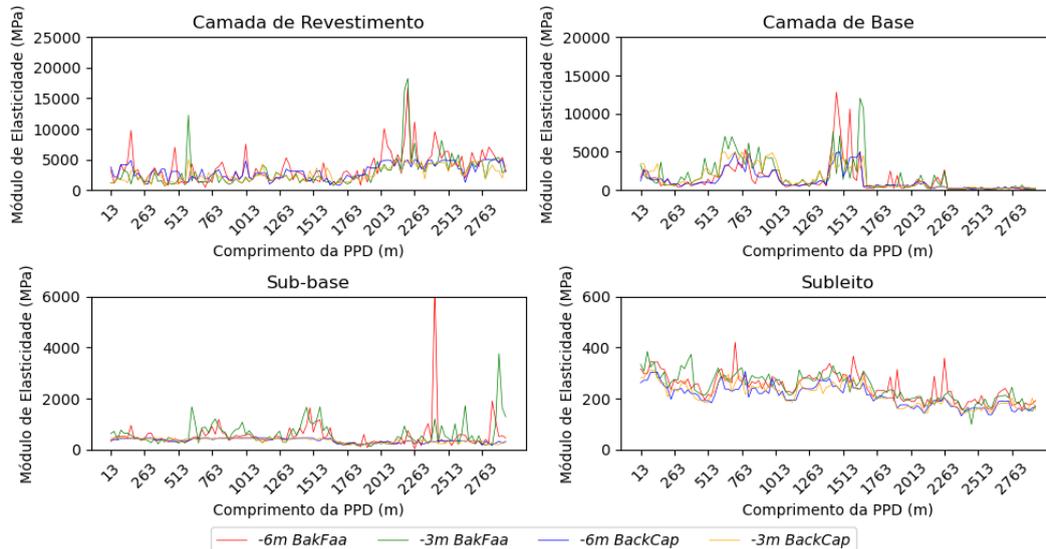


Figura 7. Módulos de elasticidade retroanalizados pelos *softwares* BackCAP e BAKFAA para os *offsets* -6m e -3m ao longo das 4 camadas de revestimento (AUTORES, 2023)

No que se refere às camadas granulares, percebem-se o BackCAP estimou valores de módulos de elasticidade próximo aos aferidos pelo BAKFAA. Entretanto, notam-se diferenças de valores em alguns pontos com módulos elevados para as características de rigidez do material (macadame hidráulico, areia branca e argila vermelha), com módulos superiores a 1.000 MPa. Na camada de sub-base, o BAKFAA resultou em um valor (5.274,23 MPa) para bacia deflectométrica 2.563 m do *offset* +6m, quando comparado ao BackCAP tem-se uma diferença de 2.098,59%.

Para verificar se essas diferenças de valores entre o BackCAP e BAKFAA são significativas, realizou-se o teste de *Mann-Whitney*. Pelo teste estatístico observa-se que os valores de “*p*” foram inferiores a 0,05 para todas as camadas e o subleito (Tabela 2), o que corrobora com o mostrado pelos gráficos das figuras 7 e 8. Diante disso, é possível concluir, de maneira geral, que o processo de retroanálise foi influenciado pelos *softwares*. Entretanto, ressalta-se que o teste de *Mann-Whitney* compara as medianas dos grupos testados, que a depender da forma de utilização dos dados, seja então um parâmetro estatístico relevante para projeto de reforço ou para um novo dimensionamento da estrutura.

Tabela 2. Comparação dos módulos de elasticidade obtidos pelos *softwares* (AUTORES, 2023)

Camada	<i>offset</i>			
	-3m	-6m	+3m	+6m
Revestimento	0,002721	0,000972	0,00617	0,00136
Base	5,92e-15	4,84e-08	2,43e-10	2,20e-16
Sub-base	2,20e-16	2,20e-16	2,20e-16	2,20e-16
subleito	2,20e-16	2,20e-16	2,20e-16	2,20e-16

De acordo com a Figura 8, observa-se diferenças acerca da condição estrutural da camada de revestimento perante os níveis de classificação adotados. Nota-se que no Trecho 1 (0 a 2.100 m), os resultados mostram uma variação da condição estrutural do revestimento, conforme o proposto por



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



PIGOZZI *et al*, (2014), sendo, nos *offsets* $\pm 6m$ e $\pm 3m$, os pontos com pior resposta à carga aplicada. Por outro lado, no Trecho 2 (2.100 m a 2.950 m), não se observa mudanças de comportamento do material asfáltico perante os *softwares* de retroanálise.

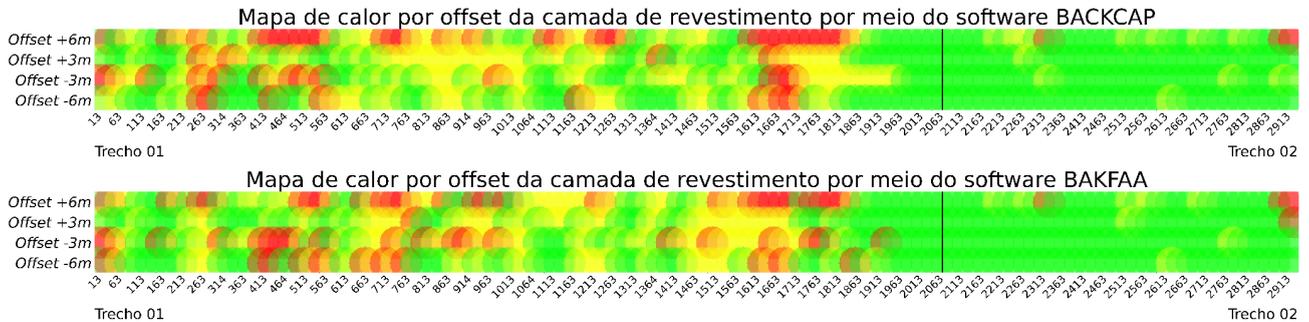


Figura 8. Mapa de calor do tipo bolha por *offset* para a camada de revestimento. (AUTORES, 2023)

Conforme pode ser observado, na Figura 9, a aplicação do *benchmarking* proposto mostrou semelhança visual da resposta estrutural da camada de base, com regiões, que ambos os *softwares* aferiram módulos de elasticidade que retratam uma situação de boa e de fraca resposta da camada, de acordo com a classificação de PIGOZZI *et al*, (2014). Além disso, observa-se que no Trecho 2 verificou-se uma existência de comportamento estrutural semelhante para os dados retroanalizados, ao contrário do que ocorre no trecho 1. Apesar da sondagem realizada na PPD mostrar duas seções homogêneas na estrutura, os gráficos evidenciaram que para o Trecho 1 existe uma maior variabilidade de resposta de comportamento estrutural. O *software* BAKFAA concentrou várias regiões isoladas em condições incongruentes com a vizinhança, em termos de classificação (cores), nos *offsets* -3m e -6m, por exemplo, nos comprimentos de pista 863m, 1.913m, 2.363m e 2.613m. Essas informações não são claramente observadas na Figura 7.

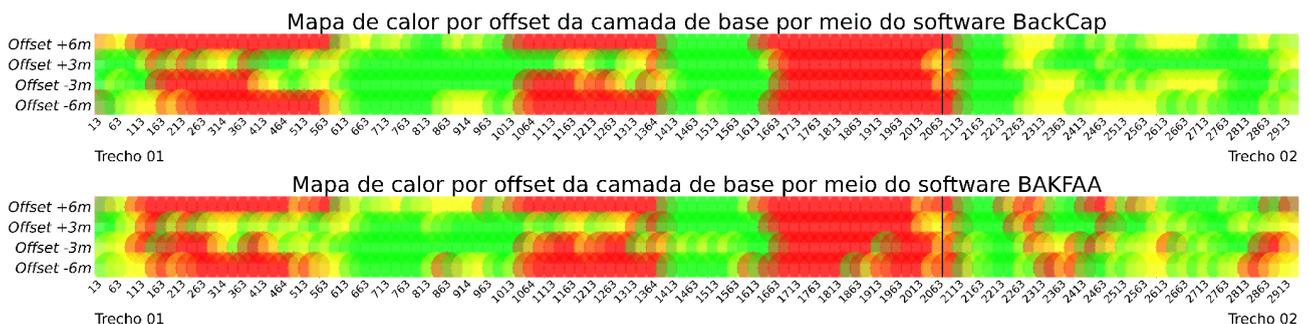


Figura 9. Mapa de calor do tipo bolha por *offset* para a camada de base. (AUTORES, 2023)

Nota-se uma distinção entre os trechos 1 e 2 (Figura 9) que remete à diferença dois materiais de pavimento. O material no Trecho 2 possui resistência menor (macadame hidráulico), oposto ao Trecho 1 (concreto asfáltico). Os indicativos dos gráficos da Figura 9 apontam respostas predominantemente negativas no trecho. Isso indica que os parâmetros de classificação podem exigir maiores análises quanto aos dados e as propriedades do pavimento inerentes aos materiais e resistências para serem estabelecidos.

Por sua vez, apesar da divergência entre os módulos de elasticidade das camadas granulares e do subleito serem mais visíveis nos gráficos de linha das figuras 6 e 7, com o BAKFAA aferindo



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



maiores para os materiais do tipo macadame hidráulico e solo natural, verifica-se que nos mapas de calor não é possível tal distinção (figuras 10 e 11). Com base na Figura 11, nota-se que, em todas as bacias deflectométricas, a cor atribuída foi verde, não sendo possível, constatar a variação dos dados, oposto ao observado nas figuras 6 e 7 e no teste estatístico de *Mann-Whitney*, comportamento divergente dos módulos, com os maiores valores advindo do BAKFAA.

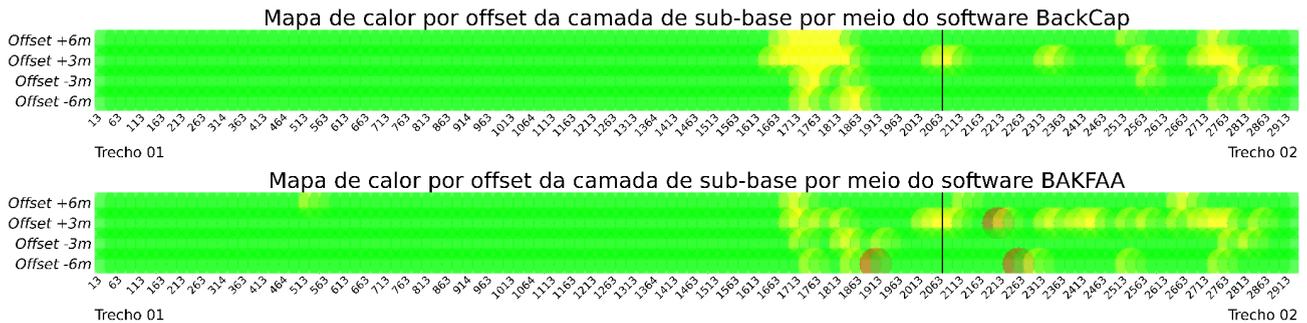


Figura 10. Mapa de calor do tipo bolha por *offset* para a camada de sub-base

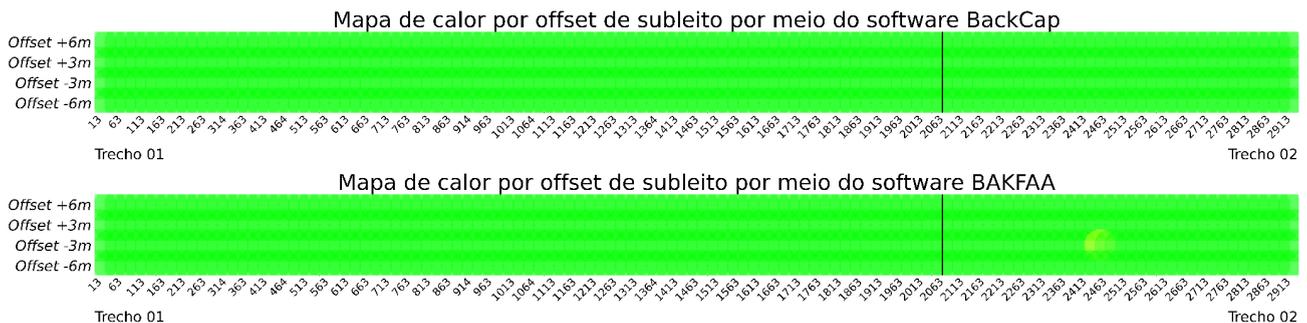
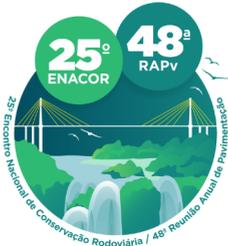


Figura 11. Mapa de calor do tipo bolha por *offset* para o subleito

Além disso, nota-se a concordância geral entre as figuras 10 e 11 denotando que os seus indicadores estruturais estão, no geral, em níveis considerados “bons”. Esses níveis também são indicados pelas figuras 6 e 7. No entanto, as figuras 10 e 11 se apresentam de tal forma que possibilitam observar regiões de níveis moderados ou críticos não-facilmente observáveis nas figuras 6 e 7. Por exemplo, na Figura 10 a camada de sub-base possui várias regiões classificadas como razoáveis (BackCAP) e também fracas (BAKFAA) facilmente identificáveis. Na Figura 11 revela-se ainda que para o *offset* -3m na camada de subleito, pelo *software* BAKFAA, existe uma região entre os 2.413 metros e 2.463 metros de comprimento de pista na qual o valor está oscilando para o nível moderado.

CONCLUSÃO

Diante da comparação entre os módulos de elasticidade obtidos no BAKFAA e no BackCAP, verificou-se que há diferenças de valores entre os dados, que utilizam metodologias de análise distintas, respectivamente, da teoria das multicamadas elásticas e método dos elementos finitos. Apesar dessas diferenças, corroborada pelo teste estatístico não paramétrico, *Mann-Whitney*, os resultados do *software* BackCAP apresentaram comportamento semelhantes e próximos em alguns pontos aos obtidos pelo BAKFAA, capaz de fornecer subsídios para seu emprego em avaliações que requerem propriedade dos materiais que compõem pavimento.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



O *framework* proposto neste trabalho para representação visual dos módulos de elasticidade são capazes de representar características do pavimento para a camada de revestimento e base, bem como auxiliar o operador do aeródromo a verificar quais são as regiões de uma pista de pouso e decolagem que requerem maiores atenções. Acrescenta-se que os gráficos podem ser aprimorados pela inserção de novos elementos visuais para também representar outros parâmetros estruturais ou funcionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro concedido para realização desta pesquisa e à Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (SIA/ANAC) pela disponibilização dos dados utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Relatório preliminar de avaliação funcional e estrutural não destrutiva e capacidade de suporte de PPD**. Brasil, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Uso de cargas em Ensaio Não Destrutivos (END) com o objetivo de se determinar o PCN de pavimentos aeroportuários**. Brasília, DF, 2019. 5p.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Agência Nacional de Aviação Civil. **Alerta aos operadores de Aeródromos Nº 003/2021**, Emenda nº 01. Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2021.

BACELAR, Felipe Simões; ALBUQUERQUE, Fernando Silva; MATOS, LEONARDO, JOSÉ DE SÁ. **Comparativo entre tensões verticais em camadas de pavimento experimental da UFS obtidas por instrumentação e por análise numérica**. Anais do XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET, de 29 de outubro a 01 de novembro, Recife, 2017.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. São Paulo, 2007.

BOTELHO, Renato; CAVALCANTE, Ricardo Nikollas de Andrade; COUTINHO, Renato Peixoto; HOLANDA, Áurea. Silva; PARENTE JR., Evandro. **Desenvolvimento de um sistema gráfico para análise numérica de pavimentos asfálticos**. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 1-12. Fortaleza-CE, 2009.

BUENO, Lucas Dotto. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. 2016. 471 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016

BURMISTER, D. **The theory of stresses and displacement systems and applications to the design of airport runways**. Highway Research Board, Proceedings, 1943.

CABRAL, Bartolomeu Pessoa. **Verificação da anisotropia em solos do subleito da Região Metropolitana de Fortaleza pertencentes à formação Barreiras**. Fortaleza. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, 2005.

CAMARINI, Guilherme Crepaldi; JUNIOR, Carlos Alberto Prado da Silva; FONTENELE, Heliana Barbosa. **Avaliação de bacias de deflexões retro analisadas pelo programa BackMeDiNa**. Universidade Estadual de Londrina. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. Balneário Camboriú, SC. 2019.

CAVALCANTE, Ricardo Nikollas de Andrade; COUTINHO, Renato Peixoto; HOLANDA, Aurea Silva; PARENTE JR., Evandro. **Gerador de malha bidimensional para análise de tensões e deformações em pavimentos asfálticos**. Anais do XXIX Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, 1-18, 2008.

COUTINHO, Renato Peixoto; CAVALCANTE, Ricardo Nikollas de Andrade. Holanda, Áurea Silva; Parente Jr. Evandro. **Desenvolvimento de um gerador de malhas para análise de pavimentos pelo Método dos Elementos Finitos**. Anais Do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anpet, 1-12. Fortaleza, CE, 2008.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- CAMACHO-GARITA, Edgar; PUELLO-BOLAÑO, Robinson; LAURENT-MATAMOROS, Pieron; AGUIAR-MOYA, José; Loria-Salazar Luís. Structural analysis for APT sections based on deflection parameters, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, vol. 2673, no. 3, pp. 313–322, 2019
- DEPARTAMENTO ESTADUAL DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). **Instrução de projeto de pavimentação** (Publi, IP., de 000/001). São Paulo, 2006.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. Advisory Circular AC 150/5370-11B: **Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements**. United States. Department of Transportation, Washington DC, USA, 2011.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Guide to Asphalt Temperature Prediction and Correction**. Online Temperature Prediction and Correction Guide-TOC, November, 2002.
- HORAK, E; EMERY, S. Evaluation of airport pavements with FWD **deflection bowl parameter benchmarking methodology**. 2nd European Airport Pavement Workshop, 13-14 May 2009, Amsterdam.
- LOGANATHAN, Karthikeyan; ISIED, Mayzan; Coca, Ana Maria; SOULIMAN, Mena. ROMANOSCHI Stefan; DESSOUKY, Samer. Development of comprehensive deflection parameters to evaluate the structural capacity of flexible pavements at the network level. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v 12, n.4, pp. 347–355, 2019
- LARKIN, A; HAYHOE, G. F. Federal Aviation Administration **Airport Pavement Management and Airport Pavement Roughness Evaluation**. NonDestructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009.
- MEDINA, Jacques. **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª edição, 380 p. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.
- SALTAN, Mehmet; TERZI, Serdal; KÜÇÜKSILLE, Ecir Uğur . Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining, **Expert Systems with Applications**, v.38, n.3, p.2600-2608, 2011.
- PEREIRA, José Miguel Belucio. **Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseados na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática**. 2007. 938 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2007.
- PIGOZZI, Franco; PORTAS, Silvia; MALTINTI, Francesca; CONI, Mauro. Analysis of Runway Deflectometer Campaign for Implementation on Airport Pavement Management System. **International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology**, v.15, n.2, p. 11-26, 2014.
- PRESS, William; TEUKOLSKY, Saul A; VETTERLING, William; FLANNERY, Brian.. **Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing**, 3º Ed. Cambridges: Cambridge University Press, 2007.
- RAHIM, Ashaf; GEORGE, K. P. Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Elastic Modulus. **Journal of Transportation Engineering - ASCE**, v. 129, n. 1, p. 100-107, 2003.
- SCHERER, Renan Gustavo. **Estudo da In"luência da Condição de Aderência Entre Camadas de Pavimentos Em Seu Comportamento Mecânico**. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.
- SILVA, Samuel de Almeida Torquato; SOARES, Jorge Barbosa; HOLANDA; Aurea Silva; OLIVEIRA; Jardel Andrade. **Utilização do método dos elementos finitos em retroanálise de pavimentos flexíveis**. In: Anais do XXVIII do Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte - ANPET, 24 a 28 de novembro de 2014, Curitiba.
- SILVA, Eric Ribeiro da. **Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- TERZI, Serdal; SALTAN Mehmet; KÜÇÜKSILLE, Ecir Uğur; KARASAHIN, Mustafa. Backcalculation of pavement layer thickness using data mining. **Neural Computing and Applications**, v. 23, n. 5, p. 1369–1379, 2013.
- TUTUMLUER, Erol; STARKER, Priyanka; **Development of Improved Pavement Rehabilitation Procedures Based on FWD Backcalculation**. USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report, 2014.
- VILLELA, A. R. A; MARCON, A. F. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Utilizando um Método Simplificado de Retroanálise – Retran2CL**. In: 33a Reunião Anual de Pavimentação. pp. 622633, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.