



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO E VIDA ÚTIL DE PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO A PARTIR DE SEGMENTOS HOMOGÊNEOS RETROANALISADOS POR DISTINTOS *SOFTWARES*

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

*José Wémenson Rabelo Chaves*¹; *Lucas Cavalcante de Almeida*² & *Francisco Heber Lacerda de Oliveira*³

RESUMO

Distintas ferramentas de retroanálises podem estimar de maneiras diferentes o comportamento elástico de um mesmo material, impactando diretamente nas atividades relacionadas a um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo simular o dimensionamento de um pavimento aeroportuário a partir de segmentos homogêneos utilizando módulos de elasticidade retroanalizados por distintos *softwares*. Foram utilizados dados deflectométricos obtidos por *Heavy Weight Deflectometer* (HWD) com carga de 200 KN em uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira. As simulações de dimensionamentos e de vida útil da PPD foram feitas no *software* FAARFIELD 2.0.18, empregando valores de módulos de elasticidade retroanalizados para as camadas (asfálticas e granulares) por meio de quatro distintos *softwares*, o BAKFAA, o BackCAP, o BackMedina e o ELMOD. Observou-se que, a depender do *software* escolhido para a retroanálise e para o segmento homogêneo, ocorre uma variação de mais de 10 cm na espessura da sub-base. Em termos de vida útil, foram constatados valores discrepantes para um mesmo segmento, conforme o *software* que estimou os módulos de elasticidade. Desse modo, conclui-se que é importante o operador do aeródromo averiguar por qual método os módulos de elasticidade foram concebidos, haja vista que ocorreram diferenças consideráveis que podem impactar o dimensionamento e a vida útil do pavimento aeroportuário.

PALAVRAS-CHAVE: HWD, retroanálise, FAARFIELD, dimensionamento.

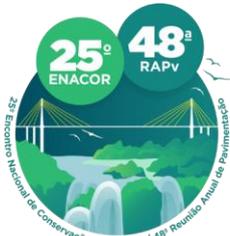
ABSTRACT

Different retroanalysis tools can estimate the elastic behavior of the same material in different ways, directly impacting activities related to an Airport Pavement Management System. Given the above, this work aims to simulate the design of an airport pavement from homogeneous segments using modules of elasticity retroanalyzed by different software. Deflectometric data obtained by Heavy Weight Deflectometer (HWD) with a load of 200 KN on a Brazilian runway (PPD) were used. The PPD sizing and lifetime simulations were carried out using the FAARFIELD 2.0.18 software, using back-analyzed elastic modulus values for the layers (asphalt and granular) using four different softwares, BAKFAA, BackCAP, BackMedina and the ELMOD. It was observed that depending on the software chosen for the retroanalysis and for the homogeneous segment, there is a variation of more than 10 cm in the thickness of the subbase. In terms of service life, discrepant values were found for the same segment, depending on the software that estimated the modulus of elasticity. Thus, it is concluded that it is important for the aerodrome operator to find out by which method the set of moduli of elasticity was designed, given that there were considerable differences that could impact the design and service life of the airport pavement.

KEY WORDS: HWD, backcalculation, FAARFIELD, design.

^{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 Instituto Federal do Ceará - IFCE, Campus do Quixadá – CEP 63902-580 – Quixadá – CE, lucas.almeida@ifce.edu.br



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Observa-se que os mais variados métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários existentes em alguns países, tais como Estados Unidos, França e Austrália são similares, e fazem uso de dados tais como: o número de operações e os modelos de aeronaves; módulos de elasticidade das camadas (asfálticas e granulares); *California Bearing Ratio* - CBR do subleito e o coeficiente de Poisson. Apesar dessa semelhança, existe certa diferenciação entre eles, sobretudo no tipo de algoritmo utilizado para calcular o estado de tensões, deformações e deslocamentos, das características das aeronaves (carga, pressão de pneus e configuração do trem de pouso) e dos materiais constituintes das camadas na estrutura do pavimento. No entanto, apesar da existência de métodos diferentes de dimensionamento, sabe-se que os pavimentos aeroportuários se constituem como um dos principais componentes de um aeródromo. Essa estrutura deve apresentar durante toda a sua vida útil níveis de serventia elevados, pois são áreas que exigem rigorosos requisitos relacionados à segurança das operações de pouso, decolagem e taxiamento de aeronaves (OLIVEIRA, 2016).

Para o dimensionamento desses pavimentos pode-se destacar o *software* FAARFIELD - *Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design* (origem americana), o *Alizé-Aéronautique* (origem francesa) e o APSDS - *Airport Pavement Structural Design System* (origem australiana). Além disso, há uma tendência na implantação de *softwares* que analisam, sobretudo, dados dos materiais que constituem as camadas desses pavimentos de forma empírico-mecanicista, por meio de modelos baseados em ensaios laboratoriais e levantamentos de campo aplicados às diversas configurações de aeronaves. Um dos principais parâmetros na seleção dos materiais que compõe o pavimento aeroportuário é o módulo de elasticidade.

Uma alternativa para obtenção dos módulos de elasticidade dos materiais das camadas que compõem o pavimento, exigidos nos métodos de dimensionamento é por meio da retroanálise, processo baseado nas bacias deflectométricas medidas por equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) ou *Heavy Weight Deflectometer* (HWD). Para isso foram desenvolvidos diversos *softwares*, com diferentes metodologias e algoritmos de cálculos. Consequentemente, o uso de distintas ferramentas de retroanálise podem estimar diferentes maneiras em relação ao comportamento elástico de um mesmo material, impactando diretamente nas atividades de manutenção e reabilitação (M&R), como em projeto de reforço e de reconstrução de um pavimento aeroportuário, por exemplo na espessura da nova camada asfáltica ou granular. Diante disso, a ANAC (2019) discorre que a ausência de uma solução para esse tipo de processo, pode influenciar no seu resultado final de obtenção de vários parâmetros como o módulo de elasticidade, por exemplo.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo simular o dimensionamento e a vida útil de um pavimento aeroportuário utilizando módulos de elasticidade retroanalisados por distintos *softwares*, BAKFAA (v. 2003.11.3), BackCAP (v.2.0) BackMedina (v.1.2.0) e ELMOD (v.6).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dimensionamento pelo método *Federal Aviation Administration* (FAA)

O desempenho estrutural dos pavimentos aeroportuários depende de cinco variáveis, projeto, construção, manutenção, condições ambientais e carregamento de tráfego (ASHFORD, MUSMAYIZ e WRIGHT, 2011). Macedo (2005) acrescenta que as condições da superfície do pavimento também podem estar associadas ao suporte do subleito.



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

www.rapvenacor.com.br



Para que um pavimento aeroportuário atenda às condições funcionais e estruturais ao longo da sua vida útil, são necessárias avaliações da qualidade do pavimento, e, caso seja necessário, intervenções de manutenção e reabilitação (M&R) (ANAC, 2017). Dentre as ações de reabilitação, tem-se o reforço estrutural e reconstrução. Entretanto, para a elaboração de projeto desse tipo, somente avaliação funcional não é suficiente, sendo necessário a realização de avaliação estrutural para a verificação da capacidade de suporte do subleito (ANAC, 2017).

No Brasil, os projetos de reforço estrutural e de dimensionamento de pavimentos aeroportuários são obtidos a partir de métodos desenvolvidos pela *Federal Aviation Administration* (FAA, 1995, 2009, 2016). Até o ano 2008, de acordo com FAA (1995), são adotados para o dimensionamento das espessuras das camadas da estrutura os ábacos que utilizavam os valores de CBR e o *mix* de aeronaves convertido em termo de aeronave de projeto. A partir do método proposto por FAA (2009) passou-se a considerar as contribuições de cada tipo de aeronave na solicitação do pavimento e o emprego do *software* FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*) desenvolvido pela FAA (2012).

O FAARFIELD adota para a definição da espessura das camadas de pavimento flexível, o critério de falha de fadiga denominado *Cumulative Damage Factor* (CDF) do subleito (HORONJEFF *et al.*, 2010). Por definição, CDF é a porção da vida útil estimada para o pavimento que foi consumida por meio do processo de fadiga decorrente dos repetidos esforços impostos à estrutura (ANAC, 2022). O valor desse parâmetro pode variar entre 0 e 1, sendo, que valores acima de 1 está associado à fadiga do subleito, cuja capacidade do pavimento já tenha se esgotado (MESQUITA JUNIOR *et al.*, 2019).

O procedimento de dimensionamento de pavimento aeroportuário a partir do *software* FAARFIELD, é realizado a partir do período de projeto (anos), das características mecânicas dos materiais das camadas, do subleito e do tráfego (*mix* de aeronaves), aplicam-se processos iterativos baseados na Teoria da Elasticidade, de forma a fornecer como *output* as espessuras das camadas do pavimento (MESQUITA JUNIOR *et al.*, 2019). De maneira geral, o dimensionamento é realizado, de modo que as espessuras das camadas sejam capazes de resistir a 36.500 passagens da aeronave de projeto sobre o pavimento, quando a deformação acumulada no subleito atingir um CDF igual a 1 (FAA, 2022). Mesquita Júnior *et al.* (2019) acrescentam o emprego de métodos que consideram o comportamento mecânico do subleito requer a formulação de modelos que descrevam o seu desempenho elástico, relacionado com o módulo de elasticidade do solo. Eventualmente, a adaptação de modelos entre solos distintos pode refletir em uma análise inadequada.

Segundo ANAC (2019) e Chaves e Oliveira (2022), os parâmetros estruturais das camadas e do subleito do aeródromo a serem utilizados no *software* FAARFIELD, pode ser obtido por meio de ensaios destrutivos (sondagens para a coleta de materiais) e não destrutivos (equipamentos deflectométricos). A partir dos dados deflectométricos medidos, realiza-se o processo de retroanálise, que consiste em determinar os módulos de elasticidade dos materiais que compõem o pavimento. Os resultados possibilitam a realização de dimensionamento mecanístico de reforço e da previsão da vida de fadiga da estrutura (CHAVES e OLIVEIRA, 2022).

Módulo de elasticidade

Os equipamentos não destrutivos mais empregados nessa tarefa são o *Heavy Weight Deflectometer* (HWD) e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) (ANAC, 2021). Ambas as ferramentas aplicam uma carga dinâmica vertical sobre a superfície do pavimento por intermédio de uma placa circular (300 a



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



450 mm de diâmetro), com duração entre 20 e 65 milissegundos (AMERI, YAVARI e SCULLION, 2009). Assim, as deflexões elásticas das camadas da estrutura, resultantes da aplicação do carregamento, são medidas por meio de sensores (*geofones*), ao passo que é produzida uma bacia deflectométrica para cada ponto levantado (LENNGREN, 2018). Fazendo uso dessas deformações, os módulos de elasticidade de cada camada e do subleito são obtidos por um processo conhecido como retroanálise.

Conforme Correia (2014), após a obtenção das bacias deflectométricas na superfície de um pavimento, realiza-se o processo de retroanálise, no qual as bacias deflectométricas são estimadas com base nas deflexões medidas e nos valores iniciais referentes às propriedades mecânicas dos materiais constituintes das camadas, como: espessura, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. A partir desses parâmetros aproxima-se o máximo possível da bacia deflectométrica medida, de modo que se atinja um erro com tolerância aceitável.

Embora sejam considerados diversos benefícios proporcionados pelo processo de retroanálise, é necessário salientar que os módulos de elasticidade obtidos são sensíveis a diversos fatores. Priddy *et al.* (2015) ressaltam que não há um método capaz de obter os valores de campo de modo exato, uma vez que são realizadas diversas simplificações. Dentre os principais elementos que podem influenciar os valores calculados, pode-se citar a presença de uma camada rígida e o subleito localizado a poucos metros de uma rocha, a espessura e aderência das camadas, assim como os módulos iniciais atribuídos.

Softwares utilizados na retroanálise

Os *softwares* utilizados no procedimento de retroanálise são divididos em simplificados e iterativos. O primeiro grupo faz uso de recursos, tais como gráficos e equações empíricas, empregando a Teoria da Elasticidade para estimar as características dos materiais que compõem as camadas da estrutura e o subleito. Por se tratar de uma simplificação de algumas características do pavimento, os métodos simplificados garantem maior rapidez, à medida que retornam menor precisão (SANTOS e SOARES, 2015).

Por sua vez, os métodos iterativos, são a partir da obtenção do módulo equivalente da estrutura de múltiplas camadas, buscando ajustar os valores de uma bacia deflectométrica calculada aos da bacia obtida por levantamentos não destrutivos até que os valores sejam iguais, ou que se obtenha resíduos mínimos, estipulados previamente no início da operação (SILVÉRIO, 2021). Ainda nesse contexto, Camarini, Silva Junior e Fontenele (2019) discorrem que os *softwares* iterativos utilizam diferentes métodos para estimar as propriedades de elasticidade das camadas de um pavimento.

Broutin (2010) e FAA (2011) complementam que a maioria desses *softwares* de retroanálise adotam rotinas de cálculo baseadas no Método das Espessuras Equivalentes (*Method of Equivalent Thickness* - MET) e na Teoria das Multicamadas Elásticas (*Multi-Layered Elastic Theory* - MLET) proposto por Burmister (1943). Esses modelos tradicionais assumem que o subleito possui um comprimento vertical infinito. Todavia, Mera (1995), Irwin (2002) e Nascimento (2017) discorrem que se o subleito estiver à apenas alguns metros de distância de uma rocha rígida (menos que 7 m), podem ocorrer erros significativos nas bacias deflectométricas e, conseqüentemente nos módulos de elasticidade retroanalizados.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Os *softwares* BAKFAA, EVERCALC e BackMedina são exemplos de ferramentas computacionais que utilizam o MLET para o cálculo das deflexões teóricas e a estimação do módulo de elasticidade. Por sua vez, os *softwares* PAYBACK, ELMOD e MOLDCALC adotam o MET na rotina de cálculo (FAA, 2011; TAREFDER e AHMED, 2014; CORREIA, 2014). Além desses, outros métodos computacionais de retroanálise vem se popularizando, baseados em métodos de regressão linear, Redes Neurais Artificiais, Algoritmos Genéticos e outros sistemas *fuzzy*. Estes procedimentos resultam em valores de módulo de elasticidade mais preciso quando comparado com os métodos tradicionais de retroanálise (TUTUMLUER e SARKER, 2014).

Segundo Medina e Mota (2015) e Lopes (2019), no Brasil, tem sido comumente empregado os seguintes *softwares* de retroanálise, o ELMOD, da fabricante *Dynatest*, o EVERCALC da fabricante KUAB, o BAKFAA desenvolvido pela Universidade de Washington em parceria com a FAA. Por sua vez, tem-se os nacionais, o BackMedina que é um importante componente do conjunto de programas relacionados ao novo método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos (MeDiNa), desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ com participação ANP/PETROBRAS e IPR/DNIT e o BackCAP, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará – UFC. A Tabela 1 expõe as principais diferenças entre os *softwares*.

Tabela 1. Característica dos *softwares* de retroanálise utilizados neste trabalho (Autores, 2023)

<i>Software</i>	Desenvolvedor	País	Rotina de cálculo	Condição de aderência	Núm. máximo de camada	Convergência de bacia
BAKFAA	FAA	EUA	Elástico linear	Variável	10	Root Mean Squared - RMS
ELMOD	<i>Dynatest</i>	EUA	Método das espessuras equivalentes de Odemark	Fixada	4	Root Mean Squared - RMS
BackMedina	UFRJ/DNIT	Brasil	Elástico linear	Variável	6	Root Mean Square Error - RMSE
BackCAP	UFC	Brasil	Método dos Elementos Finitos	Fixada	∞	Root Mean Square Error - RMSE

MÉTODO DE PESQUISA

Realizou-se um estudo de dimensionamento de pavimento flexível a partir de uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira com extensão de 2.950 m, sendo dividida em dois segmentos (trechos 1 e 2), no qual o trecho 1 possui um comprimento de 2.100 m e o trecho 2 com 850 m de extensão (Figura 1).

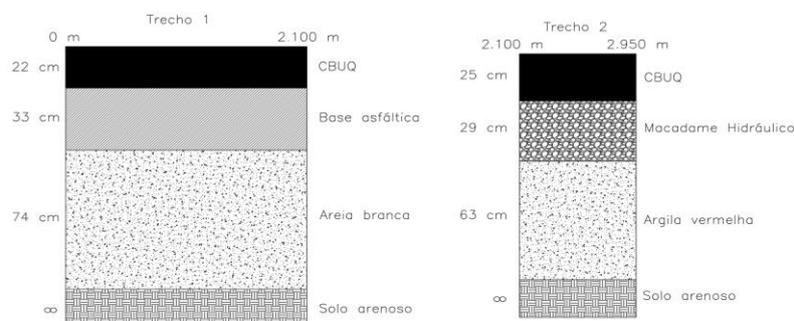
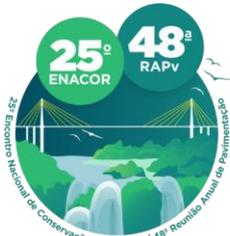


Figura 1. Características e materiais que constituem a PPD existente do aeroporto (Autores, 2023)

A partir do *software* FAARFIELD 2.0.18, foram feitos dimensionamento dos pavimentos da PPD, empregando valores de módulos de elasticidade retroanalizados para as camadas (asfálticas e



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

www.rapvenacor.com.br



granulares) e o subleito por meio de quatro distintos *softwares*, o BAKFAA (v. 2003.11.3), o BackCAP (v.2.0), o BackMedina (v.1.2.0) e o ELMOD (v.6). Para os procedimentos de retroanálises foram utilizadas as bacias deflectométricas medidas por nove sensores (*geofones*), distantes do ponto de carregamento em 0, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 cm, com carga de impacto de 200 KN. O levantamento foi realizado em ambos os lados, direito e esquerdo, a 3 m e 6 m a partir do eixo central da PPD, de modo a avaliar a resposta estrutural do pavimento nos locais com maior aplicação de cargas do trem de pouso principal das aeronaves. Com os dados do equipamento HWD, bacias deflectométricas e características dos materiais, foi iniciado o processo iterativo utilizando os valores típicos recomendado pela FAA (2011) de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de entrada para a retroanálise (Autores, 2023)

Camada	Material	BAKFAA (MPa)	BackCAP (MPa)		BackMedina (MPa)	ELMOD (MPa)	Coeficiente de Poisson
			Mínimo	Máximo			
Revestimento	CBUQ	3.500	500	5.000	3.500	3.500	0,30
Base	Base asfáltica	3.500	500	5.000	3.500	3.500	0,35
	Macadame hidráulico	350	150	500	350	350	0,35
Sub-base	Areia branca	250	100	350	250	250	0,35
Subleito	Solo natural	150	50	300	150	150	0,40

Na realização da retroanálise, foram adotadas as seguintes hipóteses: (i) materiais elásticos lineares, (ii) isotrópicos e homogêneos; (iii) condição completa de aderência entre os materiais; (iv) camadas com espessuras finitas na vertical e (v) subleito semi-infinito. Como solução para o ajuste entre as bacias deflectométricas medidas em campo e calculadas, adotou-se erro quadrático médio (*Root Mean Square - RMS*) menor do que 5%, conforme recomenda (FAA, 2011).

Após a determinação dos módulos de elasticidade para as camadas da PPD estudada, realizou-se um tratamento estatístico para identificar e excluir os *outliers*. Em seguida, separou-se a PPD em segmentos homogêneos, de acordo com a FAA (2022), que caracterizassem locais com características similares quanto à sua condição estrutural, que neste foram as deflexões máximas contidas nas bacias deflectométricas medidas (Figura 2). Por fim, realizou-se a média aritmética dos valores restantes, obtendo assim um número representativo do módulo de elasticidade característico a ser utilizado no dimensionamento.

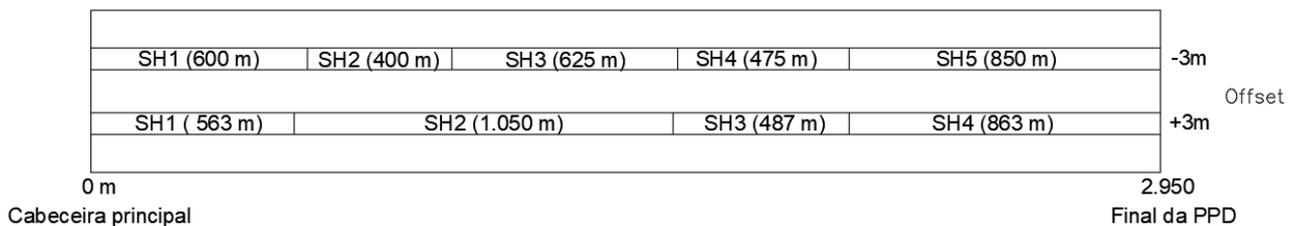


Figura 2. Segmentos Homogêneos (SH) da PPD analisada (Autores, 2023)

Foram, ainda, necessários dados de tráfego (*mix* de aeronaves). Em vista disso, a Tabela 3 mostra os modelos das aeronaves, média anual de movimentações de decolagem, percentual de tráfego, peso máximo operacional e pressão dos pneus, inseridos no *software* FAARFIELD 2.0.18. Para o dimensionamento, empregou-se as aeronaves que apresentaram no aeroporto analisado números de operação média anual superior a 1% e peso máximo de decolagem maior que 5.700 kg, conforme recomenda ANAC (2022).



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 3. Dados do *mix* de aeronaves operantes do aeroporto utilizando no *software* FAARFIELD 2.0.18

Modelo	Média anual de movimentações de decolagem	Mix (%)	Peso máximo Operacional (Toneladas)	Pressão dos Pneus (KPa)
Airbus A320-200	8.175	24,41	78.400	1,441
Boeing 737-800	7.411	22,13	79.240	1,407
Airbus A321 - 200	2.452	7,32	93.900	1,503
Embraer 190	2.310	6,90	47.950	1,014
Embraer 195	1.857	5,54	48.950	1,062
Boeing 737-700	1.518	4,53	70.310	1,358
Boeing 737-400	850	2,54	68.266	1,276
Airbus A319-100	591	1,77	68.400	1,190

Para realização do procedimento de dimensionamento da PPD foram utilizados os maiores e menores módulos de elasticidade obtidos nos segmentos homogêneos (SH) (Tabela 4). Com essas condições, variou-se somente a espessura da camada de sub-base, fixando os valores de revestimento e base como o mínimo admissível. Optou-se por escolher o *offset* +3m devido ao menor número de segmentos homogêneos em comparação ao *offset* -3m

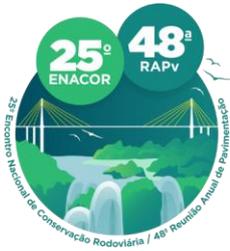
Tabela 4. Módulos de elasticidade retroanalizados (Autores, 2023)

	Software	Offset +3m				Offset -3m				
		SH1	SH2	SH3	SH4	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5
Revestimento	BAKFAA	2134,75	3336,07	4839,91	3522,07	2213,39	2674,46	4113,4	7310,34	4098,06
	BackCAP	1673,61	1364,82	2624,00	2215,48	1551,38	1985,15	1686,17	4068,36	3708,22
	BackMedina	1735,70	1366,63	3472,75	2846,39	1833,87	1808,59	2055,8	4812,4	3872,17
	ELMOD	1661,60	1450,53	2456,92	2339,32	1882,74	1930,37	2006,68	3644,41	3107,69
Base	BAKFAA	3321,91	1933,72	1091,15	583,00	1431,15	1772,84	529,52	691,34	372,31
	BackCAP	1975,97	881,00	292,00	314,04	1695,5	1990,3	594,11	285,09	263,17
	BackMedina	1980,71	902,11	405,00	456,11	1473,22	1825,72	673,89	276,00	239,55
	ELMOD	1841,15	887,53	700,98	362,39	1142,8	1324,87	507,81	282,41	455,47
Sub-base	BAKFAA	504,74	422,17	584,12	264,88	499,82	680,21	220,52	523,46	257,32
	BackCAP	403,75	212,10	266,40	241,07	422,38	420,65	159,68	307,36	279,54
	BackMedina	497,05	206,10	235,80	241,04	398,33	565,69	239,53	293,50	269,20
	ELMOD	720,50	715,17	291,96	308,58	676,87	804,91	354,13	430,53	362,25
Subleito	BAKFAA	298,47	223,95	194,33	180,15	291,81	275,41	242,03	206,50	164,33
	BackCAP	251,55	189,71	162,61	149,18	244,33	245,67	191,59	175,73	163,14
	BackMedina	372,23	290,72	200,48	182,96	333,2	292,95	242,18	223,00	201,29
	ELMOD	265,20	218,86	171,00	161,52	236,00	287,12	180,68	172,61	165,39

Para a escolha do segmento homogêneo (SH) com maior e menor módulo de elasticidade, seguiu-se o seguinte critério: o segmento SH1 possui valores considerados altos para a base e para o subleito, de acordo com DER/SP (2006). Para o segmento SH4, apesar dos valores altos de módulo para revestimento, os valores para as demais camadas são valores condizentes com os mencionados na literatura pelo DER/SP (2006). Observa-se também que a PPD é dividida em dois trechos com materiais diferentes na base e o dimensionamento foi realizado para os segmentos homogêneos SH1 que pertence ao trecho 1 e o SH4 que pertence ao trecho 2 que por sua vez apresentaram módulos de elasticidade distintos devido à separação em segmentos homogêneos. Portanto, optou-se por selecionar os segmentos SH1 e SH4 no *offset* +3m, haja vista que os menores valores de módulo de elasticidade foram verificados no segmento SH4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas utilizando dados dos segmentos SH1 e SH4, ambos para o *offset* +3m simulando o dimensionamento para uma nova estrutura da PPD pode ser observada na Tabela 5.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 5. Simulação de dimensionamento para segmentos distintos (Autores, 2023)

	<i>Software</i>	SH1	Espessura (cm)	SH4	Espessura (cm)
Revestimento	BAKFAA	2134,75		3522,07	
	BackCAP	1673,61	10	2215,48	10
	BackMedina	1735,70		2846,39	
	ELMOD	1661,60		2339,32	
Base	BAKFAA	3321,91		583,00	
	BackCAP	1975,97	15	314,04	15
	BackMedina	1980,71		456,11	
	ELMOD	1841,15		362,39	
Sub-base	BAKFAA	504,74		264,88	22,1
	BackCAP	403,75	10	241,07	33,7
	BackMedina	497,05		241,04	24,3
	ELMOD	720,50		308,58	29,4
Subleito	BAKFAA	298,47		180,15	
	BackCAP	251,55	∞	149,18	∞
	BackMedina	372,23		182,96	
	ELMOD	265,20		161,52	

Deve-se atentar, que o *software* FAARFIELD 2.0.18, executa o dimensionamento de forma automática somente para a sub-base, enquanto que para as camadas de base e revestimento o dimensionamento ocorre de forma manual, por isso optou-se por variar apenas a espessura da sub-base. Nessa situação, para o segmento que apresentou os maiores módulos de elasticidade (SH1), mesmo adotando as espessuras mínimas para o revestimento e a base, 10 cm e 15 cm, respectivamente, o dimensionamento resultou para a camada de sub-base a menor espessura possível. Por sua vez, para o segmento que possui os menores valores de módulos de elasticidade (SH4), apresentou os valores de espessura para a sub-base entre 22,1 cm e 33,7 cm (resultando em uma diferença percentual de 52,5%), dependendo do *software* que retroanalisou as bacias deflectométricas. Observa-se que a depender do *software* escolhido para a retroanálise ocorre uma variação significativa em termos estatísticos (diferença de 52,5%) na espessura da sub-base podendo ser maior do que 10 cm a diferença de espessura.

Em termos de vida útil, foram observados valores discrepantes em relação aos segmentos selecionados (SH1 e SH4) (Tabela 6). Partindo para os valores extremos observa-se que ao projetar a vida útil do pavimento com dados retroanalisados é possível obter valores consideravelmente distintos.

Tabela 6. Vida útil para SH1 e SH4 (Autores, 2023)

<i>Softwares</i>	Vida útil (SH1) (anos)	Vida útil (SH4) anos
BAKFAA	9.722	
BackCAP	31,6	20
BackMedina	3.882	
ELMOD	56,7	

Para o mesmo segmento homogêneo (SH1) essa diferença pode ser da ordem de 9.700 anos. Ou seja, uma pista de pouso e decolagem quando projetada ou restaurada possuindo como um dos dados de entrada o módulo de elasticidade, pode apresentar variações tanto da espessura quanto da vida útil.

No Brasil, de acordo com ANAC (2022), é comum verificar estruturas superdimensionadas para as aeronaves que fazem uso do aeródromo. Isso pode ser relacionado ao fato de que o pavimento quando



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

www.rapvenacor.com.br



dimensionamento, à época do projeto, fazia uso de outra metodologia de dimensionamento, diferente da adotada pelo FAARFIELD 2.0.18.

Ao analisar os conjuntos de módulos de elasticidade retroanalizados pelos *softwares* empregados, constatou-se, conforme a Figura 3, que para a camada de revestimento os resultados apresentaram comportamento semelhantes ao longo da PPD, com alguns pontos com valores elevados, chegando a 16.000 MPa. As divergências de valores de módulos de elasticidade foram mais perceptíveis para as camadas granulares e subleito, com o ELMOD e o BAKFAA aferindo maiores valores, principalmente na sub-base.

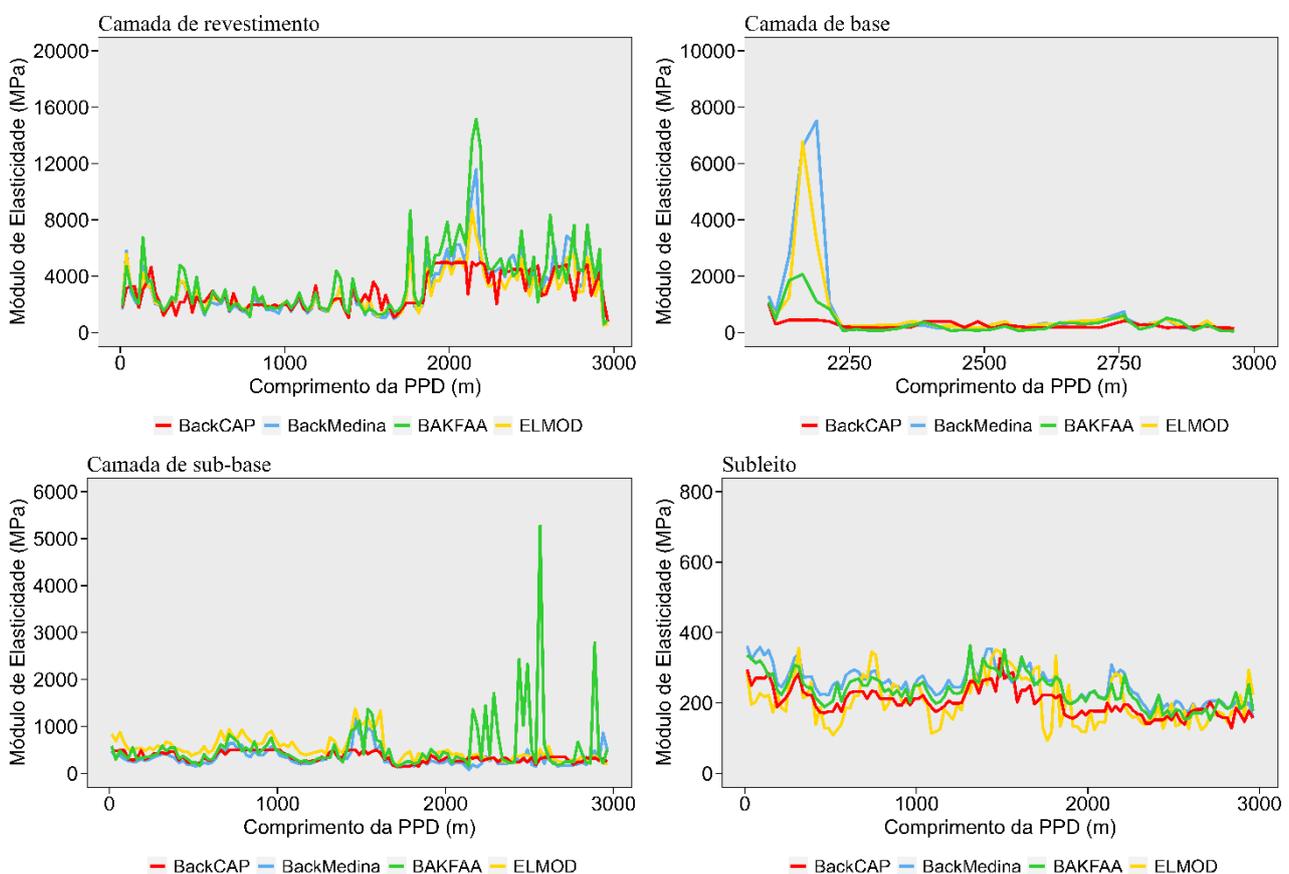


Figura 3: Resultado dos módulos de elasticidade obtidos pelos *softwares* empregados para o *offset* +3m (Autores, 2023)

Quanto aos dados do subleito, observou-se semelhanças na distribuição dos módulos de elasticidade pelos *softwares* BAKFAA e BackMedina, e não foram encontrados picos de valores (possíveis *outliers*), como verificado nas camadas de revestimento, base e sub-base. Estudos feitos por Oberez *et al.* (2015), Bueno (2016) e Lopes (2019) constataram resultados análogos ao observado para esse material (solo natural), como a semelhança de módulos de elasticidade mensurados por distintos *softwares* de retroanálises e a simetria de comportamento ao longo do trecho inspecionado.

CONCLUSÃO

Foi constatado que a utilização de diferentes *softwares* para analisar ou inserir dados de entrada para dimensionamento do pavimento aeroportuário pode modificar as variáveis de projeto de uma pista de



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



posso e decolagem. Em relação à utilização de *softwares* distintos, verificou-se, por meio deste trabalho, que ocorreram diferenças tanto com os dados obtidos para o dimensionamento (espessura das camadas) como para o cálculo da vida útil.

Em relação ao dimensionamento foi obtida uma estrutura com espessuras mínimas quando aplicado os maiores módulos de elasticidade obtidos pelos quatro *softwares* estudados (BAKFAA, BackCAP, BackMedina e ELMOD). Por outro lado, na simulação com os menores módulos de elasticidade houve uma variação de espessura da sub-base com os valores obtidos pelos *softwares* BAKFAA e BackCAP. Em ambos os casos, a simulação para o dimensionamento foi inferior à estrutura original.

Por fim, observou-se que a seção homogênea com maior módulo de elasticidade apresentou um valor da vida útil de projeto superdimensionada. Portanto, o módulo de elasticidade obtido, tanto para as misturas asfálticas como para os materiais granulares, tem influência no dimensionamento e na vida de projeto dos pavimentos aeroportuários e devem ser levadas em consideração quando da sua obtenção, sobretudo quando se trata do *software* de retroanálise utilizado. Isso porque os resultados podem influenciar diretamente nas atividades relacionadas a um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a 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). **Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários** – SGPA, 1º ed. 2017.

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.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Alerta aos operadores de Aeródromos Nº 003/2021**, Emenda nº 01. Brasília/DF, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Manual para o cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários**. Brasília, DF, 2022.

AMERI, M, YAVARI, N; SCULLION, T. Comparison of static and dynamic backcalculation of flexible pavement layer moduli, using four software programs, **Asian Journal of Applied Sciences**, v. 2, n. 3, p. 197-210, 2009.

ASHFORD, Norman J; MUMAYIZ, Saleh; WRIGHT, Paul h. **Airport Engineering: planning design, and development of 21st century airports**. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc..769 p, 2011.

BROUTIN, Michaël. **Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Development of a FEM dynamical time-domain analysis for the backcalculation of structural properties**. Mechanics of materials [physics.class-ph]. Ecole des Ponts ParisTech, 2010.

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

BURMISTER, Donald M. The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. Proc., **Highway Research Board**, v..23, p. 27-30, 1943.

CAMARINI, Guilherme Crepaldi; SILVA JUNIOR, Carlos Alberto Prado; FONTENELE, Heliana; Barbosa. **Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa backmedina**. ANAIS do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte - ANPET. Balneário Camboriú – SC, 2019.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



CHAVES, José Wémenson Rabelo; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda. **Análise do efeito da condição de aderência entre as camadas de pavimento aeroportuário no módulo de elasticidade.** Anais do 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) / 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Bento Gonçalves – RS, 2022.

CORREIA, João Miguel Santos. **Retro-análise de Resultados de Caracterização Estrutural de Pavimentos.** 2014. 133 fls. Dissertação (Mestrado) Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa / Portugal, 2014.

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). **Airport Pavement Design and Evaluation – AC No. 150/5320-6D.** Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 1995.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Airport Pavement Design and Evaluation – AC No. 150/5320-6E.** Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 2009.

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 AVIATION ADMINISTRATION (FAA). FAARFIELD 1.3 – **Software Overview. Federal Aviation Administration.** U.S. Department of Transportation. In: XI ALACPA Seminar on Airport Pavements and IX FAA Workshop. Santiago, Chile, 2012

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Airport Pavement Design and Evaluation – AC No. 150/5320-6F.** Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA, 2016.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Advisory circular 150/5335-5D: **Standardized method of Reporting Pavement Strength -PCR.** United States. Department of Transportation, Washington DC, USA, 2022.

HORONJEFF, Robert; MCKELVEY, Francis; SPROULE, William; YOUNG, Seth. **Planning and Design of Airports.** 5ª Ed, Nova York: McGraw Hill, 670 p, 2010.

IRWIN L. H. **Backcalculation: An Overview and perspective.** in: Pavement Evaluation Conference, 2002, Roanoke, Virginia, USA, 2002.

LENNGREN, C. **Advanced backcalculation of FWD data on asphalt pavements.** In Proceedings of the 13th ISAP Conference on Asphalt Pavements, Fortaleza, Brazil, 19–21 June 2018.

LOPES, Rosilene Alves. **Avaliação de programas de retroanálise de bacias deflectométricas - aplicação a um trecho de uma rodovia federal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2019.

MACEDO, Marcelo de Canossa. **Estudo para base técnica de um sistema de gerência de pavimentos para redes regionais de aeroportos.** 218f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

MEDINA, Jacques; MOTTA, Laura Maria Goretti. **Mecânica dos Pavimentos.** 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ. Interciência, 2015. 640 p.

MERA, Foinquinos R. **Dynamic Nondestructive Testing of Pavements,** Geotechnical Engineering Report GR95-4, Geotechnical Engineering Center, University of Texas at Austin, Austin, Texas, 1995.

MESQUITA JUNIOR, Giedson Silva; MAIA, Renan Santos; SOUSA, Elisa da Silva; CASTRO, Cecilia Catarina Oliveira; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda. **Análise de sensibilidade do software FAARFIELD no dimensionamento de pavimentos aeroportuários.** Conference: XVIII Simpósio de Transporte Aéreo - XVIII SITRAER, 2019, BRASÍLIA. Anais do XVIII SITRAER, 1-10, 2019.

NASCIMENTO, Mauro Henrique Alves. **Análise da incompatibilidade de rigidez entre camadas de revestimentos asfálticos na ocorrência de Slippage em pavimento aeroportuário.** 2017. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.

OBEREZ, Maria Elena; KASS, Said; HILDERMAN, Stan; AHMMED, Alauddin; TANG, William. **Estimating Base Layers and Subgrade Moduli for ME Pavement Design in Manitoba.** Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, PEI, 2015.



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

www.rapvenacor.com.br



OLIVEIRA, Franciso Heber Lacerda. **Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação**. 178 f. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)–Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PRIDDY, L. Priddy; BIANCHINI, A; CARLOS, Rutland; DOSSETT, C. S. **Evaluation of Procedures for Backcalculation of Airfield Pavement Moduli**. Vicksburg, MS: Engineer Research and Development Center Vicksburg MS Geotechnical and Structures Lab. ERDC/GSL p. 13- 31, 2015.

SANTOS, Henrique Carlos Albuquerque; SOARES, Jorge Barbosa. (2015). **Obtenção de módulos de resiliência em laboratório e por meio de retroanálise em rodovias no estado do Ceará e o efeito no dimensionamento de pavimentos**. In: Anais do XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes – ANPET, Ouro Preto – MG.

SILVÉRIO, Leticia Carlos. **Análise empírico-mecânica de pavimento asfáltico para verificação da influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade das camadas do pavimento e subleito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, 2021.

TAREFDER, Rafiqul A; AHMED, Mesbah U. Modeling of the FWD Deflection Basin to Evaluate Airport Pavements. **International Journal of Geomechanic**, v. 14, n. 2, p. 205-213, 2014.

TUTUMLUER, Erol; STARKER, Priyanka; **Development of Improved Pavement Rehabilitation Procedures Based on FWD Backcalculation**. USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report, 2014.