

## CONTROLE CONSTRUTIVO DE PAVIMENTOS COM A VIGA DE BENKELMAN – REFLEXÕES SOBRE AS PRÁTICAS EM PROJETOS

**Bruno Quilici Vellasco**

**José Tadeu Balbo**

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Transportes

### RESUMO

Este artigo apresenta uma análise crítica do uso da viga de Benkelman para controlar a qualidade da construção de pavimentos. Uma breve revisão sobre o atual estado da prática é apresentada, ressaltando as principais limitações e dificuldades associadas ao ensaio. É discutido o controle deflectométrico realizado na obra de ampliação do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro em 2014, revelando os problemas enfrentados e a abordagem para mitigá-los. Por fim é realizada uma reflexão sobre as práticas de projetistas ao definirem os valores de deflexões de controle sobre camadas em obras, evidenciando o impacto que a variação de alguns parâmetros pode ter nos resultados.

### ABSTRACT

This paper presents a critical analysis on the use of Benkelman beams for the quality control of roadworks. A brief review on the current state of practice is presented, highlighting the main constraints and difficulties related to the testing. As case study, it is presented the deflection control carried out at the International Airport of Rio de Janeiro, during the construction of new paved areas. The key issues faced by the contractor are discussed, as well as the adopted mitigation strategies. Finally, it is presented a reflection on the way designers define the acceptable values of deflection, evidencing the impact on the results caused by the variation of some parameters.

### 1. INTRODUÇÃO

Há duas décadas a viga de Benkelman é utilizada por empreiteiras para medir as deflexões sobre camadas de pavimentos em construção, como etapa não normatizada do controle de qualidade no Brasil. O equipamento acessível, a fácil operação e o procedimento não destrutivo motivam os engenheiros a escolherem este método para avaliar a consistência do processo construtivo. Valores de deflexões são especificados em projetos de execução como indicadores da rigidez desejada e medida sobre a estrutura.

A inexistência de normas que estabeleçam níveis aceitáveis de deflexões, contudo, representa obstáculo para esta prática. Definir as deflexões de controle é responsabilidade das projetistas, que geralmente se apoiam em suposições simplistas e equivocadas, deixando de apresentar uma envoltória de deflexões expectáveis para as camadas dos materiais de pavimentação. Adotam-se valores de módulos de resiliência determinísticos para calcular deflexões teóricas, no entanto, parâmetros normativos de controle (grau de compactação e o teor de umidade, por exemplo) permitem tolerâncias quanto aos valores indicados, o que *per se* leva à variabilidade em campo dos valores modulares. Fatores importantes como a heterogeneidade dos materiais de pavimentação, limitações dos programas de análise mecanicista e condições de campo, costumam ser negligenciados. Consequentemente, os valores de deflexões utilizados em obras são muitas vezes restritivos, por não abalizarem o real comportamento dos materiais. Isto é um problema para o controle deflectométrico com a viga de Benkelman, pois o procedimento do ensaio é empírico e os resultados dependem das propriedades dos materiais *in situ*. Assim, uma discussão sobre como as projetistas abordam esta questão é indispensável, porque são frequentes problemas de execução atrelados a parâmetros de controle incoerentes.

O objetivo deste artigo é analisar criticamente como deflexões de controle são definidas, abordando os parâmetros que podem afetar os resultados em campo e propondo diretrizes para

o aperfeiçoamento desta prática. Como estudo de caso, analisa-se o controle deflectométrico realizado em 2014 para os pavimentos novos na ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão), no Rio de Janeiro.

## **2. BREVE REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Cenário atual do controle deflectométrico**

No Brasil, muitas agências viárias e concessionárias exigem a determinação das deflexões sobre camadas de pavimentos recém-construídos, como parte do controle de qualidade da pavimentação. Todavia, as especificações técnicas não apresentam referências quanto aos valores de deflexões de controle; nem mesmo indicam como determinar estes valores e como proceder quando não são obtidos em campo. Não há literatura técnica nacional dando suporte a estudos e projetos sobre tal tipo de controle, nem respaldo de normas técnicas internacionais fixando níveis de deflexões aceitáveis durante a construção de pavimentos. Alguns documentos e publicações não normativas, nos Estados Unidos, Portugal e França, recomendam a avaliação do módulo de resiliência (retroanalísado) para cada camada usando ensaios não destrutivos, principalmente com *Falling Weight Deflectometer* (FWD), mas não fixam limites para as deflexões de controle.

### **2.2. O ensaio com a viga de Benkelman**

O controle deflectométrico com a viga de Benkelman é considerado um ensaio quase-estático devido à velocidade muito baixa do caminhão durante o teste; no Brasil é especificado pela norma DNER-ME 024/94 (DNER, 1994). Os resultados do ensaio são dependentes das condições de campo e da heterogeneidade dos materiais: condições climáticas; características do tráfego e da carga aplicada; tipo de pavimento; dimensões da viga de Benkelman; e parâmetros derivados das deflexões (MOLENAAR, 1995, *apud* VISSER e PRIAMBODO KOESRINDARTONO, 2000). Por isso, as deflexões obtidas com a viga de Benkelman apresentam razoável dispersão, principalmente nos pontos mais distantes da aplicação de carga (ROCHA FILHO e RODRIGUES, 1996). Recordar-se que as medidas de deflexões com a viga de Benkelman, empregando-se relógio comparador (extensômetro analógico), estão sujeitas a erros sistemáticos (posicionamentos da ponta de prova, da articulação da viga e de cargas em pontos de interesse), a erros grosseiros (leitura e anotação de valores) e eventualmente a erros aleatórios (externalidades, como vibração da pista por passagem de veículos).

## **3. ESTUDO DE CASO**

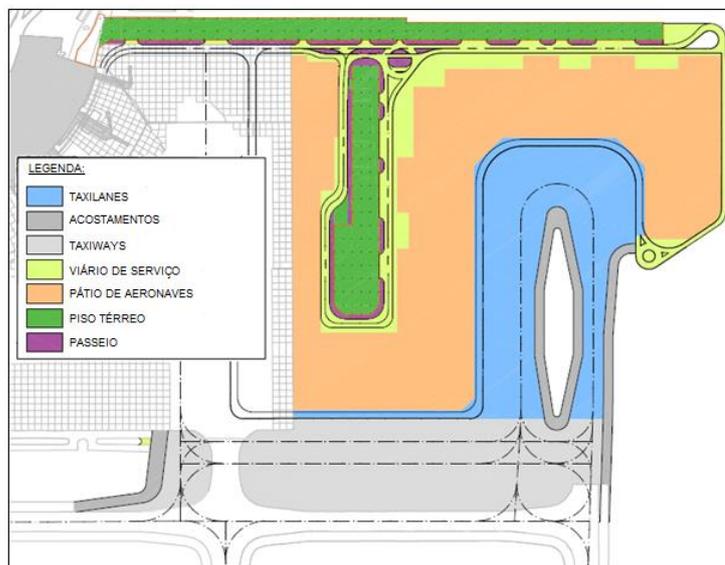
### **3.1. Características da obra**

A ampliação do Aeroporto do Galeão envolveu a execução de novos pavimentos de concreto junto ao pátio de aeronaves e à área de suporte operacional (Piso Térreo), e novos pavimentos asfálticos em *taxiways*, *taxilanes* e viário de serviço, conforme apresentado na Figura 1. Na Tabela 1 são apresentadas as estruturas dos pavimentos e os parâmetros elásticos considerados em projeto (espessura “h” da camada, módulo de resiliência “E” e coeficiente de Poisson, “ $\mu$ ”), que foram assumidos deterministicamente pela projetista. Nota-se que os valores de módulos de resiliência são constantes, negligenciando a heterogeneidade dos materiais. Isto limita as deflexões aceitáveis obtidas por meio de análise mecanicista.

### **3.2. Deflexões de controle e problemas enfrentados em campo**

As deflexões de controle foram especificadas em projeto empregando-se o programa multicamadas MnLayer (Balbo e Khazanovich, 2007), baseado na Teoria de Sistemas de

Camadas Elásticas (TSCE) de Burmister (1945). Simulou-se eixo simples de rodas duplas com 80 kN. Os parâmetros de controle submetidos inicialmente pela projetista à empreiteira são apresentados na Tabela 2.



**Figura 1:** Novos Pavimentos do Aeroporto do Galeão

(fonte: CONSÓRCIO CONSTRUTOR GALEÃO. Planta de identificação dos pavimentos: geral. Projeto Executivo do Aeroporto Internacional Tom Jobim, GIG-E009-3-PPA-04-105-DE-0021, rev. 2A, 2015)

**Tabela 1:** Estruturas de pavimentos e parâmetros elásticos

Pavimento	Material	h (mm)	E (MPa)	$\mu$
Taxilanes Taxiways	Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) capa, CAP 50/70	60	4.000	0,32
	Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) binder, CAP 50/70	60	4.000	0,32
	Pré-misturado a quente (PMQ), CAP 50/70	100	2.500	0,32
	Brita graduada tratado com cimento (BGTC), 5% cimento	150	5.500	0,20
	Brita graduada simples (BGS)	150	300	0,35
	Camada final de terraplenagem (CFT), CBR 12%	-	120	0,45
Acostamento	Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) capa, CAP 50/70	50	4.000	0,32
	Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) binder, CAP 50/70	50	4.000	0,32
	Brita graduada simples (BGS)	310	300	0,35
	Camada final de terraplenagem (CFT), CBR 12%	-	120	0,45
Viário de Serviço	Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) capa, CAP 50/70	60	4.000	0,32
	Concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) binder, CAP 50/70	60	4.000	0,32
	Brita graduada simples (BGS)	400	300	0,35
	Camada final de terraplenagem (CFT), CBR 12%	-	120	0,45
Pátio de Aeronaves	Concreto de cimento Portland (CCP)	350	-	-
	Brita graduada tratado com cimento (BGTC), 5% cimento	160	5.500	0,20
	Brita graduada simples (BGS)	300	300	0,35
	Camada final de terraplenagem (CFT), CBR 12%	-	120	0,45
Piso Térreo	Concreto de cimento Portland (CCP)	200	-	-
	Brita graduada simples (BGS)	200	300	0,35
	Camada final de terraplenagem (CFT), CBR 12%	-	120	0,45

(fonte: CONSÓRCIO CONSTRUTOR GALEÃO. Memória de Cálculo. Projeto Executivo do Aeroporto Internacional Tom Jobim, GIG-E009-3-GRL-01-105-MC-0001, rev. 1, 2015)

Para cada trecho de pavimento analisado, a média das medidas obtidas em campo não poderia superar o valor de “D<sub>0</sub>” (estas são medidas padrões de avaliação de deflexões). Adicionalmente, o valor medido em um ponto individual não poderia superar a tolerância

especificada. Este critério de aceitação é considerado exigente, pois uma única medida que não atendesse à tolerância levaria à não aceitação de todo o segmento.

O controle deflectométrico foi feito no sentido longitudinal da pavimentação. As primeiras dificuldades surgiram no controle da CFT. Aproximadamente 82% dos trechos de pavimento foram rejeitados com valores de deflexões acima dos limites admissíveis (Tabela 2). Os valores de CBR da camada atingiam consistentemente o valor de projeto (12%); contudo isto não foi suficiente, pois a capacidade de suporte da fundação não tem correspondência direta com sua deformabilidade elástica. Inicialmente, acreditava-se que o problema era com a viga de Benkelman; por isso o equipamento foi substituído por outro semelhante e devidamente calibrado. Mesmo assim, resultados insatisfatórios persistiram.

**Tabela 2:** Deflexões de controle definidas no projeto de execução

Pavimento	Material	h (mm)	D <sub>0</sub> (0,01 mm)	Tolerância
<i>Taxilanes</i> <i>Taxiways</i>	CAUQ capa	60	22	+ 5%
	CAUQ binder	60	24	+ 5%
	PMQ	100	28	+ 10%
	BGTC	150	35	+ 10%
	BGS	150	65	+ 10%
	CFT (CBR 12%)	-	72	+ 15%
Acostamento	CAUQ capa	50	40	+ 5%
	CAUQ binder	50	48	+ 5%
	BGS	310	52	+ 10%
	CFT (CBR 12%)	-	72	+ 15%
Viário de Serviço	CAUQ capa	60	36	+ 5%
	CAUQ binder	60	44	+ 5%
	BGS	400	49	+ 10%
	CFT (CBR 12%)	-	72	+ 15%
Pátio de Aeronaves	BGTC	160	31	+ 10%
	BGS	300	53	+ 10%
	CFT (CBR 12%)	-	72	+ 15%
Piso Térreo	BGS	200	59	+ 10%
	CFT (CBR 12%)	-	72	+ 15%

(adaptado de: CONSÓRCIO CONSTRUTOR GALEÃO. Detalhes e Seções Típicas. Projeto Executivo do Aeroporto Internacional Tom Jobim, GIG-E009-3-PPA-04-105-DE-0011, rev. 0, 2015)

A construtora optou então por estabilizar o solo da CFT com cimento e/ou brita, exclusivamente para aumentar a rigidez do material e amenizar as deflexões resultantes. Apesar de encarecer a obra e fugir do escopo original, este procedimento foi eficaz, pois as deflexões medidas após a estabilização resultaram em valores inferiores aos de controle. Portanto, a CFT passou a ser aprovada no controle de qualidade, mas com consequências econômicas para a empreiteira. Posteriormente, durante o controle deflectométrico da camada de BGS, novos problemas emergiram: todos os segmentos ensaiados foram reprovados quanto ao atendimento das exigências (Tabela 2). A granulometria da BGS empregada apresentava desvios em relação às faixas especificadas, o que pode ter contribuído para este cenário. Diante disso, decidiu-se que as deflexões de controle fossem revisadas pela projetista para identificar as possíveis inconsistências. Os valores de módulos de resiliência de algumas camadas foram modificados, mantendo-se, no entanto, o dimensionamento original dos pavimentos.

### 3.3. Revisão das deflexões de controle

#### 3.3.1. Subleito e CFT

Durante a determinação das deflexões de controle originais assumiu-se que o solo do subleito teria os mesmos valores de CBR e módulo de resiliência da CFT, como se ambos os materiais fossem idênticos. Todavia, foi uma consideração equivocada, haja vista que o subleito apresentava valores de CBR variando de 2 a 16% nas zonas de corte e de 4 a 28% nas zonas de aterro. Logo, o módulo de resiliência equivalente do conjunto subleito/CFT era menor que 120 MPa. Isto explica porque as deflexões inicialmente medidas no topo da CFT eram superiores àquela especificada. Como solução, a projetista considerou a influência do material do subleito sob a CFT, adotando-se um módulo de resiliência de 40 MPa (referente a um valor de CBR de 4%, segundo o critério da AASHTO, 1993) para representar as camadas de corte e aterro. O nível do lençol freático foi encontrado a uma profundidade média de 3 m, não afetando o comportamento do subleito.

#### 3.3.2. BGS

Quando as deflexões de controle foram inicialmente definidas, assumiu-se que a BGS apresentaria módulo de resiliência constante de 300 MPa, conforme o dimensionamento do pavimento. Com a revisão, o estado de confinamento do material passou a ser considerado; porém, incorretamente – admitiu-se que o módulo de resiliência da BGS diminuía com o aumento do confinamento da camada. Desta forma, assumiu-se um valor modular de 130 MPa para a BGS quando o ensaio era realizado sobre as camadas superiores. Assim, as deflexões de controle permaneceram imprecisas mesmo após a revisão. Considerou-se desde o princípio que a BGS estava completamente aderida à CFT, devido à penetração dos agregados no solo, resultante da energia vertical de compressão durante a compactação.

#### 3.3.3. BGTC

A influência do tempo na resistência e rigidez da BGTC não foi considerada durante a estimativa inicial das deflexões de controle. Um módulo de resiliência de 5.500 MPa havia sido assumido para a camada, referente à idade de 28 dias. No entanto, não foi especificado em projeto quando as deflexões deveriam ser aferidas. Dessa maneira, se o controle deflectométrico fosse realizado sobre a BGTC aos sete dias de idade, a deflexão obtida seria maior que a esperada. Com a revisão, esclareceu-se que as deflexões de controle se baseavam em um material com ao menos 28 dias. Caso o material atingisse a resistência especificada ( $f_{ct,f} \geq 0,80$  MPa) antes desta idade, as deflexões poderiam ser medidas antecipadamente. Caso contrário, um novo valor de controle deveria ser estimado para permitir o registro das deflexões. Ressalta-se que a granulometria, quantidade de cimento e umidade são também determinantes para a rigidez da BGTC. Considerou-se inicialmente que a BGTC estava completamente aderida à BGS. Na verdade, a quantidade de argamassa na BGTC é pequena (não envolve completamente seus próprios agregados, Balbo, 1993) e insuficiente para garantir a completa aderência na interface. Sendo assim, a aderência entre essas camadas passou a ser considerada inexistente, levando a valores de controle maiores no topo da BGTC.

#### 3.3.4. Materiais asfálticos

As deflexões de controle dos materiais asfálticos devem ser acompanhadas por temperaturas de referência, pois seu módulo de resiliência é sensível às alterações deste parâmetro; isto foi ignorado inicialmente. Após a revisão, evidenciou-se que os módulos de resiliência de 4.000 MPa do CAUQ e de 2.500 MPa do PMQ referiam-se a 25°C. Quando as temperaturas dessas camadas fossem diferentes, os resultados deveriam ser ajustados com fatores de

correção. Tais camadas foram consideradas plenamente aderidas, mesmo na interface com BGTC ou BGS, devido à aplicação de imprimadura ligante.

### 3.3.5. Deflexões de controle revisadas

Os valores revisados de deflexões de controle são apresentados na Tabela 3. Após a revisão dos valores modulares e condições de aderência, as seguintes alterações puderam ser observadas: (1) As deflexões de controle aumentaram para todas as camadas; (2) As deflexões de controle são identificadas como “D<sub>0</sub> média” e “D<sub>0</sub> pontual”. A primeira refere-se ao valor estimado pela análise mecanicista, a ser atingido pela média das deflexões obtidas em campo em uma seção de pavimento. A segunda é o valor médio majorado em 15%, representando o valor máximo tolerável em um ponto qualquer do pavimento; (3) O subleito (CBR 4%) foi separado da CFT, que por sua vez passou a ter uma espessura finita de 600 mm. Apesar da inclusão do subleito, não foram definidos valores de deflexões para seu controle; (4) A redução dos valores de D<sub>0</sub> proporcionada pela BGS já não foi tão significativa quanto antes, pois a baixa rigidez do subleito tem maior impacto sobre as deflexões.

**Tabela 3:** Deflexões de controle revisadas

Pavimento	Material	h (mm)	D <sub>0</sub> média (0,01 mm)	D <sub>0</sub> pontual (0,01 mm)
<i>Taxilanes Taxiways</i>	CAUQ capa	60	48	55
	CAUQ binder	60	54	62
	PMQ	100	61	70
	BGTC	150	73	83
	BGS	150	114	131
	CFT (CBR 12%)	600	115	132
	Subleito (CBR 4%)	-	-	-
<b>Acostamento</b>	CAUQ capa	50	67	77
	CAUQ binder	50	76	87
	BGS	310	108	124
	CFT (CBR 12%)	600	115	132
	Subleito (CBR 4%)	-	-	-
<b>Viário de Serviço</b>	CAUQ capa	60	60	69
	CAUQ binder	60	70	80
	BGS	400	106	121
	CFT (CBR 12%)	600	115	132
	Subleito (CBR 4%)	-	-	-
<b>Pátio de Aeronaves</b>	BGTC	160	66	75
	BGS	300	109	125
	CFT (CBR 12%)	600	115	132
	Subleito (CBR 4%)	-	-	-
<b>Piso Térreo</b>	BGS	200	112	128
	CFT (CBR 12%)	600	115	132
	Subleito (CBR 4%)	-	-	-

(adaptado de: CONSÓRCIO CONSTRUTOR GALEÃO. Detalhes e Seções Típicas. Projeto Executivo do Aeroporto Internacional Tom Jobim, GIG-E009-3-PPA-04-105-DE-0011, rev. 1, 2015)

### 3.4. Deflexões obtidas em campo

Após a revisão dos valores de controle, o número de trechos de pavimento aprovados em função das deflexões aumentou significativamente. Na CFT, 73% dos trechos foram aprovados e não era mais necessário estabilizar o solo para que as deflexões admissíveis fossem atingidas. Na BGS, 79% dos trechos foram aprovados. Considerando os resultados pré e pós-revisão, a CFT e a BGS apresentaram taxas de aprovação de 67% e 73%,

respectivamente. Os demais materiais foram ensaiados apenas após a revisão dos parâmetros de controle, vez que não houve dificuldades para atender aos valores especificados.

#### 4. ANÁLISE CRÍTICA DAS DEFLEXÕES DE CONTROLE

Na sequência apresenta-se a análise crítica dos valores de deflexões definidos pela projetista, mostrando como a variação na abordagem do problema e de alguns parâmetros pode afetar resultados teóricos e práticos.

##### 4.1. Uso de eixo padrão ou semieixo na análise mecanicista

O eixo rodoviário padrão de 80 kN foi tomado no projeto para representar o eixo de teste do caminhão. No entanto, é prática comum considerar somente o semieixo, por simplificação. Para analisar os efeitos dessa prática nos resultados, foram calculadas, com auxílio do MnLayer, as deflexões de controle para o semieixo. Os demais parâmetros das camadas de pavimento foram mantidos invariantes. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2, assim como os valores obtidos originalmente pela projetista com o eixo padrão.

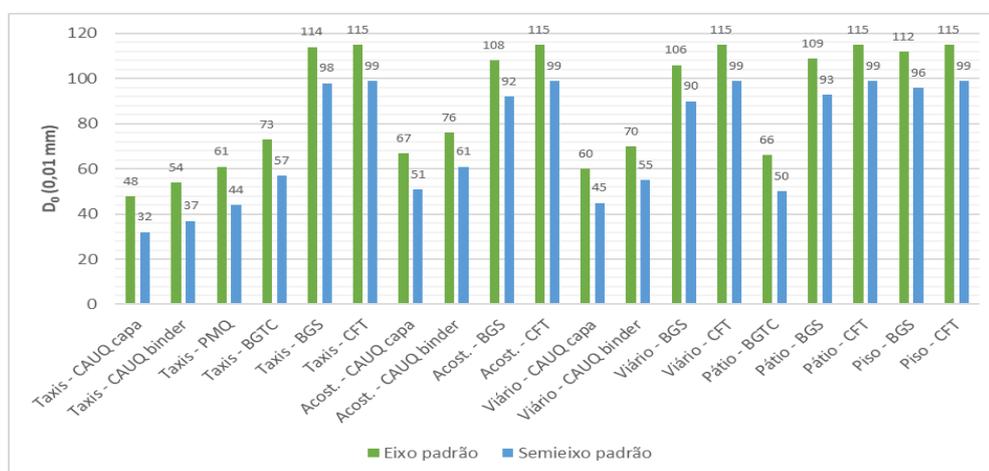


Figura 2: Deflexões de controle – semieixo e eixo padrão

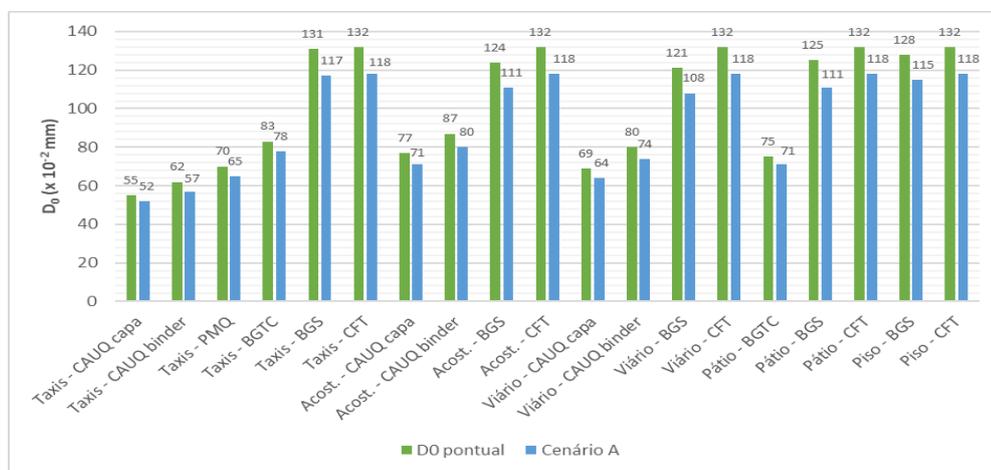
As deflexões de controle obtidas com o semieixo são menores que aquelas obtidas com o eixo padrão: 15% inferiores nas camadas granulares (CFT e BGS) e de 20 a 35% inferiores nas camadas asfálticas e cimentadas. A diferença é mais acentuada nos materiais com ligante, devido ao efeito de placa que favorece a superposição de cargas quando o eixo completo é considerado. A discrepância entre as deflexões aumenta junto com a espessura dos materiais – esta tendência é evidenciada nas camadas asfálticas das *Taxilanes/Taxiways*, Acostamento e Viário de Serviço. Na BGS, contudo, a espessura da camada pouco influencia as diferenças entre deflexões (1% para um intervalo de espessuras de 250 mm).

##### 4.2. Variação das espessuras das camadas

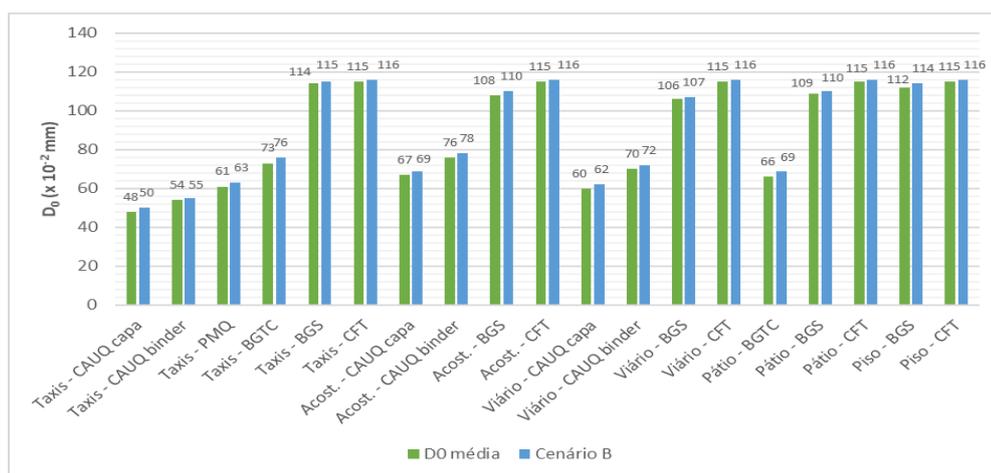
As espessuras das camadas de pavimento variam em campo, por isso as normas técnicas consideram tolerâncias em relação aos valores de projeto. O caso crítico ocorre quando as espessuras são menores que as especificadas, pois as deflexões resultantes tendem a ser maiores que os valores de controle. Para entender o impacto dessas variações nas deflexões, os seguintes cenários foram analisados com o MnLayer: (1) Cenário A – espessuras 10% menores que os valores de projeto (tolerância preconizada pelo DER/SP para medidas individuais); (2) Cenário B – espessuras 5% menores que os valores de projeto (tolerância preconizada pelo DER/SP e DNIT para valores estatísticos). Na Figura 3 apresentam-se as

deflexões obtidas no Cenário A e os valores de “D<sub>0</sub> pontual” de projeto. Na Figura 4 apresentam-se as deflexões obtidas no Cenário B e os valores de “D<sub>0</sub> média” de projeto.

Os resultados indicam que as deflexões do Cenário A são menores que aquelas de projeto. A tolerância adotada para as deflexões pontuais supera aquela preconizada pela norma técnica para as espessuras das camadas dos pavimentos. Consequentemente, camadas com desvios toleráveis de espessura não oferecem risco à aprovação dos trechos de pavimento, contanto que os demais parâmetros do controle de qualidade sejam atendidos. Por outro lado, as deflexões do Cenário B são maiores que os valores de projeto; mesmo que as camadas dos pavimentos atendam à tolerância, existe risco de trechos de pavimento serem reprovados quanto ao controle de deflexões. Isto não significa que maiores reduções de espessura representam um cenário mais vantajoso, e sim que a tolerância para valores estatísticos, estipulada pela projetista (deflexões médias), é restritiva e incompatível com a tolerância das espessuras.



**Figura 3:** Deflexões de controle – variação de -10% nas espessuras



**Figura 4:** Deflexões de controle – variação de -5% nas espessuras

### 4.3. Variação dos módulos de resiliência dos materiais

Os materiais de pavimentação são heterogêneos e tendem a apresentar valores modulares distintos para um mesmo tipo de material. Para entender como tais variações afetam as deflexões de controle, foram analisados com o MnLayer dois cenários, assumindo-se valores

de módulos de resiliências encontrados na literatura técnica (Croney e Croney, 1997; Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2008): (1) Cenário A – pavimentos compostos por camadas com módulos de resiliência em limites inferiores, sendo para misturas asfálticas (CAUQ e PMQ), 3.000 MPa e 1.500 MPa, respectivamente; para materiais cimentados (BGTC), 4.000 MPa; para materiais granulares (BGS), 100 MPa; e para solos (de CFT e de subleito), 80 MPa e 20 MPa, respectivamente; (2) Cenário B – pavimentos compostos por camadas com módulos de resiliência em limites superiores, sendo para misturas asfálticas (CAUQ e PMQ), 6.000 MPa e 4.000 MPa, respectivamente; para materiais cimentados (BGTC), 12.000 MPa; para materiais granulares (BGS), 250 MPa; e para solos (de CFT e de subleito), 140 MPa e 60 MPa, respectivamente. Nota-se que todos os valores modulares considerados são possíveis e dependem das condições de campo. As deflexões calculadas em cada cenário são apresentadas na Figura 5.

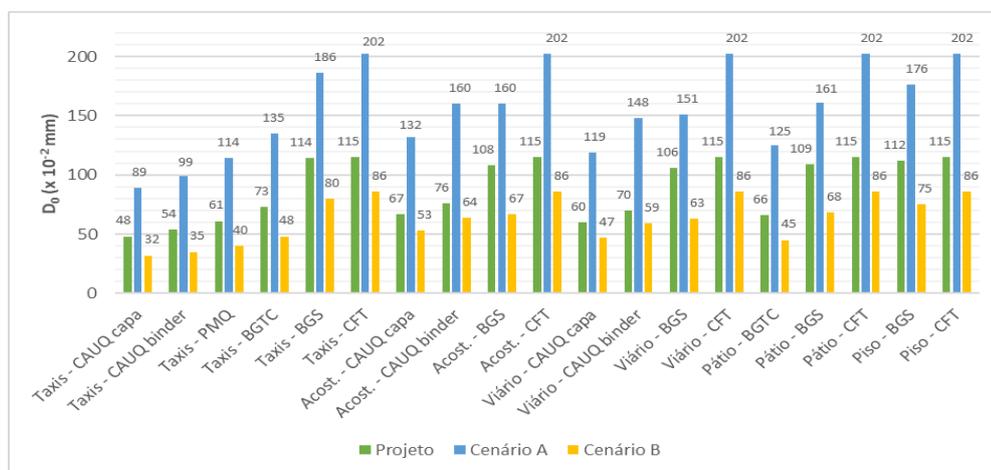


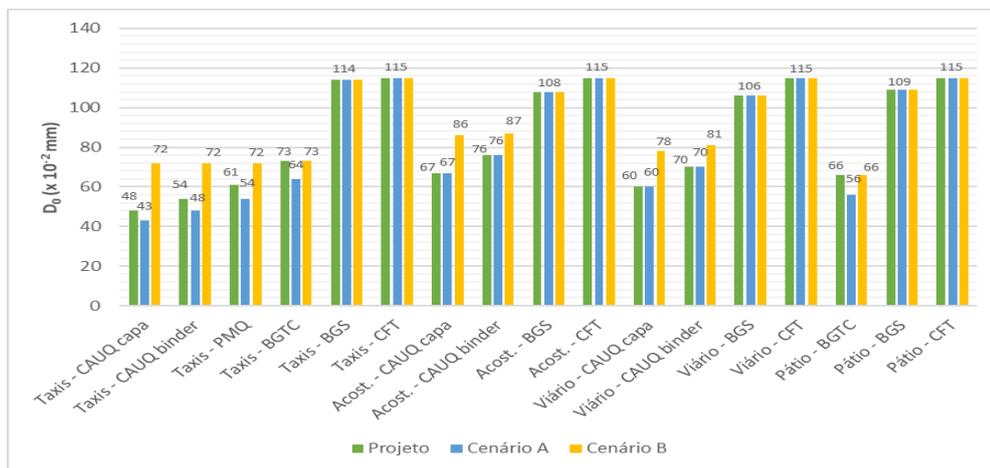
Figura 5: Deflexões de controle – variação dos módulos de resiliência

No Cenário A as deflexões são de 42 a 111% maiores que aquelas de projeto. Ainda assim, alguns valores máximos de deflexões, obtidas em campo sobre as camadas de CFT e BGS, superam os resultados deste cenário. O Cenário B, por sua vez, apresenta deflexões em torno de 16 a 41% menores que aquelas de projeto. Isto mostra que as deflexões resultantes são mais sensíveis à redução dos valores de módulos de resiliência do que ao aumento. Devido a esta tendência, é inviável aumentar a rigidez das camadas superiores do pavimento para atenuar valores de deflexões elevados, resultantes da baixa rigidez da fundação do pavimento.

#### 4.4. Variação das condições de aderência

As condições de aderência entre as camadas dos pavimentos costumam ser interpretadas de maneira simplista por projetistas, que tendem a assumir completa aderência entre as camadas em suas interfaces (muito comum no Brasil em análises com o programa Elsym5). No caso do projeto do Aeroporto do Galeão, a projetista considerou coerentemente este parâmetro durante a revisão dos valores de controle. Para verificar o impacto nas deflexões, foram analisados dois cenários distintos com o MnLayer: (1) Cenário A, em que todas as camadas dos pavimentos estariam plenamente aderidas; (2) Cenário B, quando somente as camadas granulares dos pavimentos (subleito, CFT e BGS) estariam plenamente aderidas entre si; camadas cimentadas estariam não aderidas à BGS, e camadas asfálticas não estariam aderidas entre si e nem à base do pavimento (BGS ou BGTC), devido à ausência de imprimadura ligante.

As camadas granulares foram consideradas completamente aderidas em ambos os cenários. Esta é uma condição resultante da compactação dos materiais, que se intertravam nessa interface, e dificilmente deixará de acontecer em campo. A estrutura de pavimento do Piso Térreo foi excluída da análise, dado que em ambos os cenários as condições de aderência são iguais àquelas consideradas no projeto – camadas granulares aderidas. Os resultados obtidos e os valores de projeto são apresentados na Figura 6. Constata-se que as deflexões do Cenário A são até 15% menores que as de projeto, enquanto os valores do Cenário B são até 50% maiores. Os resultados das *Taxilanes/Taxiways* do Cenário B mostram que o acréscimo das camadas asfálticas à estrutura pouco altera a deflexão no topo da BGTC – a não aderência entre as camadas faz com que elas trabalhem individualmente. Como as camadas asfálticas são esbeltas e menos rígidas do que a BGTC, a deflexão permanece inalterada (análise de deformações específicas segue outra linha de raciocínio). Os resultados do Acostamento e do Viário de Serviço do Cenário B mostram que a deflexão diminui quando as camadas asfálticas são sobrepostas à BGS, pois, apesar da não aderência, a rigidez do material asfáltico é superior à do material granular. Os resultados do Cenário A indicam que quando a condição de aderência entre a BGTC e a BGS é alterada de não aderida para aderida (equivoco comum em diversas análises mecanicistas), há uma redução da ordem de  $10 \times 10^{-2}$  mm na deflexão.



**Figura 6:** Deflexões de controle – variação das condições de aderência

#### 4.5. Tipos de *software* para análises mecanicistas

Existem inúmeros programas para análise mecanicista dos pavimentos, cada um com particularidades que podem conduzir a diferentes resultados. A grande maioria destes programas são baseados em modelos simplificados (por exemplo, TSCE) que não levam em consideração fatores importantes presentes em campo, tais como: forças de inércia e efeitos de cargas dinâmicas; efeitos térmicos; esforços cortantes no contato roda/pavimento; peso próprio das camadas do pavimento; comportamento elástico ou viscoelástico não lineal; entre outros. Com o intuito de verificar o impacto que o programa utilizado pode ter nos resultados, as deflexões de controle foram recalculadas utilizando-se dois programas bem conhecidos no meio técnico, o BISAR 3.0 e o Elsym5, ambos baseados na TSCE. Na Figura 7 são apresentados os resultados dos dois programas, bem como os valores obtidos originalmente pela projetista com o MnLayer.

Observa-se que, em geral, os valores de deflexões fornecidas pelos três *software* são semelhantes. As maiores diferenças estão nos resultados apresentados pelo Elsym5, principalmente na BGTC, que são de 8 a 12% menores que aqueles apresentados pelo

MnLayer e BISAR 3.0. Isto ocorre porque o Elsym5 considera todas as camadas dos pavimentos aderidas umas às outras; o usuário não pode definir diferentes condições de aderência. Desta forma, as deflexões tendem a ser menores quando a BGTC está aderida à BGS. Nos pavimentos com base de BGS, as variações de deflexões entre os três programas são mínimas (máximo 3%), pois a camada cimentada não faz parte da estrutura. Com relação às deflexões totais no topo do pavimento, o Elsym5 apresenta os menores valores para os pavimentos com base cimentada e os maiores para os pavimentos com base granular. As diferenças entre os resultados do BISAR 3.0 e do MnLayer são insignificantes.

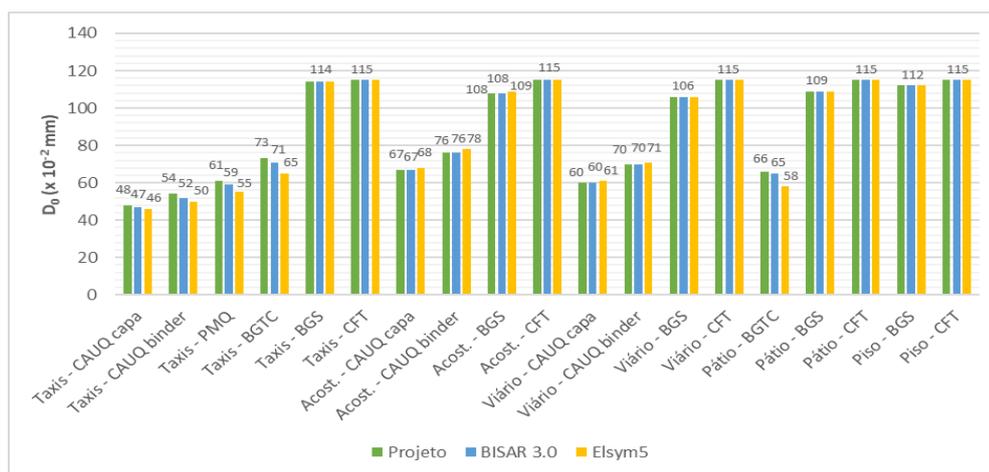


Figura 7: Deflexões de controle – variação dos programas de análise mecanicista

## 5. CONCLUSÕES

A ausência de um procedimento padrão e normativo gera incertezas em relação ao processo de definição das deflexões admissíveis, que cabe às projetistas. A natureza empírica do ensaio o torna dependente das condições de campo e da heterogeneidade dos materiais – isto deve ser levado em conta durante a definição dos valores de controle. Foram apresentadas as dificuldades enfrentadas durante o controle deflectométrico com a viga de Benkelman realizado na obra do Aeroporto do Galeão, mostrando-se a importância da definição de deflexões de controle coerentes. Com base nisto, realizou-se uma reflexão crítica do modo como são definidas as deflexões de controle, analisando-se o impacto que a variação de alguns dos parâmetros pode causar nos resultados. As principais conclusões do estudo foram:

- O controle deflectométrico deve passar por uma avaliação meticulosa que considere as potenciais faixas de variações dos materiais em campo. Isto geraria envoltórias de valores aceitáveis para cada camada;
- A falta de uma completa caracterização mecânica laboratorial dos materiais para pavimento gera incertezas na definição das deflexões de controle, que passam a depender de valores de módulos de resiliência estipulados aleatoriamente e deterministicamente;
- O uso do semieixo rodoviário padrão de 40 kN na análise mecanicista resulta em deflexões menores que o uso do eixo completo de 80 kN. Recomenda-se o emprego do eixo padrão nas análises mecanicistas, sem simplificações;
- As deflexões medidas em campo podem ser reprovadas por conta da variação das espessuras das camadas do pavimento, mesmo que as tolerâncias especificadas sejam obedecidas;

- É inviável aumentar a rigidez das camadas superiores do pavimento para compensar altos valores de deflexões apresentados pela fundação do pavimento;
- Condições de aderência entre camadas afetam diretamente as deflexões. Recomenda-se sempre o uso de camada asfáltica aderida à camada cimentada subjacente e a aderência plena entre camadas granulares e de solos. Camadas granulares e cimentadas são potencialmente não aderidas;
- As deflexões obtidas com o Elsym5 tendem a ser inferiores às obtidas pelos programas BISAR 3.0 e MnLayer, que apresentam resultados semelhantes por sua vez. Esses dois últimos programas podem considerar aderência plena ou não, o que afeta os resultados. No primeiro programa os cálculos são sempre realizados com aderência plena entre quaisquer camadas.

A ausência de respaldos normativo e metodológico na fixação das deflexões toleráveis em campo, ambos por parte das agências viárias, fazem com que um instrumento de controle valioso se torne uma ferramenta equivocada. As agências reguladoras, públicas e privadas devem repensar seriamente em como estabelecer regras de engenharia claras, precisas e coerentes para a superação de vícios, tais como aqueles descritos neste artigo.

#### Agradecimentos

Ao Consórcio Construtor Galeão e à Holanda Engenharia pela cessão de direito de uso, para finalidades de pesquisa acadêmica, dos controles de deflexões realizados no Aeroporto do Galeão. À Intertechne Consultores pela cessão das informações de projeto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) *AASHTO guide for design of pavement structures*. ISBN 1-56051-055-2, Washington.
- Andreatini, L.P. (1988) Dimensionamento de Reforço em Pavimentos Flexíveis – Sugestões no DNER-PRO-11/79. In: *Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação*, p. 1447-1464, Florianópolis.
- Balbo, J.T. (1993) Estudo das propriedades mecânicas das misturas brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrígidos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Balbo, J.T.; Khazanovich, L. (2007) *Desenvolvimento de rotina e interface do programa MnLayer para camadas elásticas*. FAPESP, Relatório Final, Processo 2006/01907-6, São Paulo.
- Bernucci, L. B. et al. (2008) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro.
- Burmister, D.M. (1945) *The general theory of stresses and displacements in layered systems*. Journal of Applied Physics, v. 16, no. 1.
- Croney, D; Croney, P. (1997) *Design and Performance of Road Pavements*. McGraw-Hill Professional, 3rd ed.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman. Norma Rodoviária, Método de Ensaio DNER-ME 024/94, Rio de Janeiro.
- Molenaar, A. A. A. (1995) *Pavement evaluation and overlay design using falling weight deflectometers and other deflection measurement devices*. Lecture notes, Delft University of Technology, Netherlands.
- Rocha Filho, N. R.; Rodrigues, R. M. (1996) A Avaliação Estrutural dos Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos. In: *Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação*, v. 3, p. 1119-1146, Salvador.
- Visser, A.; Priambodo Koesrindartono, D. (2000) *Towards a mechanistic analysis of Benkelman beam deflection measurements*. HERON, v. 45, n. 3.