26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

ANÁLISE DE RISCO EM FUNÇÃO DO CONTROLE TECNOLÓGICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

Felipe H. Cava[1]; Carlos Y. Suzuki[2]

RESUMO
O dimensionamento de pavimentos no Brasil é realizado por meio de métodos determinísticos, isto é, sem considerar as incertezas que existem em etapas de projeto, fiscalização, execução e operação das rodovias. Assim, os pavimentos podem acabar sendo dimensionados para níveis de confiabilidade inferiores aos que seriam adequados para certo empreendimento. Este trabalho tem objetivo analisar a confiabilidade dos pavimentos dimensionados por métodos determinísticos frente à incerteza da fiscalização e execução dos pavimentos. Além disso, considera uma análise probabilística e de risco para analisar os custos envolvidos nas faixas de confiabilidade analisadas. Observou-se que os pavimentos dimensionados por métodos determinísticos apresentam confiabilidade de 60%, quando a fiscalização é rigorosa, e 50% quando há falhas na fiscalização durante a execução. Entretanto, em ambos a confiabilidade é inferior ao que seria considerada adequada para o tipo de via analisada. As análises de risco mostram que entre as espessuras de 12 a 20 centímetros ocorre a queda do risco à medida que a espessura aumenta, comportamento este que não ocorre para espessuras menores que 12 centímetros. Além disso, o custo total da obra, levando em consideração o risco de ruptura das camadas asfálticas devido à fadiga do revestimento, apresenta um comportamento diferente para coeficientes de variação baixos e altos. Observou-se que, se a obra tiver fiscalização adequada, isto é, baixo coeficiente de variação, as espessuras de 12 e 15 centímetros apresentam custos semelhantes, embora as confiabilidades sejam distintas.
PALAVRAS-CHAVE: confiabilidade de pavimentos, variabilidade de materiais, análise probabilística.

ABSTRACT
In Brazil, pavement design is performed through deterministic methods, i.e., without considering uncertainties that exist in project, inspection, execution, and highway operation. Thus, pavements may be designed for lower reliability levels that would be suitable for the enterprise. This work aims to analyze the reliability of pavement design through deterministic methods in front of uncertainties of execution control and inspection. Furthermore, considering a probabilistic and risk analysis to determine the costs involved in the reliability ranges analyzed. Its was observed that pavement designed using deterministic approach presents the reliability of 60%, with rigorous inspection, and 50% when are fails in execution control. How ever, the reliability of both is lower than that considered suitable for that road type. Risk analysis shows that between 12 and 20 centimeters of thickness, the risk falls as thickness increase, that behavior doesn`t occur for thickness lower than 12 centimeters. Moreover, the total cost, considering the risk of premature fatigue failure in asphalt layer, it presents a different behavior for low and high coefficients of variation. It was observed that if the field work has adequate supervision, i.e., low coefficient of variation, the thickness between 12 and 15 centimeters presents similar costs, but distinct reliability.

KEY WORDS: pavement reliability, variability of materials, probabilistic analysis.

[1] Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Civil, cava@fei.edu.br
[2] Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, e-mail: carlos.suzuki@planservi.com.br

INTRODUÇÃO E OBJETIVO

No Brasil, o dimensionamento de pavimentos apresenta uma abordagem determinística, ou seja, o modelo tem como base os valores médios das variáveis aleatórias para estimar o desempenho da estrutura diante de um determinado critério de falha. Segundo Huang (2004), nos métodos determinísticos, cada parâmetro de análise é atribuído a um valor constante, permitindo ao projetista aplicar um fator de segurança para aumentar as cargas previstas devido às incertezas associadas ao critério em análise.

O dimensionamento de pavimentos realizado em escritórios de engenharia no Brasil considera a escolha de uma estrutura de pavimento que atenda o número de repetições do eixo rodoviário padrão calculado com critérios da USACE e AASHTO, conforme o DNIT (2006). Não são considerados fatores de segurança durante o procedimento de cálculo, e a estrutura é otimizada para minimizar a espessura do revestimento asfáltico, a qual representa o maior custo do pavimento.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnica e econômica do dimensionamento de pavimentos asfálticos flexíveis levando em consideração a variabilidade devido ao controle tecnológico da execução dos pavimentos. Além disso, tem como objetivo analisar o risco envolvido nas soluções de pavimentos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise da confiabilidade de estruturas, em linhas gerais, exige compreender as incertezas associadas a cada variável aleatória utilizada em um modelo de previsão de desempenho. Os métodos probabilísticos permitem examinar a sensibilidade em relação à vida útil esperada da pavimentação diante das flutuações nos parâmetros de projeto. Contudo, a precisão dessas análises está vinculada à habilidade do modelo probabilístico em representar o comportamento do pavimento frente a determinadas variáveis aleatórias (PITTMAN, 1996).

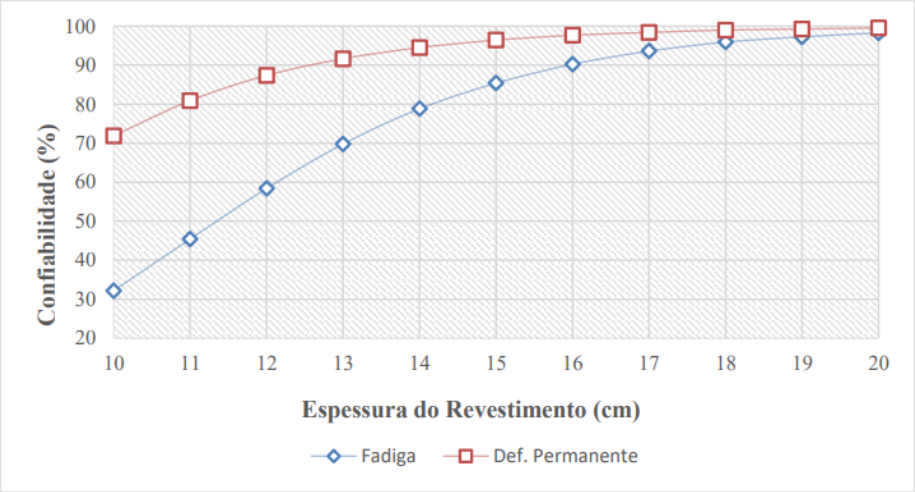
A confiabilidade em um projeto de pavimentação pode ser definida como a probabilidade de o número de repetições admissíveis ser maior do que o número de repetições solicitantes, o que para pavimentação rodoviária é dada em função do eixo rodoviário padrão (MAJI e DAS, 2008).

Entretanto, cada uma das variáveis utilizadas no dimensionamento de pavimentos apresenta uma certa variabilidade, isto é, não são valores únicos. Segundo Valle e Thom (2016), a variabilidade da espessura das camadas influencia no desempenho esperado para os pavimentos. Enquanto em nível de projeto existe apenas uma espessura especificada para uma certa camada, no campo a qualidade do controle tecnológico pode fazer com que a espessura das camadas sofra variação.

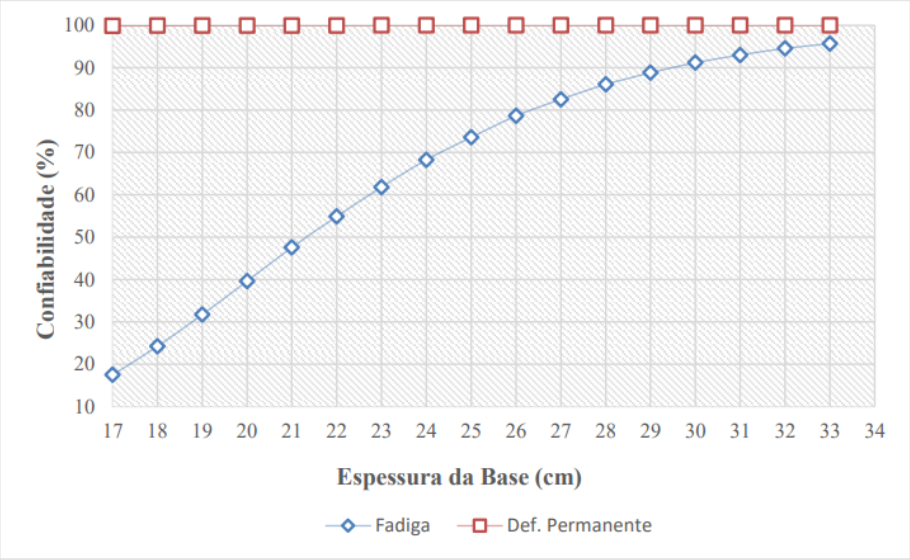
Além da espessura, a variabilidade de outras variáveis aleatórias também pode impactar no desempenho dos pavimentos. Cava (2021) estudou a variação da pressão de enchimento dos pneus em rodovias de alto volume de tráfego. O autor observou que a pressão de enchimento do eixo rodoviário padrão, usada no dimensionamento do pavimento, representa menos de 2% dos pneus dos veículos comerciais.

Cava *et al* (2023) estudou a probabilidade de falha dos pavimentos dimensionados usando a pressão de pneus do eixo padrão em relação à distribuição de pressões de pneus de campo. Os autores observaram que a probabilidade de falha é superior a 70% e recomendam que a pressão de pneus de dimensionamento seja alterada para 840kPa para conseguir representar as características de campo.

Cava e Suzuki (2024) analisaram a confiabilidade de pavimentos flexíveis e semirrígidos dimensionados no Brasil. Os autores observaram que os pavimentos semirrígidos são os mais impactados pela variabilidade dos materiais e tráfego, com confiabilidade de cerca de 30% para a espessura obtida pelo procedimento de cálculo, conforme a Figura 1. Os pavimentos flexíveis resultaram em cerca de 60% de confiabilidade para a espessura obtida pelo procedimento de dimensionamento usualmente adotado no Brasil.



(a)



(b)

Figure 1 - Confiabilidade de pavimentos dimensionados no Brasil: (a) flexíveis; (b) semirrígidos

MÉTODO

O processo empregado na concepção deste projeto foi dividido em três fases distintas. A primeira fase consistiu na realização de um estudo de tráfego no Estado de São Paulo, com o propósito de calcular o Número N e dimensionar os pavimentos de maneira determinística, seguindo a prática comum em escritórios de engenharia no Brasil. A Tabela 1 apresenta os tipos de veículos que foram levados em consideração para o cálculo do Número N. Devido à falta de informações sobre a carga transportada, assumiu-se que 20% dos veículos circulavam vazios, enquanto os 80% restantes operavam com carga máxima permitida.

Tabela 1 - Classe e Volume diário médio de veículos na rodovia

Classe	2C	3C	3CB	2S1	2S2	2S3	3S3	3I3	3D4	3T6	TOTAL
VDM	408	237	9	1	24	14	72	13	76	61	915

Após o cálculo do Número N, pelos critérios USACE e AASHTO, foi dimensionada uma estrutura de pavimento asfáltico flexível, conforme os materiais especificados na Tabela 2. Os pavimentos foram dimensionados inicialmente pelo critério CBR, conforme DNIT (2006), e realizada a verificação mecanicista para atendimento aos critérios de fadiga e deformação permanente. Foram usadas as equações de desempenho da FHWA (1976) e Dormon & Metcalf (1965), as quais constam no DER/SP (2006) e estão apresentadas nas Equações 1 e 2 Estas equações foram utilizadas para a verificação mecanicista por serem os principais modelos usados em escritórios de engenharia no Brasil. Foi considerada a solicitação proveniente do eixo rodoviário padrão com 80kN e pressão de pneus de 560kPa.

Tabela 2 - Materiais usados nas estruturas de pavimento

Camada	Material	MR (MPa)	Coef. Poisson
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	3500	0,30
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	250	0,35
Sub-base	Macadame Seco (MS)	150	0,35
Subleito	Solo LA	104	0,4

$$N_{fadiga} = 1{,}092 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{ht}{}^{-3{,}512} \quad (1)$$

$$N_{def.\ permanente} = 6{,}069 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon_{vc}{}^{-4{,}762} \quad (2)$$

Na segunda etapa, após o dimensionamento determinístico, o pavimento flexível foi analisado levando em consideração critérios probabilísticos e a variabilidade presente nos cálculos do Número N e no controle tecnológico para construção dos pavimentos. Com objetivo de verificar a influência do controle tecnológico na confiabilidade dos pavimentos, estes foram separados em dois níveis: baixa variabilidade e alta variabilidade.

A análise probabilística foi realizada por meio da Simulação de Monte Carlo, sendo geradas 100 mil amostras de solicitação e capacidade resistente do pavimento. Por simplificação do modelo, todas as variáveis aleatórias foram consideradas com distribuição normal, de modo que a variabilidade foi considerada por meio do coeficiente de variação (CV). Nas 100 mil amostras geradas, foi calculada a função indicadora, isto é, para cada amostra, se a solicitação for maior do que a capacidade resistente do pavimento essa foi indicada como 1 e caso contrário 0, conforme as Equações 3 e 4. A confiabilidade (R) da estrutura foi calculada conforme a Equação 5. A Tabela 3 apresenta os coeficientes de variação e as variáveis aleatórias consideradas nas análises.

Se, Resistência > Solicitação $$f(R > S) = 0 \quad (3)$$

Se, Resistência < Solicitação $$f(R < S) = 1 \quad (4)$$

$$R = \frac{amostras\ f(R > S)}{Total\ de\ amostras} \quad (5)$$

Tabela 3 - Variáveis aleatórias e coeficientes de variação

Variabilidade	Item	Material	CV (%)
Baixa	h1	Revestimento	5
	MR1	Revestimento	15
	h2	Base	10
	MR2	Base	15
	h3	Sub-base	10
	MR3	Sub-base	15
	MR4	Subleito	20
Alta	h1	Revestimento	15
	MR1	Revestimento	30
	h2	Base	20
	MR2	Base	30
	h3	Sub-base	20
	MR3	Sub-base	30
	MR4	Subleito	30
-	VDM	-	30
	taxa de crescimento	-	20
	FV	-	20

Na última etapa do método, foi realizada uma análise de risco da estrutura de pavimento flexível dimensionada e de custo total. O risco foi calculado conforme a Equação 6, sendo o produto da probabilidade de falha do pavimento e do custo da camada asfáltica. O risco foi calculado apenas para o material que sofreu variação de espessura na análise probabilística, sendo usada como referência a Tabela de Preços Unitários do DER/SP (2023). Já o custo total, consiste na soma do custo da camada e do custo por risco, conforme Equação 7.

$$Risco = p_f \cdot custo \quad (6)$$

Custo total = Custo da camada + Risco (7)

RESULTADOS

Dimensionamento Determinístico

Com base nos dados de tráfego, o número de repetições do eixo rodoviário padrão foi determinado para um período de projeto de 10 anos, levando em consideração uma taxa de crescimento linear de 3%. Os coeficientes de equivalência de carga foram calculados de acordo com os critérios de falha da USACE e AASHTO. Os resultados obtidos neste estudo para o número N determinístico estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Número N determinístico

Critério	Número N
USACE	3,27E+7
AASHTO	9,98E+6

Para o Número N determinístico foi dimensionada a estrutura de pavimento. O pavimento foi dimensionado inicialmente pelo critério CBR e, em seguida, realizada a verificação mecanicista para atendimento aos critérios de falha. A Tabela 5 apresenta as duas estruturas dimensionadas.

Tabela 5 - Estruturas do Dimensionamento Determinístico

Camada	Material	Flexível Espessura (cm)
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	12
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	20
Sub-base	Macadame Seco (MS)	20
Subleito	Solo LA	-

Análise Probabilística

A análise probabilística foi realizada variando a espessura do revestimento asfáltico entre 5 e 20 centímetros para verificar a confiabilidade associada. Além disso, conforme destacado no Item 3, foram analisadas duas condições de variabilidade com objetivo de simular o controle tecnológico e de execução das camadas do pavimento.

A variabilidade baixa está associada a um bom comportamento tecnológico, isto é, a fiscalização e a qualidade do processo de execução são rigorosas. Assim, o coeficiente de variação tende a ser

menor. Por outro lado, a alta variabilidade ocorre quando a fiscalização não é severa e o procedimento de execução falha muito no atendimento ao projeto. A Figura 2 ilustra a variação da confiabilidade para o critério de fadiga do revestimento asfáltico em função da variabilidade.

Observa-se que para espessuras esbeltas de revestimento asfáltico, isto é, inferiores a 10 centímetros, a variabilidade é pouco influente na confiabilidade da estrutura para o caso estudado neste trabalho. Entretanto, entre 10 e 20 centímetros, a variabilidade devido ao controle tecnológico afeta diretamente a confiabilidade da estrutura.

Para o pavimento dimensionado de modo determinístico, observa-se que uma diferença de cerca de 10% na confiabilidade para alta e baixa variabilidade. Assim, quando o pavimento é dimensionado de modo determinístico e executado por uma empresa com fiscalização eficiente, a confiabilidade da estrutura é de cerca de 60%. Entretanto, se a empresa responsável pela execução não for fiscalizada adequadamente, a confiabilidade do pavimento é de 50%. Assim, o atendimento da estrutura ao tráfego não depende apenas do dimensionado executado. A fiscalização durante a execução do pavimento, *i.e*, atendimento a questões de compactação, características dos materiais, módulos de resiliência e afins, é fundamental para melhorar o desempenho dos pavimentos.

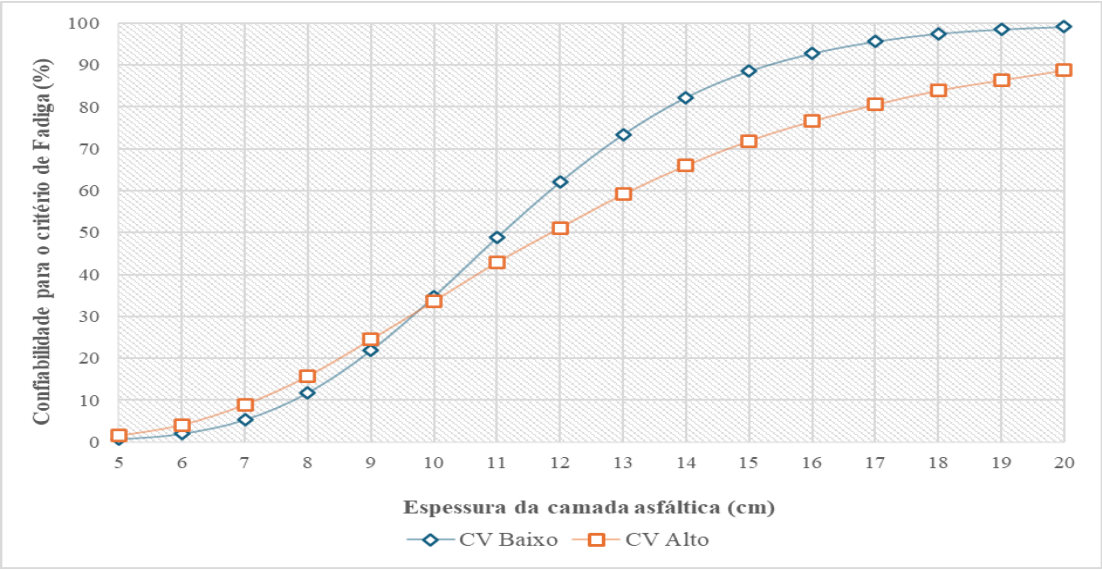


Figura 2 - Confiabilidade para critério de fadiga em função da variabilidade

Ainda assim, segundo recomendações de confiabilidade da AASHTO (1993; 2008) e MeDiNa (Franco e Motta, 2020) para um sistema arterial, a estrutura dimensionada pelo método determinístico não atende aos níveis exigidos e que variam de 70% a 95%. Assim, para o pleno atendimento à confiabilidade do sistema arterial, o pavimento deveria apresentar espessura entre 13 e 17 centímetros, para baixa variabilidade, e 15 a 20 centímetros para alta variabilidade.

A Figura 3 ilustra a confiabilidade para o critério de falha por deformação permanente. Observa-se que para este critério de falha o dimensionamento determinístico já atende aos níveis exigidos de

confiabilidade para o sistema arterial. Entretanto, nota-se que a alta variabilidade reduz significativamente a confiabilidade para deformação permanente.

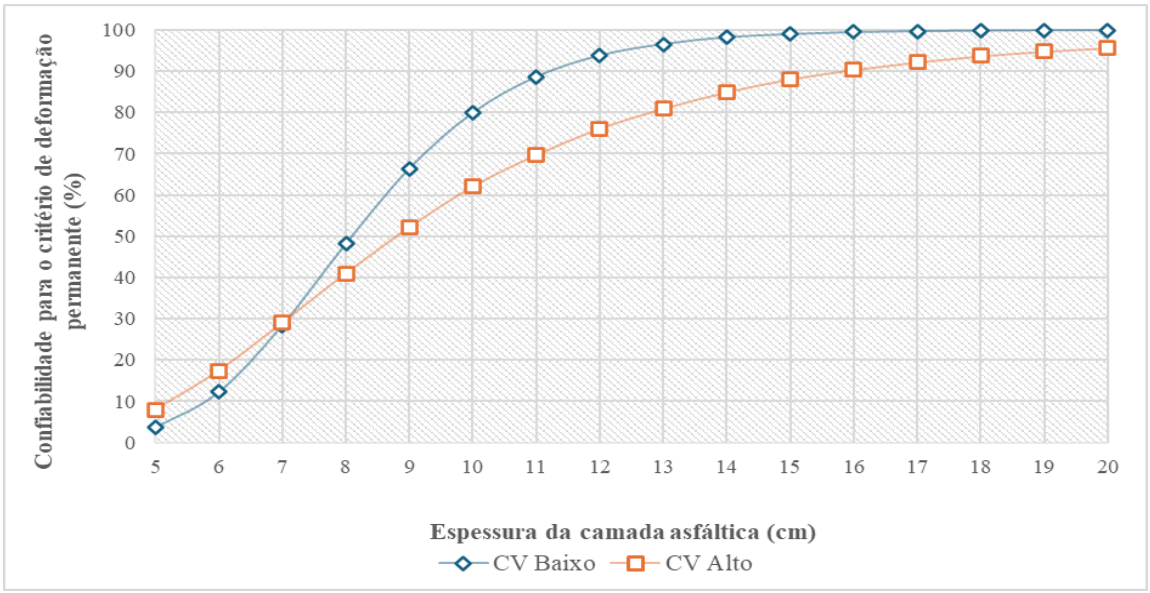


Figura 3 - Confiabilidade para o critério de deformação permanente em função da variabilidade

Análise de Risco e de Custo

Para o pleno atendimento da confiabilidade do sistema arterial, a espessura de revestimento asfáltico deveria ser aumentada. A necessidade de aumento da espessura do revestimento asfáltico resultaria também em uma mudança dos custos de execução em obras de pavimentação. A Figura 4 apresenta a variação do custo da camada asfáltica por metro quadrado.

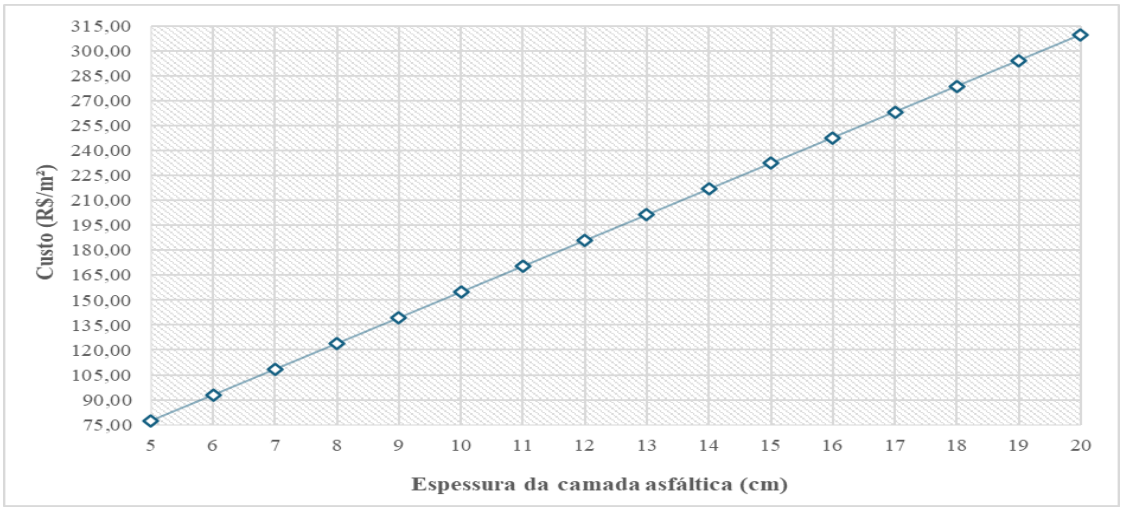


Figura 4 - Variação do custo da camada asfáltica

Observa-se que a espessura de 13 centímetros, que atende a 70% de confiabilidade para baixa variabilidade, representa um aumento de custo de material de 8% em relação aos 12 centímetros dimensionados pelo método determinístico. Para 15 centímetros de espessura, de mesmo modo, essa variação relativa é de 25%.

A Figura 5 ilustra a variação do risco em função da variabilidade. Como o risco é o produto da probabilidade e do custo, não necessariamente a redução apenas da probabilidade de falha resulta na redução do risco, como pode ser notado pelas espessuras entre 5 e 10 centímetros. Observa-se que a alta variabilidade resulta também nos maiores riscos para espessuras variando de 10 a 20 centímetros. Nesse intervalo, o aumento da espessura reflete na redução do risco.

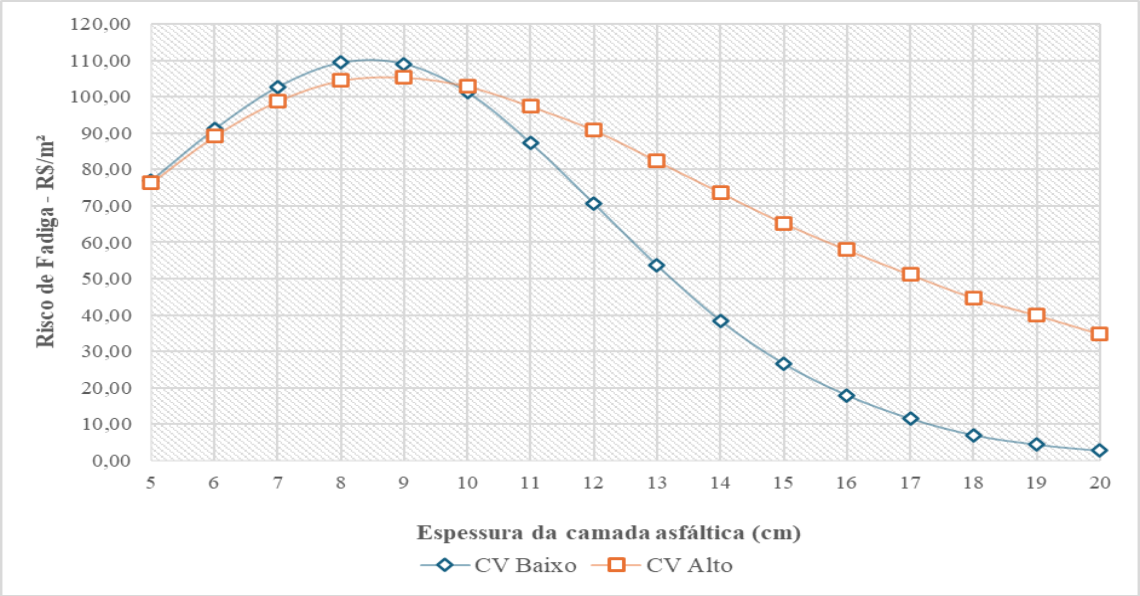


Figura 5 - Risco de fadiga para alta e baixa variabilidade

Uma análise técnica e econômica deve avaliar o custo total da obra, o que envolve tanto o custo da construção quanto o custo do risco. Assim, escolher pela solução de menor custo de construção não necessariamente consiste na melhor alternativa. A Figura 6 apresenta a análise do custo total para espessuras variando de 12 a 20 centímetros.

Observa-se que para baixa variabilidade, entre as espessuras de 12 e 15 centímetros, ocorre a redução do custo da obra. Isto é, a diferença no custo de construção do pavimento com 12 e 15 centímetros é praticamente desprezível se levado em consideração o risco. Contudo, a probabilidade de o pavimento falhar precocemente passa de cerca de 40% (12 centímetros) para 10% (15 centímetros). Assim, a mudança na espessura resulta em maior confiabilidade no atendimento ao tráfego solicitante, mesmo não representando grande variação no custo da obra.

Contudo, para alta variabilidade, o custo total da obra é crescente em todo o intervalo analisado. Neste caso, a variação de espessura de 12 para 15 centímetros de revestimento asfáltico implica em um aumento do custo total de cerca de 8%.

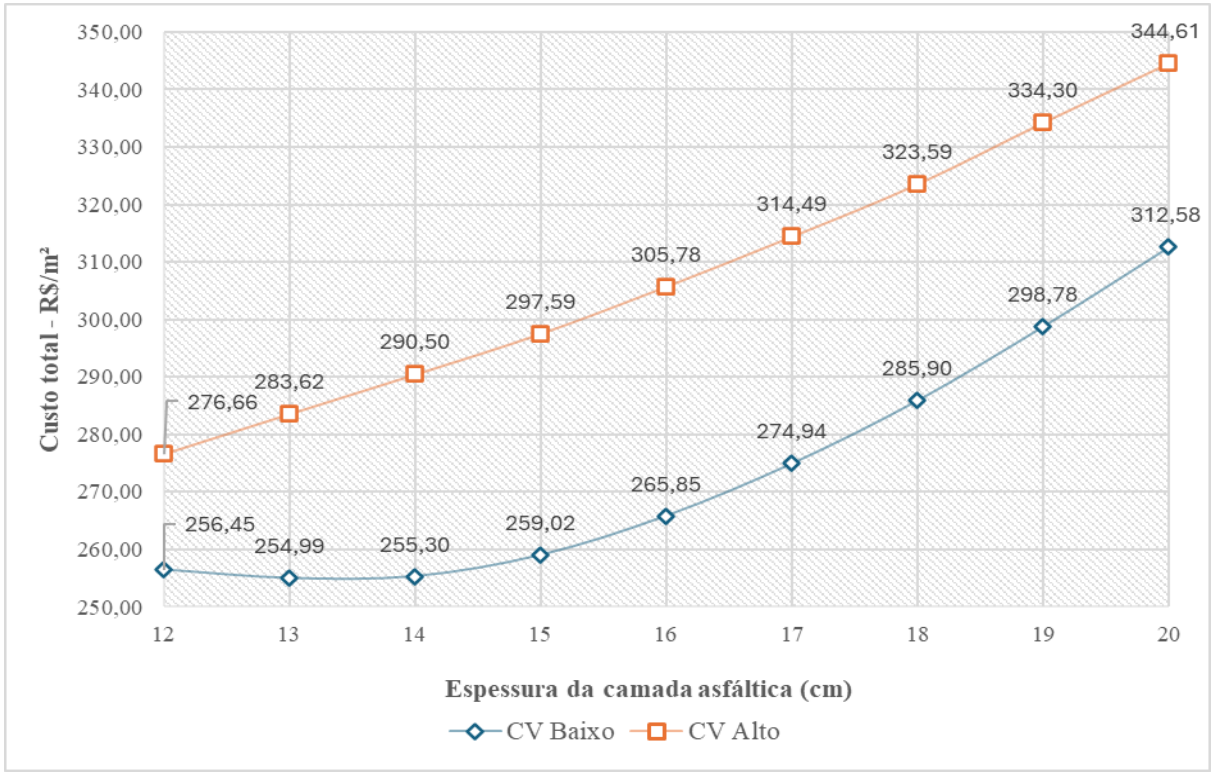


Figura 6 - Custo total da obra para alta e baixa variabilidade

CONCLUSÃO

Os pavimentos no brasil são dimensionados de modo determinístico, isto é, não levam em consideração a variabilidade dos materiais, da fiscalização durante a execução dos pavimentos e de outras variáveis. Este trabalho teve como objetivo analisar a confiabilidade e o risco dos pavimentos asfálticos rodoviários quanto ao controle tecnológico durante a execução dos pavimentos.

Observou-se que o pavimento dimensionado pelo método determinístico resulta em uma confiabilidade entre 60% e 50% e risco entre R$ 70,00 por metro quadrado e R$ 90,00 por metro quadrado, para baixa e alta variabilidade, respectivamente. Ou seja, a variabilidade resultante da eficiência da fiscalização durante a execução dos pavimentos possui também um impacto técnico e econômico no desempenho dos pavimentos durante sua vida útil.

Com relação ao custo total da obra, conclui-se que a análise de custo total, incluindo o custo da obra e o custo proveniente do risco envolvido na solução adotada, constitui uma forma mais coerente de tomada de decisão. Observou-se que soluções com confiabilidades distintas podem apresentar o mesmo custo total desde que estes aspectos sejam levados em consideração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. *Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2008.

AASHTO. *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1993.

Cava, F.H; Suzuki, C.Y. Análise técnica e econômica da confiabilidade de pavimentos flexíveis e semirrígidos no Brasil. XXII Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto (XXII CILA). Granada, 2024.

Cava, F.H; Suzuki, C.Y; Santos, C.R.G; Vallejo, F.M.L; Azevedo, A.M. Considerações sobre a variação da pressão de enchimento dos pneus na confiabilidade dos projetos de pavimentos asfálticos rodoviários. 25° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 48° Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu, 2023.

Cava, F.H. Análise da influência da pressão de enchimento dos pneus e da condição de aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Dissertação de Mestrado: Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2021.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP). IP-DE-P00/001 Projeto de Pavimentação. São Paulo, Janeiro, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Pavimentação. Publicação IPR 719. 3° Edição. Rio De Janeiro, 2006.

Franco, F.A.C.P; Motta, L.M.G. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos – manual de utilização do programa Medina. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Agosto 2020.

Huang, Y.H. Pavement Analysis and Design. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2004.

Pittman, D.W. Development of a Reliability-based design procedure for rigid and flexible airfield pavements. US Army Corps of Engineers. Vicksburg, 1996.

Valle, P.D; Thom, N. Reliability in pavement design. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, 2016.