



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO *IN SITU* DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Jorge Luis Santos Ferreira²; Euller Loiola Sena¹; Eliardo Soares Coelho²; Juceline Batista dos Santos Bastos³ & Jorge Barbosa Soares¹

RESUMO

Apesar das diferentes abordagens para a definição de qualidade, entende-se que a minimização da variabilidade das principais características de um produto ou processo proporciona um ganho nesse quesito. Para esse fim, necessita-se primeiramente mensurar tal variabilidade. Visando agregar maior qualidade às obras de pavimentação asfáltica, este trabalho descreve e compara estatisticamente as variações que ocorrem durante a etapa de compactação de misturas asfálticas densas em três obras rodoviárias reais, tendo o grau de compactação (GC) como indicador de qualidade. Para as obras em análise, os resultados indicam a ocorrência de variações intrínsecas ao tipo de serviço, mas também revelam um quadro de inconformidades normativas e diferenças estatísticas significativas entre as variações observadas ao longo da execução, o que indica potencial para aprimoramento do processo construtivo. A abordagem estatística proposta agrega uma compreensão quantitativa do processo executivo e pode ser utilizado pelas empresas construtoras para aperfeiçoar seus procedimentos objetivando a melhoria da qualidade. De modo complementar, ao ser aplicada a obras já executadas e/ou em execução, os órgãos de controle adquirem referências úteis para auxiliar o planejamento e a consecução das auditorias de conformidade de modo otimizado e preciso.

PALAVRAS-CHAVE: Variabilidade; Misturas Asfálticas; Qualidade.

ABSTRACT

Despite the different approaches to defining quality, it is understood that minimizing the variability of the main characteristics of a product or process provides a gain in quality. For this purpose, it is necessary to first measure such variability. Aiming to add greater quality to asphalt pavement works, this study describes and statistically compares the variations that occur during the compaction stage of dense asphalt mixtures in three real road jobs, with the degree of compaction (GC) as quality indicator. For the works under analysis, the results indicate variations intrinsic to the type of service, but also reveal a scenario of normative non-conformities and significant statistical differences among the variations observed throughout construction, indicating a potential for improvement in the process. The proposed statistical approach adds a quantitative understanding of the execution process and can be used by contractors to improve their procedures aiming at quality improvement. Additionally, when applied to works already completed and/or in progress, regulatory agencies acquire useful references to assist in the planning and implementation of compliance audits in an optimized and precise manner.

KEY WORDS: Variability; Hot Mix Asphalt; Quality.

¹ Universidade Federal do Ceará, e-mail: euller.loiola@det.ufc.br; jsoares@det.ufc.br

² Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús, e-mail: jorge@crateus.ufc.br; eliardosoares@alu.ufc.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: juceline.santos@ifce.edu.br



INTRODUÇÃO

A concepção de qualidade na construção rodoviária adota uma abordagem centrada na produção, associada ao nível de conformidade com as especificações, um dos cinco conceitos propostos por Garvin (1992). Também pode-se entendê-la como uma característica inversamente proporcional à variabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Obras rodoviárias possuem, por natureza, grande extensão, o que faz com que haja enorme variabilidade nas características dos materiais que a compõem, tanto ao longo do trecho como em cada uma das suas camadas (AASHTO, 2003). Assim, aponta-se que o controle da variabilidade é um dos principais obstáculos para o controle de qualidade de obras rodoviárias.

Embora a literatura traga diferentes investigações sobre a variabilidade da composição de misturas asfálticas densas, bem como o impacto dessa variabilidade em seu comportamento mecânico (MOHAMMAD *et al.*, 2013; KASSEM; NAJJAR; CHEHAB, 2016, 2020; LIU *et al.*, 2017, 2021), ainda há pouquíssimos registros de um esforço semelhante em nível nacional (SANTOS *et al.*, 2020). Em face da relação entre variabilidade e qualidade, há a necessidade de se mensurar as oscilações dos principais parâmetros construtivos visando melhorias tanto na execução quanto na fiscalização de obras rodoviárias. Em um processo produtivo, uma maior variabilidade resulta em menor previsibilidade, menor continuidade e maior suscetibilidade a erros.

Nesse contexto, e apoiado na documentação de controle de qualidade produzido ao longo da execução de algumas obras rodoviárias estaduais, este artigo compara sistematicamente as variações ocorridas durante a etapa de compactação de misturas asfálticas densas, para as quais adota-se o grau de compactação (GC) como indicador de qualidade dessa etapa.

Para Liu *et al.* (2018), há um certo consenso de que a compactação desempenha um papel crucial para o desempenho de pavimentos flexíveis. Porém, a literatura não contempla explicitamente o efeito da variação do grau de compactação da mistura asfáltica em seu desempenho. No entanto, tem-se explorado a influência do volume de vazios e da densidade aparente, as quais tem relação direta com o grau de compactação. Em um dos trabalhos pioneiros nessa temática, Linden *et al.* (1989) identificaram a relação existente entre a vida de serviço e a massa específica máxima medida da mistura asfáltica não compactada. Estes autores afirmam que, de modo particular para misturas asfálticas com volume de vazios igual ou superior a 7,0%, a elevação dessa característica da mistura asfáltica em 1,0% implica na perda de aproximadamente 10,0% da vida de serviço do revestimento.

Sabe-se que uma compactação insuficiente reduz a rigidez da mistura asfáltica, o que pode induzir o desenvolvimento de defeitos prematuros (LI *et al.*, 2017; VACKOVÁ; VALENTIN; KOTOUSOVÁ, 2017). Tran *et al.* (2016), apontam que o desempenho quanto ao trincamento por fadiga e ao acúmulo de deformação permanente em misturas asfálticas podem aumentar entre 8,2 a 43,8% e 7,3 a 66,3%, respectivamente, pela simples redução de 1,0% no volume de vazios. Além do mais, a compactação deficiente e um menor grau de compactação gera uma maior presença de vazios, o que favorece a oxidação do ligante asfáltico e a penetração de água no interior da camada asfáltica. Por outro lado, a compactação excessiva pode causar fragmentação dos agregados e exige



mais consumo de energia durante a execução (MALLICK, 1999). Outra consequência é uma maior possibilidade de segregação de ligante asfáltico em razão do reduzido volume de vazios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo foi desenvolvido a partir da documentação de três obras rodoviárias estaduais localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza sob jurisdição da Superintendência de Obras Públicas (SOP) do Estado do Ceará. Os documentos analisados incluem os relatórios de acompanhamento e controle tecnológico da camada de rolamento em concreto asfáltico referentes aos seus respectivos períodos de execução. Por questões de confidencialidade, as obras são chamadas de Obra 1, Obra 2 e Obra 3.

As Obras 2 e 3 foram executadas por empresas distintas, enquanto a Obra 1 foi executada pela mesma empresa da Obra 2 em consórcio com uma terceira empresa, a qual ficou responsável pelas subcamadas. Mesmo que a documentação consultada não permita uma conclusão precisa, espera-se que os revestimentos asfálticos das Obras 1 e 2 compartilhem da mesma técnica executiva. Sobre a Obra 3, não há elementos que permitam uma comparação direta com as demais obras. Em termos constitutivos, todas as obras em análise utilizam, na camada de rolamento, concreto asfáltico com CAP 50/70 convencional nos teores de 5,5 (Obras 1 e 3) e 5,8 (Obra 2) e granulometria enquadrada na faixa C do DNIT. Estas camadas foram executadas com espessuras de 5,0 cm (Obra 1) e 6,5 cm (Obras 2 e 3).

A avaliação estatística foi conduzida no software Minitab® e considerou-se as características relevantes para o adequado desempenho da mistura asfáltica associadas à etapa de compactação (grau de compactação). Para a Obra 1, foram avaliadas 345 amostras em 12 medições; para a Obra 2, 685 amostras em 28 medições; e para a Obra 3, 194 amostras em 10 medições, totalizando 1224 amostras. A variabilidade das obras foi explorada sob duas abordagens estatísticas distintas, quais sejam: (i) análise descritiva e comparativa das medições mensais ao longo da execução de cada obra; e (ii) avaliação da uniformidade das variações no processo executivo no decorrer dos semestres.

Para a análise descritiva e comparativa das medições, adotou-se o diagrama de caixa ou *boxplot* (Figura 1), o qual fornece uma perspectiva sobre o caráter dos dados incluindo variabilidade, simetria e ocorrência de valores discrepantes (*outliers*). Além do mais, por não depender da média, essa ferramenta adequa-se bem para descrever conjuntos de dados com distribuição não normal. Ressalta-se que em trabalho recente, Sena (2023) identificou fortes indícios de não normalidade nos valores de algumas características de misturas asfálticas aplicadas em obras rodoviárias locais, incluindo o grau de compactação.

O boxplot é normalmente representado com uma caixa vertical contendo diversas características relevantes do conjunto de dados, tais como a mediana (centro), dispersão e assimetria. Como apresentado na Figura 1, a face inferior da caixa representa o 1º quartil (Q_1), que é o valor para o qual 25% dos dados são menores ou iguais a ele. A face superior é o 3º quartil (Q_3), onde 75% dos valores amostrais são menores ou iguais a ele. Desse modo, o intervalo entre Q_1 e Q_3 , chamado de



intervalo ou amplitude interquartil (IIQ ou AIQ), concentra 50% dos valores amostrais. Nota-se que a mediana (2º quartil ou 50º percentil) é representada por uma linha horizontal que cruza a caixa, não necessariamente em seu centro.

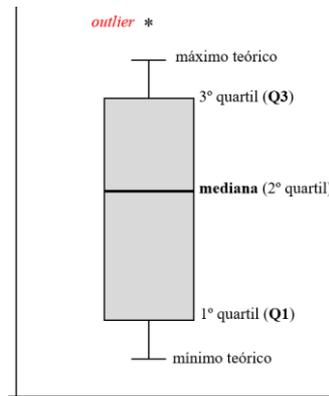


Figura 1. Representação qualitativa do diagrama de caixa ou *boxplot* (Autores, 2024).

De cada extremidade da caixa estende-se duas hastes que representam os limites teóricos. A haste inferior é uma linha de Q_1 até o valor mínimo teórico (V_{\min}), o qual é calculado pela Equação 1. A haste superior é uma linha de Q_3 até o valor máximo teórico (V_{\max}) obtido pela Equação 2. Valores amostrais abaixo do mínimo ou acima do máximo teórico são classificados como *outliers*.

$$V_{\min} = Q_1 - 1,5 \times AIQ \quad (1)$$

$$V_{\max} = Q_3 + 1,5 \times AIQ \quad (2)$$

Em termos de uniformidade de execução, as variações amostrais observadas na etapa de compactação de misturas asfálticas são basicamente de duas naturezas: (i) variabilidade natural intrínseca ao processo, a qual não pode ser evitada, mas deve ser quantificada e minimizada; e (ii) variabilidade associada à incapacidade do responsável conceber o produto sob condições controladas, ou seja, em conformidade com as normas e com características físicas e mecânicas semelhantes ao longo do processo.

Nesse cenário, buscou-se comparar estatisticamente as variações ocorridas no decorrer da obra. Para tanto, inicialmente agrupou-se os valores amostrais em semestres conforme indicado na Tabela 1. Os semestres foram marcados a partir do primeiro mês em que houve medição da propriedade em análise (GC). Na sequência, aplicou-se simultaneamente dois testes de igualdade de desvios padrão para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), sendo estes: (i) método de comparações múltiplas, e (ii) método de Levene modificado. Ambos os testes avaliam a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0), que nesse trabalho trata-se da igualdade dos desvios padrão entre os grupos (semestres). Para mais detalhes sobre tais testes, o leitor é direcionado a Almeida *et al.* (2008) e Banga e Fox (2013).



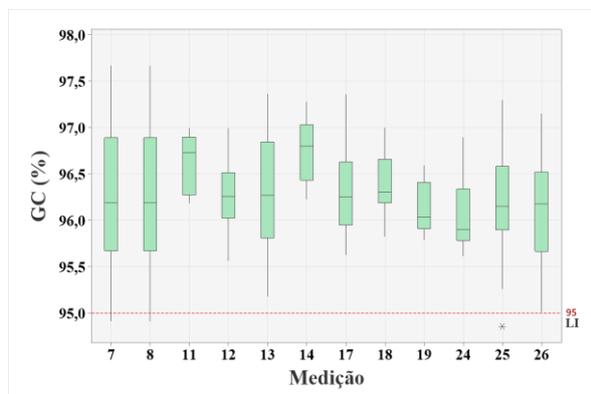
Tabela 1. Detalhamento dos semestres adotados nos testes de igualdade de desvios padrão (Autores, 2024).

	Semestres						
	1	2	3	4	5	6	7
Obra 1	mar/2020 a ago/2020	set/2020 a fev/2021	mar/2021 a ago/2021	set/2021 a fev/2022	-	-	-
Obra 2	jul/2014 a dez/2014	jan/2015 a jun/2015	jul/2015 a dez/2015	jan/2016 a jun/2016	jul/2016 a dez/2016	jan/2017 a jun/2017	jul/2017 a dez/2017
Obra 3	nov/2018 a abr/2019	mai/2019 a out/19	nov/2019 a abr/2020	-	-	-	-

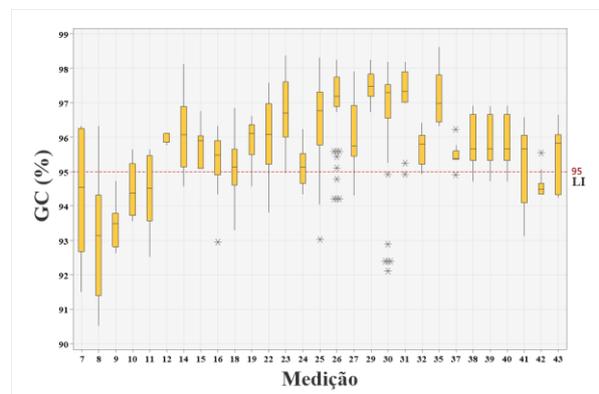
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Descritiva das Medições

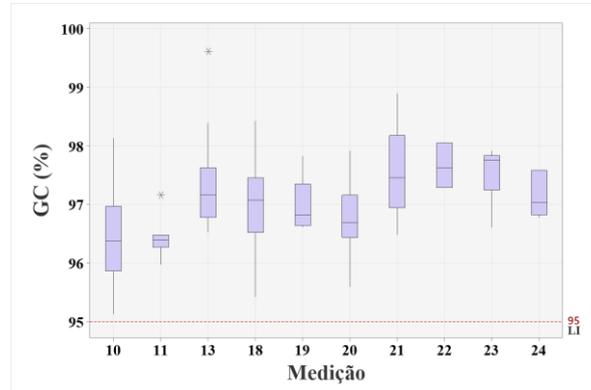
Analisando as amplitudes amostrais do GC da Obra 1 (Figura 2a) nota-se uma pequena variabilidade nas dispersões entre medições. Em alguns casos a diferença entre os valores máximo e mínimo é superior a 2,5% (e.g., medições 7 e 8), já em outros casos é inferior a 1,0% (e.g., medições 11 e 19). Para boa parte das medições, a dispersão de valores amostrais ocorre acima do limite inferior (LI = 95%) indicado pelo órgão local (SOP-ESP-13/2019). Observa-se também a ocorrência de algumas inconformidades nas medições iniciais e finais da obra, as quais também possuem as maiores diferenças entre os valores máximo e mínimo (medições 7, 8, 25 e 26). Aparentemente há um maior controle sobre o processo executivo nas medições intermediárias.



(a) Obra 1



(b) Obra 2



(c) Obra 3

Figura 2. *Boxplots* do GC relativos a todas as medições em que o serviço foi executado (Autores, 2024).

Pela Figura 2b é possível identificar que a Obra 2 é claramente aquela de menor qualidade executiva sob o critério de compactação, sobretudo nas medições iniciais. Na medição 7, por exemplo, em torno de 60% dos valores amostrais estão abaixo do LI. A situação é ainda pior para as medições 8 e 9, onde nesta última, 100% das amostras não atendem à especificação. O processo de compactação aparenta ser uma situação problemática ao longo de toda a execução desta obra, ainda que em menor intensidade após a medição 11. No decorrer da obra nota-se muitas medições com inconformidades, algumas delas com medianas próximas ao LI, o que se reflete em um percentual de inconformidades em torno de 50%, além de amplitudes bastante variáveis entre medições. Destaca-se ainda a recorrência de valores discrepantes (*outliers*) abaixo do valor mínimo especificado entre as medições 16 e 37.

Por outro lado, a Obra 3 (Figura 2c) possui pouca variação do GC no decorrer da execução, o que pode caracterizar um maior controle sobre o processo executivo, mais especificamente sobre a compactação do concreto asfáltico. Destaca-se também a ausência de inconformidades, isto é, todos os valores observados nas amostragens de cada medição estão acima do LI especificado. Ainda que haja uma variação nas medianas, a diferença entre as medianas mínima e máxima é da ordem de apenas 1%. De modo particular, a análise da Obra 3 ratifica a natureza variável das obras de pavimentação. Mesmo com aparente controle sobre o processo executivo, ainda se observam oscilações nos valores amostrais.

Avaliação da Uniformidade Executiva

Conforme já indicado, aplicou-se dois testes de hipótese (método de comparações múltiplas e método de Levene modificado) como critérios para a identificação da ocorrência de variações destoantes de GC ao longo da execução do revestimento. A Figura 3 explicita estes resultados para GC. Nessa análise, os valores foram agrupados por semestre visando ampliar o número de amostras e obter maior precisão nos intervalos de incerteza.

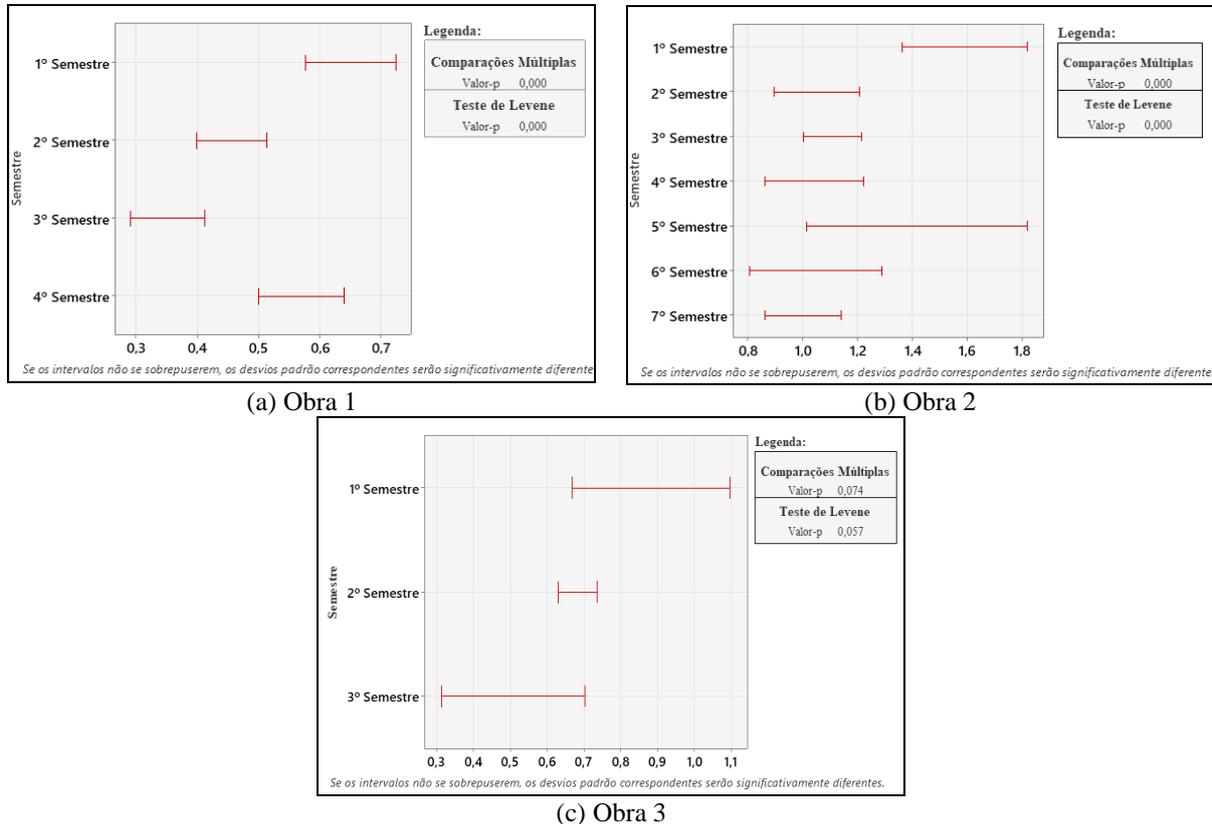


Figura 3. Testes de igualdade de desvios padrão para GC (Autores, 2024).

Os intervalos de incerteza para o GC mostrados na Figura 3 indicam que há casos de não sobreposição em alguns destes intervalos. Os valores-p obtidos nos testes de hipótese corroboram que há diferenças estatísticas significativas nos valores de GC entre os semestres das Obras 1 e 2 (Figuras 3a e 3b, respectivamente). No caso da Obra 1 (Figura 3a), a dispersão observada no primeiro semestre é estatisticamente semelhante apenas ao último semestre e a dispersão do terceiro assemelha-se exclusivamente ao segundo.

Para a Obra 2 (Figura 3b), o intervalo de incerteza estimado para o 1º semestre diverge significativamente de todos dos demais, exceto do 5º semestre. Espera-se que um processo construtivo estável apresente variações semelhantes ao longo do tempo, o que não foi observado na obra em tela, não só pela diferença estatística, mas também pelo maior valor máximo do desvio padrão estimado pelo intervalo de incerteza nas medições do 1º e 5º semestres. Por último, a Obra 3 (Figura 3c) não apresentou diferença estatística significativa em sua variabilidade executiva semestral, caracterizando melhor controle de qualidade.

Pode-se observar algumas tendências de comportamento executivo relacionado à qualidade das obras em análise. Primeiro, atenta-se para o fato dos intervalos de incerteza que contemplam os maiores valores de dispersão (desvio padrão) ocorrerem no 1º semestre. Em segundo lugar, embora não seja um comportamento geral, os intervalos de incerteza englobam valores de desvio padrão cada vez menores nos semestres subsequentes. Dessa forma, pode-se supor que há uma propensão



de redução da variabilidade da compactação da mistura asfáltica com o avanço da obra mesmo para diferentes empresas construtoras. Tal fato pode sugerir uma curva de aprendizado e/ou um controle mais rigoroso das obras no decorrer do tempo. Se tal observação de fato se reproduzir como evidência em um maior conjunto de obras, um desafio relevante é trazer tais aspectos (aprendizado e/ou controle) para o mais cedo possível nas obras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descrição e a comparação sistemática da variabilidade da etapa compactação de misturas asfálticas densas por meio de ferramentas estatísticas permitiram enxergar o processo executivo do revestimento asfáltico sob uma ótica pouco explorada no ambiente técnico e acadêmico. De modo geral, ratificou-se a variabilidade inerente à etapa em análise (compactação). Por outro lado, observou-se a ocorrência de muitas inconformidades e distintos padrões executivos ao longo das diferentes etapas das obras. Em alguns casos, há evidências de uma diferença estatística significativa entre os desvios padrão semestrais, o que pode estar relacionado a uma menor estabilidade do processo construtivo.

As análises estatísticas realizadas mostram-se particularmente úteis para o controle, garantia e melhoria da qualidade em obras rodoviárias, pois trazem uma compreensão complementar à abordagem tipicamente adotada no controle estatístico de obras e serviços rodoviários normatizada em nosso país, qual seja, a norma DNER-PRO 277/97. Ainda que esta norma estabeleça um método útil e consistente para orientar a aceitação ou rejeição do produto (i.e., daquilo que foi executado), este traz uma avaliação pontual e está relacionado a uma postura reativa em relação à má qualidade, ou seja, a ação dos envolvidos é motivada sobretudo pela rejeição de algo já executado, o que gera retrabalho e impacta prazos e custos.

Por outro lado, ao monitorar o processo em termos de conformidade, dispersão amostral e uniformidade executiva tem-se uma visão ampla e contínua, induzindo uma postura preventiva, onde pode-se tomar decisões antecipadas a fim de evitar a execução com má qualidade. Dessa forma, minimiza-se o retrabalho. Além disso, o uso de ferramentas estatísticas fornece uma compreensão rica sobre o processo executivo, a qual pode ser utilizada pelas construtoras para aperfeiçoar seus processos e orientar ações de melhoria da qualidade visando obras futuras.

Os ganhos associados à compreensão objetiva do processo executivo alcançam também os órgãos rodoviários e especialmente os órgãos de controle interno e externo, sendo para estes últimos, uma ferramenta viável no auxílio às auditorias de conformidade. A caracterização estatística dos dados produzidos ao longo da execução de diversas obras de pavimentação pode evidenciar alguns aspectos relevantes, tais como, padrões de variabilidade, frequência e número de inconformidades, camadas do pavimento mais suscetíveis a erros executivos e características mais propensas a desvios de projeto. O conhecimento dos aspectos elencados pode subsidiar o planejamento das auditorias, bem como a definição do plano de amostragem e dos ensaios laboratoriais a serem realizados visando otimizar as atividades de campo.

Em síntese, os resultados obtidos apontam para a relevância da mensuração contínua, registro e análise da variabilidade no processo construtivo de obras de pavimentação. Para além do caráter



fiscalizatório e/ou punitivo, este conhecimento pode se traduzir em ações de planejamento e aperfeiçoamento dos diferentes atores do setor da infraestrutura de pavimentos no intuito de agregar qualidade ao produto final. Como consequências diretas pode-se citar o incremento na vida útil dos pavimentos, redução dos gastos com retificações, menos interferências nos prazos e custos de execução, redução do consumo de materiais e diminuição das emissões de gases e poluentes.

Por fim, destaca-se que sobretudo por limitação da documentação disponível, não foi possível avançar na investigação das possíveis causas relacionadas às inconformidades do GC e às variações estatisticamente significativas dos desvios padrão semestrais. Entretanto, algumas sugestões para a redução da variabilidade e melhoria do processo construtivo podem ser elencadas. Inicialmente é primordial que as empresas executoras desenvolvam uma cultura organizacional que valorize a gestão da qualidade. Assim, cria-se um ambiente propício para a busca e inserção de diferentes técnicas desde o nível estratégico até o operacional, incluindo por exemplo, o uso de ferramentas estatísticas para monitorar e gerenciar a execução conforme explorado neste trabalho, o que caracteriza o chamado controle estatístico do processo. Especificamente sob a ótica operacional, pode-se sugerir:

- Qualificação contínua do corpo técnico envolvido na supervisão das atividades de compactação;
- Formação regular dos colaboradores responsáveis não só pela compactação da mistura asfáltica, mas também pela usinagem, transporte e espalhamento;
- Minimização do tempo entre o espalhamento da mistura asfáltica e o início de sua compactação;
- Controle rigoroso das temperaturas de usinagem e compactação de acordo com o tipo de ligante asfáltico;
- Manutenção e calibração periódicas dos equipamentos de usinagem, transporte, espalhamento e compactação.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelas bolsas de pesquisa por meio do Programa Cientista Chefe e ao Tribunal de Contas do Estado do Ceará pela colaboração técnica e pela ativa participação no referido Programa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.; ELIAN, S.; NOBRE, J. **Modificações e alternativas aos testes de Levene e de Brown e Forsythe para igualdade de variâncias e médias.** Revista Colombiana de Estadística, v. 31, n. 2, p. 241–260, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Quality Assurance Guide Specification.** Washington, 2003.

BANGA, S. J.; FOX, G. D. **On Bonett's Robust Confidence Interval for a Ratio of Standard Deviations.** In press, 2013.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G. D.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** (2ª ed.). Rio de Janeiro: Abeda, 2022.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 277**: Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 011 – PRO**: Gestão da qualidade em obras rodoviárias - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

GARVIN, D. A. **Gerenciando a qualidade**: a visão estratégica e competitiva. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1992.

GONÇALVES, B. C. S.; PEREIRA, D. da S.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos. **Transportes**, v. 28, n. 3, p. 75-90, 2020.

KASSEM, H. A.; NAJJAR S. S.; CHEHAB G. R. Probabilistic Modeling of the Inherent Variability in the Dynamic Modulus Master Curve of Asphalt Concrete. **Transportation Research Record**, v. 2576, n. 1, p. 60–71, 2016.

KASSEM, H. A.; NAJJAR S. S.; CHEHAB G. R. Effect of Asphalt Mixture Components on the Uncertainty in Dynamic Modulus Master curves. **Transportation Research Record**, v. 2674, n. 5, p. 135–148, 2020.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Paris: 2007.

LI, X.; ZHOU, Z.; LV, X.; XIONG, K.; WANG, X.; YOU, Z. Temperature segregation of warm mix asphalt pavement: Laboratory and field evaluations. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 436-445, 2017.

LINDEN, R. N.; MAHONEY, J. P.; JACKSON, N. C. EFFECT OF COMPACTION ON ASPHALT CONCRETE PERFORMANCE. **Transportation Research Record**, n. 1217, 1989. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/306988>. Acesso em: 5 jun. 2024

LIU, P.; XU, H.; WANG, D.; WANG, C.; SCHULZE, C.; OESER, M. Comparison of mechanical responses of asphalt mixtures manufactured by different compaction methods. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 765-780, 2018.

LIU, J.; ZHAO, S.; LI, P.; SABOUNDJIAN, S. Variability of composition, volumetric, and mechanic properties of hot mix asphalt for quality assurance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 3, p. D4015004, 2017.

LIU, Q.; HU, J.; LIU, P.; WU, J.; LEISCHNER, S.; OESER, M. Uncertainty analysis of in-situ pavement compaction considering microstructural characteristics of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122514, 2021.

MALLICK, R. B. Use of Superpave gyratory compactor to characterize hot-mix asphalt. **Transportation Research Record**, v. 1681, n. 1, p. 86-96, 1999.

MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M.; COOPER III, S. B.; RAGHAVENDRA, A. Levels Of Variability In Volumetric And Mechanical Properties Of Asphalt Mixtures. **JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING**, V. 25, N.10, P. 1424-1431, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. Hoboken: John wiley & sons, 2018.

SANTOS, F. R. T.; SILVA, L. S. V. D.; BASTOS, J. B. D. S.; SOARES, J. B. (2020). **Avaliação de variabilidade de misturas asfálticas aplicadas em um trecho experimental e aplicação de fator de pagamento**. In: Congresso De Pesquisa E Ensino Em Transportes, 34, 2020, 100% digital. ANPET, 2020, p. 1156-1167.



SENA, E. L. **Caracterização da variabilidade construtiva de revestimentos asfálticos densos em obras rodoviárias cearenses**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75401>. Acesso em: 06/04/2024.

SHEWHART, W. A. **Statistical method from the viewpoint of quality control**. New York: Dover Publications, 1939.

SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS PÚBLICAS. **SOP-ES-P 13: Concreto Asfáltico**. Fortaleza, 2019.

TRAN, N.; TURNER, P.; SHAMBLEY, J. **NCAT Report 16-02R ENHANCED COMPACTION TO IMPROVE DURABILITY AND EXTEND PAVEMENT SERVICE LIFE: A LITERATURE REVIEW**. 2016. Disponível em: <https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/reports/2016/rep16-02.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2024

VACKOVÁ, P.; VALENTIN J.; KOTOUŠOVÁ A. Impact of lowered laboratory compaction rate on strength properties of asphalt mixtures. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 3, n. 7, p. 1-8, 2017.