

Caracterização estatística da variabilidade nos processos de usinagem e compactação de misturas asfálticas densas

Statistical characterization of plant mixing and compaction of dense asphalt mixtures

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

¹Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

²Universidade Federal do Ceará Campus de Crateús, Crateús, Ceará, Brasil

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: euller.loiola@det.ufc.br,  (ELS); eliardo-soares@alu.ufc.br,  (ESC); jorge@crateus.ufc.br,  (JLSF);
juceline.santos@ifce.edu.br,  (JBSB); jsoares@det.ufc.br,  (JBS)

Recebido:

25 de maio de 2024

Revisado:

11 de fevereiro de 2025

Aceito para publicação:

24 de fevereiro de 2025

Publicado:

16 de maio de 2025

Editor de Área:

Kamilla Vasconcelos, Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:

Teor de ligante asfáltico.

Grau de compactação.

Controle de qualidade.

Keywords:

Percentage of asphalt binder.

Degree of compaction.

Quality control.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3016

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 as etapas de usinagem e compactação de misturas asfálticas densas em três obras rodoviárias reais, tendo o percentual de cimento asfáltico de petróleo (%CAP) e o grau de compactação (GC) como indicadores de qualidade de cada uma das etapas, respectivamente. 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.

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 plant mixing and compaction stages of dense asphalt mixtures in three real road construction projects, with the percentage of asphalt binder (%Pb) and the degree of compaction (DoC) as quality indicators for each stage, respectively. 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.



1. INTRODUÇÃO

A concepção de qualidade na construção rodoviária está associada ao nível de conformidade com as especificações, isto é, tem-se uma abordagem centrada na produção (Garvin, 1992). Também pode-se entender a qualidade como uma característica inversamente proporcional à variabilidade (Montgomery e Runger, 2018). O controle de qualidade, por sua vez, compreende atividades simultâneas à execução dos serviços de produção da obra rodoviária, aplicando técnicas operacionais que se destinam a monitorar todo o processo em todas as etapas do ciclo da qualidade da obra (DNIT, 2004).

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). De modo particular, a execução do revestimento asfáltico, sujeita a imprevistos como variações de temperatura e diferenças nas proporções de dosagem, pode comprometer a conformidade com as especificações e, conseqüentemente, a qualidade do produto final (Santos et al., 2020). Desse modo, aponta-se que o controle da variabilidade é um dos maiores obstáculos para o controle de qualidade de obras rodoviárias. Para Shewhart (1939), a qualidade e a variabilidade são conceitos antagônicos, isto é, onde se tem muito de um, necessariamente se terá pouco do outro.

Quanto ao controle de qualidade (e de variabilidade) de obras e serviços rodoviários, o cenário técnico nacional adota sobretudo a norma DNER-PRO 277/97 (DNER, 1997). Em síntese, a qualidade do serviço executado será quantificada através do cálculo de uma variável aleatória que combina a média aritmética e o desvio da característica em análise, bem como é afetada pelo tamanho amostral considerado. Por meio do procedimento prescrito nessa norma, é possível estabelecer a probabilidade de aceitação de um serviço, com base em uma porcentagem de defeitos, fornecendo parâmetros para a tomada de decisão (aceitação ou rejeição) em relação à qualidade executiva (DNER, 1997).

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 et al., 2016, 2020; Liu et al., 2017, 2021), ainda observa-se um número reduzido de esforços semelhantes em nível nacional (Santos et al., 2020). Ressalta-se ainda que poucos trabalhos abordam o tratamento estatístico de dados de obras rodoviárias em maior profundidade (Al-Qadi et al., 2020). Frente a 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.

Em uma mistura asfáltica, o %CAP ou teor de ligante asfáltico diz respeito ao percentual de ligante asfáltico (em massa) na composição total da mistura correspondente e sua definição é um ponto chave no processo de dosagem, pois relaciona-se diretamente com as características volumétricas e mecânicas das misturas produzidas (LCPC, 2007; Sul, 2014). O excesso de ligante asfáltico pode ocasionar instabilidade na mistura asfáltica, o que tende a gerar ondulações, deslocamentos, deformações plásticas e/ou exsudação. De outro modo, quando em teor deficiente, induz o surgimento de desagregações, trincamentos prematuros e desgastes excessivos (Bernucci et al., 2022).

Em relação à compactação, para Liu et al. (2018), há um certo consenso de que esta desempenha um papel crucial para o desempenho de pavimentos flexíveis. Sabe-se que uma compactação

insuficiente reduz a rigidez da mistura asfáltica, o que pode induzir o desenvolvimento de defeitos prematuros (e.g., deformação permanente). Além do mais, tem-se uma maior presença de vazios, o que favorece a oxidação do ligante asfáltico e a penetração de água no interior da camada asfáltica (Vacková et al., 2017). 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.

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 as etapas de usinagem e compactação de misturas asfálticas densas, para as quais adota-se o teor de ligante asfáltico (%CAP) e o grau de compactação (GC), respectivamente, como indicadores de qualidade de cada uma das etapas em análise.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

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

A avaliação estatística foi conduzida no software Minitab® e considerou-se as características relevantes para o adequado desempenho da mistura asfáltica associadas às etapas de usinagem (teor de ligante asfáltico) e compactação (grau de compactação). Para a Obra 1, foram avaliadas 345 amostras em 12 medições; para a Obra 2, 695 amostras em 28 medições; e para a Obra 3, 198 amostras em 10 medições, totalizando 1238 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*, 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 teor de ligante asfáltico e o grau de compactação.

Em termos de uniformidade de execução, as variações amostrais observadas nas etapas de usinagem e 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. Salienta-se que os semestres foram marcados a partir do primeiro mês em que houve medição das propriedades em análise (%CAP e GC) e, na Tabela 1, os números entre colchetes abaixo do período correspondente a cada semestre correspondem ao número de medições dentro

do período de observação. De modo complementar, o Apêndice 1, na Tabela S1, traz o número de amostras que compõem todas as medições das obras em tela.

Na sequência da análise, 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 (teste W_{50}). Ambos os testes avaliam a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0), isto é, de igualdade dos desvios padrão entre os grupos (semestres). O teste de Levene é usado para comparar a variância entre diferentes amostras e a variância geral, sendo uma etapa preliminar antes de testes paramétricos (Almeida et al., 2008). Já o teste de comparações múltiplas é popular devido à sua simplicidade e ao suporte computacional disponível, permitindo identificar diferenças significativas entre pares de médias quando a hipótese nula é rejeitada (Nogueira, 2017).

Tabela 1: Detalhamento dos semestres adotados nos testes de igualdade de desvios padrão

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

O método de comparações múltiplas recorre a um procedimento numérico e gráfico para a comparação das variâncias (ou correspondentes desvios padrão) de múltiplas amostras. Esta análise apoia-se no conceito de intervalos de incerteza ou intervalos de múltipla comparação referentes a cada uma das amostras (Banga e Fox, 2013). Rejeita-se a hipótese nula se, e somente se, pelo menos um par dos intervalos de múltipla comparação obtidos pela Equação 1 não se sobrepuserem. Nesse caso, o valor-p derivado do teste também será inferior ao nível de significância adotado.

$$\left[S_i \sqrt{c_i \exp(-q_{\alpha,k} V_i / \sqrt{2})}, S_i \sqrt{c_i \exp(q_{\alpha,k} V_i / \sqrt{2})} \right], i = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

Na Equação 1, tem-se que S_i é o desvio padrão da amostra i , k é o número total de amostras a comparar, $q_{\alpha,k}$ é o ponto superior do nível de significância α do intervalo de variáveis independentes e aleatórias normais padrão identicamente distribuídas de k . Além disso, as variáveis c_i e V_i são definidas conforme as Equações 2 e 3, respectivamente, onde n_i é o número de observações da amostra i , $z_{\alpha/2}$ é o ponto percentil superior $\alpha/2$ da distribuição normal padrão e o termo b_{ij} é obtido através da Equação 4.

$$c_i = \frac{n_i}{n_i - z_{\alpha/2}} \quad (2)$$

$$V_i = \frac{(k-1) \sum_{j \neq i} b_{ij} - \sum_{1 \leq j < l \leq k} b_{jl}}{(k-1)(k-2)} \quad (3)$$

$$b_{ij} = \sqrt{\frac{\hat{y}_{ij} - r_i}{n_i - 1} + \frac{\hat{y}_{ij} - r_j}{n_j - 1}} \quad (4)$$

Por fim, na Equação 4, \hat{y}_{ij} é o estimador de curtose combinada das amostras pareadas i e j . Por outro lado r_i e r_j dependem do número de observações de cada amostra n_i e n_j , respectivamente, e são calculadas pelas Equações 5 e 6 a seguir.

$$r_i = \frac{(n_i - 3)}{n_i} \quad (5)$$

$$r_j = \frac{(n_j - 3)}{n_j} \quad (6)$$

Já o teste de Levene modificado, o qual caracteriza-se como um procedimento relativamente insensível a desvios de normalidade, adota a estatística W_{50} expressa pela Equação 7 (Almeida et al., 2008). Existe um valor-p correspondente à estatística de Levene calculada. Se este valor-p for menor que o nível de significância α pré-especificado, então os desvios padrão são considerados significativamente diferentes. Caso contrário, diz-se que os desvios padrão são homogêneos.

$$W_{50} = \frac{(n-k) \sum_{i=1}^k n_i [\bar{Z}_i^{(m)} - \bar{Z}^{(m)}]^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} [Z_{ij}^{(m)} - \bar{Z}_i^{(m)}]^2} \quad (7)$$

Na Equação 7 as variáveis k e n_i possuem as mesmas definições dadas no método de comparações múltiplas e o índice (m) faz referência à mediana amostral. As variáveis $\bar{Z}_i^{(m)}$, $\bar{Z}^{(m)}$, n e $Z_{ij}^{(m)}$ são obtidas, respectivamente, a partir das Equações 8, 9, 10 e 11. A variável $Z_{ij}^{(m)}$ representa os desvios absolutos das variáveis X_{ij} em relação às medianas amostrais M_i dos grupos.

$$\bar{Z}_i^{(m)} = n_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}^{(m)} \quad (8)$$

$$\bar{Z}^{(m)} = n^{-1} \sum_{i=1}^k n_i \bar{Z}_i^{(m)} \quad (9)$$

$$n = \sum_{i=1}^k n_i \quad (10)$$

$$Z_{ij}^{(m)} = |X_{ij} - M_i| \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise descritiva das medições

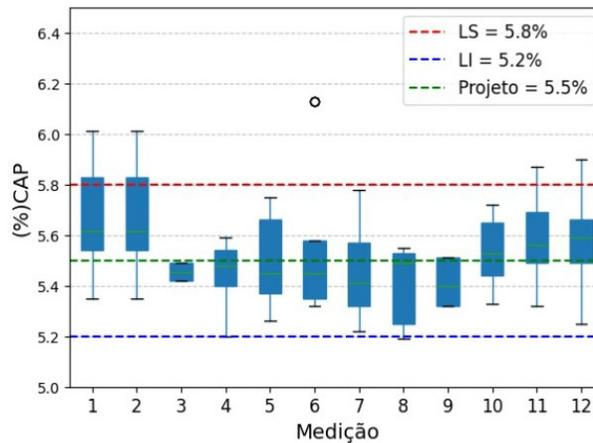
Adotou-se o %CAP como indicador da qualidade da etapa de usinagem do concreto asfáltico. A Figura 1 sintetiza, por meio de *boxplots*, as variações ocorridas no %CAP ao longo das medições em cada uma das obras em tela. Apresenta-se também, como referência, os teores de projeto bem como os limites superior (LS) e inferior (LI) a serem observados por essa propriedade conforme a especificação SOP-ESP-13/2019 (SOP, 2019).

Pela Figura 1, nota-se que de modo geral, a maioria das variações ocorreu dentro dos limites de tolerância. Não por acaso, as medianas do %CAP em todas as obras aproximam-se dos respectivos valores de projeto, sendo as medianas de 5,53% para a Obra 1; 5,83% para a Obra 2; e 5,45% para a Obra 3. No entanto, a análise individual de cada uma das medições revela alguns momentos de aparente descontrole sobre o processo de produção do concreto asfáltico com destaque especial para as Obras 1 e 2, onde percentuais significativos de amostras ultrapassam os limites de conformidade.

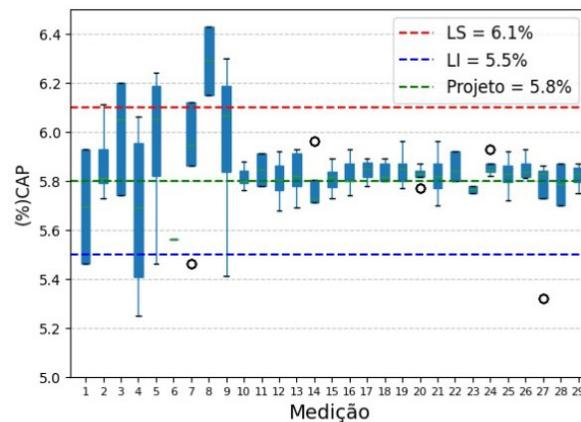
Os *boxplots* das medições 1 e 2 da Obra 1 (Figura 1a) mostram que em ambos os casos, mais de 25% dos valores amostrais de %CAP estão acima do limite superior (LS) aceitável, o que é um percentual de inconformidades considerável, sugerindo uma inconformidade crítica que pode impactar a qualidade final da pavimentação e os custos do projeto. Além disso, registra-se valores máximos próximos a 6%, ou seja, 0,5% acima do teor de projeto, aumentando o risco de problemas como exsudação e deformação permanente. Teores acima do limite superior voltam a ocorrer nas medições finais (11 e 12). Sabe-se que em excesso, o %CAP torna a mistura asfáltica mais suscetível a defeitos como exsudação e deformação permanente e impacta diretamente o orçamento da obra em razão do consumo desnecessário de um insumo de alto custo.

Considerando-se ainda todas as medições da Obra 1, percebe-se que em um primeiro momento há a concentração de teores acima do valor de projeto, posteriormente há uma inversão, onde a maior parte está abaixo desse teor, sobretudo a medição 8, a qual apresenta uma assimetria positiva (agrupamento de valores na zona de menores valores amostrais), inclusive com a ocorrência de valores menores que o limite inferior (LI).

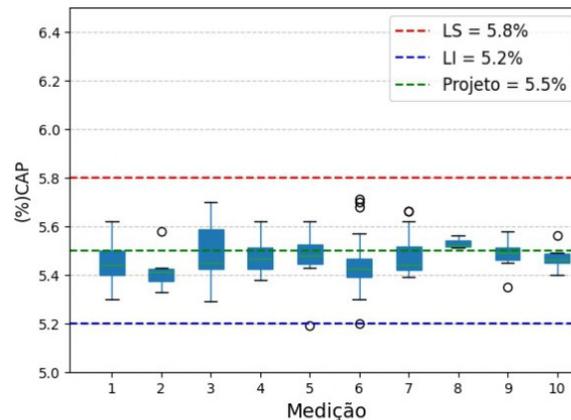
Ao longo das medições 10, 11 e 12 (Figura 1a), os valores voltam a concentrar-se acima do teor de projeto. A variação descrita pode ser resultado de um processo de produção (usinagem) pouco controlado, o que é corroborado pelas diferentes amplitudes (diferenças entre os valores máximo e mínimo) observadas entre as medições. Porém, não se pode desprezar a variabilidade associada ao método de ensaio para a obtenção do %CAP, onde adotou-se a extração de ligante asfáltico com solvente utilizando a centrífuga Rotarex conforme a especificação DNER-ME 053/94 (DNER, 1994), o qual pode apresentar desvios padrão acima da tolerância admitida em norma (Gonçalves et al., 2020).



(a) Obra 1



(b) Obra 2



(c) Obra 3

Figura 1. Boxplots do %CAP relativos a todas as medições em que o serviço foi executado.

Para a Obra 2 (Figura 1b), os *boxplots* das medições 1 a 9 revelam um desequilíbrio na produção do concreto asfáltico na fase inicial de construção do revestimento, haja vista a recorrência de inconformidades, a posição das medianas e as amplitudes interquartis. O desequilíbrio inicial sugere problemas com a calibração da usina, impactando diretamente o controle da qualidade da camada asfáltica. Observa-se na Figura 1b que para as medições 3, 5 e 9, o percentual de não atendimento ao limite superior especificado (LS) é da ordem de 40% das amostras, estando as

suas medianas muito próximas de LS. Valor semelhante é observado na medição 4, mas nesse caso, a discordância ocorre para o limite inferior. A medição 8 é um caso extremo, onde todos os valores amostrais superam o valor máximo admissível.

Também é notória a diferença nas amplitudes interquartis das medições iniciais. Por exemplo, a medição 2 tem mediana próxima ao valor de projeto e uma amplitude interquartil em torno de 0,1%, isto é, 50% dos valores amostrais intermediários diferem entre si em no máximo 0,1%; enquanto na medição 4, essa amplitude está próxima de 0,7%. Tratando-se de %CAP, a diferença existente entre ambas (0,6%) não pode ser ignorada.

Ainda sobre o %CAP da Obra 2, constata-se que após a medição 9, a produção da mistura asfáltica torna-se menos variável, o que pode ser observado pela clara redução da amplitude interquartil e pela baixa flutuação da mediana em torno do valor de projeto. Embora os dados consultados não informem expressamente, a principal hipótese para a estabilização do processo executivo é a aprendizagem obtida a partir das inconformidades das medições iniciais. Possivelmente, ajustes foram realizados na etapa de usinagem a fim de garantir um %CAP uniforme.

Por outro lado, a Obra 3 (Figura 1c) mantém um aparente controle sobre o %CAP ao longo de todas as medições analisadas. Para essa obra, embora ocorram inconformidades nas medições 5 e 6 – uma amostra com %CAP abaixo do limite inferior para cada medição – tais valores são discrepantes da ampla maioria das amostras e são considerados *outliers*. Levando em conta a proximidade dos valores caracterizados como discrepantes em relação ao valor mínimo normativo, espera-se que o impacto sobre o desempenho seja mínimo. No entanto, a avaliação do processo executivo pode apontar causas e possibilidades de melhoria para uniformizar ainda mais a etapa de usinagem da mistura asfáltica. Isso sugere que um processo de usinagem mais estável foi mantido ao longo de todas as medições.

Como previamente indicado, o grau de compactação (GC) foi adotado como medida de qualidade da etapa de compactação do concreto asfáltico. Assim como para o %CAP, sintetiza-se as variações ocorridas no GC no decorrer das medições de cada uma das obras por meio de *boxplots* (Figura 2). Pela normativa local (SOP-ESP-13/2019), o GC de concretos asfálticos deve ser maior ou igual a 95% (limite inferior, LI), o qual também é representado nos gráficos. Destaca-se que a norma de referência das obras em questão diferencia-se da especificação DNIT 031/2024 ES (DNIT, 2024), a qual define limites inferior (97%) e superior (101%) para o GC.

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 1 e 2), já em outros casos é inferior a 1,0% (e.g., medições 3 e 9). Para boa parte das medições, a dispersão de valores amostrais ocorre acima do limite inferior (LI = 95%) indicado pelo órgão local (SOP, 2019) e abaixo do valor superior prescrito na especificação equivalente em nível federal de 101% (DNIT, 2024), o que reduz a preocupação com possíveis implicações na vida útil da camada. No entanto, 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 1, 2, 11 e 12). Aparentemente há um maior controle sobre o processo executivo nas medições intermediárias, haja vista a menor amplitude dos *boxplots* correspondentes, revelando que o processo de compactação também requer monitoramento contínuo, especialmente em fases críticas da execução.

Pela Figura 2b é possível identificar que a Obra 2 é aquela de menor qualidade executiva sob o critério de compactação, sobretudo nas medições iniciais. Na medição 1, por exemplo, em torno de 60% dos valores amostrais estão abaixo do LI. A situação é ainda pior para as medições 2 e 3, onde nesta última, 100% das amostras não atende à especificação. Diferentemente da análise do %CAP,

onde o processo de usinagem parece estabilizar-se após a medição 16 (Figura 1b), o processo de compactação aparenta ser uma situação problemática ao longo de toda a execução da obra, ainda que em menor intensidade após a medição 5. No decorrer da obra nota-se muitas medições com inconformidades, algumas delas com mediana próxima ao LI (percentual de inconformidades em torno de 50%), além de amplitudes variáveis entre medições. Destaca-se ainda a recorrência de valores discrepantes (*outliers*) abaixo do valor mínimo especificado entre as medições 9 e 23.

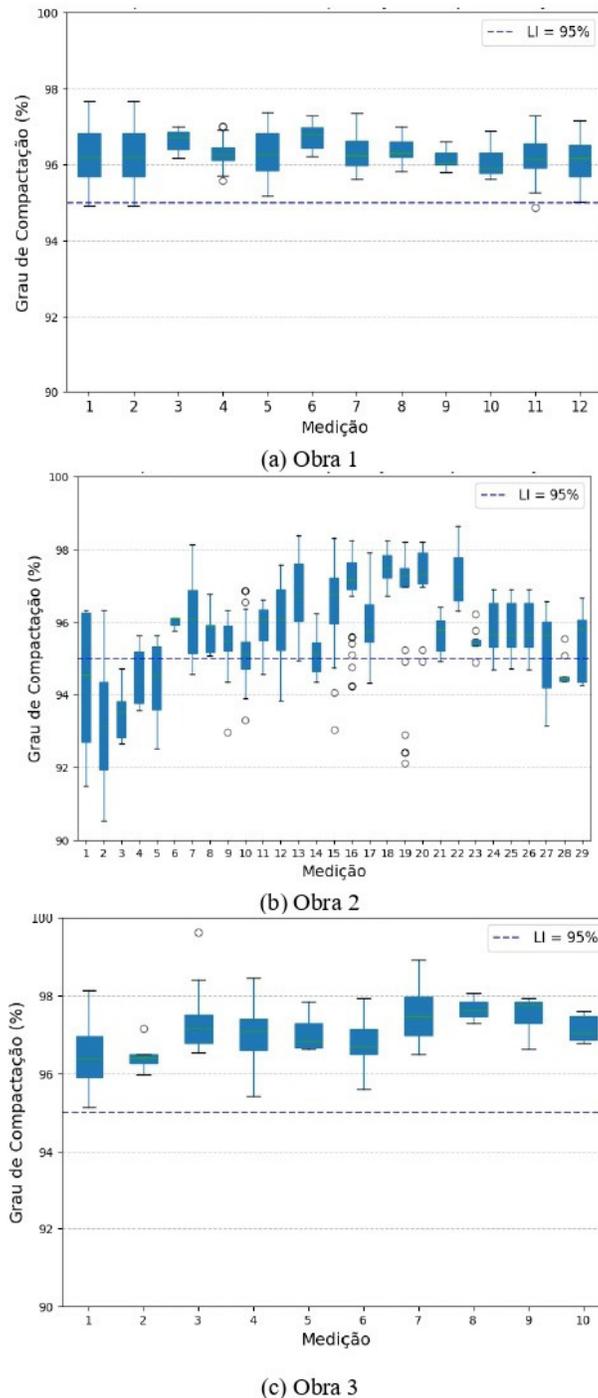


Figura 2. Boxplots do GC relativos a todas as medições em que o serviço foi executado.

Por outro lado, a Obra 3 (Figura 2c) possui pouca variação do GC no decorrer da execução, assim como ocorreu para o %CAP, 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, mesmo os valores mínimos 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 das dez medições consideradas é da ordem de apenas 1%, o que para a característica em discussão (GC) é um valor aceitável. 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.

No tocante às variações observadas para ambas as características, algumas considerações sobre suas possíveis causas podem ser elaboradas. Como já pontuado anteriormente, a própria variabilidade do método de ensaio tem potencial para afetar os valores amostrais obtidos, destacando-se as limitações para obtenção do %CAP (Gonçalves et al., 2020). Ainda sobre o %CAP, pode-se levantar também a hipótese de dificuldades iniciais para a calibração da usina, sobretudo para a Obra 2. Quanto ao GC, a definição correta do tipo de rolo compactador e do número de passadas pode ter sido um fator influente. De todo modo, as proposições acima são apenas especulações, visto que a documentação da obra a que se teve acesso não permite uma conclusão assertiva a esse respeito.

3.2. Avaliação da uniformidade executiva

Para avaliar a uniformidade executiva, aplicou-se dois testes de hipótese (comparações múltiplas e método de Levene modificado) como critérios para a identificação da ocorrência de variações destoantes de %CAP e GC ao longo da execução do revestimento. As Figuras 3 e 4 explicitam estes resultados para %CAP e GC, respectivamente. Nessa análise, os valores foram agrupados por semestre visando ampliar o número de amostras e obter maior precisão nos intervalos de incerteza.

As amplitudes de desvio padrão (eixo das abscissas) mostradas na Figura 3 nos permitem ordenar facilmente as obras em termos de variabilidade do %CAP, sendo a Obra 2 aquela com maiores desvios em oposição à Obra 3, que é a menos variável. Esse resultado está em consonância com as análises anteriores (subseção 3.1).

Os testes de hipótese realizados consideram um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Observa-se nas Figuras 3a e 3b que para ambos os testes o valor-p é inferior a 0,05. Desse modo, tanto a Obra 1 quanto a Obra 2 apresentam diferenças estatisticamente significativas em pelo menos um de seus semestres. Essa constatação é reforçada pela inexistência de sobreposição em alguns intervalos de incerteza para o %CAP.

De início, destaca-se o 3º semestre da Obra 1 (Figura 3a), o qual diferencia-se estatisticamente do 1º e 2º semestres, e apresenta os menores valores de desvio padrão para esta obra. Já na Obra 2 (Figura 3b), a variabilidade estimada para os dois primeiros semestres, os quais têm os maiores valores de desvio padrão, não guardam semelhança estatística com os quatro semestres subsequentes, indicando que há discrepância no perfil das variações ocorridas ao longo da execução. Por outro lado, a hipótese de igualdade de desvios padrão semestrais não foi rejeitada para a Obra 3 (Figura 3c), visto que o valor-p é superior ao nível de significância adotado e todos os intervalos de incerteza apresentam sobreposição mútua.

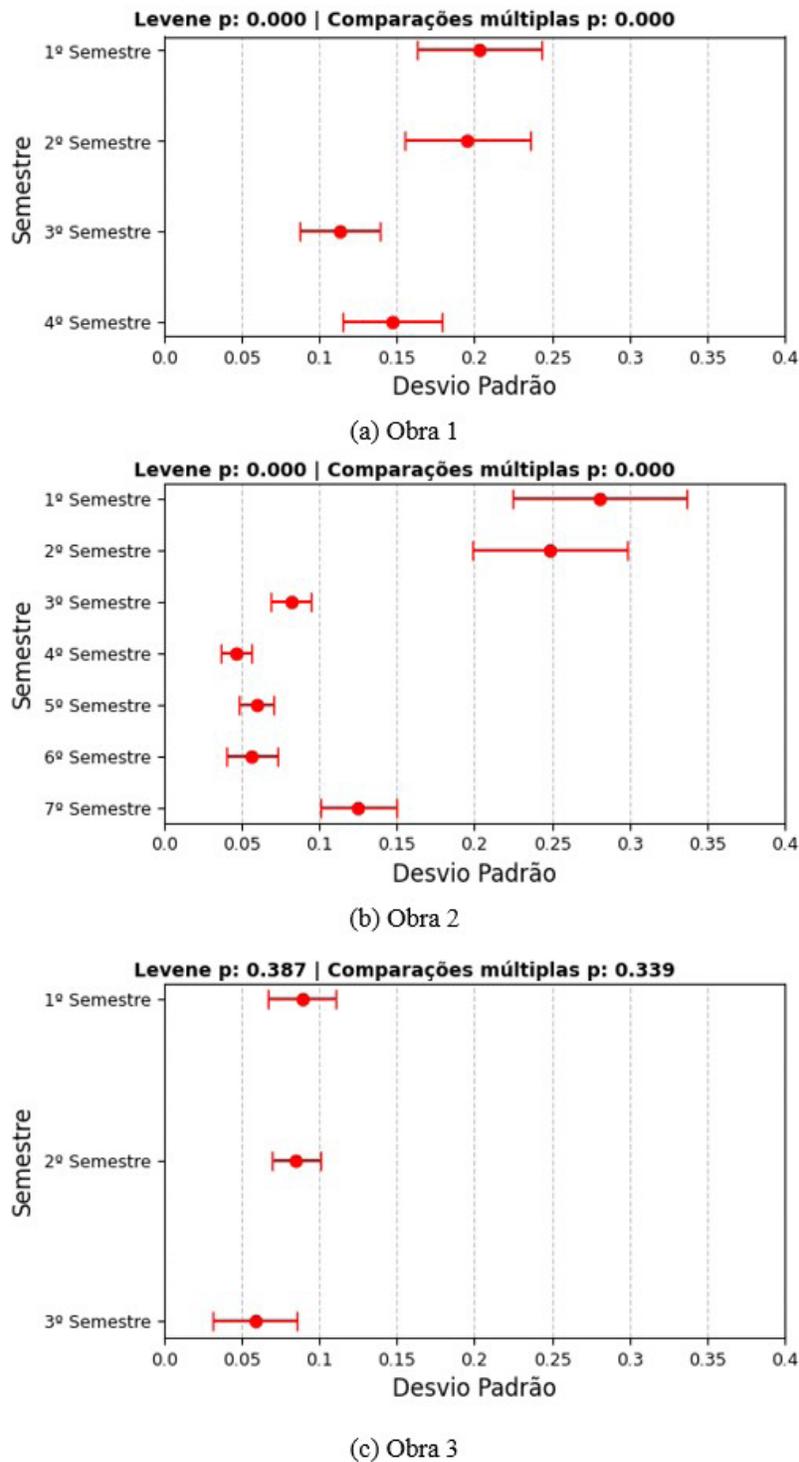


Figura 3: Testes de igualdade de desvios padrão para %CAP.

Os intervalos de incerteza para o GC mostrados na Figura 4 indicam que assim como para o %CAP, também há ocorrências de não sobreposição em alguns 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 4a e 4b, respectivamente). Observa-se, em ambos os casos, intervalos de incerteza sem sobreposição.

No caso da Obra 1 (Figura 4a), isso ocorre para o primeiro e último semestre, os quais se sobrepõem, mas não têm intercessão com os semestres intermediários. Para a Obra 2 (Figura 4b), o intervalo de incerteza estimado para o 1º semestre diverge significativamente de todos os 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 4c) não apresentou diferença estatística significativa em sua variabilidade executiva semestral, caracterizando melhor controle de qualidade.

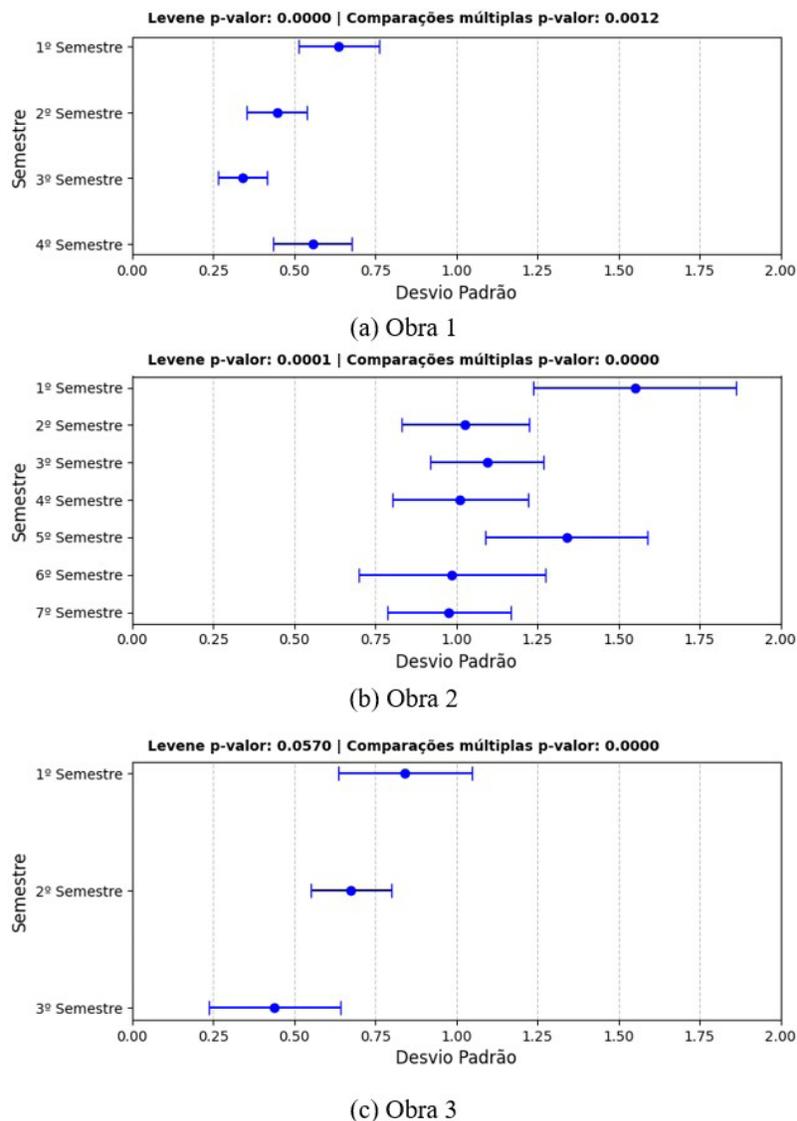


Figura 4: Testes de igualdade de desvios padrão para GC.

Das Figuras 3 e 4 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) para ambas as propriedades (%CAP e GC) 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 tanto da usinagem quanto 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.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descrição e a comparação sistemática das variabilidades das etapas de usinagem e 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 às etapas em análise (usinagem e 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 (DNER, 1997). 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.

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. Tudo isso pode ter sua eficiência potencializada com a inclusão de técnicas de ciências de dados, a qual permite a extração de *insights*, a identificação de tendências, a previsão de eventos futuros e a otimização de processos. 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, essas análises fornecem evidências importantes sobre as falhas de controle de qualidade em etapas específicas das obras de pavimentação e identificação de comportamento variado entre as obras. A identificação de pontos críticos de inconformidade, associada à variação do %CAP e do

GC, sugere que ajustes de processo e controles mais rigorosos devem ser implementados já nas primeiras fases das obras. Além disso, a análise reforça a necessidade de monitoramento contínuo, registro e análise da variabilidade no processo construtivo de obras para evitar inconformidades que possam comprometer o desempenho da pavimentação no longo prazo. 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.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

ELS: Conceitualização, Redação – rascunho original, revisão e edição, Análise formal, Metodologia, Visualização; ESC: Curadoria de dados, Análise formal; JLSF: Conceitualização, Metodologia, Redação – rascunho original, revisão e edição; JBSB: Supervisão, Redação – rascunho original, revisão e edição; JBS: Supervisão, Aquisição de financiamento, Redação – revisão e edição.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à 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

- AASHTO (2003) *Quality assurance guide specification*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Almeida, A.; S. Elian and J. Nobre (2008) 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. 241-60.
- Al-Qadi, I.L.; J. Rivera-Perez; H. Ozer et al. (2020) *Data Trends and Variability in Quality Control for Performance and Pay for Performance Specifications: Statistical Analysis* (No. FHWA-ICT-20-005). Illinois: Illinois Center for Transportation. DOI: 10.36501/0197-9191/20-006.
- Banga, S.J.; G.D. Fox (2013) *Multiple Comparisons Method: a Graphical Multiple Comparisons Procedure for Several Standard Deviations*. Washington, D.C.: Minitab.
- Bernucci, L.L.B.; L.M.G. Motta; J.A.P. Ceratti et al. (2022) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros* (2a ed.). Rio de Janeiro: Abeda.
- DNER (1997) *DNER PRO 277: Metodologia para Controle Estatístico de Obras e Serviços*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER (1994) *ME 053 - Misturas Betuminosas - Percentagem de Betume*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNIT (2004) *Norma DNIT 011/2004 - PRO: Gestão da Qualidade em Obras Rodoviárias - Procedimento*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2024) *Norma DNIT 031/2024 - ES: Pavimentação - Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- Garvin, D.A. (1992) *Gerenciando a Qualidade: a Visão Estratégica e Competitiva*. Rio de Janeiro: Qualitymark.

- Gonçalves, B.C.S.; D.D.S. Pereira; L.P. Specht et al. (2020) Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos. *Transportes*, v. 28, n. 3, p. 75-90. DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1841.
- Kassem, H.A.; S.S. Najjar and G.R. Chehab (2016) Probabilistic modeling of the inherent variability in the dynamic modulus master curve of asphalt concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2576, n. 1, p. 60-71. DOI: 10.3141/2576-07.
- Kassem, H.A.; S.S. Najjar and G.R. Chehab (2020) Effect of asphalt mixture components on the uncertainty in dynamic modulus master curves. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2674, n. 5, p. 135-48. DOI: 10.1177/0361198120914292.
- LCPC (2007) *Manuel LPC d'aide à la Formulation des Enrobés*. Paris: Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussés.
- Liu, P.; H. Xu; D. Wang et al. (2018) Comparison of mechanical responses of asphalt mixtures manufactured by different compaction methods. *Construction & Building Materials*, v. 162, p. 765-80. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.082.
- Liu, Q.; J. Hu; P. Liu et al. (2021) Uncertainty analysis of in-situ pavement compaction considering microstructural characteristics of asphalt mixtures. *Construction & Building Materials*, v. 279, p. 122514. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122514.
- Liu, Q.; S. Zhao; P. Li et al. (2017) 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. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001481.
- Mallick, R.B. (1999) Use of superpave gyratory compactor to characterize hot-mix asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1681, n. 1, p. 86-96. DOI: 10.3141/1681-11.
- Mohammad, L.N.; M. Elseifi; S.B. Cooper 3rd et al. (2013) Levels of variability in volumetric and mechanical properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 10, p. 1424-31. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000545.
- Montgomery, D.C. and G.C. Runger (2018) *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Nogueira, C. H (2017) *Testes para Comparações Múltiplas de Médias em Experimentos com Tendência e Dependência Espacial*. Tese (doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Santos, F.R.T. et al. (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*. São Paulo: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, p. 1156-1167.
- Sena, E.L. (2023) *Caracterização da Variabilidade Construtiva de Revestimentos Asfálticos Densos em Obras Rodoviárias Cearenses*. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado). Universidade Federal do Ceará, Crateús. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75401>> (acesso em 22/02/2024).
- Shewhart, W.A. (1939) *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*. New York: Dover Publications.
- SOP (2019) *SOP-ES-P 13/19: Concreto Asfáltico*. Fortaleza: Superintendência de Obras Públicas.
- Sul, A. L. (2014) *Avaliação de Métodos de Dosagem de Misturas Asfálticas e sua Relação com as Propriedades Mecânicas*. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres, v. 210.
- Vacková, P.; J. Valentin and A. Kotoušová (2017) Impact of lowered laboratory compaction rate on strength properties of asphalt mixtures. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 3, pp. 7. DOI: 10.1007/s41062-017-0111-6.

Apêndice 1. Indicação do número de amostras por medição

Tabela S1. Número de amostras por medição em cada obra

| Medições | Número de amostras | | |
|----------|--------------------|--------|--------|
| | Obra 1 | Obra 2 | Obra 3 |
| 1 | 30 | 10 | 46 |
| 2 | 30 | 25 | 7 |
| 3 | 6 | 15 | 11 |
| 4 | 18 | 20 | 39 |
| 5 | 30 | 20 | 14 |
| 6 | 15 | 5 | 35 |
| 7 | 39 | 40 | 27 |
| 8 | 21 | 10 | 3 |
| 9 | 9 | 20 | 9 |
| 10 | 45 | 25 | 7 |
| 11 | 48 | 10 | - |
| 12 | 54 | 60 | - |
| 13 | - | 45 | - |
| 14 | - | 20 | - |
| 15 | - | 40 | - |
| 16 | - | 55 | - |
| 17 | - | 20 | - |
| 18 | - | 30 | - |
| 19 | - | 30 | - |
| 20 | - | 20 | - |
| 21 | - | 30 | - |
| 22 | - | 15 | - |
| 23 | - | 10 | - |
| 24 | - | 20 | - |
| 25 | - | 20 | - |
| 26 | - | 20 | - |
| 27 | - | 30 | - |
| 28 | - | 10 | - |
| 29 | - | 20 | - |