



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ELIARDO SOARES COELHO**

**INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DOS DADOS NO**  
**CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE DE OBRAS E SERVIÇOS**  
**RODOVIÁRIOS**

**CRATEÚS**  
**2025**

ELIARDO SOARES COELHO

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DOS DADOS NO  
CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE DE OBRAS E SERVIÇOS RODOVIÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof. Me. Jorge Luis Santos  
Ferreira.

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S653i Coelho, Eliardo Soares.  
Influência da distribuição de probabilidade dos dados no controle estatístico da qualidade de obras e serviços rodoviários / Eliardo Soares Coelho. – 2025. 115 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2025.  
Orientação: Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira.
1. controle de qualidade. 2. pavimentação asfáltica. 3. DNER-PRO 277/97. 4. distribuição normal. I. Título.

CDD 620

---

ELIARDO SOARES COELHO

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DOS DADOS NO  
CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE DE OBRAS E SERVIÇOS RODOVIÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovada em: 12/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC) Campus de Crateús

---

Prof. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos (Examinadora externa)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Eng. Dra. Beatriz Chagas Silva Gouveia (Examinadora externa)

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

À Deus.

Aos meus pais, Elieuda e Raimundo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu Senhor Jesus, fonte de luz, sabedoria e força inabalável. Foi Ele quem me sustentou nos momentos de incerteza e me guiou até esta conquista.

Aos meus queridos pais, Elieuda e Raimundo, minha gratidão eterna por todo o amor, suporte e encorajamento que me ofereceram ao longo da minha jornada acadêmica. Sem vocês ao meu lado, este sonho não teria se tornado realidade. Aos meus irmãos Bianca, Abelardo e Eduardo, agradeço pelo apoio constante e por sempre estarem presentes nesta caminhada.

Ao Prof. Me. Jorge Luis, registro minha profunda gratidão pela orientação excepcional, paciência e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo desta jornada. Seu apoio, comprometimento e incentivo foram fundamentais para a realização deste trabalho. Além disso, a experiência adquirida em outros projetos sob sua supervisão foi enriquecedora e essencial para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos membros da banca avaliadora, agradeço pela disponibilidade, pelo tempo dedicado e pelas contribuições valiosas para o aprimoramento deste trabalho.

Aos meus amigos que estiveram comigo nesta trajetória universitária, meu sincero agradecimento. Em especial, ao Wellington, Jesus Lucas, Bruno, José Carlos e Daniel, que foram verdadeiros companheiros nesta jornada, oferecendo não apenas apoio acadêmico, mas também amizade, motivação e momentos inesquecíveis de descontração. Espero levar essa amizade para toda a vida.

Por fim, sou grato a todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo destes anos. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada aprendizado compartilhado foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

“Porque para Deus nada é impossível.”

(Lucas 1:37)

## RESUMO

O presente trabalho consistiu na análise da influência da distribuição de probabilidade dos dados no controle estatístico da qualidade de obras e serviços rodoviários, com foco no teor de ligante asfáltico (%CAP) e no percentual passante na peneira N° 200 (N° 200). A hipótese de normalidade dos dados adotada em normas como a DNER-PRO 277/97 é investigada por meio de análises estatísticas e simulações computacionais. A metodologia envolveu a coleta de dados de três obras rodoviárias no Ceará (Obra 1, Obra 2 e Obra 3), a realização de testes de normalidade (Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling) e o ajuste de distribuição de probabilidade. Além disso, o Método de Monte Carlo foi empregado para simular diferentes cenários e avaliar o impacto da distribuição dos dados nos percentuais de aceitação dos serviços. A distribuição log-logística apresentou o melhor ajuste para os dados do %CAP, enquanto a distribuição normal mostrou-se inadequada na maioria dos casos. Para o N° 200, não houve uma única distribuição que melhor se ajustasse simultaneamente aos dados das três obras. A distribuição log-normal foi a mais adequada para a Obra 1, enquanto a normal apresentou melhor ajuste na Obra 2, e a logística, na Obra 3. Os resultados mostraram que assumir a normalidade como premissa nos critérios de aceitação pode gerar distorções significativas. Na Obra 2, por exemplo, o percentual de aceitação do %CAP variou em até 18,0%, dependendo da distribuição adotada, evidenciando um viés de rejeição que impõe um risco maior do que o estimado para o executante. Assim, a adoção de distribuições estatísticas mais representativas pode aprimorar o controle de qualidade na pavimentação asfáltica, reduzindo erros na aceitação ou rejeição dos serviços e minimizando impactos técnicos e financeiros. Diante disso, recomenda-se a revisão dos critérios normativos e a ampliação dos estudos sobre o tema em diferentes condições de pavimentação.

**Palavras-chave:** controle de qualidade; pavimentação asfáltica; DNER-PRO 277/97; distribuição normal.

## ABSTRACT

This study analyzed the influence of probability distribution of data on the statistical quality control of road construction and maintenance services, focusing on asphalt binder content (%CAP) and percent passing the No. 200 sieve (No. 200). The assumption of data normality, as adopted in standards such as DNER-PRO 277/97, was investigated through statistical analysis and computer simulations. The methodology involved collecting data from three highway projects in Ceará (Obra 1, Obra 2, and Obra 3), performing normality tests (Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, and Anderson-Darling), and fitting probability distributions. Additionally, the Monte Carlo method was employed to simulate different scenarios and evaluate the impact of data distribution on service acceptance rates. The log-logistic distribution provided the best fit for the %CAP data, whereas the normal distribution proved inadequate in most cases. For No. 200, no single distribution best fitted the data from all three projects. The log-normal distribution was the most appropriate for Obra 1, while the normal distribution showed a better fit for Obra 2, and the logistic distribution was the best fit for Obra 3. The results demonstrated that assuming normality as a premise in acceptance criteria can lead to significant distortions. In Obra 2, for instance, the acceptance rate for %CAP varied by up to 18.0%, depending on the adopted distribution, showing a rejection bias, increasing the risk for the contractor beyond the estimated level. Thus, adopting more representative statistical distributions can enhance quality control in asphalt paving, reducing errors in service acceptance or rejection and minimizing technical and financial impacts. In light of these findings, it is recommended to review regulatory criteria and expand studies on the subject under different paving conditions.

**Keywords:** quality control; asphalt paving; DNER-PRO 277/97; normal distribution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das medidas de centralidade .....	25
Figura 2 – Relação entre as distribuições de probabilidade .....	28
Figura 3 – Tipos de distribuição de probabilidade .....	29
Figura 4 – Distribuição normal.....	30
Figura 5 – Relação entre os parâmetros $\mu$ e $\sigma$ com o formato da curva normal.....	31
Figura 6 – Probabilidades associadas à distribuição normal .....	31
Figura 7 – Distribuição normal padrão .....	32
Figura 8 – Distribuição exponencial para diferentes valores de $\lambda$ .....	33
Figura 9 – Distribuição log-normal para valores de $\sigma^2$ e $\mu = 1$ .....	34
Figura 10 – Distribuição de Weibull para valores de $\psi$ e $\delta = 1$ .....	35
Figura 11 – Distribuição gama para valores de $r$ e $\eta = 1$ .....	36
Figura 12 – Distribuição logística para valores de $\zeta$ e $\nu$ .....	37
Figura 13 – Distribuição log-logística para valores de $\gamma$ e $\theta$ .....	38
Figura 14 – Ensaio típico de aceitação de misturas asfálticas.....	44
Figura 15 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	46
Figura 16 – Gráficos de <i>outliers</i> .....	52
Figura 17 – Densidade de probabilidade do %CAP .....	55
Figura 18 – Gráficos de dispersão do %CAP .....	57
Figura 19 – Densidade de probabilidade do N° 200 .....	59
Figura 20 – Gráficos de dispersão do N° 200 .....	60
Figura 21 – Gráficos Q-Q para o %CAP .....	62
Figura 22 – Gráficos Q-Q para o N° 200.....	64
Figura 23 – Histograma e distribuições de probabilidade do %CAP .....	67
Figura 24 – Histograma e distribuições de probabilidade do N° 200 .....	69
Figura 25 – Percentual de aceitação para o %CAP – Obra 1 .....	70
Figura 26 – Variação do percentual de aceitação entre a log-logística e normal.....	71
Figura 27 – Percentual de aceitação para o %CAP – Obra 2 .....	72
Figura 28 – Percentual de aceitação para o %CAP – Obra 3 .....	73
Figura 29 – Percentual de aceitação para o N° 200 – Obra 1 .....	75
Figura 30 – Percentual de aceitação (%) $\times$ Valor de projeto (%) do N° 200.....	76
Figura 31 – Percentual de aceitação para o N° 200 – Obra 2 .....	77
Figura 32 – Percentual de aceitação para o N° 200 – Obra 3 .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de $k$ e $\alpha$ em função do tamanho da amostra .....	23
Tabela 2 – Alternativas de decisão .....	23
Tabela 3 – Valore de projeto .....	46
Tabela 4 – Teste de hipótese para verificar a normalidade dos dados .....	49
Tabela 5 – Hipóteses do teste de Grubbs .....	51
Tabela 6 – Número de amostras antes e depois de remover os <i>outliers</i> .....	53
Tabela 7 – Resumo estatístico do %CAP .....	53
Tabela 8 – Resumo estatístico do N° 200 .....	58
Tabela 9 – Resumo das análises de normalidade do %CAP .....	63
Tabela 10 – Resumo das análises de normalidade do N°200.....	65
Tabela 11 – Estatística AD do %CAP .....	66
Tabela 12 – Estatística AD do N° 200 .....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEQ	Controle Estatístico de Qualidade
CNT	Confederação Nacional de Trânsito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIE	Limite Inferior Especificado
LSE	Limite Superior Especificado
MCCM	Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VTM	Vazios na Mistura Total

## LISTA DE SÍMBOLOS

%CAP	Teor de ligante asfáltico
$f(x)$	Função distribuição de probabilidade
$H_a$	Hipótese alternativa
$H_o$	Hipótese nula
$k$	Coefficiente multiplicador
$M_o$	Moda
$n$	Tamanho amostral
$N$	Tamanho populacional
$N(\mu, \sigma^2)$	Notação da distribuição normal
Nº 200	Percentual passante na peneira Nº 200
$p$	Valor- $p$
$p_1$	Nível de qualidade aceitável
$p_2$	Nível de qualidade inaceitável
$r$	Parâmetro de forma da distribuição gama
$s$	Desvio padrão amostral
$S$	Espaço amostral de uma variável aleatória
$s^2$	Variância amostral
$W$	Variável aleatória da distribuição log-normal
$X$	Variável aleatória
$\tilde{x}$	Mediana
$\bar{x}$	Média amostral
$x_i$	Valores individuais da amostra
$y$	Dados brutos – Box-Cox e Yeo-Johnson
$y^{(\xi)}$	Dados transformados – Box-Cox e Yeo-Johnson
$Z$	Variável aleatória da distribuição normal padrão
$\Gamma(r)$	Função gama
$\alpha$	Risco do executante
$\beta$	Risco do contratante
$\gamma$	Parâmetro de forma da distribuição log-logística
$\delta$	Parâmetro de escala da distribuição Weibull
$\zeta$	Parâmetro de escala da distribuição logística

$\eta$	Parâmetro de escala da distribuição gama
$\theta$	Parâmetro de escala da distribuição log-logística
$\lambda$	Parâmetro da distribuição exponencial
$\mu$	Média populacional
$\nu$	Parâmetro de localização distribuição logística
$\xi$	Parâmetro de transformação – Box-Cox e Yeo-Johnson
$\sigma$	Desvio padrão populacional
$\sigma^2$	Variância populacional
$\chi^2$	Teste qui-quadrado
$\psi$	Parâmetro de forma da distribuição Weibull

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	18
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	19
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	19
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	19
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
<b>2.1</b>	<b>Conceito geral de qualidade</b> .....	20
<b>2.2</b>	<b>Qualidade em obras de engenharia</b> .....	21
<i>2.2.1</i>	<i>Construção civil</i> .....	21
<i>2.2.2</i>	<i>Pavimentação asfáltica</i> .....	21
<b>2.3</b>	<b>Controle Estatístico de Qualidade (CEQ)</b> .....	24
<i>2.3.1</i>	<i>Estatística descritiva</i> .....	24
<i>2.3.1.1</i>	<i>Medidas de tendência central</i> .....	24
<i>2.3.1.2</i>	<i>Medidas de dispersão</i> .....	26
<i>2.3.1.3</i>	<i>Medidas populacionais</i> .....	27
<b>2.4</b>	<b>Variáveis aleatórias e distribuição de probabilidade</b> .....	28
<i>2.4.1</i>	<i>Variáveis aleatórias</i> .....	28
<i>2.4.2</i>	<i>Distribuição de probabilidade</i> .....	29
<b>2.5</b>	<b>A questão da não normalidade dos dados</b> .....	38
<i>2.5.1</i>	<i>Testes de normalidade</i> .....	39
<i>2.5.2</i>	<i>Métodos para lidar com a não normalidade</i> .....	40
<i>2.5.3</i>	<i>A não normalidade na pavimentação asfáltica</i> .....	41
<b>2.6</b>	<b>Método de Monte Carlo</b> .....	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	44
<b>3.1</b>	<b>Limites das propriedades</b> .....	45
<b>3.2</b>	<b>Etapas metodológicas</b> .....	46
<i>3.2.1</i>	<i>Organização do banco de dados</i> .....	47
<i>3.2.2</i>	<i>Teste de outliers</i> .....	47
<i>3.2.3</i>	<i>Estatística descritiva</i> .....	48
<i>3.2.4</i>	<i>Teste de normalidade</i> .....	48

3.2.5	<i>Ajuste de distribuição de probabilidade</i> .....	49
3.2.6	<i>Método de Monte Carlo</i> .....	49
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	51
4.1	<b>Identificação de outliers</b> .....	51
4.2	<b>Estatística descritiva dos dados</b> .....	53
4.3	<b>Verificação da normalidade</b> .....	61
4.4	<b>Análise das distribuições de probabilidade</b> .....	66
4.5	<b>Impacto da não normalidade</b> .....	70
4.5.1	<i>Teor de ligante asfáltico</i> .....	70
4.5.2	<i>Percentual passante na peneira N° 200</i> .....	74
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	78
5.1	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	79
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80
	<b>APÊNDICE A – PLANILHA DE DADOS DA OBRA 1</b> .....	89
	<b>APÊNDICE B – PLANILHA DE DADOS DA OBRA 2</b> .....	98
	<b>APÊNDICE C – PLANILHA DE DADOS DA OBRA 3</b> .....	108
	<b>APÊNDICE D – CÓDIGO DO MÉTODO DE MONTE CARLO</b> .....	113

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O modal rodoviário desempenha um papel essencial no Brasil, sendo o principal meio de transporte de passageiros e mercadorias (Pereira; Pinheiro, 2021). Nesse sentido, 65% do transporte de cargas e 95% dos deslocamentos de passageiros ocorrem por meio das rodovias (CNT, 2024). No entanto, apesar de sua relevância, apenas 12,4% da malha brasileira é pavimentada, com uma densidade de 25,1 km de rodovias pavimentadas por mil km<sup>2</sup>, número significativamente inferior ao de países como China e Estados Unidos, cujas densidades superam 400 km/mil km<sup>2</sup> (CNT, 2023). Esses dados evidenciam a lacuna existente entre o Brasil e essas nações em termos de oferta de infraestrutura rodoviária.

A qualidade na construção rodoviária fundamenta-se tanto na execução quanto na conformidade com as especificações do projeto. Esse princípio está alinhado a um dos cinco conceitos de qualidade propostos por Garvin (1992), especificamente o conceito baseado na produção. Além disso, a qualidade pode ser interpretada como uma característica inversamente proporcional à variabilidade (Montgomery, 2009). Essas duas perspectivas são complementares e relevantes em obras rodoviárias, onde a conformidade com as normas e a consistência nos parâmetros de construção são essenciais para atender às expectativas e exigências dos usuários.

O controle de qualidade na pavimentação asfáltica envolve a execução de atividades simultâneas à realização dos serviços na construção rodoviária, utilizando técnicas operacionais que visam monitorar todas as etapas do ciclo de qualidade da obra (DNIT, 2004a). Nesse contexto, Mallick e El-Korchi (2013) destacam a importância de assegurar o cumprimento das especificações durante a construção, a fim de garantir a qualidade do projeto. Portanto, uma supervisão rigorosa sobre a mão de obra e os materiais utilizados é essencial para assegurar a excelência na engenharia rodoviária (Robinson; Thagesen, 2004).

O pavimento rodoviário é composto por múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final de terraplenagem, com a finalidade técnica e econômica de resistir aos esforços do tráfego e às ações climáticas, proporcionando aos usuários melhores condições de rolamento com maior conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.*, 2022). Nesse sentido, cada camada do pavimento possui funções específicas que devem suportar os esforços oriundos de cargas e ações climáticas sem sofrerem deterioração prematura (Ma *et al.*, 2021). Essa capacidade de resistência e durabilidade torna a pavimentação asfáltica a principal escolha para o revestimento de vias de rodagem, uma vez que atende de forma eficiente às

demandas estruturais e funcionais (Piracelli *et al.*, 2020). Dessa forma, a vida útil de um pavimento, em termos de serviço e desempenho, está relacionada ao seu correto dimensionamento, que busca evitar a ocorrência de defeitos estruturais como trincas por fadiga e deformações permanentes (Navarrete *et al.*, 2022).

O pavimento viário é classificado em três tipos: rígido, semirrígido e flexível. Os rígidos são compostos por uma camada de concreto de cimento Portland, enquanto os semirrígidos possuem revestimento asfáltico apoiado sobre uma base ou sub-base composta por materiais aglutinados por ligantes hidráulicos, como cimento e cal, ou por ligantes asfálticos, incluindo os convencionais, modificados ou emulsões (Bernucci *et al.*, 2022). Já os flexíveis são caracterizados pelo revestimento asfáltico assentado sobre as camadas de base, sub-base e subleito, permitindo que as deformações elásticas ocorram com o carregamento se distribuindo uniformemente entre todos os elementos estruturais (DNIT, 2006).

O controle estatístico da qualidade na execução de obras e serviços rodoviários no Brasil é regido pela norma DNER-PRO 277/97. Essa metodologia assume que os dados possuem um comportamento aproximadamente normal (DNER, 1997). A normalidade refere-se à adequação dos valores à distribuição normal ou gaussiana, que é amplamente utilizada em estudos de probabilidade e estatística (Rohatgi; Saleh, 2015). Nesse ínterim, a suposição de normalidade é crucial porque muitas técnicas estatísticas, como correlação, regressão, teste *t* e análise de variância, dependem dela para garantir a validade das inferências realizadas (Altman; Bland, 1995). Assim, se os dados não forem normais, as análises podem ser impactadas negativamente (Field, 2009).

## 1.2 Justificativa

A aceitação ou rejeição de obras e serviços rodoviários federais é regida pela norma DNER 277 (1997). Conforme mencionado anteriormente, esse procedimento fundamenta-se na hipótese de distribuição normal dos dados amostrais. Ademais, normas como DNIT 011 (2004), DNIT 031 (2024) e DNER-ES 385/99 a DNER-ES 395/99 também se baseiam na suposição da normalidade dos dados. No entanto, trabalhos mostram que esta premissa é frequentemente violada tanto para características da camada de revestimento asfáltico, quanto para as camadas de base e sub-base (Lopes; Castelo Branco; Soares, 2013; Vieira, 2022; Sena, 2023). Essa violação da normalidade pode comprometer a validade das inferências estatísticas e afetar diretamente as decisões sobre a aceitação ou rejeição de obras e serviços rodoviários. Por exemplo, uma camada de pavimento que aparenta estar dentro dos limites de aceitação pode,

na realidade, não atender aos requisitos exigidos devido a variações que não são modeladas adequadamente pela distribuição normal. Dessa forma, é imprescindível investigar como a distribuição de probabilidade dos dados pode afetar as decisões de aceitação ou rejeição de obras e serviços rodoviários no controle estatístico da qualidade.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo geral***

Avaliar a influência da distribuição de probabilidade dos dados sobre o controle estatístico da qualidade de obras e serviços rodoviários.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Investigar a hipótese de distribuição normal dos valores de características de misturas asfálticas densas;
- Estimar o impacto da distribuição de probabilidade dos dados sobre os critérios de aceitação ou rejeição de obras e serviços rodoviários.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

O trabalho é estruturado em cinco seções. A seção 1 introduz o problema de pesquisa, apresentando a justificativa e os objetivos. A seção 2 discute o referencial teórico, abordando conceitos sobre qualidade em obras de engenharia, controle estatístico da qualidade, distribuições de probabilidade e os impactos da não normalidade dos dados. Já a seção 3 descreve a metodologia, incluindo a organização do banco de dados, identificação de *outliers*, testes de normalidade, ajuste de distribuições e aplicação do Método de Monte Carlo. Na seção 4 é apresentado os resultados, destacando o impacto das distribuições de probabilidade na aceitação de obras rodoviárias e as implicações da suposição de normalidade. Por fim, a seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Conceito geral de qualidade

A busca pela qualidade tem sido uma constante na história da humanidade, refletindo a incessante aspiração por excelência e satisfação. Segundo Lins (2000) e Fazano (2006), a qualidade, em seus primórdios, era muitas vezes associada à habilidade artesanal e à durabilidade dos produtos. Todavia, atualmente, a qualidade é percebida como um atributo multifacetado que engloba não apenas a funcionalidade e a durabilidade, mas também a experiência do usuário (Garvin, 1992).

Para Crosby (1979), sob a ótica do processo produtivo, pode-se definir a qualidade como a adequação às especificações de projeto. Já Deming (1990) define-a como tudo aquilo que melhora sob a perspectiva do cliente. Nesse ínterim, o consumidor é considerado o componente central da cadeia de produção e, como tal, o produto deve ser projetado e fabricado de modo a satisfazer plenamente as expectativas do cliente. Campos (1992) reforça essa ideia, ao afirmar que a qualidade consiste em satisfazer as exigências do consumidor de maneira confiável, acessível e segura.

Juran (1995) define qualidade como a capacidade de satisfazer as demandas do cliente e a ausência de falhas. Ademais, Ishikawa (1993) argumenta que qualidade é a capacidade de desenvolver, projetar, fabricar e comercializar um produto que seja vantajoso economicamente, funcional e satisfatório para o consumidor. Esse conceito destaca a importância da satisfação do cliente e incorpora a ideia de melhoria contínua, ou seja, a busca por uma situação superior à anterior.

É perceptível que a maioria dos autores mencionados define qualidade focando na satisfação do cliente em relação ao produto. No entanto, Garvin (1992) argumenta que é pouco aconselhável restringir-se a uma única definição de qualidade, pois tal postura pode ser uma origem de problemas. Nesse viés, o autor supracitado define qualidade por intermédio de cinco abordagens: transcendente, baseada no produto, no usuário, na produção e no valor.

- Transcendente: não se pode definir qualidade com precisão, pois é uma propriedade simples, não passível de análise, que se aprende a reconhecer apenas pela experiência;

- Baseada no produto: qualidade é uma variável precisa e mensurável. Diferenças de qualidade se refletem em diferenças de quantidade de um determinado atributo desejado;
- Baseada no usuário: qualidade está relacionada à percepção do usuário, ou seja, a qualidade é igualada à satisfação máxima do cliente;
- Baseada na produção: qualidade refere-se ao nível em que um produto específico atende ao projeto ou especificação estabelecida;
- Baseada no valor: qualidade é a característica de um produto ou serviço que garante um desempenho ou conformidade a um preço ou custo aceitável.

Considerando as diversas perspectivas, a mais relevante para a construção rodoviária é a centrada na produção. Ao analisar o ciclo de projeto, desenvolvimento e produção de pavimentos, percebe-se que a ênfase recai na conformidade com normas técnicas, muitas vezes em detrimento das expectativas do usuário. Dessa forma, com o constante avanço tecnológico e a influência crescente da globalização, as empresas se veem compelidas a aprimorar sua eficiência operacional, assegurando a excelência em seus produtos (Decourt; Neves; Baldner, 2012).

## **2.2 Qualidade em obras de engenharia**

### ***2.2.1 Construção civil***

A qualidade na construção civil abrange aspectos como desempenho técnico, durabilidade, satisfação do cliente e conformidade com as especificações do projeto (Carpinetti, 2010). No entanto, esse setor ainda enfrenta desafios, incluindo desperdício excessivo, não conformidades e retrabalho, o que resulta em custos elevados na execução das obras (Yahya; Boussabaine, 2006). Para aprimorar os padrões de qualidade, é fundamental adotar uma abordagem multifacetada, considerando fatores como a qualificação da mão de obra e a escolha criteriosa de materiais (Souza, 1995).

### ***2.2.2 Pavimentação asfáltica***

No contexto das obras de pavimentação asfáltica, a qualidade é crucial e abrange fatores determinantes para o sucesso e durabilidade das infraestruturas. Conforme Soares

(2020), a engenharia viária enfrenta desafios significativos, como a caracterização precisa dos materiais, a previsão das cargas de tráfego, os impactos climáticos e do tempo sobre a resposta estrutural das camadas, além da qualificação da infraestrutura física e de pessoal. Além disso, um problema recorrente que compromete a qualidade final do pavimento é a discrepância entre o planejamento e a execução das obras.

Apesar dos avanços nos materiais asfálticos e nos métodos de construção, ainda são observados defeitos precoces nos pavimentos, elevando os custos de manutenção (Seo, 2010). No entanto, esses defeitos são difíceis de serem previstos em campo devido à complexidade dos materiais asfálticos (Kim *et al.*, 2008). Nesse contexto, Balbo (2007) indica que, no Brasil, a negligência ou a ausência de um controle de qualidade adequado é um dos principais problemas em obras rodoviárias.

Dentre as normas nacionais relativas à qualidade de obras rodoviárias, destaca-se o método DNIT 011/2004-PRO, que estabelece as diretrizes gerais para a gestão da qualidade em obras rodoviárias, abrangendo o planejamento, a implantação, a implementação e a verificação dos procedimentos e técnicas exigidos (DNIT, 2004a). Outro procedimento complementar é o DNER-PRO277/97, responsável pela definição da metodologia utilizada para o controle estatístico de obras e serviços rodoviários (DNER, 1997).

Além dessas normas, a especificação de serviço DNIT 031/2024-ES determina a sistemática para a produção de misturas asfálticas, abrangendo o controle de qualidade dos insumos e da execução, bem como a verificação final das camadas asfálticas (DNIT, 2024). Ademais, a norma DNIT 013/2004-PRO estabelece os requisitos necessários para garantir a qualidade na execução de obras rodoviárias, definindo diretrizes e critérios específicos para o planejamento, implementação e verificação do sistema de gestão da qualidade (DNIT, 2004b). Dentre as normas citadas, a DNER-PRO 277/97 assume grande relevância para este trabalho e, por esse motivo, será detalhada no tópico a seguir.

#### ▪ **DNER-PRO 277/97**

A norma DNER-PRO 277/97 tem como objetivo definir o procedimento a ser seguido no controle estatístico da qualidade da execução de obras e serviços rodoviários. Essa metodologia inclui o estabelecimento de um plano de amostragem, que pressupõe a aleatoriedade no processo de coleta das amostras, além de definir os riscos em aceitar ou rejeitar obras de pavimentação asfáltica (DNER, 1997).

Esse procedimento leva em consideração os riscos, os níveis de qualidade, o

número de amostras, a média e o desvio padrão para estabelecer os critérios de aceitação e rejeição de um serviço. Nesse sentido, a norma define os seguintes riscos e níveis de qualidade:

- $\alpha$  = risco do executante de ter rejeitado um serviço de boa qualidade;
- $\beta$  = risco do órgão de aceitar um serviço de má qualidade;
- $p_1$  = nível de qualidade aceitável ou percentagem máxima de defeitos que caracterizam um serviço de boa qualidade;
- $p_2$  = nível de qualidade inaceitável ou percentagem mínima de defeitos que caracterizam um serviço de má qualidade.

A partir do tamanho da amostra ( $n$ ), é possível determinar, através da Tabela 1, os valores do coeficiente multiplicador ( $k$ ) e o risco do executante ( $\alpha$ ). A norma estabelece como referência os valores de  $\beta = 10\%$ ,  $p_1 = 5\%$  e  $p_2 = 25\%$ .

Tabela 1 – Valores de  $k$  e  $\alpha$  em função do tamanho da amostra

Amostragem variável														
$n$	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	19	21
$k$	1,55	1,41	1,36	1,31	1,25	1,21	1,16	1,13	1,11	1,10	1,08	1,06	1,04	1,01
$\alpha$	0,45	0,35	0,30	0,25	0,19	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01

Fonte: Adaptado da DNER (1997).

A qualidade do serviço executado para fins de aceitação ou rejeição é quantificada através do cálculo das variáveis  $\bar{x} \pm ks$ . A média amostral é denotada por  $\bar{x}$ , enquanto  $s$  representa o desvio padrão amostral. Assim, a decisão de aceitação ou rejeição é feita comparando as variáveis mencionadas com o Limite Inferior de Especificação (LIE) e o Limite Superior de Especificação (LSE), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Alternativas de decisão

Se	Decisão
$\bar{x} - ks < \text{LIE}$ ou $\bar{x} + ks > \text{LSE}$	Rejeita-se
$\bar{x} - ks \geq \text{LIE}$ e $\bar{x} + ks \leq \text{LSE}$	Aceita-se

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que o valor de  $k$  influencia diretamente na aceitação e rejeição do serviço. Desse modo, o aumento de  $k$  reduz o valor de  $\bar{x} - ks$  (que deve ser superior ao LIE) e

eleva o valor de  $\bar{x} + ks$  (que deve ser inferior ao LSE). Assim, com o aumento do valor de  $k$ , espera-se um acréscimo no número de produtos rejeitados.

Uma das premissas adotadas na DNER-PRO 277/97 é que a variável aleatória  $\bar{x} \pm ks$  seja aproximadamente normal. Essa hipótese implica que todas as decisões de aceitação ou rejeição presumem que os dados coletados durante a execução de obras e serviços rodoviários se ajustem, ou se aproximem, de uma distribuição normal.

## 2.3 Controle Estatístico de Qualidade (CEQ)

O Controle Estatístico da Qualidade (CEQ) é uma metodologia fundamental para monitoramento e manutenção da qualidade em processos produtivos, utilizando ferramentas estatísticas para avaliar e melhorar continuamente a qualidade de produtos e serviços (Lamprecht, 1992). Sua principal função é garantir que os produtos atendam aos padrões de qualidade esperados, empregando gráficos de controle e outras técnicas para analisar a variabilidade dos processos e detectar desvios ou falhas no processo de produção (Da Silva *et al.*, 2018). Assim, através de análises estatísticas, o CEQ permite tomar decisões sobre a aceitação ou rejeição de produtos, além de identificar possíveis falhas na gestão da qualidade, fornecendo sugestões para aprimorar os processos e produtos (Hairiyah; Amalia; Luliyanti, 2019; Kusuma *et al.*, 2023).

Uma das ferramentas essenciais utilizadas no CEQ é a estatística descritiva, que desempenha um papel crucial na análise e interpretação dos dados de qualidade. Ela oferece informações detalhadas sobre a distribuição, a centralização e a dispersão dos dados, possibilitando uma compreensão mais profunda dos padrões de qualidade e ajudando a identificar variações e tendências no processo (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2005).

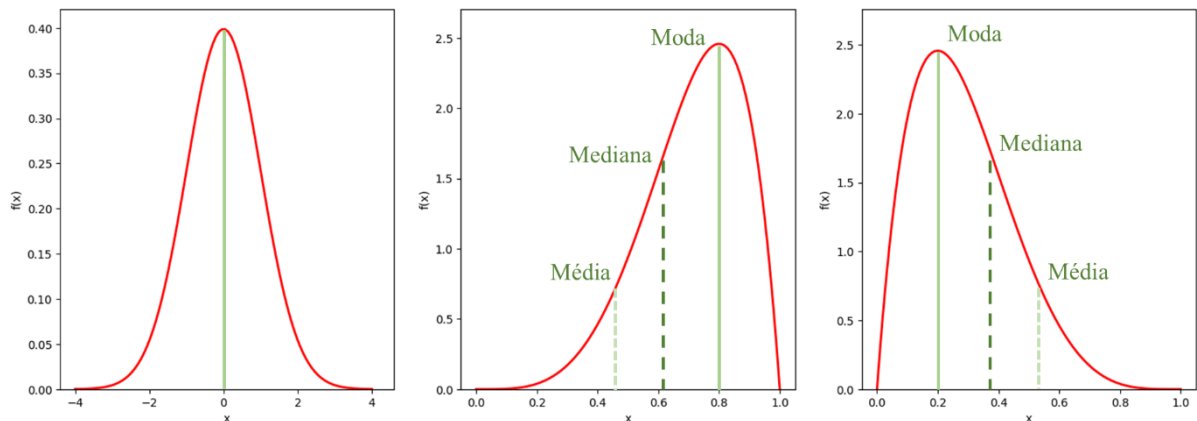
### 2.3.1 Estatística descritiva

#### 2.3.1.1 Medidas de tendência central

As medidas de centralidade, também denominadas medidas de tendência central, são essenciais em análises estatísticas e consistem em três principais tipos: a média, ou média aritmética, que é a mais amplamente empregada, a mediana, que ocupa a segunda posição em termos de aplicação, e a moda, que é a menos recorrente das três (Quevedo, 2011).

Não há uma relação matemática entre a média, moda e mediana no sentido de que, se for conhecido o valor de uma dessas medidas, não é possível determinar as medidas faltantes sem usar os valores dos dados (Gupta; Guttman; Jayalath, 2020). No entanto, tais medidas fornecem informações úteis sobre a forma da distribuição de frequência dos dados, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição das medidas de centralidade



Distribuição simétrica

Assimetria à esquerda

Assimetria à direita

Média = Mediana = Moda

Média < Mediana < Moda

Moda < Mediana < Média

Fonte: Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 1, um conjunto de dados é classificado como simétrico quando os valores equidistantes da média ocorrem com igual frequência em ambos os lados. A assimetria à esquerda ocorre quando a cauda da distribuição se estende para a esquerda, concentrando a maior parte dos dados à direita da média. De maneira similar, a assimetria à direita ocorre quando os valores abaixo da mediana têm uma frequência maior, resultando em uma dispersão para a direita. A seguir, são detalhados os conceitos relacionados às medidas de tendência central.

#### ▪ Média amostral ( $\bar{x}$ )

A média amostral é determinada somando todas as medidas da amostra e dividindo pelo número total de observações (Devore, 2006). Essa medida é representada por  $\bar{x}$ , enquanto o número de elementos é designado por  $n$ . Sua definição é expressa na Equação 1.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

- **Mediana ( $\tilde{x}$ )**

A mediana pode ser considerada como o valor dos dados que divide exatamente a amostra ao meio, com metade das observações menores que a mediana e a outra metade maior (Montgomery, 2009). Dessa forma, segundo Walpole *et al.* (2017), para  $n$  valores de uma amostra, dispostas em ordem crescente de magnitude, a mediana  $\tilde{x}$  pode ser determinada pela Equação 2.

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{(n+1)/2}, & \text{se } n \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2}(x_{n/2} + x_{n/2+1}), & \text{se } n \text{ é par} \end{cases} \quad (2)$$

- **Moda ( $Mo$ )**

A moda de um conjunto de dados corresponde ao valor que ocorre com maior frequência (Grami, 2020). Embora seja a medida de centralidade menos utilizada, seu conceito é particularmente útil em pesquisas que envolvem dados qualitativos (Gouveia, 2018).

### 2.3.1.2 Medidas de dispersão

As medidas de tendência central proporcionam uma visão limitada de um conjunto de dados ou de uma distribuição, já que diferentes amostras podem compartilhar medidas centrais idênticas, mas divergir significativamente em outros aspectos essenciais (Devore, 2006). Ademais, segundo King e Eckersley (2019), as medidas de tendência central não fornecem informações sobre dispersão, variação ou amplitude. Nesse viés, existem duas medidas principais para resumir a dispersão dos dados: variância e desvio padrão amostral.

- **Variância amostral ( $s^2$ )**

A variância amostral quantifica a dispersão ou variabilidade de um conjunto de dados, representando o grau em que os valores se afastam da média. Assim, quanto maior for

essa variação, maior será o valor da variância (Montgomery; Rugenr, 2009). Assim, essa medida é calculada pela Equação 3.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3)$$

Em que  $n$  é o tamanho da amostra,  $\bar{x}$  é a média amostral e  $x_i$  são os valores individuais da amostra.

▪ **Desvio padrão amostral ( $s$ )**

O desvio padrão amostral corresponde à raiz quadrada da variância (Ross, 2009). Dessa forma, seu cálculo é representado pela Equação 4.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

*2.3.1.3 Medidas populacionais*

A população pode ser descrita como o conjunto de todos os elementos de interesse para análise estatística, enquanto a amostra é uma parte representativa da população selecionada para estudo, sendo utilizada para inferir a média e o desvio padrão da população (Whitley; Ball, 2002; Kim, 2015). Desse modo, as principais medidas populacionais são a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ), determinadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (6)$$

Em que  $N$  é o tamanho da população e  $x_i$  são os valores individuais correspondentes. Observa-se que, o desvio padrão populacional é a raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios em relação à média populacional (Decoursey, 2003).

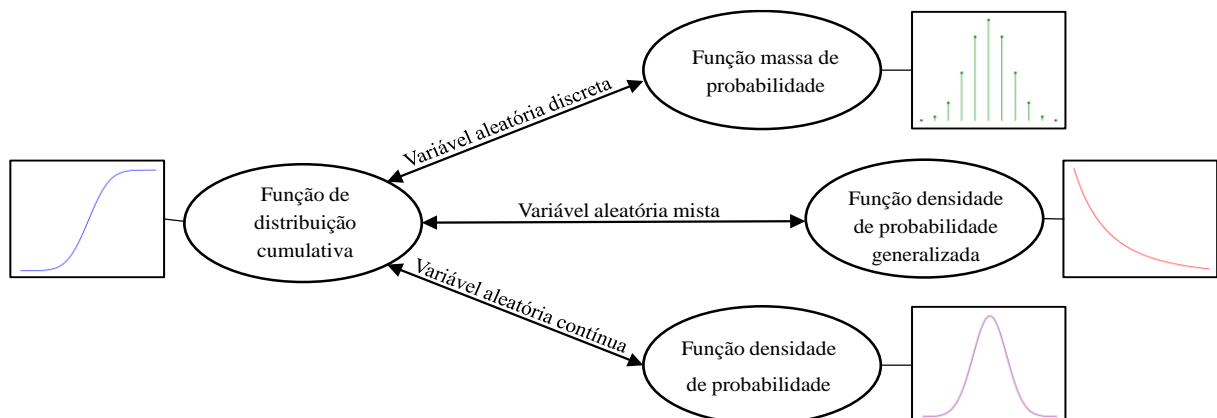
## 2.4 Variáveis aleatórias e distribuição de probabilidade

### 2.4.1 Variáveis aleatórias

Antes de abordar a distribuição de probabilidade, é essencial compreender o conceito de variáveis aleatórias, pois elas representam numericamente os possíveis resultados de um experimento aleatório. Segundo Grami (2020), uma variável aleatória  $X$  é uma função determinística que associa um número real a cada resultado no espaço amostral  $S$ . Nesse âmbito, as variáveis aleatórias se dividem em dois tipos principais: discretas e contínuas. Vale ressaltar que algumas variáveis aleatórias não se limitam apenas a essas categorias, mas apresentam uma combinação de ambas. Nesse caso, são denominadas variáveis aleatórias mistas, pois apresentam um intervalo que abrange partes contínuas e discretas.

Uma variável aleatória é classificada como discreta quando o conjunto de seus possíveis resultados é contável, enquanto uma variável aleatória que pode assumir valores em um intervalo contínuo é denominada contínua (Walpole *et al.*, 2017). Toda variável aleatória possui uma função de distribuição cumulativa, que sintetiza suas propriedades probabilísticas. No entanto, a variável aleatória discreta é definida por uma função massa de probabilidade, enquanto a contínua é caracterizada por uma função densidade de probabilidade (Grami, 2020). Essa relação é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Relação entre as distribuições de probabilidade



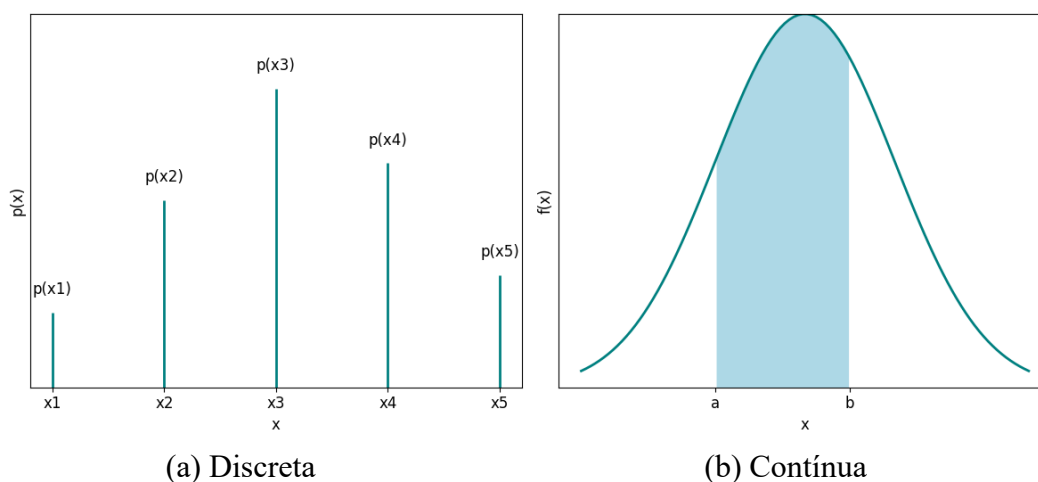
Fonte: Adaptado de Grami (2020).

### 2.4.2 Distribuição de probabilidade

Uma distribuição de probabilidade é um modelo matemático que estabelece a relação entre os valores da variável e suas respectivas probabilidades de ocorrência na população (Montgomery, 2009). Assim, existem dois tipos de distribuições de probabilidade, conforme descrito a seguir e representado na Figura 3.

- Distribuições de probabilidade discreta: quando a variável assume apenas determinados valores, por exemplo, os números naturais;
- Distribuições de probabilidade contínua: quando a variável a ser medida é expressa em uma escala contínua.

Figura 3 – Tipos de distribuição de probabilidade



Fonte: Autor (2025).

As principais distribuições de probabilidade discreta são: uniforme discreta, binomial, geométrica, binomial negativa, hipergeométrica e de Poisson. Entretanto, este trabalho não se aprofundará nessas distribuições, pois as distribuições de probabilidade contínua, como a normal, são mais úteis para descrever dados de obras rodoviárias. A seguir, serão apresentadas as principais distribuições de probabilidade contínua.

#### ▪ Distribuição normal

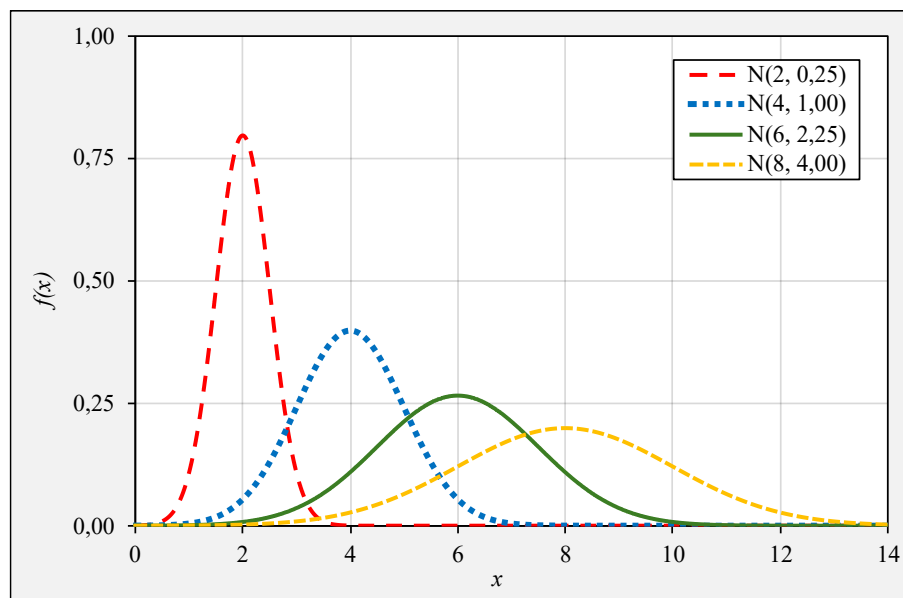
A distribuição normal, também denominada de gaussiana e representada pela notação  $N(\mu, \sigma^2)$ , é uma das distribuições mais importantes em estudos de probabilidade e

estatística (Trivedi, 2016). Ainda segundo o autor, essa distribuição possui um papel crucial em aplicações estatísticas devido ao Teorema Central do Limite, o qual estabelece que a média de uma amostra de  $n$  variáveis aleatórias mutuamente independentes (com média e variância finitas) é normalmente distribuída no limite  $n \rightarrow \infty$ . Assim, a distribuição normal é dada pela Equação 7.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, -\infty < x < \infty \quad (7)$$

Em que  $\mu$  e  $\sigma$  representam, respectivamente, a média e o desvio padrão populacional, com  $-\infty < \mu < \infty$  e  $\sigma > 0$ . Segundo Bussab e Morettin (2017), a aparência visual da distribuição normal é uma curva simétrica, conforme mostrado na Figura 4.

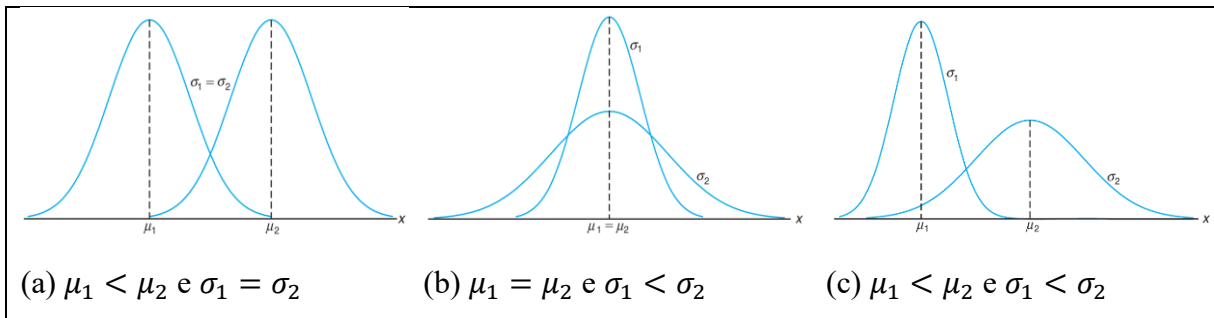
Figura 4 – Distribuição normal



Fonte: Autor (2025).

A Figura 5 ilustra a influência dos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  na distribuição normal em três situações distintas. Na Figura 5a, as curvas possuem o mesmo desvio padrão, porém médias diferentes, o que resulta em formas idênticas, mas deslocadas ao longo do eixo horizontal. Na Figura 5b, as curvas apresentam médias iguais, porém diferentes valores de desvio padrão, de modo que a curva com maior desvio padrão exibe uma dispersão mais acentuada e uma maior quantidade de valores extremos. Por fim, na Figura 5c, as curvas têm valores distintos para a média e desvio padrão, refletindo essas variações em suas formas e posições no eixo horizontal.

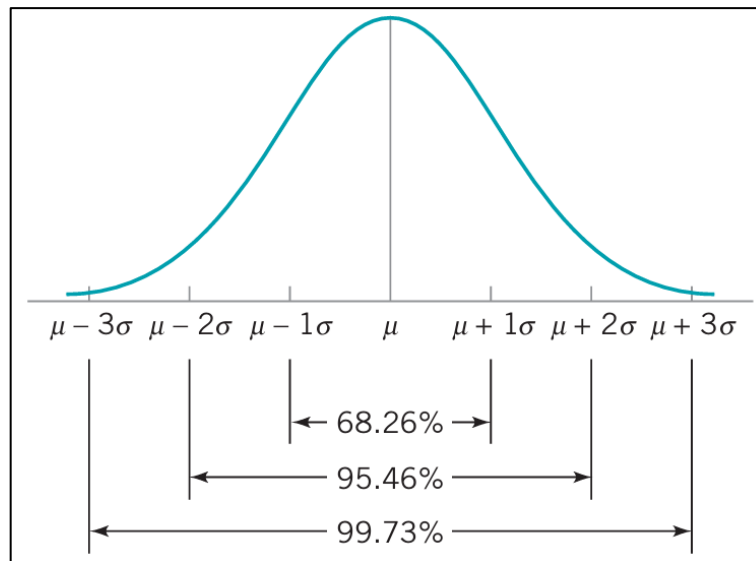
Figura 5 – Relação entre os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  com o formato da curva normal



Fonte: Adaptado de Walpole *et al.* (2017).

De acordo com Montgomery (2009), em uma distribuição normal, 68,26% dos valores da população estão dentro do intervalo  $(\mu \pm \sigma)$ , 95,46% estão entre  $(\mu \pm 2\sigma)$  e 99,73% se encontram dentro de  $(\mu \pm 3\sigma)$ . Esses resultados são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Probabilidades associadas à distribuição normal



Fonte: Montgomery (2009).

#### ▪ Distribuição normal padrão

Segundo Darbyshire e Hampton (2014), se uma distribuição normal possuir  $\mu = 0$  e  $\sigma = 1$ , então é denominada distribuição normal padrão. Dessa forma, para converter uma variável aleatória de uma distribuição normal em uma normal padrão, aplica-se a Equação 8.

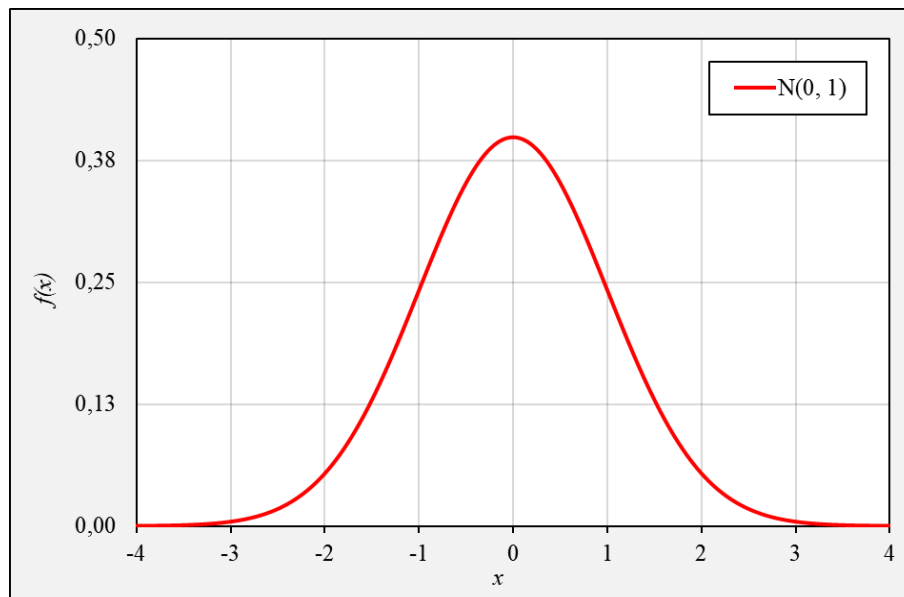
$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (8)$$

Em que  $X$ ,  $\mu$  e  $\sigma$  representam a variável aleatória, a média e o desvio padrão da distribuição normal original, respectivamente, enquanto  $Z$  denota o valor padronizado. Nesse sentido, a distribuição normal padrão é descrita pela Equação 9.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, -\infty < x < \infty \quad (9)$$

Semelhante à distribuição normal, a distribuição normal padrão também possui uma curva simétrica. No entanto, está centrada em zero e seus valores de dispersão são normalizados em unidades de desvio padrão, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Distribuição normal padrão



Fonte: Autor (2025).

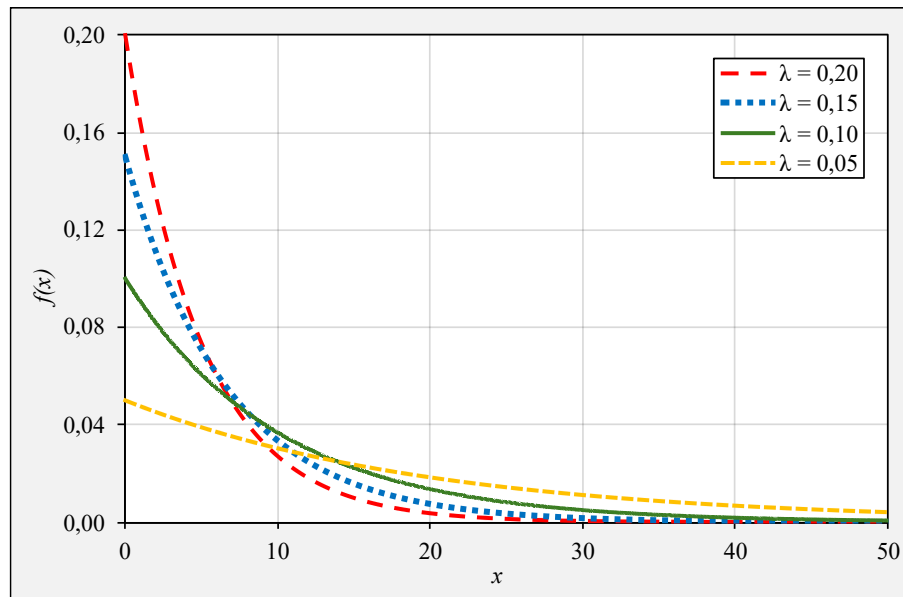
#### ▪ Distribuição exponencial

A família de distribuições exponenciais fornece modelos probabilísticos amplamente utilizados em engenharia e em diversas disciplinas científicas (Devore, 2006). Na prática, esses modelos são empregados para estimar o tempo esperado até a ocorrência de um evento (Ross, 2009; Kissell; Poserina, 2017). Assim, a distribuição exponencial é determinada pela Equação 10.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, 0 \leq x < \infty \quad (10)$$

Com o parâmetro  $\lambda > 0$  sendo uma constante. A média e o desvio padrão da distribuição exponencial são iguais a  $1/\lambda$  (Ross, 2010). A Figura 8 apresenta diferentes distribuições exponenciais.

Figura 8 – Distribuição exponencial para diferentes valores de  $\lambda$



Fonte: Autor (2025).

#### ▪ Distribuição log-normal

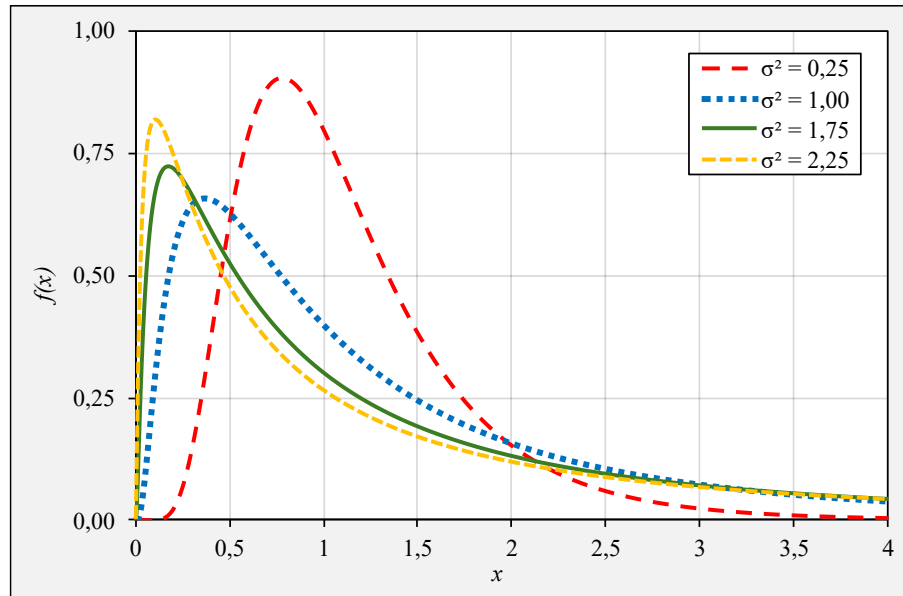
A distribuição log-normal é aplicável em situações em que a transformação do logaritmo natural resulta em uma distribuição normal (Walpole *et al.*, 2017). Além disso, é amplamente empregada em finanças para modelar preços de ações (Siegel, 2012) e pode simular as distribuições de Poisson e a binomial negativa (Taylor, 2019). Assim, a distribuição log-normal é dada pela Equação 11.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], 0 < x < \infty \quad (11)$$

Em que os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  representam a média e o desvio padrão, respectivamente. Porém, é importante mencionar que essas medidas se referem a variável aleatória  $W$ , com  $X =$

$\exp(W)$  (Montgomery; Rugenr, 2009). Nesse âmbito, a Figura 9 ilustra a distribuição log-normal.

Figura 9 – Distribuição log-normal para valores de  $\sigma^2$  e  $\mu = 1$



Fonte: Autor (2025).

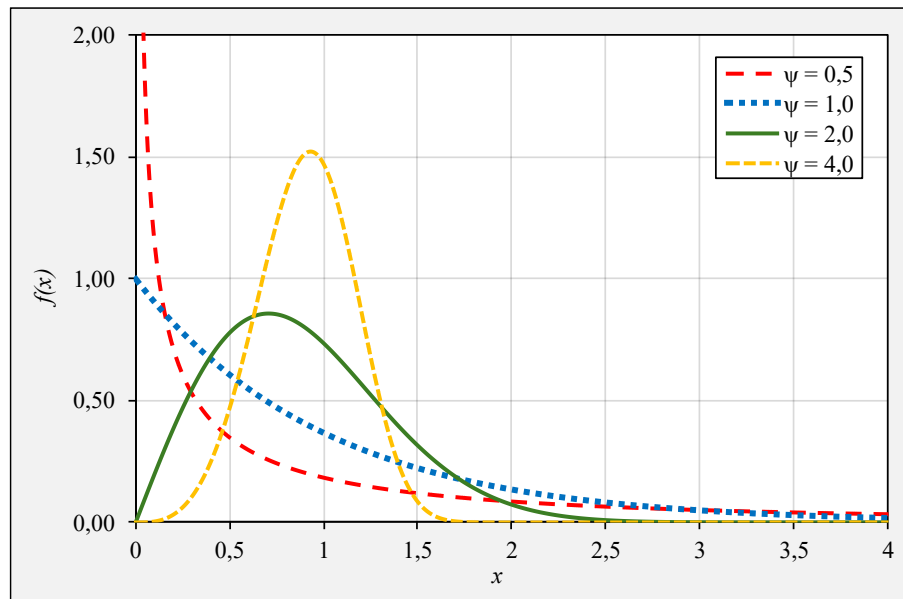
#### ▪ Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é frequentemente empregada para modelar o tempo até a ocorrência de falhas em diversos sistemas físicos distintos. Os parâmetros dessa distribuição oferecem uma considerável flexibilidade para modelar sistemas nos quais o número de falhas aumenta, diminui ou permanece constante ao longo do tempo (Montgomery; Rugenr, 2009). Além disso, segundo Hubbard (1996), são utilizadas para estudar a vida útil e as taxas de falha de produtos. Nesse sentido, a distribuição de Weibull é determinada pela Equação 12.

$$f(x) = \frac{\psi}{\delta} \left(\frac{x}{\delta}\right)^{\psi-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\delta}\right)^\psi\right], x > 0 \quad (12)$$

Em que  $\delta > 0$  é o parâmetro de escala e  $\psi > 0$  é o parâmetro de forma. Convém ressaltar que, quando  $\psi = 1$ , a distribuição de Weibull é idêntica à distribuição exponencial, com  $\lambda = 1/\delta$ . Nesse contexto, a Figura 10 ilustra a distribuição de Weibull.

Figura 10 – Distribuição de Weibull para valores de  $\psi$  e  $\delta = 1$



Fonte: Autor (2025).

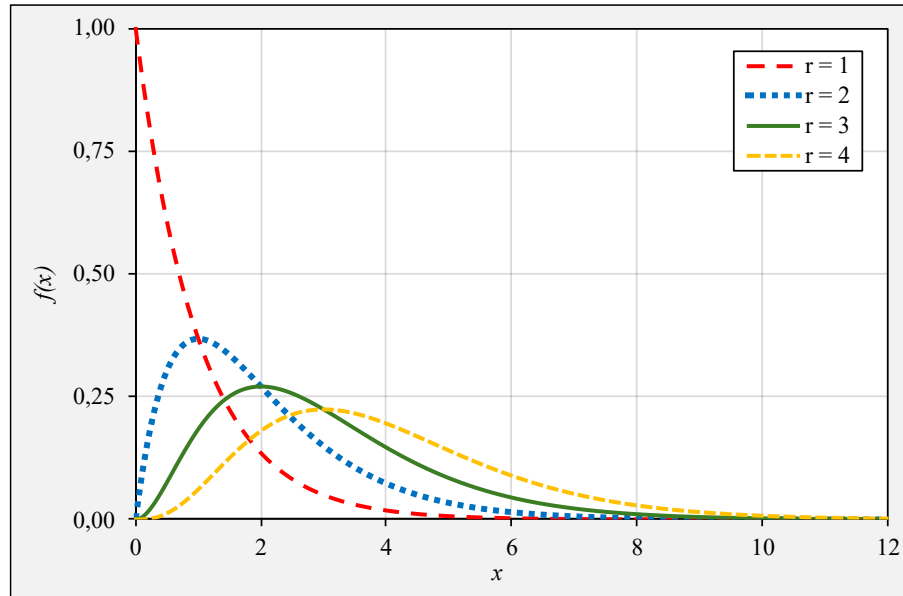
#### ▪ Distribuição gama

A distribuição gama é uma função de densidade fundamental em diversas aplicações, como problemas de confiabilidade, e tem sido amplamente estudada em várias áreas da matemática (Mitra, 2016). Nesse viés, a distribuição gama, descrita pela Equação 13, é ilustrada na Figura 11.

$$f(x) = \frac{\eta}{\Gamma(r)} (\eta x)^{r-1} e^{-\eta x}, x > 0 \quad (13)$$

Em que  $r > 0$  é o parâmetro de forma e  $\eta > 0$  é o parâmetro de escala. Observa-se que, quando  $r = 1$ , a distribuição gama se reduz à distribuição exponencial. Ademais, a função gama é determinada pela Equação 14.

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} x^{r-1} e^{-x} dx, r > 0 \quad (14)$$

Figura 11 – Distribuição gama para valores de  $r$  e  $\eta = 1$ 

Fonte: Autor (2025).

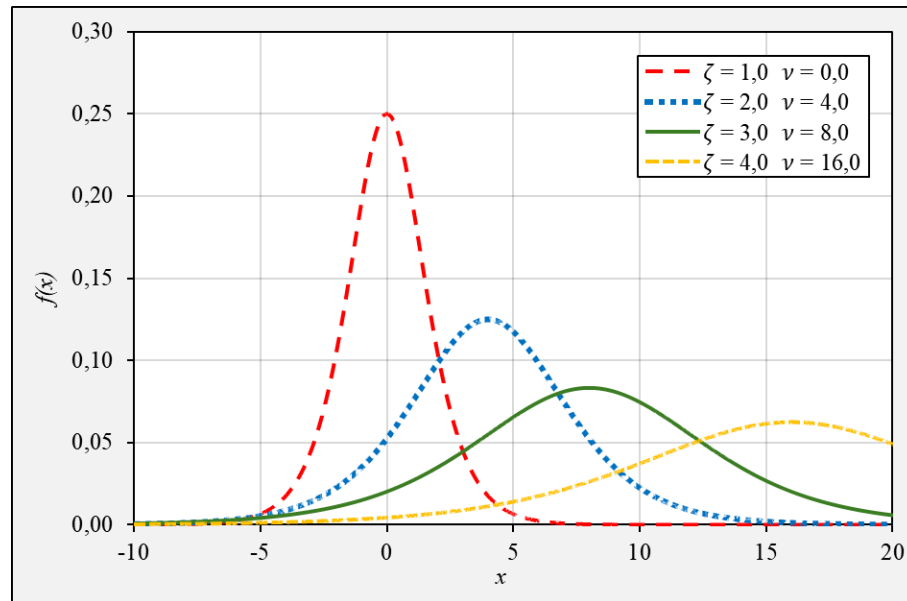
#### ▪ Distribuição logística

Segundo Kissell e Poserina (2017), a distribuição logística é uma função de distribuição contínua amplamente utilizada em diversas áreas. Suas funções densidade de probabilidade e distribuição cumulativa são aplicadas em modelos como regressão logística e redes neurais. Além disso, essa distribuição tem sido empregada em ciências físicas, modelagem esportiva e, mais recentemente, no setor financeiro. Comparada à distribuição normal, a distribuição logística apresenta caudas mais largas, tornando-a mais aderente aos dados subjacentes e proporcionando uma melhor compreensão da probabilidade de eventos extremos. A expressão geral da função de densidade de probabilidade logística é dada pela Equação 15.

$$f(x) = \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{e^{-\left(\frac{x-\nu}{\zeta}\right)}}{\left[1 + e^{-\left(\frac{x-\nu}{\zeta}\right)}\right]^2}, \zeta > 0 \quad (15)$$

Onde  $\nu$  é o parâmetro de localização e  $\zeta$  é o parâmetro de escala. A Figura 12 ilustra a distribuição logística.

Figura 12 – Distribuição logística para valores de  $\zeta$  e  $\nu$



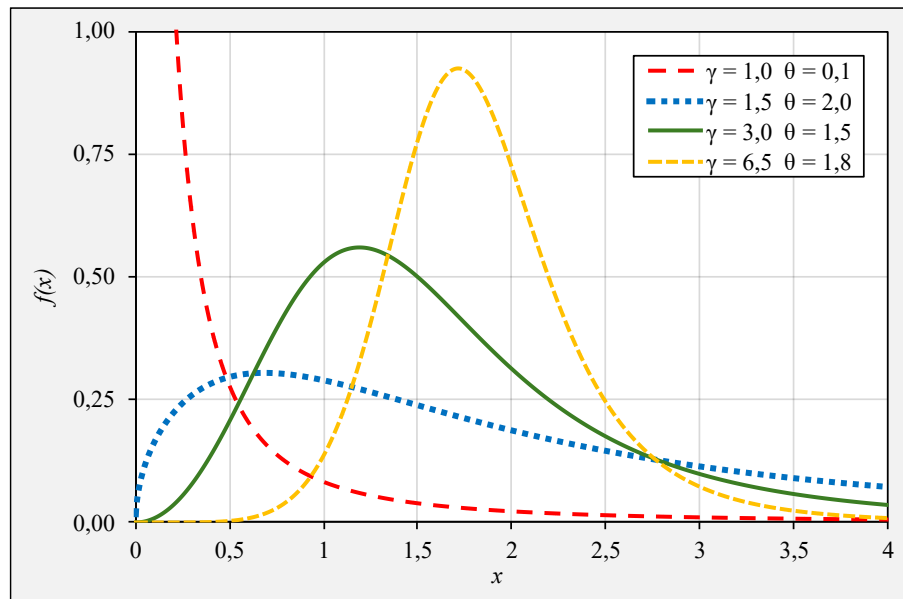
Fonte: Autor (2025).

#### ▪ Distribuição log-logística

A distribuição log-logística é uma distribuição de probabilidade contínua utilizada para modelar dados de tempo de vida, sendo relevante na análise de sobrevivência, engenharia de confiabilidade e finanças (Lemonte, 2014). Ela é uma escolha eficaz quando outras distribuições tradicionais, como Weibull e gama, não são aplicáveis (Trivedi, 2016). Assim, a distribuição log-logística pode ser escrita da seguinte forma (Shoukri; Mian; Tracy, 1988):

$$f(x) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\gamma-1} \left(1 + \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\gamma}\right)^{-2}, x > 0 \quad (16)$$

Em que  $\gamma > 0$  é o parâmetro de forma e  $\theta > 0$  é o parâmetro de escala. Nesse sentido, a Figura 13 apresenta a distribuição log-logística para diversos valores dos parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$ .

Figura 13 – Distribuição log-logística para valores de  $\gamma$  e  $\theta$ 

Fonte: Autor (2025).

## 2.5 A questão da não normalidade dos dados

A não normalidade ocorre quando uma variável que descreve um fenômeno segue qualquer distribuição de probabilidade que não seja a normal. Essa condição é evidente quando há restrições nos valores das observações ou quando a distribuição apresenta caudas pesadas ou distorções significativas em relação à distribuição normal (Pino, 2014). A não normalidade pode impactar severamente a análise estatística, pois, se as suposições de normalidade não forem atendidas, as conclusões das análises podem ser equivocadas (Xu; Li; Song, 2013).

Diversos procedimentos são utilizados para verificar se os dados se ajustam à distribuição normal. A análise gráfica, por meio de histogramas de frequência, *box-plots* e gráficos Q-Q (quantil-quantil), oferece uma visualização prática do comportamento dos dados, embora a interpretação possa ser subjetiva e não fornecer uma confirmação definitiva da normalidade (Ferreira, 2008; Field, 2009; Hair *et al.*, 2009). Ademais, pode-se analisar indiretamente a normalidade ao contrastar os valores de assimetria e curtose esperados na distribuição normal com os valores obtidos nos dados amostrais (Santos; Ferreira, 2003). Além desses métodos indiretos, diversos testes estatísticos foram desenvolvidos, como os de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk e Anderson-Darling.

Quando a suposição de normalidade não é atendida, uma alternativa comum é a aplicação de transformações nos dados para aproximá-los de uma distribuição normal. Entre os métodos disponíveis, a transformação de Box-Cox é muito recomendada, pois permite

identificar a melhor transformação dos dados com base na adição de um valor que maximize o estimador de máxima verossimilhança e minimize o resíduo (Box; Cox, 1964; Kutner *et al.*, 2004). Nesse contexto, além de corrigir possíveis violações das suposições estatísticas, essas transformações podem melhorar a interpretação e a eficácia das análises estatísticas (Hair *et al.*, 2009; Chiappori; Komunjer; Kristensen, 2015).

### **2.5.1 Testes de normalidade**

Os testes de normalidade são ferramentas estatísticas essenciais para determinar se um conjunto de dados segue uma distribuição normal. Assim, os mais conhecidos são os teste de Anderson-Darling, Cramer-Von Mises, D'Agostino-Pearson, Jarque-Bera, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk (Öztuna; Elhan; Tüccar, 2006). Nesse contexto, Leotti, Birck e Riboldi (2005) avaliaram os testes Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk, concluindo que há uma equivalência geral entre eles para dados normais. Entretanto, o teste de Kolmogorov-Smirnov foi considerado menos sensível para a verificação da normalidade, sendo, portanto, menos eficiente em comparação aos demais. Por outro lado, o teste de Shapiro-Wilk se destacou como o melhor teste de aderência à normalidade (Cirillo; Ferreira, 2003; Ferreira, 2008).

Além das diferenças de desempenho entre os testes, a escolha da abordagem mais apropriada deve considerar a categorização desses métodos. Os testes de normalidade podem ser classificados em diferentes categorias: baseados na função de distribuição empírica, baseados em regressão e correlação, e baseados em momentos (Dufour *et al.*, 1998). A escolha do teste mais adequado deve levar em consideração o contexto específico da análise e as características da amostra, uma vez que nenhum teste é superior em todas as situações (Akbiğiç; Home, 2011). Todavia, apesar de não haver um teste que domine os demais em todas as condições, o teste de Shapiro-Wilk é reconhecido por sua potência e eficácia, especialmente em amostras pequenas (Maroco, 2007).

Os testes de normalidade são realizados com um nível de confiança de 95%, o que significa que há uma probabilidade de 95% de que os resultados obtidos reflitam corretamente a distribuição dos dados na população. Esse nível de confiança está diretamente relacionado ao nível de significância, que, nesse caso, é de 5% (ou 0,05). O nível de significância representa a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira, ou seja, a chance de cometer um erro do tipo I. Assim, ao adotar um nível de significância de 5%, admite-se um risco de 5% de concluir que os dados não seguem uma distribuição normal quando, na realidade,

seguem. Esse equilíbrio entre confiança e significância é essencial para garantir análises estatísticas robustas e confiáveis (Montgomery; Rugenr, 2009).

### 2.5.2 Métodos para lidar com a não normalidade

Transformações de dados são técnicas utilizadas para alterar a distribuição dos dados, visando melhorar a conformidade com as suposições dos modelos estatísticos ou facilitar a interpretação dos resultados. Elas ajudam a melhorar a normalidade de uma distribuição e equalizar a variância, sendo essenciais na preparação dos dados para análises estatísticas (Osborne, 2010). Entre as transformações de dados mais notáveis, destacam-se as técnicas Box-Cox e Yeo-Johnson.

A transformação Box-Cox é uma técnica estatística utilizada para transformar dados não normalmente distribuídos em uma forma mais próxima de uma distribuição normal. Essa transformação é especialmente útil para estabilizar a variância e tornar os dados mais simétricos (Hinkley, 1975; Taylor, 1985). Nesse viés, segundo Box e Cox (1964), a transformação Box-Cox, definida em  $(0, +\infty)$ , é dada pela Equação 17.

$$y^{(\xi)} = \begin{cases} (y^\xi - 1)/\xi, & \text{se } \xi \neq 0 \\ \ln(y), & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Onde  $y$  representa os dados brutos,  $y^{(\xi)}$  representa dados transformados e  $\xi$  é o parâmetro de transformação. Já a transformação de Box-Cox, apesar de inovadora, é limitada a valores positivos. Embora ajustes permitam sua aplicação a valores negativos, isso compromete a teoria que define o intervalo de confiança de  $\xi$ . Para superar essa restrição, Yeo e Johnson (2000) introduziram uma nova família de transformações de dados, que é válida tanto para valores positivos quanto negativos da variável  $y$ . Essa transformação é descrita pela Equação 18.

$$y^{(\xi)} = \begin{cases} \frac{(y+1)^\xi - 1}{\xi}, & \text{se } \xi \neq 0 \text{ e } y \geq 0 \\ \ln(y+1), & \text{se } \xi = 0 \text{ e } y \geq 0 \\ -\frac{(1-y)^{2-\xi} - 1}{2-\xi}, & \text{se } \xi \neq 2 \text{ e } y < 0 \\ -\ln(1-y), & \text{se } \xi = 2 \text{ e } y < 0 \end{cases} \quad (18)$$

### 2.5.3 A não normalidade na pavimentação asfáltica

A temática da não normalidade na pavimentação asfáltica é ainda pouco investigada no Brasil, o que leva a um número limitado de pesquisas. Desse modo, dentre os trabalhos disponíveis, destaca-se o estudo de Lopes, Castelo Branco e Soares (2013), que utiliza os testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificar a normalidade em materiais de pavimentação. Os resultados mais significativos apontam que, para ambos os testes, a hipótese de normalidade é descartada para os dados dos ensaios de densidade aparente do agregado graúdo e densidade do agregado miúdo. Ademais, trabalhos recentes mostraram que a premissa de normalidade dos dados é frequentemente violada tanto para subcamadas de base e sub-base granulares (Vieira, 2022), quanto para as características da camada de revestimento asfáltico (Sena, 2023).

No cenário internacional, Benson, Chong e Samaniego (2000) avaliaram a adequação da suposição de normalidade em dados de controle de qualidade de materiais de 25 projetos do Departamento de Transportes da Califórnia. A análise revelou que, em uma proporção significativa dos casos, a hipótese de normalidade foi rejeitada, observando-se distribuições assimétricas, truncadas e bimodais. Aproximadamente um terço das amostras do teor de ligante asfáltico e quase metade das amostras do grau de compactação apresentaram indícios de não normalidade.

Ademais, Katicha *et al.* (2011) analisaram a normalidade das propriedades volumétricas do Departamento de Transporte da Virgínia, identificando que os dados de Vazios na Mistura Total (VTM) e Vazios no Agregado Mineral (VAM) não seguem uma distribuição normal, falhando em todos os testes aplicados. Essa ausência de normalidade pode comprometer a aplicação de testes paramétricos, influenciando a análise da variabilidade e das correlações entre as variáveis estudadas.

Além disso, Uddin, Goodrum e Mahboub (2011) investigaram a não normalidade em dados de aceitação de lotes em programas de garantia de qualidade na construção de rodovias, analisando a assimetria e a curtose. Os resultados mostraram que esses índices variam significativamente entre os conjuntos de dados, com muitos apresentando níveis elevados. Essa alta não normalidade está associada a uma maior variabilidade nos lotes, comprometendo o poder dos testes  $F$  e  $t$ , amplamente utilizados por agências rodoviárias norte-americanas para controle de qualidade, e afetando a validade das decisões sobre a qualidade das amostras.

Em trabalhos subsequentes, Uddin *et al.* (2012) investigaram a não normalidade nos dados de construção rodoviária e seus impactos nas análises estatísticas e nos fatores de

pagamento dos empreiteiros. A presença de alta assimetria e curtose prejudica os testes estatísticos utilizados pelas agências de transporte, aumentando a variabilidade dos dados e reduzindo a eficiência na identificação de diferenças entre os conjuntos de dados das agências e dos empreiteiros. O maior problema reside na distorção nos pagamentos, que pode levar à penalização indevida de empreiteiras que atendem aos requisitos e à bonificação de serviços de baixa qualidade. Para mitigar esses efeitos, o estudo propõe a transformação Box-Cox. Esse método permite um cálculo mais preciso dos fatores de pagamento, sem a necessidade de remover ou substituir dados. A adoção dessa abordagem pode reduzir a incerteza nos pagamentos, evitando que empreiteiras elevem os preços para compensar riscos financeiros.

## 2.6 Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é uma técnica que se baseia na geração de números aleatórios para encontrar soluções aproximadas para problemas complexos (Hammersley; Handscomb, 1964). Esse método é amplamente utilizado em diversas disciplinas, especialmente na pesquisa operacional (McLeish, 2005), onde auxilia na redução da variância de estimativas e na resolução de problemas de otimização estocástica com restrições lineares ou não lineares (Sakalauskas, 2004; Ross, 2013). Sua principal vantagem é permitir a análise de problemas que são desafiadores de resolver analiticamente ou que exigem processamento computacional intensivo (Kroese *et al.*, 2014).

A aplicação do Método de Monte Carlo exige a escolha de uma função de distribuição para modelar os dados (Jato-Espino *et al.*, 2018). Conforme Tóth (2010), com uma análise abrangente de dados históricos confiáveis, é possível prever padrões de comportamento futuros, incluindo a probabilidade dos dados se situarem dentro de uma faixa específica. Desse modo, a eficácia das simulações depende da precisão com que a função de distribuição escolhida se adapta aos dados do modelo, além da qualidade das estimativas que fundamentam a obtenção desses dados (Jato-Espino *et al.*, 2014).

O método pode ser categorizado em diferentes tipos, a depender da aplicação e das técnicas utilizadas. Entre eles, destacam-se o Método Quasi-Monte Carlo e o Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCCM). O Método Quasi-Monte Carlo apresenta uma abordagem alternativa para a geração de amostras aleatórias, com maior eficiência e melhores propriedades de convergência (Hung, 2024). Como resultado, é amplamente utilizado em análises de sensibilidade e experiências computacionais (Sobol; Kucherenko, 2005; Levy; Steinberg, 2011). Conforme Chuang e Hung (2010), essa abordagem gera sequências de baixa

discrepância, as quais são distribuídas de forma mais uniforme no espaço de amostragem. Dessa forma, a capacidade de alcançar maior uniformidade no espaço amostral pode implicar diminuição da variância e taxas de convergência aprimoradas, especialmente ao lidar com espaços amostrais de menor dimensão (Asmussen; Glynn, 2007).

Já o Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCCM) é desenvolvido para estimar integrais de alta dimensão ou para a amostragem de distribuições de probabilidade multivariadas (Brooks *et al.*, 2011). Conforme Hung (2024), o MCCM gera uma sequência de observações correlacionadas segundo uma cadeia de Markov estacionária com probabilidades de transição designadas.

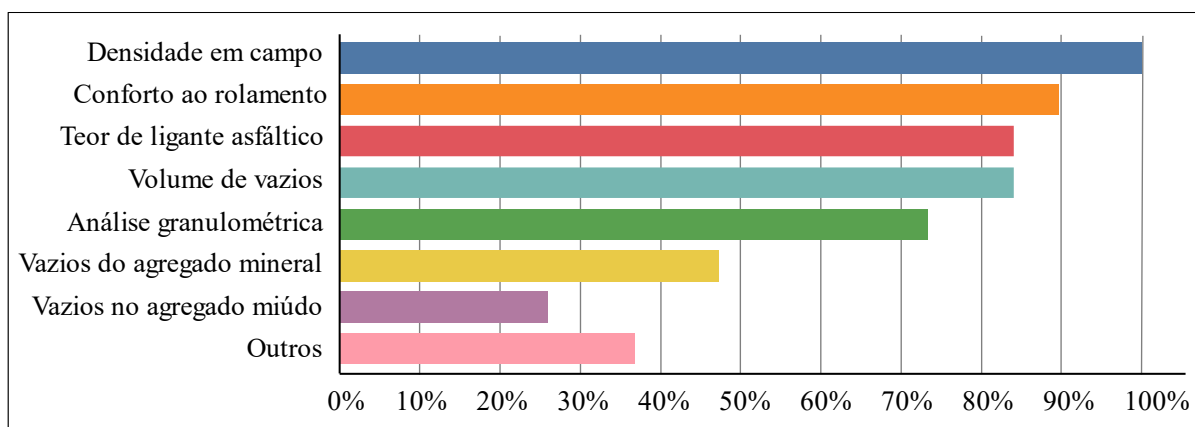
### 3 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido a partir da análise de dados oriundos do controle estatístico de qualidade de três obras rodoviárias localizadas no estado do Ceará. Para garantir a confidencialidade das empresas responsáveis, essas obras foram referenciadas como Obra 1, Obra 2 e Obra 3. As informações, obtidas em PDF, incluem relatórios de acompanhamento e controle tecnológico das obras em execução. Os dados analisados abrangem diversas camadas do pavimento, como revestimento asfáltico, base e sub-base. No entanto, este estudo concentra-se exclusivamente no revestimento asfáltico, que se destaca pelo maior nível de controle tecnológico, devido à sua exposição direta ao tráfego e às intempéries (Senço, 2008).

Conforme destacado, o banco de dados recebido abrange diversas propriedades associadas à mistura asfáltica utilizada no revestimento rodoviário. Contudo, foram selecionadas as propriedades mais relevantes e frequentemente utilizadas na análise da qualidade de revestimentos asfálticos, seguindo as orientações da literatura técnico-científica.

Em um estudo realizado por Uddin (2020), foi observado que, entre os 19 departamentos rodoviários estaduais norte-americanos avaliados, há uma ampla diversidade de ensaios utilizados para medir a qualidade construtiva do revestimento asfáltico. Contudo, alguns deles se destacam, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Ensaios típicos de aceitação de misturas asfálticas



Fonte: Adaptada de Uddin (2020).

Observa-se que mais de 70% dos órgãos consultados realizam análises de qualidade utilizando a densidade de campo, conforto ao rolamento, teor de ligante asfáltico, volume de vazios e granulometria. Neste contexto, o presente trabalho concentra-se no teor de ligante asfáltico, um parâmetro essencial para o controle de qualidade do pavimento e de grande

impacto no custo total da obra. A importância desse parâmetro se justifica pelo fato de que uma subdosagem pode gerar um revestimento pouco durável e propenso à desagregação, enquanto o excesso pode resultar em uma camada de rolamento com macrotextura superficial fechada, suscetível à exsudação (Bernucci *et al.*, 2022).

Ademais, com o intuito de expandir as análises, incluiu-se também o percentual passante na peneira N° 200. Essa propriedade está diretamente relacionada ao fíler, que é definido como partículas minerais com dimensões inferiores à peneira N° 200 (0,075 mm), incluindo os materiais solúveis em água, presentes nos agregados (DNIT 449, 2024). Além disso, observa-se que 100% das empresas consultadas utilizam o grau de compactação como parâmetro de controle de qualidade. Contudo, neste trabalho, não foi possível incluí-lo na análise devido à indisponibilidade dos dados.

Para manter a padronização ao longo deste documento, adotam-se as denominações %CAP para o teor de ligante asfáltico e N° 200 para o percentual passante na peneira N° 200. Além disso, de acordo com a norma DNIT 031 (2024), os projetos de concreto asfáltico devem atender a uma proporção N° 200/%CAP entre 0,6 e 1,6, reforçando a importância da relação entre essas propriedades para o desempenho da mistura asfáltica.

### 3.1 Limites das propriedades

Para verificar a aceitação ou rejeição de obras e serviços rodoviários, segundo a metodologia estabelecida na norma DNER-PRO 277/1997, é necessário conhecer o Limite Inferior de Especificação (LIE) e o Limite Superior de Especificação (LSE). Desse modo, as propriedades selecionadas possuem limites que dependem do valor de projeto e de suas respectivas tolerâncias, os quais são definidos na norma DNIT 031 (2024). Para o %CAP, a tolerância é de  $\pm 0,3\%$ , enquanto para o N° 200, é de  $\pm 2\%$ . Assim, os limites de especificação são determinados por meio das equações a seguir.

$$\text{LIE} = \text{Valor de projeto} - \text{Tolerância} \quad (19)$$

$$\text{LSE} = \text{Valor de projeto} + \text{Tolerância} \quad (20)$$

Os valores de projeto utilizados para a determinação dos limites de especificação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valore de projeto

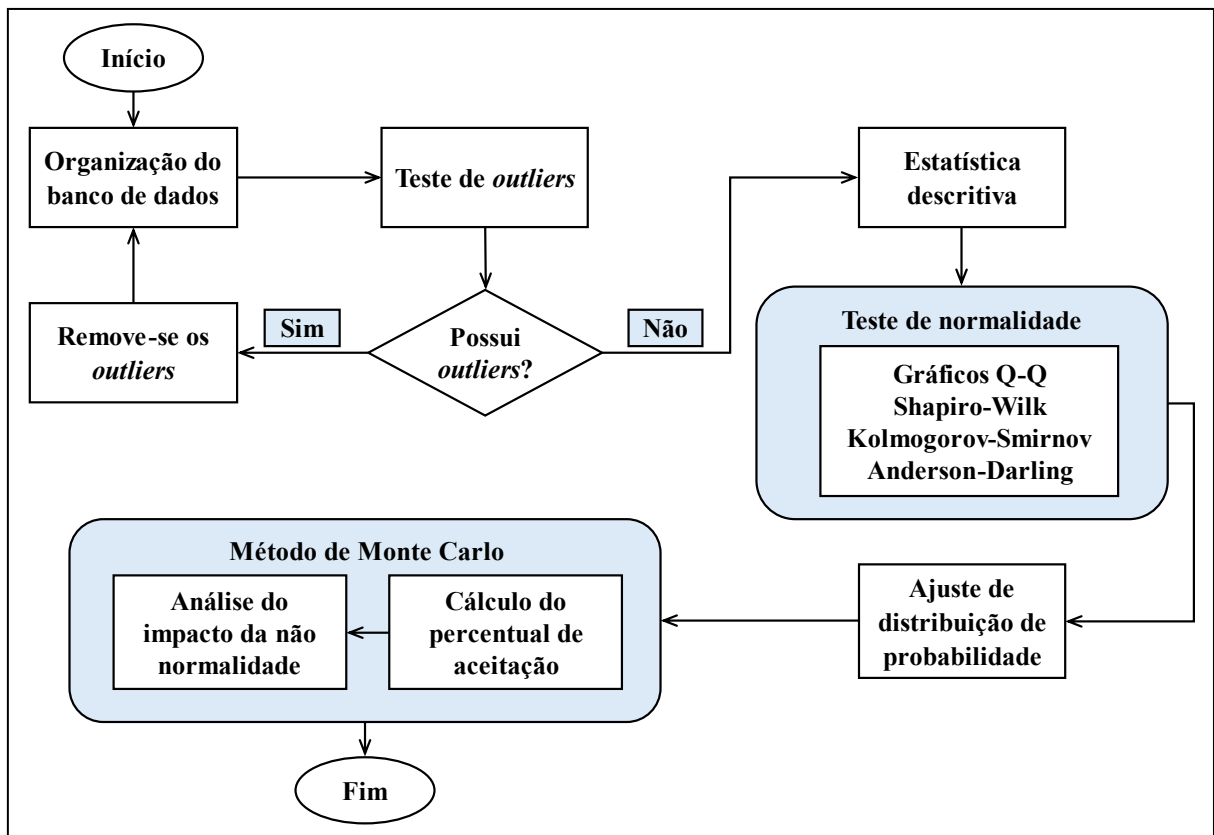
Propriedade	Valor de projeto		
	Obra 1	Obra 2	Obra 3
%CAP	5,5%	5,8%	5,5%
N° 200	5,0%	5,0%	5,0%

Fonte: Autor (2025).

### 3.2 Etapas metodológicas

Nesta seção, serão detalhados os métodos empregados para avaliar a influência da distribuição de probabilidade dos dados no controle estatístico da qualidade de obras. Para isso, foram realizadas análises envolvendo testes de normalidade, ajustes de distribuições de probabilidade e aplicação do Método de Monte Carlo. As etapas da pesquisa estão dispostas na Figura 15 e são detalhadas na sequência.

Figura 15 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Autor (2025).

### 3.2.1 Organização do banco de dados

O processo de organização dos dados iniciou-se com a obtenção das informações, as quais foram disponibilizadas em documentos no formato PDF. Esses arquivos continham dados como: (i) valores amostrais das diversas propriedades da mistura asfáltica utilizada nas camadas do revestimento, (ii) data de coleta das amostras, (iii) número da medição realizada e (iv) estacas inicial e final do segmento onde cada amostra foi obtida.

Em seguida, os dados foram organizados em planilhas no *software* Microsoft Excel®. Essa etapa foi essencial para estruturar as informações de forma compreensível, facilitando sua análise posterior. Para garantir uma organização eficiente, cada obra foi agrupada em uma planilha distinta. Embora um amplo conjunto de dados tenha sido registrado, a pesquisa concentrou-se nos parâmetros de maior interesse, ou seja, o %CAP e o N° 200. Os dados pertinentes à pesquisa estão apresentados nos Apêndice A (Obra 1), Apêndice B (Obra 2) e Apêndice C (Obra 3).

### 3.2.2 Teste de outliers

As técnicas estatísticas desempenham um papel fundamental na análise de dados, previsões e estimativas. Nesse contexto, é preciso filtrar as informações para obter resultados mais precisos e confiáveis. Contudo, a presença de *outliers* pode comprometer a eficácia desses processos. Um *outlier* é definido como uma observação que se desvia significativamente das demais a ponto de suscitar suspeitas de que tenha sido gerada por um mecanismo externo (Hawkins, 1980).

Para lidar com esse problema, diversas metodologias foram desenvolvidas para identificar e remover *outliers* do conjunto de dados. Entre elas, destaca-se o teste de Grubbs, introduzido por Grubbs (1950) e recomendado pela *International Organization for Standardization* (ISO). Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficácia, baseando-se na média e no desvio padrão dos dados para a detecção de valores discrepantes (Aslam, 2020).

Neste estudo, as análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio do *software* Minitab®. Para identificar a presença de *outliers* nos dados, foi aplicado o teste de Grubbs, utilizando um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Os valores discrepantes identificados foram excluídos, assegurando maior consistência nas análises subsequentes. Esse processo foi repetido iterativamente até que nenhum *outlier* fosse detectado pelo teste de Grubbs.

### 3.2.3 Estatística descritiva

Segundo Huot (2002), a estatística descritiva é definida como o conjunto de técnicas e regras destinadas a sintetizar informações obtidas de uma amostra ou população, sem gerar distorções ou perdas. Nesse âmbito, foi realizada uma análise estatística abrangente do conjunto de dados, contemplando o cálculo da média, desvio padrão, valores máximo e mínimo, mediana, moda, assimetria e curtose. O *software* Microsoft Excel® desempenhou um papel fundamental, atuando como repositório do banco de dados e ferramenta para a execução das análises estatísticas detalhadas. Essa abordagem permitiu uma avaliação aprofundada do comportamento dos dados, facilitando a identificação de padrões relevantes.

Vale ressaltar que outras medidas estatísticas poderiam ser calculadas, como o coeficiente de variação, primeiro quartil, terceiro quartil e amplitude. No entanto, as medidas centrais, de forma e dispersão adotadas já se mostram suficientes para as análises deste trabalho, proporcionando uma caracterização abrangente do comportamento dos dados.

### 3.2.4 Teste de normalidade

Segundo Das e Imon (2016), a avaliação da normalidade é fundamental antes de qualquer análise estatística. Nesse contexto, a norma DNER-PRO 277/97 estabelece que os dados devem ser obtidos de forma aleatória e seguir uma distribuição normal na população. Assim, com o objetivo de verificar essa premissa, foi realizado testes de normalidade utilizando o *software* Minitab®. Assim, para avaliar a aderência dos dados à distribuição normal, iniciou-se a análise por meio do gráfico Q-Q. Além disso, foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling.

Os testes foram realizados com um nível de confiança de 95%, equivalente a 5% de significância. Conforme Hirakata, Mancuso e Castro (2019) se o valor- $p$  for inferior a 5%, conclui-se que a distribuição dos dados difere significativamente de uma normal. Caso contrário, a hipótese nula ( $H_0$ ) não é rejeitada, indicando que os dados seguem uma distribuição gaussiana. As hipóteses adotadas estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Teste de hipótese para verificar a normalidade dos dados

<b>Hipóteses</b>	<b>Implicação</b>
Hipótese nula ( $H_o$ )	Os dados são provenientes de uma distribuição normal
Hipótese alternativa ( $H_a$ )	Os dados não são provenientes de uma distribuição normal

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.5 *Ajuste de distribuição de probabilidade*

O ajuste de distribuição de probabilidade é o processo de identificar e selecionar a distribuição estatística que melhor representa um conjunto de dados. Essa abordagem é fundamental em análises estatísticas e probabilísticas, permitindo compreender o comportamento das informações e realizar inferências mais precisas. Desse modo, investigou-se o ajuste dos dados de campo a diferentes distribuições de probabilidade, utilizando a estatística de Anderson-Darling (estatística AD) como critério de avaliação. Essa metodologia, proposta por Anderson e Darling (1952), é amplamente reconhecida por sua sensibilidade, sendo considerada precisa e eficiente (Arshad; Rasool; Ahmad, 2003).

As análises foram conduzidas no *software* Minitab®, empregando um nível de confiança de 95%. A estatística AD foi utilizada para medir a qualidade do ajuste, visto que valores menores indicam maior aderência dos dados à distribuição de probabilidade avaliada.

### 3.2.6 *Método de Monte Carlo*

Na etapa final do estudo, foi realizada uma estimativa quantitativa para avaliar como a adesão dos dados a distribuições de probabilidade diferentes da normal impactava as decisões de aceitação ou rejeição do serviço. Assim, empregou-se o Método de Monte Carlo, que gera números aleatórios com base em funções de distribuição de probabilidade (Jato-Espino *et al.*, 2018). Nesta simulação, foram analisadas as quatro distribuições que apresentaram melhor ajuste, além da normal, sendo elas: logística, log-logística, log-normal e gama.

O ajuste das distribuições de probabilidade foi realizado no *software* Minitab®, enquanto o Método de Monte Carlo foi implementado no Matlab®. Para viabilizar a simulação, foi desenvolvido um código que automatiza o processo de geração de dados. No Apêndice D, é apresentado o código referente ao %CAP da Obra 1. Para as demais obras, basta substituir os parâmetros específicos e manter a estrutura do código.

No código, o usuário deve inserir os valores amostrais da propriedade, o valor de

projeto e os limites inferior e superior de especificação. Além disso, é necessário fornecer os parâmetros de forma e localização das distribuições de probabilidade, obtidos previamente no *software* Minitab®. Para algumas distribuições, como a normal, devem ser inseridos a média e o desvio padrão. Com essas informações, o código gera números aleatórios utilizando as cinco distribuições de probabilidade que apresentaram melhor ajuste, por meio da função *random* do Matlab®.

As amostras geradas apresentam tamanhos variando de 5 a 21, e para cada tamanho amostral foram realizadas 100.000 iterações. A partir desses dados, o código calcula a média e o desvio padrão, e em seguida verifica se os valores satisfazem os critérios de aceitação definidos pela norma DNER-PRO 277/97. Ao final do processo, calculou-se a razão percentual entre o número de iterações em que as amostras foram aceitas e o total de iterações realizadas (Equação 21). Essa razão, denominada percentual de aceitação, foi o principal critério utilizado para avaliar o impacto das diferentes distribuições de probabilidade.

$$\% \text{Aceitação} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de amostras aceitas}}{\text{N}^{\circ} \text{ de amostras totais}} \quad (21)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Identificação de *outliers*

A primeira etapa da análise deste trabalho consistiu na identificação dos *outliers* no conjunto de dados utilizando o teste de Grubbs. Esse teste foi conduzido a um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, representando o risco máximo aceitável de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Desse modo, para garantir a precisão desse processo, a avaliação foi realizada por meio do *software* Minitab®. Assim, uma análise detalhada dos gráficos de *outliers* foi conduzida para confirmar a necessidade de remover os valores atípicos.

O gráfico de *outlier* é uma representação visual que destaca valores discrepantes em um conjunto de dados, evidenciando pontos que se desviam do padrão esperado para facilitar a identificação de erros, anomalias ou tendências incomuns. Assim, apenas as amostras que, de fato, comprometiam a consistência dos dados foram excluídas, evitando distorções que poderiam impactar as análises estatísticas subsequentes. A definição das hipóteses nula e alternativa são apresentadas na Tabela 5.

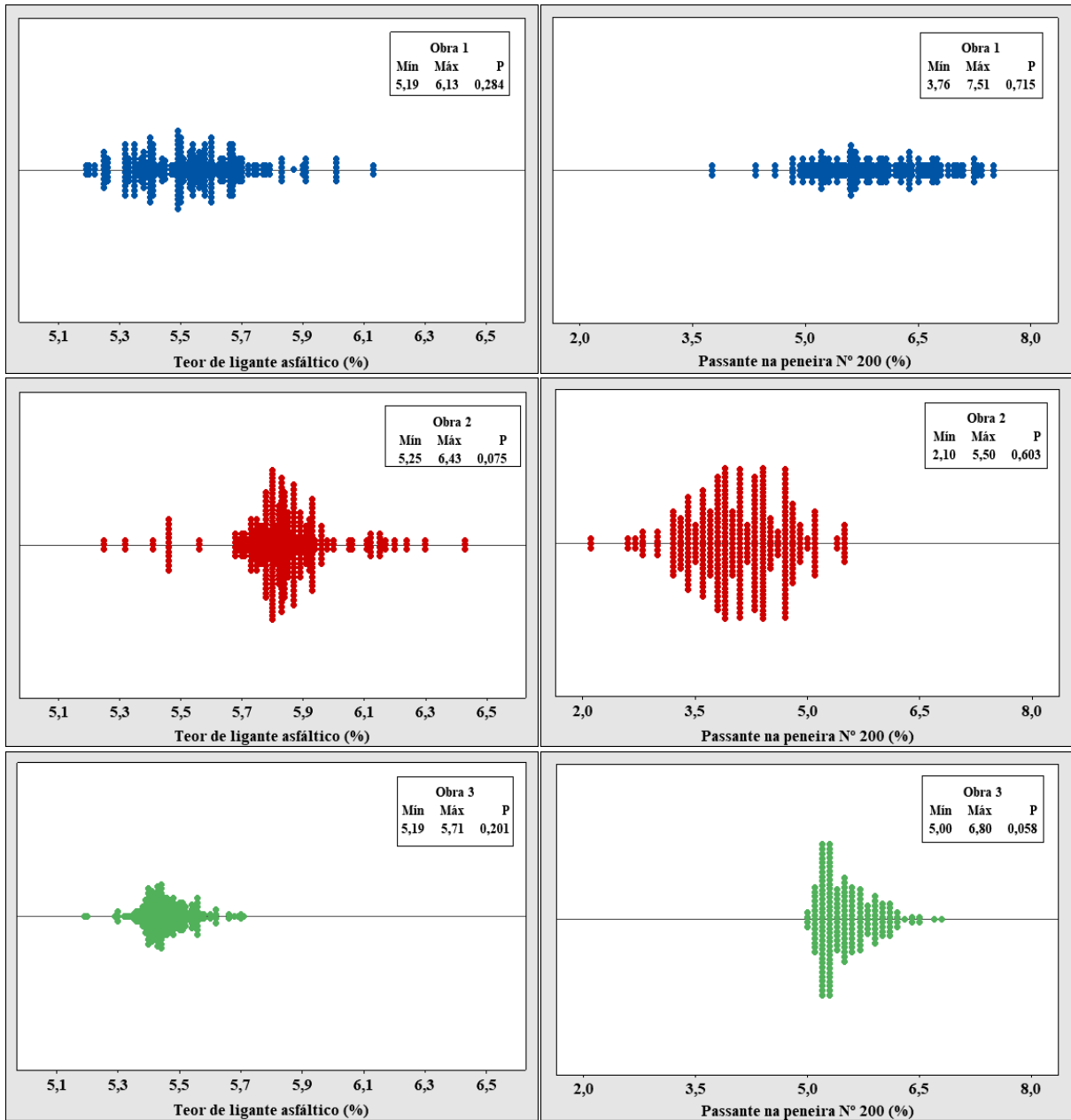
Tabela 5 – Hipóteses do teste de Grubbs

Hipóteses	Implicação
Hipótese nula ( $H_o$ )	Os dados são provenientes da mesma distribuição normal
Hipótese alternativa ( $H_a$ )	O menor ou maior valor dos dados é um <i>outlier</i>

Fonte: Autor (2025).

Na tomada de decisão, compara-se o nível de significância ( $\alpha$ ) com o valor- $p$  para determinar se a hipótese nula deve ser rejeitada. Se  $p$  for menor ou igual ao nível de significância, rejeita-se  $H_o$ , indicando a presença de um *outlier*. Caso contrário, a hipótese nula não é rejeitada, pois não há evidências suficientes para confirmar a existência desses valores.

Para o %CAP, a Obra 1 não apresentou *outliers*. Na Obra 2, foram identificados seis valores atípicos, enquanto na Obra 3, quatro valores extremos foram encontrados. Com relação ao N° 200, tanto a Obra 1 quanto a Obra 2 não apresentaram valores discrepantes, enquanto a Obra 3 teve quatro valores atípicos. Esses valores foram removidos do conjunto de dados, pois poderiam comprometer a integridade da análise e afetar a precisão dos resultados. A Figura 16 apresenta os gráficos de *outliers* para ambas as propriedades analisadas.

Figura 16 – Gráficos de *outliers*

Fonte: Autor (2025).

Conforme a Figura 16, para o %CAP, a Obra 1 apresenta a maior parte das amostras entre 5,3% e 5,8%, indicando uma distribuição relativamente uniforme. Na Obra 2, a concentração ocorre entre 5,6% e 6,0%, com algumas amostras próximas de 6,2%, sugerindo uma leve tendência a valores mais altos. Já na Obra 3, a maioria das amostras está entre 5,3% e 5,6%, mostrando uma menor amplitude em comparação à Obra 2. Quanto ao N° 200, a Obra 1 apresenta a maioria das amostras concentradas entre 5,0% e 7,0%. Na Obra 2, os valores se distribuem principalmente entre 3,0% e 5,0%, enquanto na Obra 3, a maior concentração ocorre entre 5,0% e 6,5%. Destaca-se que, após a remoção dos *outliers*, o teste de Grubbs resultou em

um valor- $p$  acima do nível de significância de 5%, confirmando a ausência de valores atípicos no conjunto de dados. A Tabela 6 apresenta o número de amostras antes e após a remoção dos outliers.

Tabela 6 – Número de amostras antes e depois de remover os *outliers*

Propriedade	Condição	Número de amostras		
		Obra 1	Obra 2	Obra 3
%CAP	Antes de remover os <i>outliers</i>	345	417	198
	Após remover os <i>outliers</i>	345	411	194
Nº200	Antes de remover os <i>outliers</i>	345	417	198
	Após remover os <i>outliers</i>	345	417	194

Fonte: Autor (2025).

## 4.2 Estatística descritiva dos dados

Após a exclusão dos *outliers*, foi realizada uma análise estatística descritiva do %CAP e do Nº 200 nas três obras rodoviárias, utilizando o *software* Microsoft Excel®. Esse processo permitiu uma avaliação detalhada das medidas de tendência central, dispersão e formato da distribuição, proporcionando uma compreensão mais precisa do comportamento dos dados. Além disso, a análise buscou identificar padrões relevantes, avaliar a consistência das distribuições e comparar as características entre as diferentes obras, possibilitando a detecção de possíveis discrepâncias. A Tabela 7 apresenta um resumo estatístico para o %CAP.

Tabela 7 – Resumo estatístico do %CAP

Medidas	Obra 1	Obra 2	Obra 3
Número de amostras	345	411	194
Média	5,54	5,84	5,46
Mediana	5,53	5,83	5,45
Moda	5,49	5,80	5,44
Desvio padrão	0,18	0,16	0,08
Curtose	0,59	3,57	1,17
Assimetria	0,59	-0,07	0,36
Mínimo	5,19	5,25	5,19
Máximo	6,13	6,43	5,71

Fonte: Autor (2025).

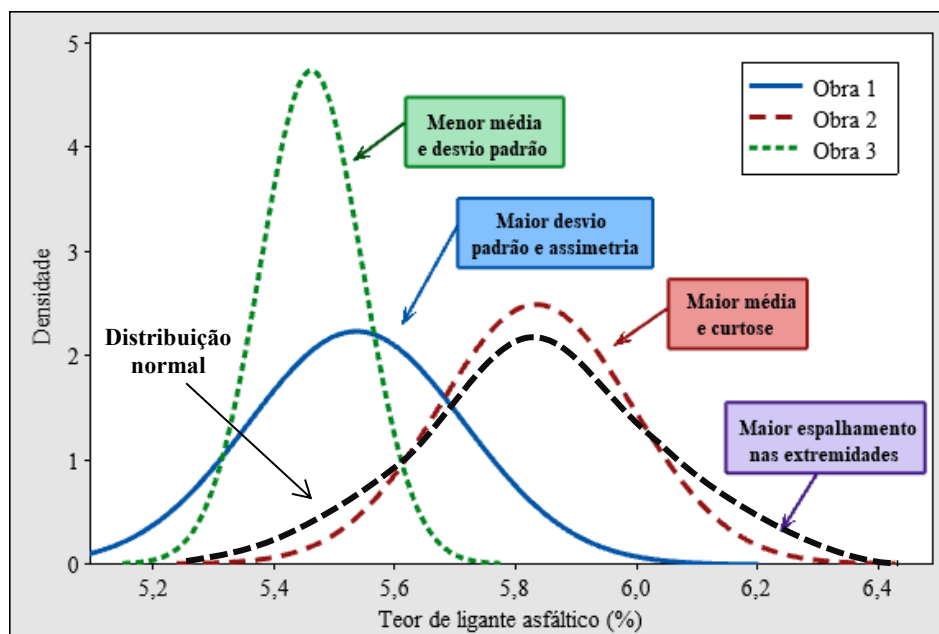
A análise dos dados coletados nas três obras revela diferenças estatisticamente

relevantes. A Obra 2 apresenta o maior número de amostras, totalizando 411, seguida pela Obra 1, com 345, e pela Obra 3, com 194. Esse volume de dados sugere que os resultados da Obra 2 possuem maior representatividade estatística, enquanto os da Obra 3 podem estar mais sujeitos a variações devido à menor quantidade de amostras. Quanto às medidas centrais, a média dos valores é mais alta na Obra 2, atingindo 5,84, enquanto na Obra 1 e na Obra 3 os valores médios são de 5,54 e 5,46, respectivamente. Como a mediana e a moda também se mantêm próximas da média em todas as obras, isso indica que a distribuição dos dados é relativamente simétrica, sem grandes desvios ou valores extremos.

A dispersão dos dados pode ser avaliada pelo desvio padrão, que é maior na Obra 1 (0,18), seguido pela Obra 2 (0,16), enquanto a Obra 3 apresenta a menor dispersão, com um desvio padrão de apenas 0,08. Isso significa que os valores na Obra 3 são mais homogêneos, variando menos em relação à média, enquanto na Obra 1 há uma maior variabilidade. A curtose reforça essa análise ao indicar a concentração dos valores em torno da média. A Obra 2 se destaca por apresentar uma curtose elevada (3,57), sugerindo uma distribuição com caudas mais pesadas e um pico mais pronunciado em comparação à normal (curva preta tracejada apresentada na Figura 17). Tal fato indica que os valores estão mais concentrados ao redor da média, com uma menor presença de valores discrepantes. A Obra 1, com uma curtose de 0,59, e a Obra 3, com 1,17, exibem um comportamento semelhante, embora com menor intensidade.

A análise da assimetria também traz informações relevantes. A Obra 1 apresenta uma assimetria positiva de 0,59, o que indica uma leve inclinação da distribuição para a direita. A Obra 3 também possui uma assimetria positiva, mas de menor magnitude, registrando 0,36. Por outro lado, a Obra 2 apresenta uma assimetria praticamente nula (-0,07), sugerindo que a distribuição dos dados é bastante simétrica. A Figura 17 apresenta um resumo gráfico das informações mencionadas, proporcionando uma visualização clara e objetiva dos dados analisados.

Figura 17 – Densidade de probabilidade do %CAP



Fonte: Autor (2025).

As curvas apresentadas na Figura 17 sugerem distribuições normais ou aproximadamente normais para as três obras, indicando que a densidade de probabilidade do %CAP tende a se concentrar em torno de um valor médio para cada obra. No entanto, observam-se diferenças na forma e dispersão dos dados entre as obras, principalmente devido à média e ao desvio padrão.

Com o objetivo de analisar a evolução do %CAP ao longo das diferentes fases de cada obra, foram construídos gráficos de dispersão que ilustram a distribuição dos dados ao longo do tempo, desde o início até a conclusão, conforme detalhado na Figura 18. É relevante observar que esses gráficos incluem linhas constantes para o LIE, LSE, valor de projeto e média. Essas referências visuais proporcionam um contexto claro para a interpretação dos dados, facilitando a identificação de tendências e padrões ao longo do tempo em cada obra.

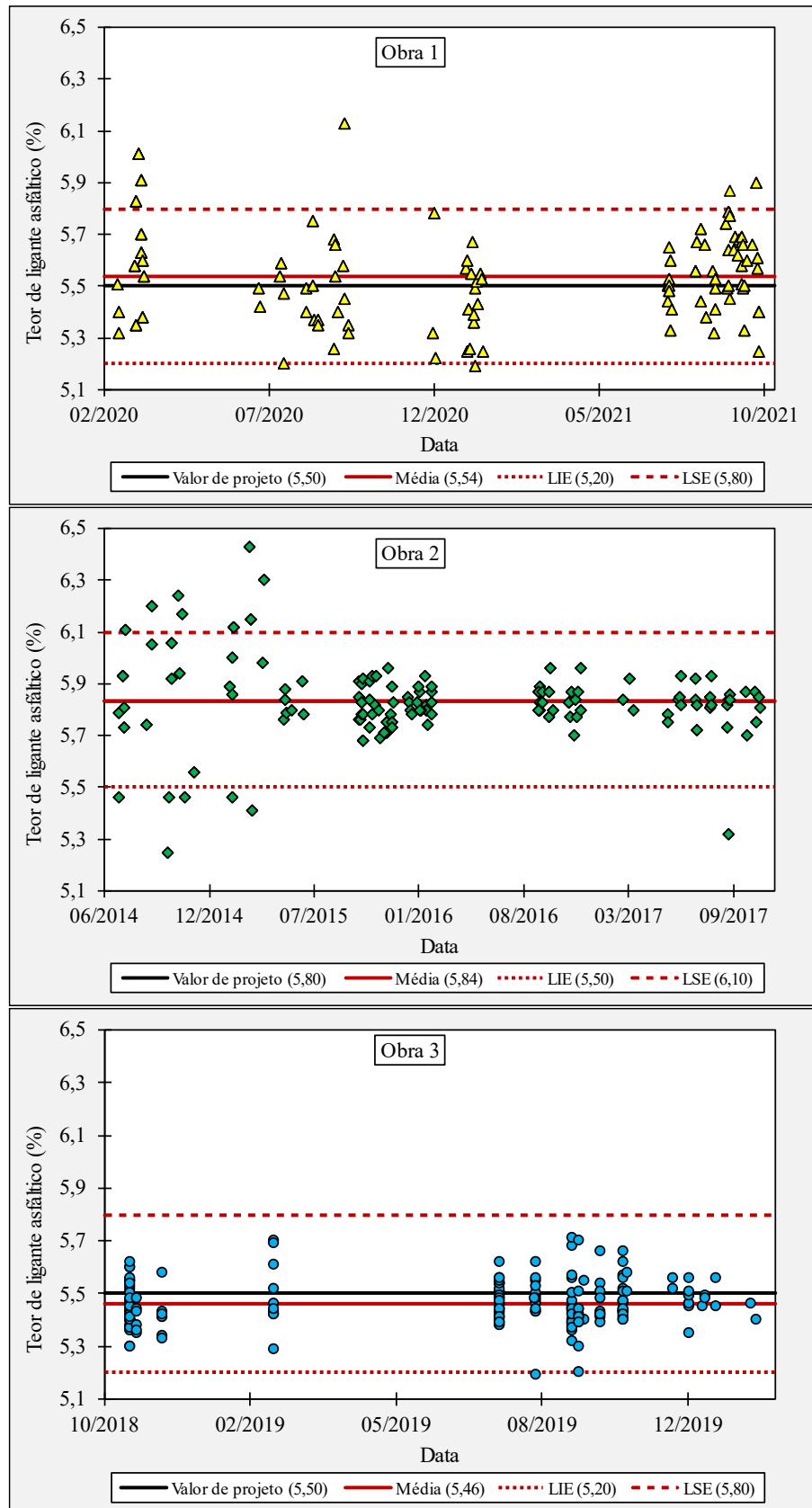
Na Figura 18 é evidente que há diferenças significativas no controle do %CAP ao longo do tempo em cada uma das três obras, destacando padrões distintos de variação. Um aspecto notável é a presença de descontinuidades expressivas entre diferentes períodos de medição, refletindo uma possível falta de consistência no processo executivo. Essas oscilações indicam a ausência de uma correlação clara entre as medições sucessivas, sugerindo um controle menos padronizado na aplicação do ligante asfáltico ao longo das etapas da obra.

Com relação à Obra 1, a maioria dos valores se concentra próxima ao valor de projeto (5,50%), com uma média de 5,54%. Embora haja variação no processo, quase todos os

pontos permanecem dentro dos limites de especificação (LIE e LSE). Já na Obra 2, observam-se variações significativas, especialmente no início, com valores acima do LSE, caracterizando uma não conformidade inicial. Com o tempo, houve uma melhora no controle, e a maioria dos valores passou a se concentrar dentro dos limites. Entretanto, persistem algumas oscilações e descontinuidades, possivelmente associadas a fatores externos, como a influência do período chuvoso do Ceará. Na Obra 3, os valores se mantiveram de forma consistente próximos ao valor de projeto (5,50%), com uma média de 5,46%. Nota-se, porém, uma grande ausência de dados entre 03/2019 e 07/2019.

Vale ressaltar que apenas o fato de a média estar próxima ao valor de projeto não indica, por si só, um bom controle tecnológico. A variabilidade, representada pelo desvio padrão, exerce grande influência na aceitação ou rejeição dos serviços e, portanto, deve ser considerada. Para indicar uma boa qualidade, as amostras devem apresentar valores próximos ao valor de projeto.

Figura 18 – Gráficos de dispersão do %CAP



Fonte: Autor (2025).

De maneira análoga, também foi realizado uma análise estatística descritiva para o N° 200. Os resultados estão apresentados na Tabela 8, destacando as principais medidas estatísticas, como média, mediana, moda, desvio padrão, curtose e assimetria, proporcionando uma visão detalhada da distribuição dos dados.

Tabela 8 – Resumo estatístico do N° 200

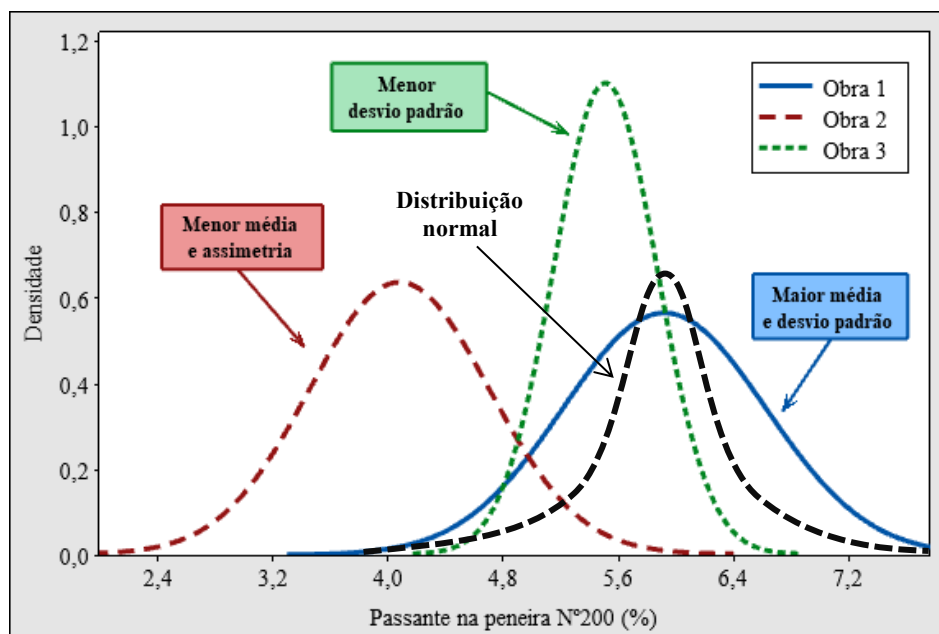
<b>Medidas</b>	<b>Obra 1</b>	<b>Obra 2</b>	<b>Obra 3</b>
Número de amostras	345	417	195
Média	5,92	4,08	5,51
Mediana	5,82	4,10	5,40
Moda	5,61	4,40	5,30
Desvio padrão	0,71	0,63	0,36
Curtose	-0,23	0,10	0,68
Assimetria	0,01	-0,16	1,02
Mínimo	3,76	2,10	5,00
Máximo	7,51	5,50	6,80

Fonte: Autor (2025).

A análise da média e desvio padrão das três obras revela diferenças importantes na dispersão dos dados. A Obra 1 tem a maior média (5,92), acompanhada de um desvio padrão de 0,71, indicando maior variação entre as três obras. A Obra 2, com uma média de 4,08, apresenta um desvio padrão de 0,63, mostrando uma dispersão moderada dos dados, embora um pouco mais concentrada que na Obra 1. Já a Obra 3 tem uma média de 5,51 e o menor desvio padrão (0,36), sugerindo maior uniformidade das amostras.

Ao analisar a curtose e assimetria, nota-se que Obra 1 apresenta uma curtose negativa (-0,23), o que indica que a distribuição possui caudas mais leves e um pico mais suave em comparação com a distribuição normal. Sua assimetria é praticamente nula (0,01), sugerindo uma distribuição simétrica. A Obra 2 tem uma curtose de 0,10, indicando uma leve concentração de dados em torno da média. Sua assimetria negativa de -0,16 indica uma leve inclinação da distribuição para a esquerda. Por fim, a Obra 3 tem uma curtose de 0,68, o que indica uma distribuição mais pontiaguda, com maior concentração de dados próximos à média. Sua assimetria positiva de 1,02 sugere uma cauda mais longa à direita. A Figura 19 apresenta um resumo detalhado com as informações mencionadas anteriormente.

Figura 19 – Densidade de probabilidade do N° 200



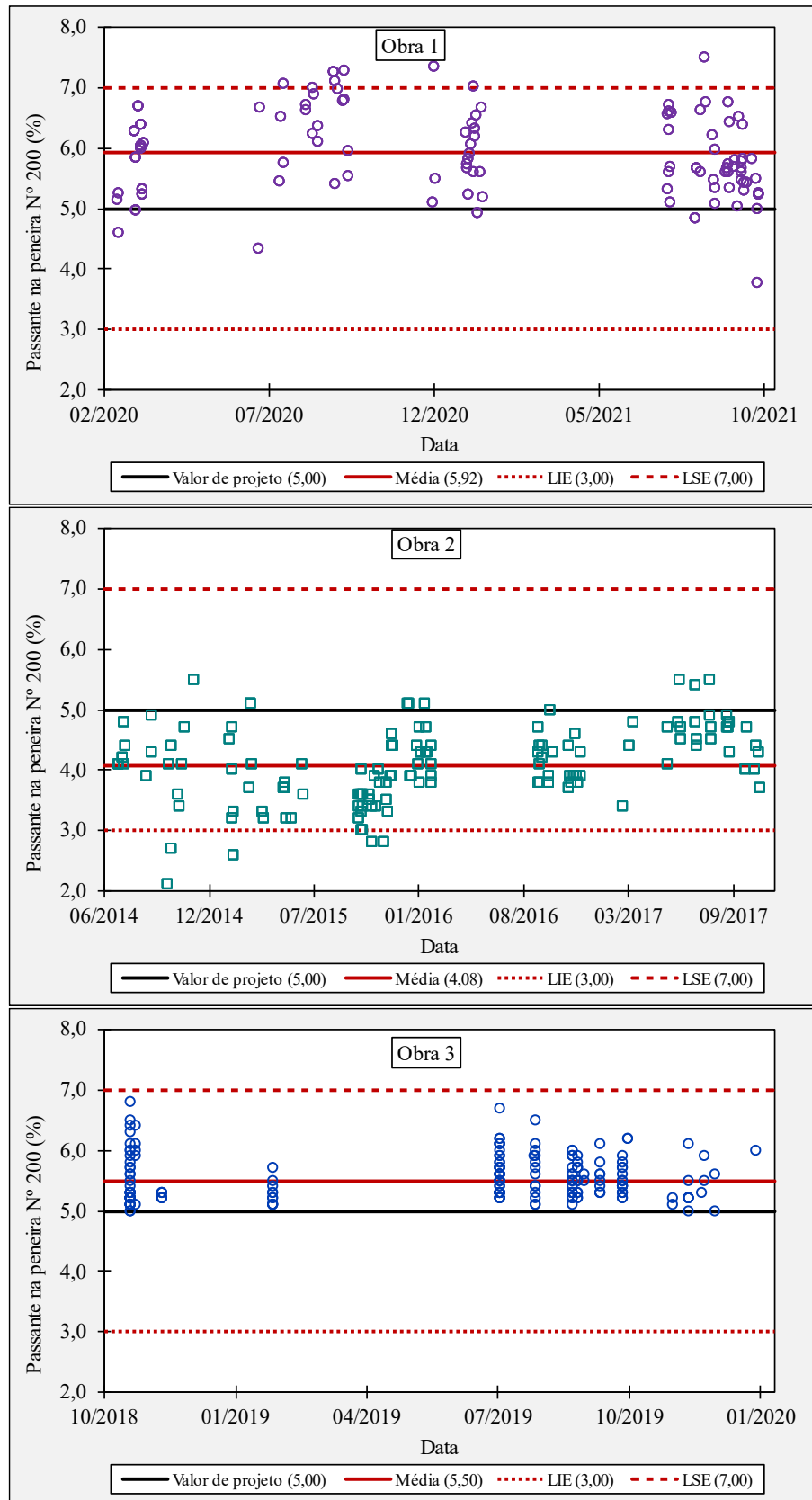
Fonte: Autor (2025).

Com base na Figura 19, a Obra 1 apresenta uma curva com caudas mais leves e um pico suavizado em relação à distribuição normal (curva preta tracejada). Ademais, a Obra 2 exibe caudas e pico de intensidade moderada, indicando uma dispersão e concentração de dados próximas ao esperado para uma distribuição normal. Já a Obra 3 possui caudas mais pesadas e um pico mais acentuado, característico de distribuições com curtose positiva.

Assim como no %CAP, também foi gerado gráficos de dispersão para o N° 200 ao longo do tempo. Tais gráficos são apresentados na Figura 20.

Na Obra 1, observa-se que quase todas as amostras possuem valores superiores ao valor de projeto (5,0%). Além disso, a maioria dos dados está dentro dos limites de especificação, com poucas amostras acima do LSE. Vale ressaltar que, assim como no %CAP, há descontinuidades temporais nos dados, principalmente nos períodos chuvosos da região. A Obra 2 apresenta poucas descontinuidades temporais, evidenciando que as medições foram realizadas ao longo da execução da rodovia. Apesar da grande variabilidade, a maioria dos valores permanece dentro dos limites de especificação. Já a Obra 3 apresenta todos os dados dentro dos limites, mas com muitas descontinuidades temporais e diversas medições concentradas em um mesmo dia, o que sugere a ausência de um controle de qualidade contínuo ao longo da execução da obra.

Figura 20 – Gráficos de dispersão do N° 200



Fonte: Autor (2025).

### 4.3 Verificação da normalidade

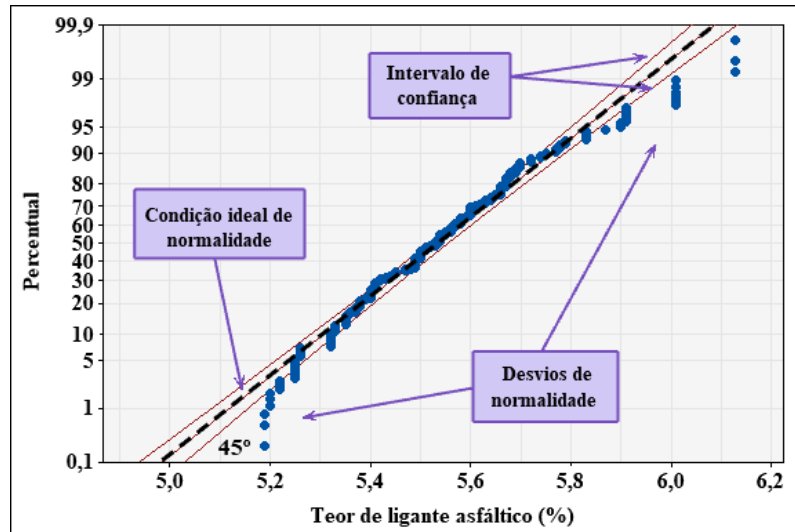
A avaliação da distribuição dos dados é essencial para o controle estatístico de qualidade, especialmente no setor rodoviário, onde a verificação da normalidade é fundamental para a validação dos serviços, conforme a norma DNER-PRO 277/97. Nesse contexto, será analisado se os dados do %CAP e do N° 200 seguem uma distribuição normal.

Inicialmente, foi realizada uma análise visual dos resultados por meio do gráfico Q-Q, uma ferramenta eficaz para verificar a aderência da distribuição de frequência dos dados à distribuição normal. Assim, foram gerados gráficos de probabilidade pelo método de Anderson-Darling, disponíveis no *software* Minitab®, com intervalos de confiança de 95%. Os primeiros gráficos gerados correspondem ao %CAP, conforme ilustrado na Figura 21.

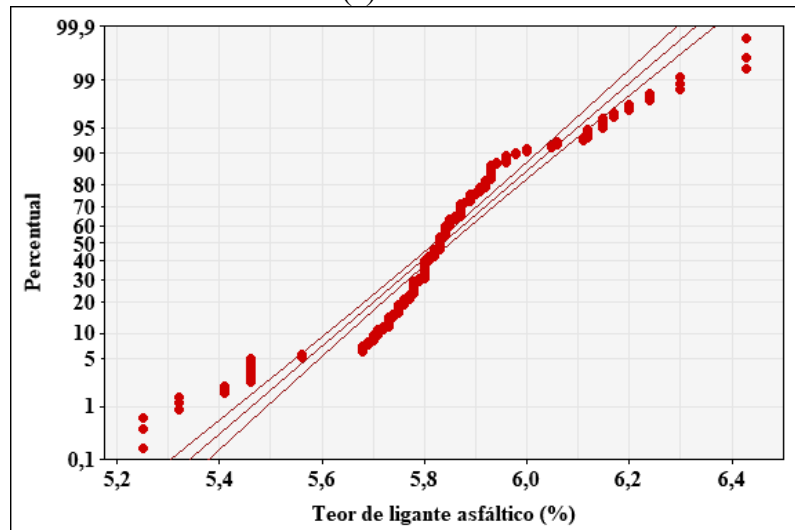
Na Figura 21a, a linha preta central, inclinada a 45°, representa o padrão que a distribuição dos dados deve seguir para serem considerados normais. As outras duas linhas, próximas da linha central, indicam o intervalo de confiança. Os pontos de dados que ficam fora desse intervalo são considerados desvios de normalidade. Assim, se o valor- $p$  no gráfico Q-Q for maior que o nível de significância, então não se deve rejeitar a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal.

No contexto da Obra 1 (Figura 21a), observa-se que a maioria dos dados está contida no intervalo de confiança. Entretanto, os pontos das extremidades estão dispersos em relação à linha central e ultrapassam os limites, sugerindo um possível desvio de normalidade. Na Obra 2 (Figura 21b), a situação é ainda mais preocupante, pois a maioria dos pontos se afasta da linha central e estão fora do intervalo de confiança. Isso se deve principalmente pelo elevado valor de curtose (3,57), que é uma das principais medidas que interferem na normalidade dos dados. Em relação à Obra 3 (Figura 21c), nota-se um comportamento semelhante ao da Obra 1, com grande parte dos pontos próximos a linha central, mas com desvios nas extremidades.

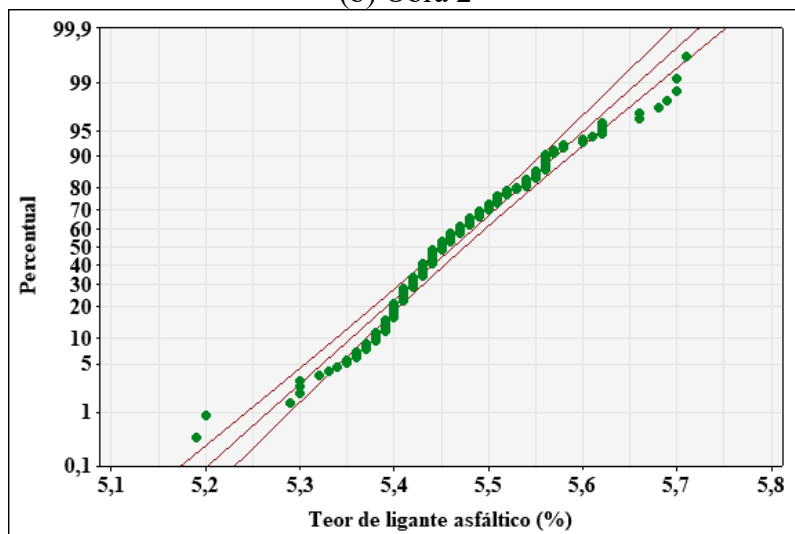
Figura 21 – Gráficos Q-Q para o %CAP



(a) Obra 1



(b) Obra 2



(c) Obra 3

Fonte: Autor (2025).

Além da análise visual, também foram empregados os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Anderson Darling, utilizando o *software* Minitab®. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo das análises de normalidade do %CAP

<b>Análise de normalidade</b>	<b>Obra 1</b>	<b>Obra 2</b>	<b>Obra 3</b>
Gráfico Q-Q	Não normal	Não normal	Não normal
Shapiro-Wilk	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )
Kolmogorov-Smirnov	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )
Anderson-Darling	Não normal (valor- $p < 0,005$ )	Não normal (valor- $p < 0,005$ )	Não normal (valor- $p < 0,005$ )
<b>Conclusão</b>	<b>Não normal</b>	<b>Não normal</b>	<b>Não normal</b>

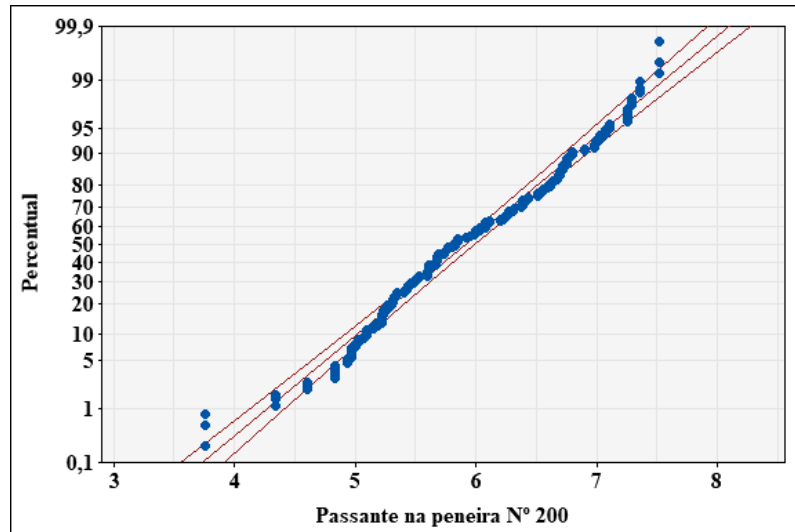
Fonte: Autor (2025).

Na Obra 1, observa-se que os dados não seguem uma distribuição normal, pois os testes apresentaram valores- $p$  inferiores aos limiares de significância adotados. No caso dos testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, os valores- $p$  são menores que 0,010, enquanto no teste de Anderson-Darling, o valor- $p$  é inferior a 0,005. Esses resultados indicam que a hipótese de normalidade para a Obra 1 deve ser rejeitada, sugerindo que os dados podem seguir outro tipo de distribuição. Vale ressaltar que, à medida que o número de amostras aumenta, a sensibilidade dos testes de normalidade diminui, sendo prudente adotar um nível de significância de 1% para os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov (Miot, 2017).

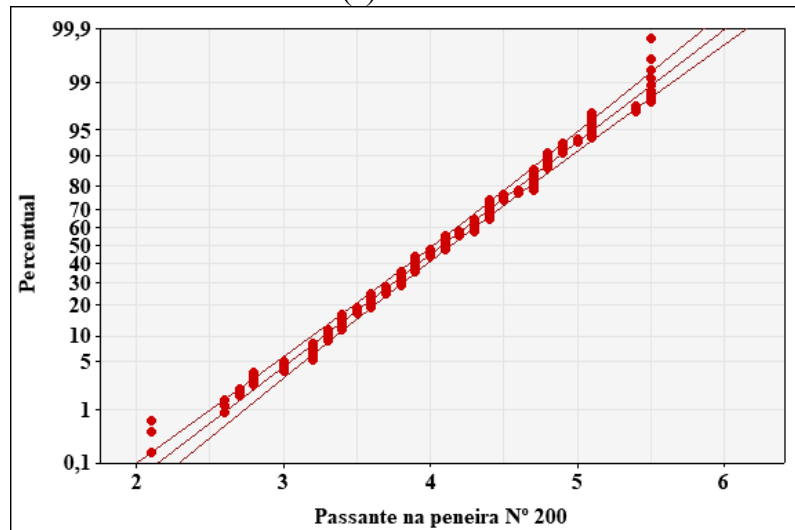
Os resultados da Obra 2 são semelhantes ao da Obra 1, demonstrando uma rejeição da normalidade em todos os testes estatísticos. Os valores- $p$  obtidos para os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov são menores que 0,010, enquanto o teste de Anderson-Darling apresentou um valor- $p$  inferior a 0,005. Esses resultados oferecem evidências estatísticas claras para concluir que os dados da Obra 2 não são normalmente distribuídos. A Obra 3 apresentou o mesmo comportamento, com todos os testes indicando que os dados não seguem uma distribuição normal.

De maneira análoga, também foi verificada a normalidade dos dados para o N° 200. Inicialmente, foram gerados os gráficos Q-Q (Figura 22) e, em seguida, realizados os testes de normalidade.

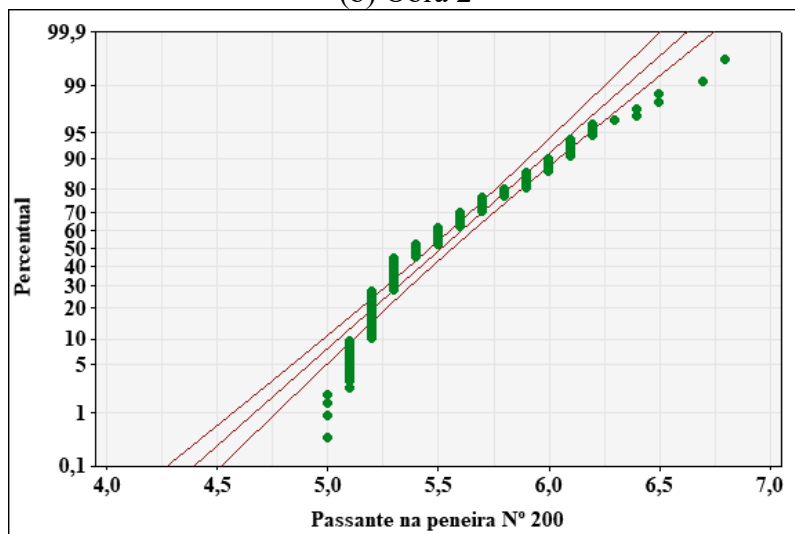
Figura 22 – Gráficos Q-Q para o N° 200



(a) Obra 1



(b) Obra 2



(c) Obra 3

Fonte: Autor (2025).

Com relação a Obra 1 (Figura 22a), observa-se que a maioria dos dados está próxima da linha central, entretanto, os pontos das extremidades ultrapassam o intervalo de confiança, o que evidencia a ausência de normalidade. Na Obra 2 (Figura 22b), quase todos os pontos estão sobre a linha central, com poucos desvios na extremidade direita. Isso foi suficiente para que o valor- $p$  fosse maior que 0,05 (Tabela 10), indicando que os dados são provêm de uma distribuição normal. Em relação à Obra 3 (Figura 22c), nota-se um comportamento contrário ao da Obra 1, com grande parte dos dados distantes da linha central e fora dos limites aceitável, indicando que os dados não são normais.

Além dos gráficos Q-Q, também foram empregados os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Anderson Darling. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo das análises de normalidade do N°200

<b>Análise de normalidade</b>	<b>Obra 1</b>	<b>Obra 2</b>	<b>Obra 3</b>
Gráfico Q-Q	Não normal	Normal	Não normal
Shapiro-Wilk	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Normal (valor- $p > 0,100$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )
Kolmogorov-Smirnov	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )	Não normal (valor- $p < 0,010$ )
Anderson-Darling	Não normal (valor- $p < 0,005$ )	Não normal (valor- $p = 0,007$ )	Não normal (valor- $p < 0,005$ )
<b>Conclusão</b>	<b>Não normal</b>	<b>Aproximadamente normal</b>	<b>Não normal</b>

Fonte: Autor (2025).

De acordo com a Tabela 10, os dados da Obra 1 não seguem uma distribuição normal, conforme corroborado pelo gráfico Q-Q e pelos testes, que apresentaram valores- $p$  inferiores ao nível de significância. O mesmo se aplica à Obra 3, onde os testes também apontam para a não normalidade. Todavia, os resultados da Obra 2 sugerem uma distribuição aproximadamente normal. O teste de Shapiro-Wilk indicou a normalidade, enquanto o de Anderson-Darling reforçou essa tendência. No entanto, o teste de Kolmogorov-Smirnov apontou uma leve divergência. Mesmo sem uma confirmação dos três testes, os dados da Obra 2 podem ser considerados muito próximos da normalidade.

#### 4.4 Análise das distribuições de probabilidade

Nessa etapa, os dados foram ajustados a diferentes distribuições utilizando o *software* Minitab®. O programa aplica o teste de qualidade de ajuste de Anderson-Darling (AD) para identificar as distribuições que melhor se ajustam ao conjunto de dados. Valores menores da estatística AD indicam uma maior aderência dos dados a uma determinada distribuição. Como mostrado na Tabela 11, as cinco distribuições com melhor ajuste para os valores do %CAP são as mesmas em todas as obras, com destaque para a log-logística. Vale ressaltar que o ajuste foi realizado para diversas outras distribuições, porém, apenas as de melhor desempenho foram consideradas nas análises.

Tabela 11 – Estatística AD do %CAP

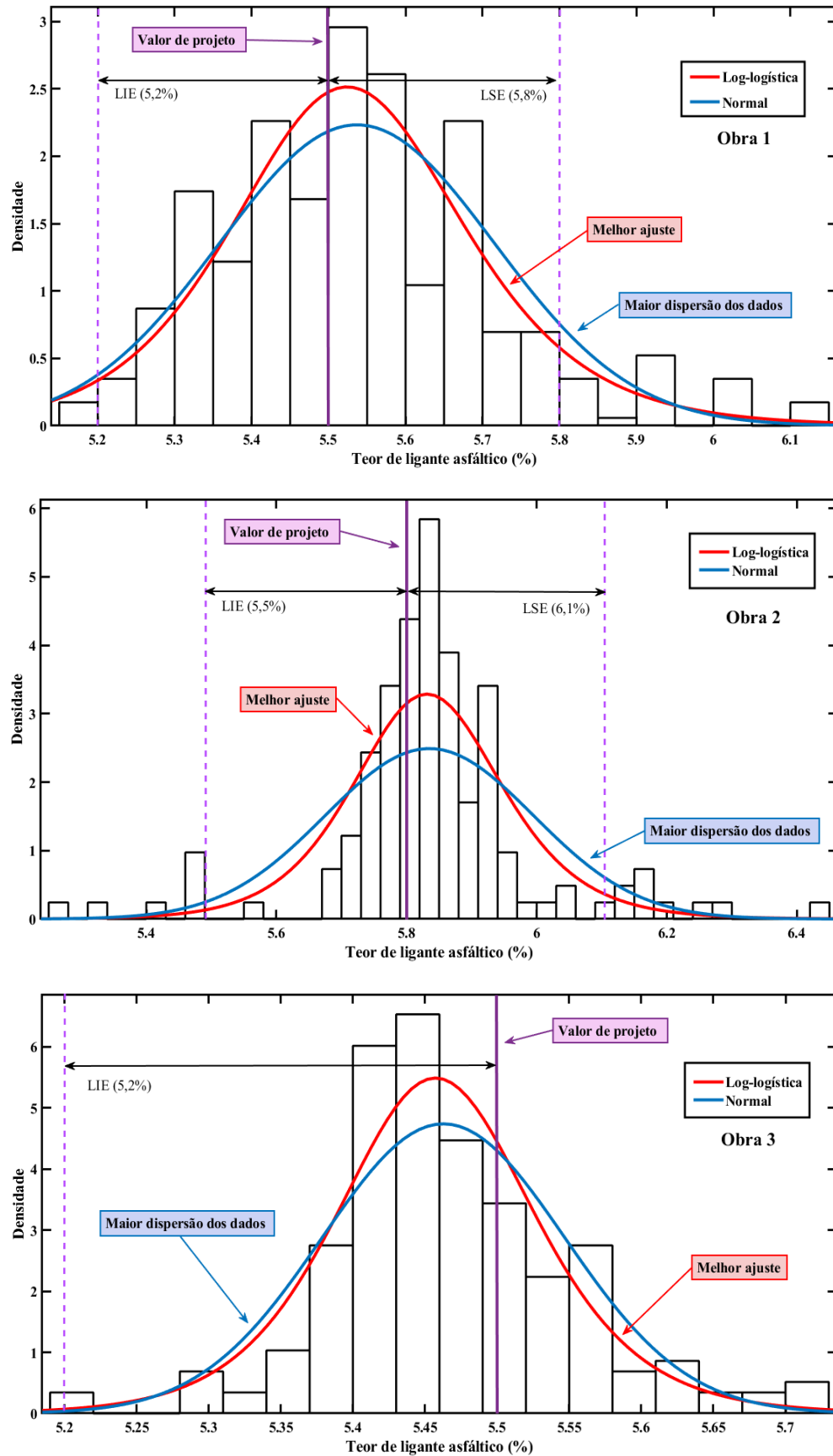
Distribuição de probabilidade	Valores da estatística AD		
	Obra 1	Obra 2	Obra 3
Log-logística	1,034	8,125	1,380
Logística	1,154	8,164	1,463
Log-normal	1,369	16,880	2,054
Gama	1,471	16,775	2,083
Normal	1,715	16,734	2,185

Fonte: Autor (2025).

Os resultados indicam que a distribuição log-logística apresentou o melhor ajuste aos dados, exibindo os menores valores da estatística AD em todas as obras analisadas. Na Obra 1, o valor obtido foi 1,034, demonstrando boa aderência à variabilidade do %CAP. Na Obra 2, a estatística AD aumentou para 8,125, enquanto na Obra 3 foi de 1,380. Em contraste, a distribuição normal apresentou um dos piores ajustes, com valores elevados da estatística AD, chegando a 16,734 na Obra 2. Outras distribuições, como a logística, log-normal e gama, também foram testadas, apresentando ajustes razoáveis. No geral, a log-logística se destacou como a melhor opção para modelar os dados do %CAP.

Com o objetivo de ilustrar esses resultados, foram gerados gráficos contendo o histograma, a distribuição de probabilidade de melhor ajuste e a distribuição normal. A Figura 23 apresenta esses gráficos.

Figura 23 – Histograma e distribuições de probabilidade do %CAP



Fonte: Autor (2025).

Com base na Figura 23, observa-se que, em todas as obras, a distribuição log-logística se ajusta melhor aos dados do que a distribuição normal. Além disso, essa distribuição apresentou caudas mais pesadas e picos mais altos em comparação à normal. Na Obra 1, os valores predominam entre 5,4% e 5,7% (LIE = 5,2% e LSE = 5,8%), enquanto na Obra 2, a concentração ocorre entre 5,6% e 6,0% (LIE = 5,5% e LSE = 6,1%). Já na Obra 3, os valores se distribuem em torno de 5,45%, com a maior parte dentro dos limites aceitáveis.

De forma análoga, o ajuste de distribuição de probabilidade também foi realizado para o N° 200, com os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Estatística AD do N° 200

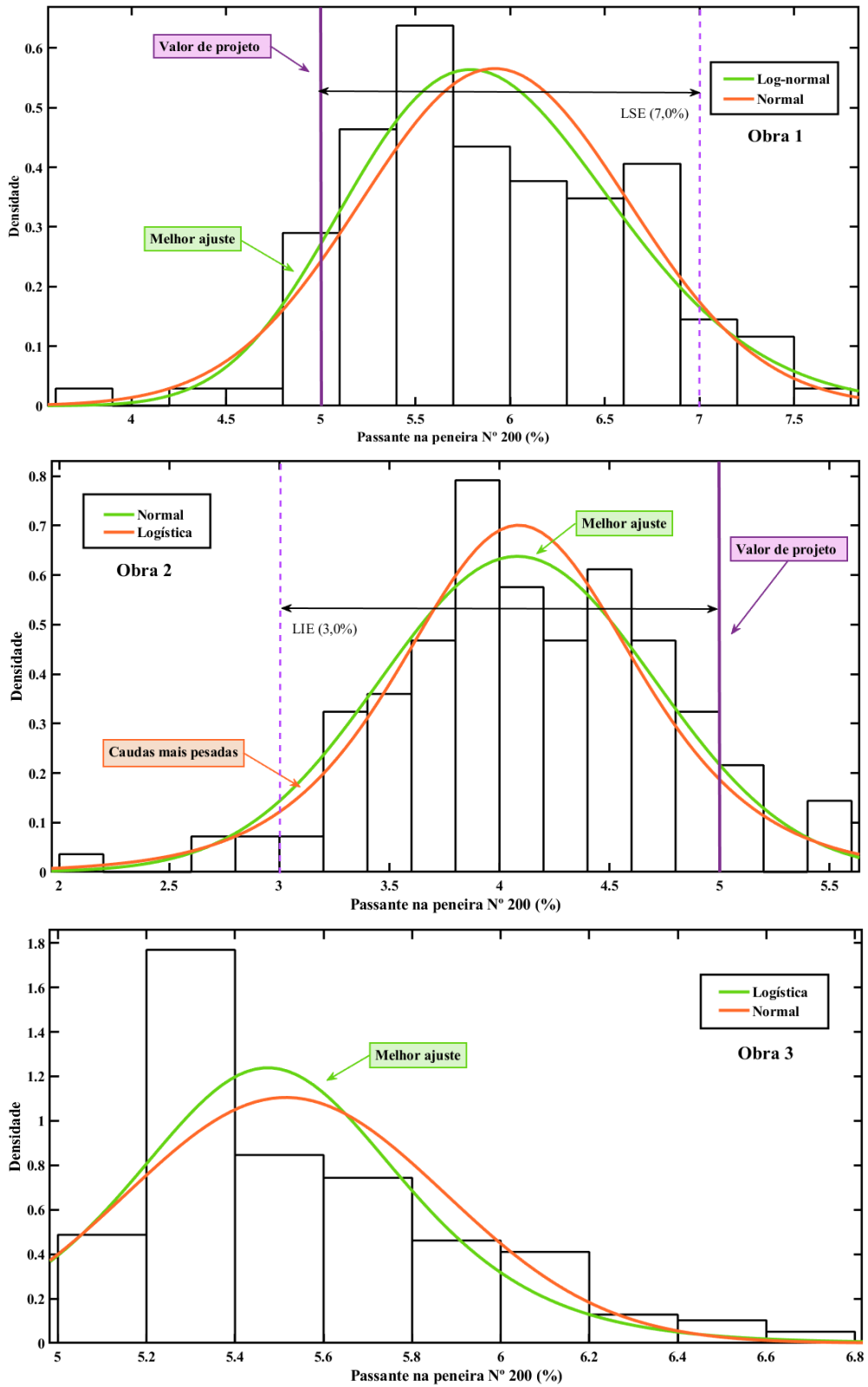
<b>Distribuição de probabilidade</b>	<b>Valores da estatística AD</b>		
	<b>Obra 1</b>	<b>Obra 2</b>	<b>Obra 3</b>
Log-logística	2,016	1,950	4,557
Logística	2,460	1,432	5,011
Log-normal	1,358	2,536	5,074
Gama	1,419	1,803	5,318
Normal	1,796	1,106	5,790

Fonte: Autor (2025).

Os resultados indicam que não há uma mesma distribuição que apresente o melhor ajuste simultaneamente para as três obras. Na Obra 1, a distribuição log-normal forneceu o melhor ajuste, com uma estatística AD de 1,358. Na Obra 2, a distribuição com melhor ajuste foi a normal, com 1,106. Esse resultado já era esperado, pois os dados se aproximam muito de uma distribuição normal, conforme evidenciado na Tabela 10. Já na Obra 3, a distribuição com a melhor estatística AD foi a log-logística, com as demais apresentando valores AD próximos de 5,150. Além disso, foram gerados gráficos com histogramas e distribuições para o N° 200, conforme ilustrado na Figura 24.

Na Obra 1, observa-se que a distribuição log-normal se ajusta melhor aos dados, apresentando uma curva mais deslocada à esquerda em comparação à normal. Isso ocorre porque os valores estão mais concentrados em torno de 5,5%. Na Obra 2, a distribuição normal, que demonstrou a melhor aderência aos dados, exibe um pico mais suave em relação à logística. Já Obra 3, a distribuição logística apresentou o melhor desempenho em comparação às demais, pois sua curva se aproxima significativamente do histograma dos dados.

Figura 24 – Histograma e distribuições de probabilidade do N° 200



Fonte: Autor (2025).

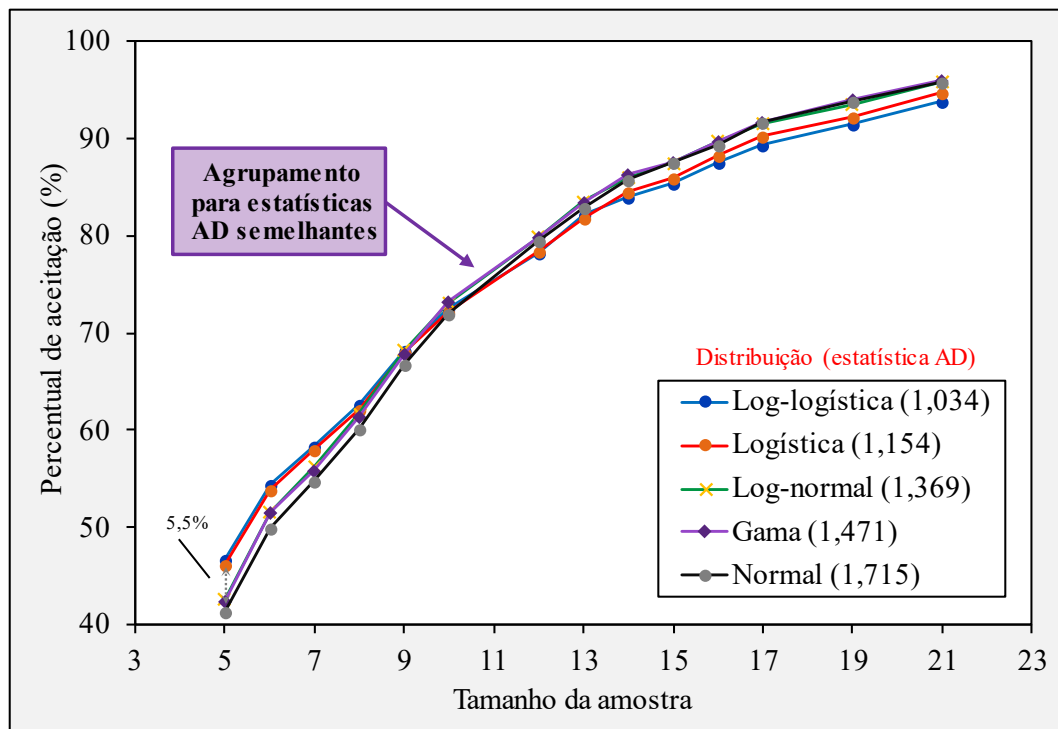
## 4.5 Impacto da não normalidade

Nesta etapa, foram selecionadas as cinco distribuições que melhor se ajustaram aos dados, e as análises foram conduzidas no *software* Matlab®. Foram gerados milhares de valores para diferentes tamanhos amostrais (de 5 a 21), com base nos parâmetros de cada distribuição. Esses valores foram avaliados de acordo com os critérios da norma DNER 277. Para medir o impacto da não normalidade, calculou-se o percentual de aceitação, definido como a razão entre o número de amostras aceitas e o total de amostras geradas.

### 4.5.1 Teor de ligante asfáltico

A análise foi realizada inicialmente para o %CAP e, em seguida, para o N° 200. Para a Obra 1, a Figura 25 mostra que as cinco distribuições de probabilidade apresentam comportamentos semelhantes, o que se deve à proximidade das estatísticas AD, cuja diferença máxima foi de 0,681 entre as distribuições log-logística e normal.

Figura 25 – Percentual de aceitação para o %CAP – Obra 1

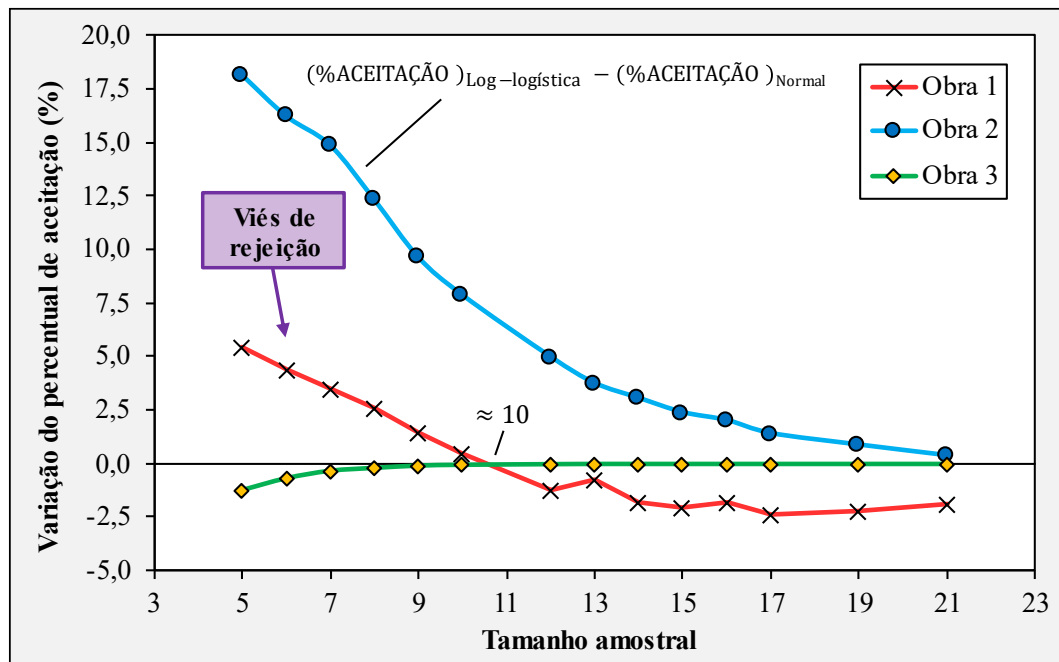


Fonte: Autor (2025).

O agrupamento das curvas de aceitação sugere que ajustes estatísticos similares

resultam em desempenhos igualmente próximos. Ademais, observa-se um aumento no percentual de aceitação à medida que o tamanho da amostra cresce, estabilizando-se em cerca de 95,0% para 21 amostras. No entanto, para 5 amostras, a diferença no percentual de aceitação entre as distribuições normal e log-logística é de aproximadamente 5,5%. Essa diferença reduz-se gradualmente até 10 amostras, momento em que a tendência se inverte, passando a distribuição normal a apresentar um percentual de aceitação superior. Nesse sentido, no intervalo  $5 \leq n < 10$ , há um leve viés de rejeição. Por exemplo, para 5 amostras, a distribuição normal apresenta um percentual de rejeição de 58,7%, enquanto a log-logística indica 53,3%. A Figura 26 ilustra esse comportamento, evidenciando as variações no percentual de aceitação entre as distribuições log-logística e normal.

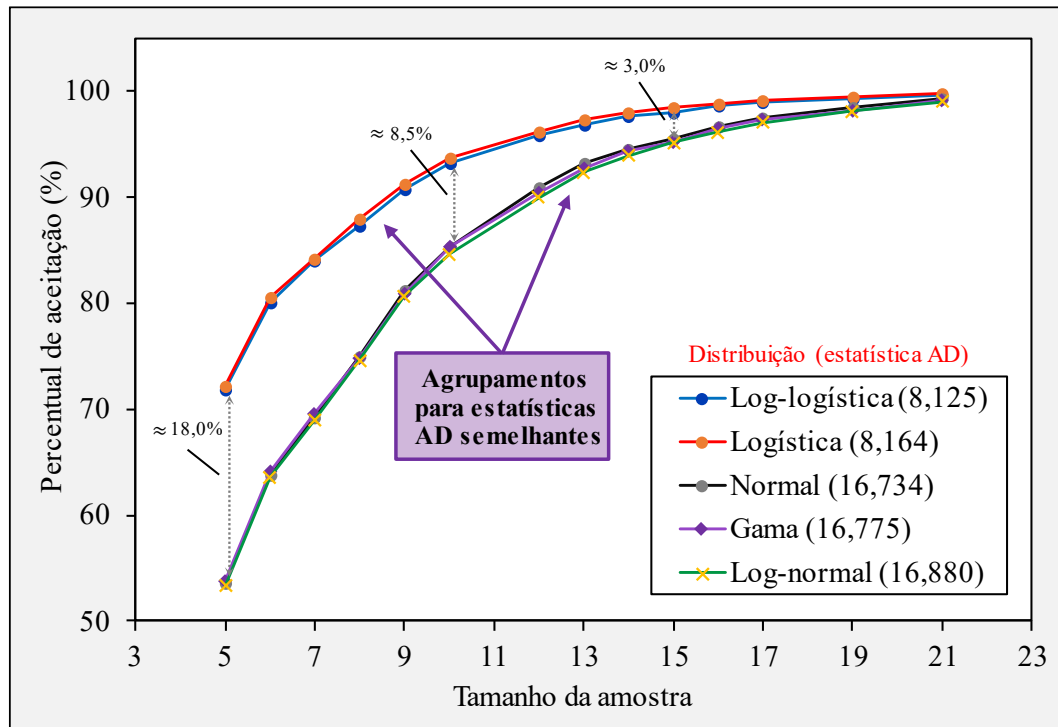
Figura 26 – Variação do percentual de aceitação entre a log-logística e normal



Fonte: Autor (2025).

Para a Obra 2, os resultados estão apresentados na Figura 27. Nota-se, de imediato, que para 5 amostras, a diferença nos percentuais de aceitação é significativamente maior em comparação à Obra 1, alcançando 18,0%.

Figura 27 – Percentual de aceitação para o %CAP – Obra 2



Fonte: Autor (2025).

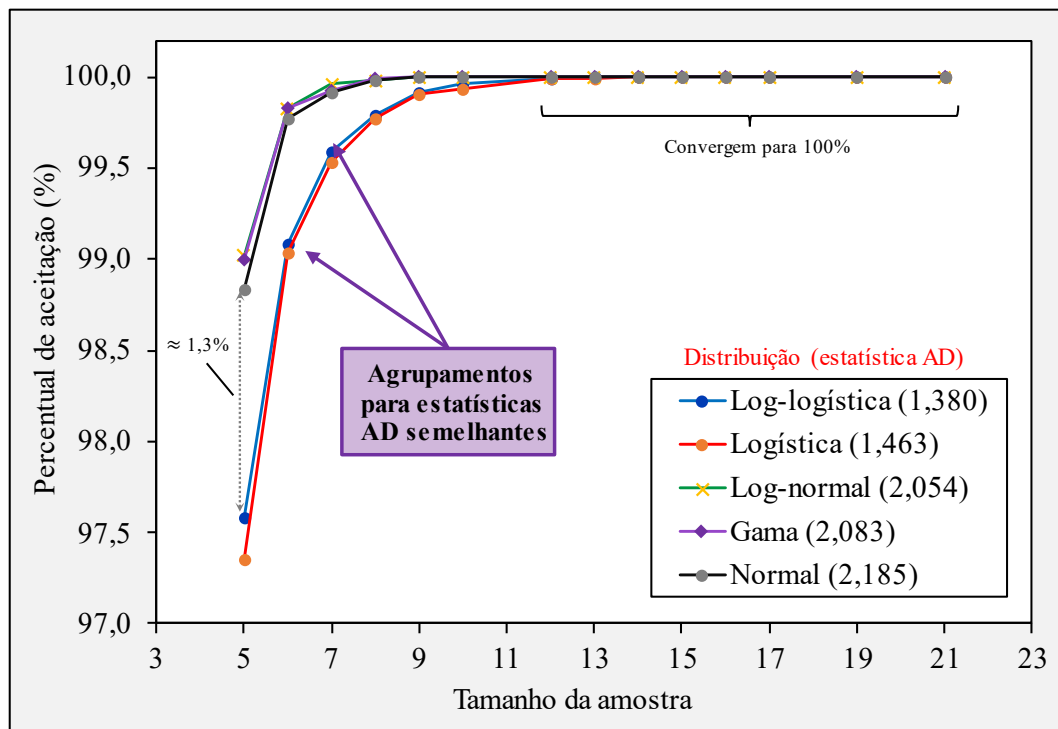
A Figura 27 mostra que algumas distribuições de probabilidade apresentam comportamentos semelhantes. As estatísticas AD das distribuições log-normal (16,880) e gama (16,775) são bastante próximas à da distribuição normal (16,734). Em contraste, as distribuições log-logística (8,125) e logística (8,164) possuem estatísticas AD similares entre si, mas consideravelmente diferentes das demais. O agrupamento das curvas de aceitação sugere que ajustes estatísticos semelhantes resultam em desempenhos igualmente próximos. Conforme o critério de aceitação/rejeição estabelecido na norma DNER 277, pequenos desvios de normalidade são desprezíveis e não comprometem a validade das decisões baseadas nessa hipótese. No entanto, esse pressuposto só se mantém quando a distribuição normal está entre as melhores ajustadas aos dados, o que não ocorre na Obra 2.

Para um tamanho amostral de 5, observa-se uma diferença significativa de aproximadamente 18,0% no percentual de aceitação entre as distribuições normal e log-logística, diferença que diminui com o aumento do tamanho da amostra, chegando a cerca de 8,5% para 10 amostras (Figura 26). As demais distribuições, como normal, gama e log-normal, também apresentam um crescimento no percentual de aceitação conforme o tamanho da amostra aumenta, embora com valores ligeiramente inferiores.

A distribuição log-logística, que apresentou o melhor ajuste aos dados, mantém um percentual de aceitação superior ao da distribuição normal para todos os tamanhos amostrais simulados. Isso se deve à sua maior eficiência em modelar a ocorrência de valores próximos ao valor de projeto. No caso analisado, a maior variabilidade prevista pela distribuição normal resulta na atribuição equivocada de uma qualidade inferior à execução da obra. Dessa forma, observa-se um viés de rejeição considerável para pequenas amostras, que diminui à medida que o número de amostras aumenta. Assim, o risco do executante, conforme indicado na norma DNER-PRO 277/97, pode ser maior do que o esperado para amostras menores, especialmente em cenários onde a não normalidade não pode ser desconsiderada. Por exemplo, considerando os valores de %CAP da Obra 2, a simulação indicou que, para 5 amostras e adotando a distribuição log-logística, o percentual de rejeição é de aproximadamente 28,0%. Em contrapartida, utilizando a distribuição normal no mesmo espaço amostral, cerca de 46,0% das amostras são rejeitadas.

Para a Obra 3, os resultados estão apresentados na Figura 28. Nota-se, de imediato, diferenças significativas em comparação as duas obras anteriores.

Figura 28 – Percentual de aceitação para o %CAP – Obra 3



Fonte: Autor (2025).

Com base na Figura 28, observa-se que as cinco distribuições analisadas apresentam valores da estatística AD muito próximos, indicando que pequenos desvios de normalidade são desprezíveis e não comprometem a validade das decisões baseadas nessa hipótese. Além disso, identificam-se dois agrupamentos, sendo o primeiro composto pelas distribuições log-logística (1,380) e logística (1,463), e o segundo pelas distribuições log-normal (2,054), gama (2,083) e normal (2,185). Destaca-se que, para 5 amostras, a diferença no percentual de aceitação entre as distribuições log-logística e normal é de aproximadamente 1,3%. Com o aumento do tamanho amostral, os percentuais de aceitação crescem gradativamente, convergindo para 100% quando  $n \geq 12$ . Esse comportamento ocorre porque não há grandes desvios de normalidade, visto que praticamente todas as amostras estão dentro dos limites de aceitação, conforme ilustrado na Figura 18.

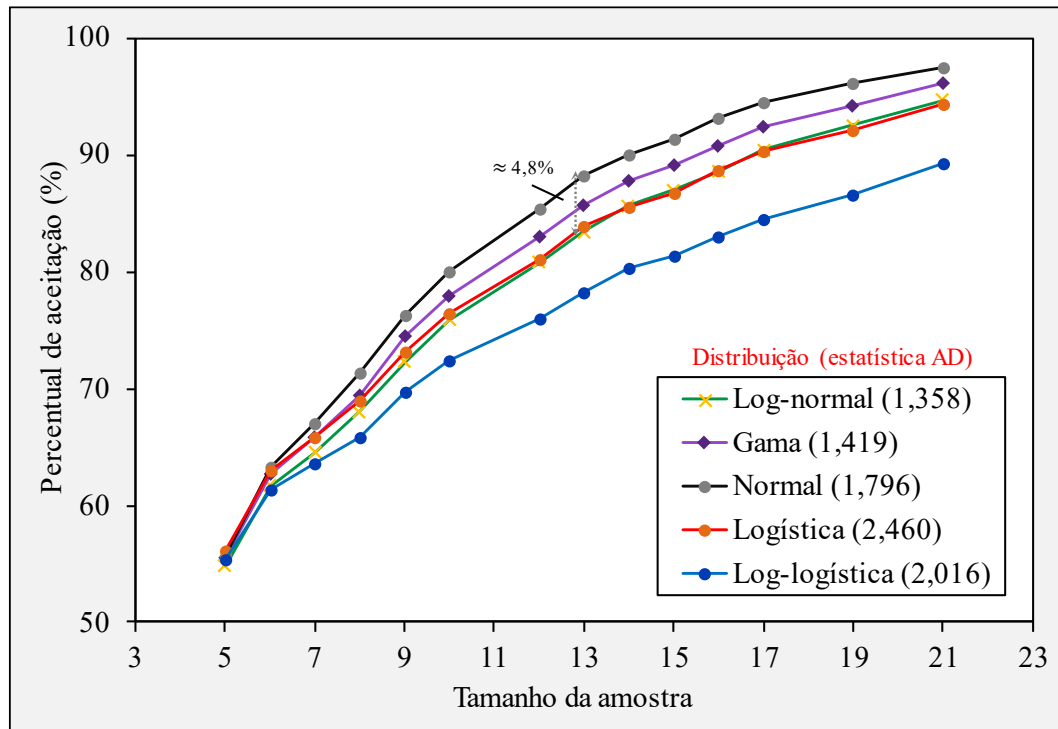
Apesar da análise ter sido realizada para a mesma propriedade (%CAP), cada obra apresentou resultados específicos. Isso se deve principalmente às diferenças entre os valores de projeto e os dados obtidos em campo, já que cada obra apresenta variações em termos de média e desvio padrão. Entretanto, um padrão comum foi identificado entre as três obras analisadas: quanto maior o tamanho amostral ( $n$ ), maior o percentual de aceitação. Isso indica que o risco do executante tende a diminuir à medida que mais ensaios são realizados. Esse comportamento já era previsto, conforme indicado na Tabela 1 da norma DNER 277 (1997).

#### **4.5.2 Percentual passante na peneira N° 200**

A simulação de Monte Carlo também foi realizada para o N° 200, com os resultados apresentados a seguir.

Ao analisar a Figura 29, nota-se um comportamento distinto em relação aos resultados do %CAP. Para 5 amostras, todos os percentuais de aceitação se estabilizam em 55,0%, sem convergirem para 100,0% à medida que  $n$  aumenta. Esse padrão contrasta com as análises anteriores, evidenciando a necessidade de uma investigação mais aprofundada desses dados. A distribuição log-normal (1,358) destaca-se como a mais apropriada para modelar os dados, sugerindo que a distribuição granulométrica do material apresenta características específicas que essa distribuição adere com maior precisão. Observa-se uma diferença máxima de 4,8% entre as distribuições log-normal e normal, indicando que pequenos desvios de normalidade não têm um impacto significativo na aceitação ou rejeição, desde que a distribuição normal apresente um bom ajuste dos dados.

Figura 29 – Percentual de aceitação para o N° 200 – Obra 1



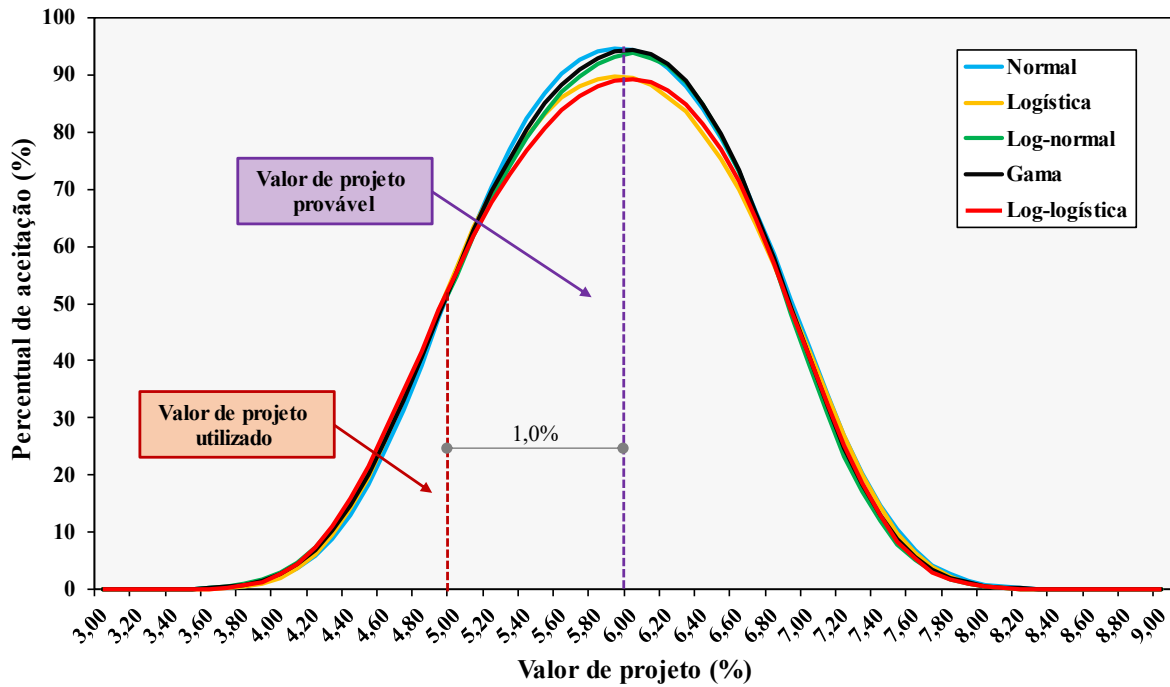
Fonte: Autor (2025).

Notavelmente, não há um padrão claro entre o valor da estatística AD e o percentual de aceitação, pois existem distribuições com estatísticas AD distintas que resultam em percentuais de aceitação praticamente iguais, como ocorre com a log-normal e a logística. Esse fenômeno não foi observado em nenhuma obra em relação ao %CAP.

Uma possível explicação para isso pode estar no fato de que o valor de projeto (5,0%) é consideravelmente baixo. Isso se torna evidente ao observar a Figura 20, pois praticamente todos os valores do N° 200 estão acima do valor de projeto. Em termos técnicos, isso não é adequado, pois as amostras coletadas em campo deveriam variar em torno do valor de projeto, sem um viés significativo para cima ou para baixo. Ao realizar uma nova análise considerando um valor de projeto igual a 6,0%, as curvas apresentaram agrupamentos mais próximos dos previstos para a estatística AD. Esse resultado corrobora a ideia de que o valor de projeto inicial não é o mais adequado para o conjunto de dados.

Para verificar essa hipótese, foi realizada uma nova simulação de Monte Carlo para a Obra 1, variando o valor de projeto e fixando  $n = 5$ . Dessa forma, para cada valor de projeto, foi determinado um percentual de aceitação. O valor de projeto que apresentou o maior percentual de aceitação foi considerado o mais provável para o conjunto de dados. Foi adotado um intervalo de (3,0; 9,0), com um passo de 0,2. Os resultados são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Percentual de aceitação (%) × Valor de projeto (%) do N° 200



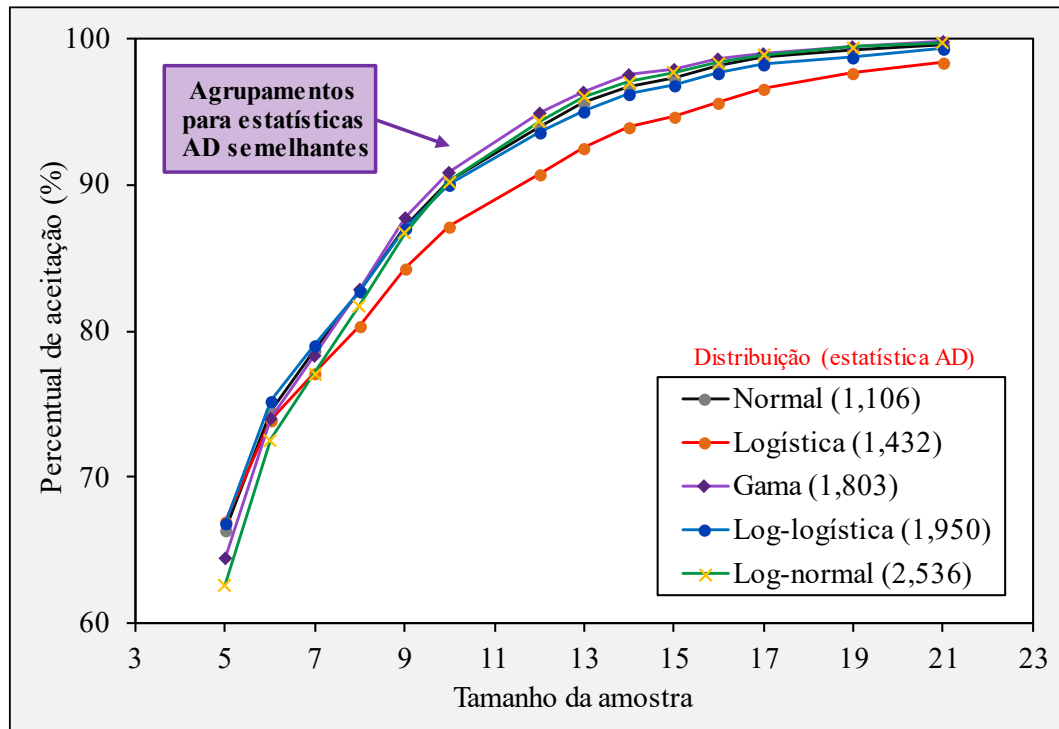
Fonte: Autor (2025).

Com base na Figura 30, o valor de projeto atualmente utilizado (5,0%) é inferior ao valor considerado mais provável (6,0%), com uma diferença de 1,0%. Essa subestimação pode indicar um risco maior de falha ou não conformidade, sugerindo a necessidade de revisar e ajustar o valor de projeto atual.

Para a Obra 2, os resultados estão apresentados na Figura 31. Assim como na Obra 1, os dados não exibem um padrão de agrupamento claro. No entanto, todos os valores de AD são bastante próximos, com a distribuição log-normal apresentando o valor mais elevado (2,536). Observa-se que a distribuição normal obteve o melhor ajuste. Nesse contexto, o percentual de aceitação reflete com precisão a situação da obra, indicando que ela realmente cumpriu com as exigências de normalidade da norma DNER 277.

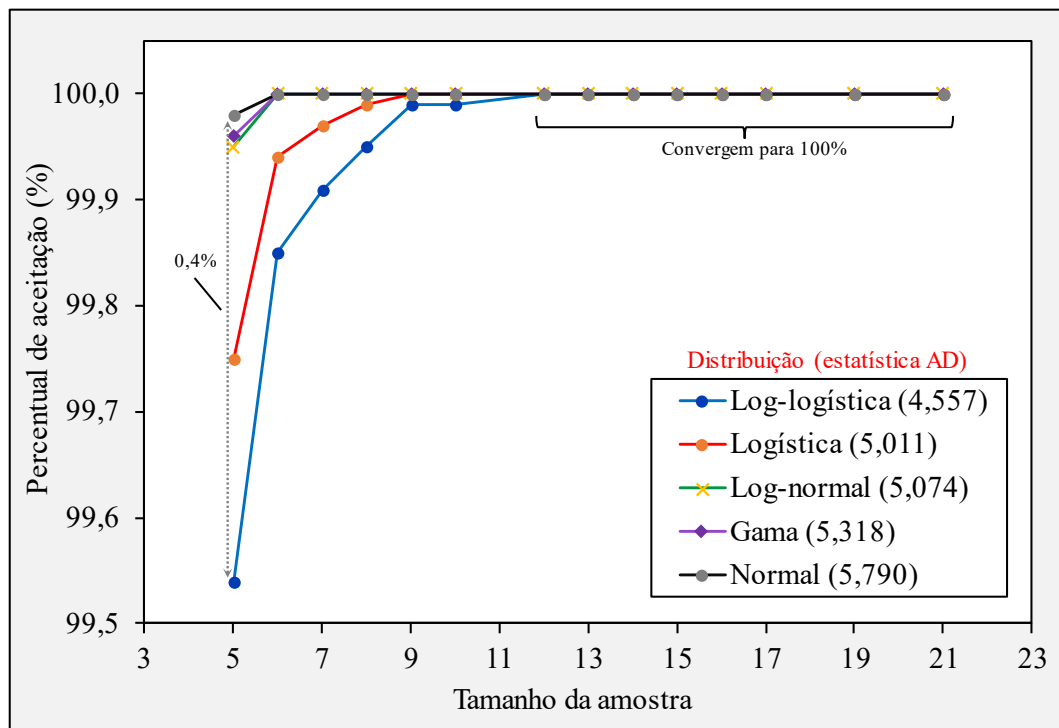
Por fim, a Figura 32 apresenta os resultados da Obra 3, nos quais os agrupamentos para as estatísticas AD próximas são atendidos. Assim, todas as distribuições demonstram um ajuste semelhante, com valores muito próximos de um percentual de aceitação de 100,0%. Isso é evidenciado pelo elevado percentual de aceitação, mesmo considerando apenas 5 amostras. Observa-se uma diferença de 0,4% entre as distribuições log-logística e normal, um valor praticamente desprezível. Os percentuais de aceitação tendem a aumentar com o tamanho da amostra, convergindo para 100% quando  $n \geq 12$ .

Figura 31 – Percentual de aceitação para o N° 200 – Obra 2



Fonte: Autor (2025).

Figura 32 – Percentual de aceitação para o N° 200 – Obra 3



Fonte: Autor (2025).

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a influência da distribuição de probabilidade dos dados no controle estatístico da qualidade de obras e serviços rodoviários, com foco no %CAP e no N° 200. Inicialmente, realizou-se uma análise estatística descritiva, incluindo a identificação e remoção de *outliers*, seguida pela verificação da aderência dos dados à distribuição normal por meio de testes de normalidade. Nesse sentido, foram empregados gráficos Q-Q e os testes de Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling, os quais indicaram a violação da suposição de normalidade dos dados das três analisadas. Essa constatação é relevante, pois a ausência de normalidade pode comprometer a metodologia de aceitação ou rejeição definida pela norma DNER-PRO 277/97.

Na etapa seguinte, realizou-se o ajuste das distribuições de probabilidade, permitindo a identificação de modelos estatísticos mais adequados para representar os dados. Os resultados indicaram que, para o %CAP, a distribuição log-logística apresentou melhor aderência em relação à normal. No que diz respeito ao N° 200, não foi identificada uma única distribuição que se adequasse a todas as obras analisadas. A distribuição log-normal foi a mais apropriada para a Obra 1, enquanto a distribuição normal se destacou na Obra 2 e a distribuição logística se adequou melhor aos dados da Obra 3.

A aplicação do Método de Monte Carlo possibilitou quantificar o impacto da não normalidade na aceitação ou rejeição dos serviços. Foram simulados cenários considerando diferentes distribuições de probabilidade, e os resultados mostraram que a escolha da distribuição influencia significativamente nos percentuais de aceitação. Para o %CAP, em amostras menores, verificou-se um viés de rejeição que diminui com o aumento do tamanho amostral. Esse fenômeno é corroborado pelo fato de que os percentuais de aceitação da distribuição normal são inferiores aos da log-logística. Assim, o risco do executante, conforme estabelecido pela norma DNER-PRO 277/97, pode ser maior do que o esperado em situações onde a não normalidade dos dados não pode ser desconsiderada.

Diante disso, os objetivos estabelecidos para este estudo foram plenamente alcançados. A investigação da hipótese de normalidade das características das misturas asfálticas densas demonstrou que a maioria dos dados não segue uma distribuição normal. Ademais, a estimativa do impacto da distribuição de probabilidade sobre os critérios de aceitação ou rejeição, realizada por meio do Método de Monte Carlo, evidenciou que a escolha da distribuição influencia diretamente a tomada de decisão. Dessa forma, o estudo forneceu subsídios relevantes para a reavaliação dos métodos estatísticos tradicionalmente empregados

no controle de qualidade de obras rodoviárias. Por fim, destaca-se que este estudo não tem a intenção de contestar a norma vigente, mas sim de promover uma reflexão sobre a hipótese fundamental que sustenta os critérios estatísticos de aceitação e rejeição na engenharia rodoviária.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Observa-se que há poucos trabalhos no Brasil que abordem o impacto da não normalidade dos dados no controle tecnológico da qualidade de obras e serviços rodoviários. Isso indica uma ampla margem para investigações e debates. Assim, com base nos resultados obtidos, propõem-se algumas direções para pesquisas futuras:

- a) Refazer novas análises para propriedades que não possuem um valor de projeto definido, como, por exemplo, o grau de compactação e o volume de vazios;
- b) Explorar métodos estatísticos adequados para a análise de dados com poucas amostras, uma vez que, testes de normalidade como o Kolmogorov-Smirnov são considerados menos sensíveis e podem não detectar desvios significativos da normalidade;
- c) Investigar o ajuste de distribuições de probabilidade por meio de métodos alternativos, como o teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e o Cramer-Von Mises.

**REFERÊNCIAS**

- AKBILGIÇ, O.; HOME, J. A. A Novel Normality Test Using an Identity Transformation of the Gaussian Function. v. 4, n. 4, p. 448–454, 2011.
- ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. Statistics notes: The normal distribution. **BMJ**, v. 310, n. 6975, p. 298–298, 1995.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. Asymptotic Theory of Certain “Goodness of Fit” Criteria Based on Stochastic Processes. v. 23, n. 2, p. 193–212, 1952.
- ARSHAD, M.; RASOOL, M. T.; AHMAD, M. I. Anderson Darling and Modified Anderson Darling Tests for Generalized Pareto Distribution. **Journal of Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 85–88, 2003.
- ASLAM, M. Introducing Grubbs’s test for detecting outliers under neutrosophic statistics – An application to medical data. **Journal of King Saud University - Science**, v. 32, n. 6, p. 2696–2700, 2020.
- ASMUSSEN, S.; GLYNN, P. W. **Stochastic simulation: algorithms and analysis**. New York: Springer, 2007.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BENSON, P. E.; CHONG, Y. S.; SAMANIEGO, F. J. Nonparametric Approach to Managing Materials Quality. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1712, n. 1, p. 109–116, 2000.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos ABEDA, 2022.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, v. 26, n. 2, p. 211–243, 1964.
- BROOKS, S. et al. **Handbook of Markov Chain Monte Carlo**. 1. ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2011.

- BUSSAB, W. DE O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- CAMPOS, V. F. **Qualidade Total - Padronização de Empresas**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992.
- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da qualidade: conceitos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 2010.
- CHIAPPORI, P.-A.; KOMUNJER, I.; KRISTENSEN, D. Nonparametric identification and estimation of transformation models. **Journal of Econometrics**, v. 188, n. 1, p. 22–39, 2015.
- CHUANG, S. C.; HUNG, Y. C. Uniform design over general input domains with applications to target region estimation in computer experiments. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 54, n. 1, p. 219–232, 2010.
- CIRILLO, M. A.; FERREIRA, D. F. Extensão do teste para normalidade univariado baseado no coeficiente de correlação quantil-quantil para o caso multivariado. v. 21, n. 3, p. 67–84, 2003.
- CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2023**. Brasília: CNT, 2023.
- CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2024**. Brasília: CNT, 2024.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- CROSBY, P. B. **Quality is free: the art of making quality certain**. New York: McGraw-Hill, 1979.
- DA SILVA, C. M. et al. Controle estatístico de qualidade usando o método bootstrap. **Scientia Plena**, v. 14, n. 3, 2018.
- DARBYSHIRE, P.; HAMPTON, D. **Hedge fund modelling and analysis using MATLAB®**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2014.
- DAS, K. R.; IMON, A. H. M. R. A Brief Review of Tests for Normality. **American Journal of Theoretical and Applied Statistics**, v. 5, n. 1, p. 5–12, 2016.
- DECOURSEY, W. J. **Statistics and probability for engineering applications with Microsoft® Excel**. 1. ed. Amsterdam: Newnes, 2003.

DECOURT, F.; NEVES, H. DA R.; BALDNER, P. R. **Planejamento e gestão estratégica**. 1. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2012.

DEMING, W. E. **Qualidade: A Revolução da Administração**. Rio de Janeiro: Marques Saraiva, 1990.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

DNER 277. **NORMA DNER-PRO 277/97 - Metodologia para controle estatístico de obras e serviços**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DNIT 011. **NORMA DNIT 011/2004-PRO - Gestão da qualidade em obras rodoviárias - Procedimento**. Rio de Janeiro: DNIT, 2004a.

DNIT 013. **NORMA DNIT 013/2004-PRO - Requisitos para a qualidade na execução de obras rodoviárias - Procedimento**. Rio de Janeiro: DNIT, 2004b.

DNIT 031. **NORMA DNIT 031/2024-ES - Pavimentação - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2024.

DNIT 449. **DNIT 449/2024-PRO - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Parâmetros volumétricos para dosagem de misturas asfálticas - Procedimento**. Rio de Janeiro: DNIT, 2024.

DUFOUR, J.-M. et al. Simulation-based finite sample normality tests in linear regressions. v. 1, p. 154–173, 1998.

FAZANO, C. A. **Qualidade: a evolução de um conceito**. São Paulo: Banas Qualidade, 2006.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2008.

FIELD, A. **Descobrendo a Estatística Usando o SPSS**. São Paulo: Artmed, 2009.

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

GOUVEIA, M. A. DA C. **Controle estatístico da qualidade**. Londrina: Editora e Distribuidora educacional S.A., 2018.

GRAMI, A. **Probability, Random Variables, Statistics, and Random Processes: Fundamentals & Applications**. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2020.

GRUBBS, F. E. Sample Criteria for Testing Outlying Observations. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 21, n. 1, p. 27–58, 1950.

GUPTA, B. C.; GUTTMAN, I.; JAYALATH, K. P. **Statistics and Probability with Applications for Engineers and Scientists using MINITAB, R and JMP**. 2. ed. [s.l.] Wiley, 2020.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAIRIYAH, N.; AMALIA, R. R.; LULIYANTI, E. Analisis Statistical Quality Control (SQC) pada Produksi Roti di Aremania Bakery. **Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri**, v. 8, n. 1, p. 41–48, 2019.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo methods**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1964.

HAWKINS, D. M. **Identification of Outliers**. 1. ed. Dordrecht: Springer Dordrecht, 1980.

HINKLEY, D. V. On power transformations to symmetry. **Biometrika**, v. 62, n. 1, p. 101–111, 1975.

HIRAKATA, V. N.; MANCUSO, A. C. B.; CASTRO, S. M. D. J. Teste de hipóteses: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. **Clinical & Biomedical Research**, v. 39, n. 2, p. 181–185, 2019.

HUBBARD, M. R. **Statistical Quality Control for the Food Industry**. 2. ed. Boston, MA: Springer, 1996.

HUNG, Y. A review of Monte Carlo and quasi-Monte Carlo sampling techniques. **WIREs Computational Statistics**, v. 16, n. 1, p. 1–23, 2024.

HUOT, R. **Métodos Quantitativos para as Ciências Humanas**. Lisboa: Instituto Piaget, 2002.

ISHIKAWA, K. **Controle de qualidade total a maneira japonesa**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1993.

JATO-ESPINO, D. et al. A fuzzy stochastic multi-criteria model for the selection of urban pervious pavements. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 15, p. 6807–6817, 2014.

JATO-ESPINO, D. et al. Decision support model for the selection of asphalt wearing courses in highly trafficked roads. **Soft Computing**, v. 22, n. 22, p. 7407–7421, 2018.

JURAN, J. M. **Planejando para a qualidade**. 3. ed. Sao Paulo: Pioneira, 1995.

KATICHA, S. W. et al. Variability and Normality Assumptions for Virginia Department of Transportation Volumetric Properties: Analysis of Contractor Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2228, n. 1, p. 87–95, 2011.

KIM, T. K. T test as a parametric statistic. **Korean Journal of Anesthesiology**, v. 68, n. 6, p. 540–546, 2015.

KIM, Y. R. et al. Application of viscoelastic continuum damage model based finite element analysis to predict the fatigue performance of asphalt pavements. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 2, p. 109–120, 2008.

KING, A. P.; ECKERSLEY, R. J. **Statistics for biomedical engineers and scientists: how to visualize and analyze data**. 1. ed. London, United Kingdom: Academic Press, 2019.

KISSELL, R.; POSERINA, J. **Optimal sports math, statistics, and fantasy**. London San Diego, CA Cambridge, MA: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017.

KROESE, D. P. et al. Why the Monte Carlo method is so important today. **WIREs Computational Statistics**, v. 6, n. 6, p. 386–392, 2014.

KUSUMA, A. A. et al. ANALISIS PENGENDALIAN MUTU PRODUK STIK DUDA MEMPAAWAH: Analisis of Product Quality Control of Incense Sticks Using Statistical Quality Control (SQC) at PT XY Mempawah Regency. **Jurnal Penelitian Hasil Hutan**, v. 41, n. 3, p. 121–136, 2023.

KUTNER, M. H. et al. **Applied linear regression models**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2004.

LAMPRECHT, J. L. **ISO 9000: preparing for registration**. Milwaukee : New York: ASQC Quality Press ; Marcel Dekker, 1992.

LEMONTE, A. J. The beta log-logistic distribution. **Brazilian Journal of Probability and Statistics**, v. 28, n. 3, p. 313–332, 2014.

LEOTTI, V. B.; BIRCK, A. R.; RIBOLDI, J. **Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, Anderson-Darling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação**. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). **Anais...**Londrina: 2005.

LEVY, S.; STEINBERG, D. M. Computer experiments: a review. **AStA Advances in Statistical Analysis**, v. 94, n. 4, p. 311–324, 2011.

LINS, B. E. Breve história da engenharia da qualidade. v. 4, n. 12, p. 53–65, 2000.

LOPES, M. D. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **TRANSPORTES**, v. 21, n. 1, p. 59–66, 2013.

MA, F. et al. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, 2021.

MALLICK, R. B.; EL-KORCHI, T. **Pavement engineering: principles and practice**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2013.

MAROCO, J. **Análise estatística com utilização do SPSS**. 3. ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2007.

MCLEISH, D. L. **Monte Carlo simulation and finance**. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.

MIOT, H. A. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 16, n. 2, p. 88–91, 2017.

MITRA, A. **Fundamentals of quality control and improvement**. 4. ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 6. ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUGENR, G. C. **Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros**. 4. ed. [s.l.] LTC, 2009.

NAVARRETE, C. et al. Resistance to Fatigue in Asphalts Used in Military Airports of the Brazilian Amazon through the Use of Nickel-Holding Ash. **Applied Sciences**, v. 12, n. 18, p. 9134, 2022.

OSBORNE, J. W. Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. v. 15, n. 12, p. 1–9, 2010.

ÖZTUNA, D.; ELHAN, A. H.; TÜCCAR, E. Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type 1 Error Rate and Power under Different Distributions. **Turk J Med Sci**, v. 36, n. 3, p. 171–176, 2006.

PEREIRA, B. R.; PINHEIRO, E. C. N. M. Flexible Pavement Analysis - Study of a critical stretch on the AM highway - 010. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 8, n. 6, p. 218–225, 2021.

PINO, F. A. A questão da não-normalidade: uma revisão. **São Paulo**, v. 61, n. 2, p. 17–33, 2014.

PIRACELLI, V. et al. EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM CONDIÇÕES REAIS DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: MATERIAL PARTICULADO, BLACK CARBON E HIDROCARBONETOS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS. **Química Nova**, v. 43, n. 4, p. 404–412, 2020.

QUEVEDO, F. Medidas de tendencia central y dispersión. **Medwave**, v. 11, n. 03, 2011.

ROBINSON, R.; THAGESEN, B. **Road engineering for development**. 2. ed. London: Spon Press, 2004.

ROHATGI, V. K.; SALEH, A. K. M. E. **An introduction to probability and statistics**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

ROSS, S. M. **Introduction to probability and statistics for engineers and scientists**. 4. ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2009.

ROSS, S. M. **Introduction to probability models**. 10. ed. Amsterdam, Boston: Academic Press, 2010.

- ROSS, S. M. **Simulation**. 5. ed. Amsterdam: Academic Press, 2013.
- SAKALAUSKAS, L. Application of the Monte-Carlo Method to Nonlinear Stochastic Optimization with Linear Constraints. **Informatica**, v. 15, n. 2, p. 271–282, 2004.
- SANTOS, A. C. D.; FERREIRA, D. F. Definição do tamanho amostral usando simulação Monte Carlo para o teste de normalidade baseado em assimetria e curtose: I. Abordagem univariada. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 2, p. 432–437, 2003.
- SENA, E. L. **Caracterização da variabilidade construtiva de revestimentos asfálticos densos em obras rodoviárias cearenses**. Monografia—Crateús: Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 2023.
- SENÇO, W. D. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008. v. 1
- SEO, Y. Development and implementation of Korea's first Percent within Limit (PWL) specification for road pavements. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 353–361, 2010.
- SHOUKRI, M. M.; MIAN, I. U. H.; TRACY, D. S. Sampling properties of estimators of the log-logistic distribution with application to Canadian precipitation data. **Canadian Journal of Statistics**, v. 16, n. 3, p. 223–236, 1988.
- SIEGEL, A. F. **Practical business statistics**. 6. ed. Amsterdam: Academic Press, 2012.
- SOARES, J. B. Reflexões sobre um programa de pesquisa científica para a infraestrutura viária do Brasil. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 154–168, 2020.
- SOBOL, I. M.; KUCHERENKO, S. S. On global sensitivity analysis of quasi-Monte Carlo algorithms. **Monte Carlo Methods and Applications**, v. 11, n. 1, p. 83–92, 2005.
- SOUZA, R. DE. **Sistema de gestão da qualidade para empresas construtoras**. São Paulo: Pini, 1995.
- TAYLOR, J. M. G. Power transformations to symmetry. **Biometrika**, v. 72, n. 1, p. 145–152, 1985.
- TAYLOR, R. A. J. **Taylor's power law: order and pattern in nature**. 1. ed. SanDiego: Elsevier, 2019.

TÓTH, C. Analysis of the quality variances of asphalt production by Monte Carlo Simulation. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 54, n. 1, p. 67, 2010.

TRIVEDI, K. S. **Probability and statistics with reliability, queuing, and computer science applications**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.

UDDIN, M. et al. Solution to Nonnormality in Quality Assurance and Acceptance Quality Characteristics Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2268, n. 1, p. 50–58, 2012.

UDDIN, M.; GOODRUM, P. M.; MAHBOUB, K. C. Severity of Nonnormality in Pavement Quality Assurance: Acceptance Quality Characteristics Data and Adverse Effects on Acceptance and Pay. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2228, n. 1, p. 70–77, 2011.

UDDIN, M. M. **Lean Construction Quality Assurance Opportunities in Highway Construction**. . Em: 28TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION (IGLC). Berkeley, California, USA: 2020. Disponível em: <<http://iglc.net/Papers/Details/1758>>. Acesso em: 1 jan. 2025

VIEIRA, I. E. V. **Estudo de caso sobre a variabilidade de parâmetros construtivos de camadas granulares em um pavimento asfáltico**. Monografia—Crateús: Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 2022.

WALPOLE, R. E. et al. **Probability & statistics for Engineers & Scientists**. 9. ed. Boston: Pearson, 2017.

WHITLEY, E.; BALL, J. Statistics review 2: Samples and populations. v. 6, n. 2, 2002.

XU, W.; LI, Y.; SONG, D. Testing normality in mixed models using a transformation method. **Statistical Papers**, v. 54, n. 1, p. 71–84, 2013.

YAHYA, K.; BOUSSABAIN, A. H. Eco-costing of construction waste. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 17, n. 1, p. 6–19, 2006.

YEO, I.-K.; JOHNSON, R. A. A new family of power transformations to improve normality or symmetry. **Biometrika**, v. 87, n. 4, p. 954–959, 2000.

**APÊNDICE A – PLANILHA DE DADOS DA OBRA 1**

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
18/03/2020	5,58	6,27
18/03/2020	5,58	6,27
18/03/2020	5,58	6,27
19/03/2020	5,35	5,85
19/03/2020	5,35	5,85
19/03/2020	5,35	5,85
19/03/2020	5,83	4,97
19/03/2020	5,83	4,97
19/03/2020	5,83	4,97
21/03/2020	6,01	6,69
21/03/2020	6,01	6,69
21/03/2020	6,01	6,69
23/03/2020	5,91	6,38
23/03/2020	5,91	6,38
23/03/2020	5,91	6,38
23/03/2020	5,63	5,99
23/03/2020	5,63	5,99
23/03/2020	5,63	5,99
24/03/2020	5,70	6,03
24/03/2020	5,70	6,03
24/03/2020	5,70	6,03
25/03/2020	5,38	5,23
25/03/2020	5,38	5,23
25/03/2020	5,38	5,23
25/03/2020	5,60	5,31
25/03/2020	5,60	5,31
25/03/2020	5,60	5,31
26/03/2020	5,54	6,08
26/03/2020	5,54	6,08
26/03/2020	5,54	6,08
18/03/2020	5,58	6,27
18/03/2020	5,58	6,27
18/03/2020	5,58	6,27
19/03/2020	5,35	5,85
19/03/2020	5,35	5,85
19/03/2020	5,35	5,85
19/03/2020	5,83	4,97
19/03/2020	5,83	4,97
19/03/2020	5,83	4,97

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
21/03/2020	6,01	6,69
21/03/2020	6,01	6,69
21/03/2020	6,01	6,69
23/03/2020	5,91	6,38
23/03/2020	5,91	6,38
23/03/2020	5,91	6,38
23/03/2020	5,63	5,99
23/03/2020	5,63	5,99
23/03/2020	5,63	5,99
24/03/2020	5,70	6,03
24/03/2020	5,70	6,03
24/03/2020	5,70	6,03
25/03/2020	5,38	5,23
25/03/2020	5,38	5,23
25/03/2020	5,38	5,23
25/03/2020	5,60	5,31
25/03/2020	5,60	5,31
25/03/2020	5,60	5,31
26/03/2020	5,54	6,08
26/03/2020	5,54	6,08
26/03/2020	5,54	6,08
08/07/2020	5,49	4,34
08/07/2020	5,49	4,34
08/07/2020	5,49	4,34
09/07/2020	5,42	6,68
09/07/2020	5,42	6,68
09/07/2020	5,42	6,68
28/07/2020	5,54	5,44
28/07/2020	5,54	5,44
28/07/2020	5,54	5,44
29/07/2020	5,59	6,51
29/07/2020	5,59	6,51
29/07/2020	5,59	6,51
31/07/2020	5,20	7,07
31/07/2020	5,20	7,07
31/07/2020	5,20	7,07
31/07/2020	5,47	5,76
31/07/2020	5,47	5,76
31/07/2020	5,47	5,76
20/08/2020	5,40	6,62
20/08/2020	5,40	6,62
20/08/2020	5,40	6,62

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
21/08/2020	5,49	6,71
21/08/2020	5,49	6,71
21/08/2020	5,49	6,71
27/08/2020	5,75	6,24
27/08/2020	5,75	6,24
27/08/2020	5,75	6,24
27/08/2020	5,50	6,99
27/08/2020	5,50	6,99
27/08/2020	5,50	6,99
28/08/2020	5,37	6,90
28/08/2020	5,37	6,90
28/08/2020	5,37	6,90
31/08/2020	5,37	6,37
31/08/2020	5,37	6,37
31/08/2020	5,37	6,37
31/08/2020	5,35	6,11
31/08/2020	5,35	6,11
31/08/2020	5,35	6,11
15/09/2020	5,26	7,25
15/09/2020	5,26	7,25
15/09/2020	5,26	7,25
15/09/2020	5,68	7,25
15/09/2020	5,68	7,25
15/09/2020	5,68	7,25
16/09/2020	5,54	7,10
16/09/2020	5,54	7,10
16/09/2020	5,54	7,10
16/09/2020	5,66	5,40
16/09/2020	5,66	5,40
16/09/2020	5,66	5,40
18/09/2020	5,40	6,98
18/09/2020	5,40	6,98
18/09/2020	5,40	6,98
23/09/2020	5,58	6,77
23/09/2020	5,58	6,77
23/09/2020	5,58	6,77
24/09/2020	5,45	7,29
24/09/2020	5,45	7,29
24/09/2020	5,45	7,29
24/09/2020	6,13	6,80
24/09/2020	6,13	6,80
24/09/2020	6,13	6,80

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
28/09/2020	5,35	5,95
28/09/2020	5,35	5,95
28/09/2020	5,35	5,95
28/09/2020	5,32	5,53
28/09/2020	5,32	5,53
28/09/2020	5,32	5,53
14/12/2020	5,32	5,09
14/12/2020	5,32	5,09
14/12/2020	5,32	5,09
15/12/2020	5,78	7,35
15/12/2020	5,78	7,35
15/12/2020	5,78	7,35
16/12/2020	5,22	5,49
16/12/2020	5,22	5,49
16/12/2020	5,22	5,49
13/01/2021	5,57	6,26
13/01/2021	5,57	6,26
13/01/2021	5,57	6,26
14/01/2021	5,25	5,66
14/01/2021	5,25	5,66
14/01/2021	5,25	5,66
14/01/2021	5,60	5,74
14/01/2021	5,60	5,74
14/01/2021	5,60	5,74
15/01/2021	5,41	5,82
15/01/2021	5,41	5,82
15/01/2021	5,41	5,82
15/01/2021	5,41	5,22
15/01/2021	5,41	5,22
15/01/2021	5,41	5,22
16/01/2021	5,26	5,91
16/01/2021	5,26	5,91
16/01/2021	5,26	5,91
18/01/2021	5,55	6,07
18/01/2021	5,55	6,07
18/01/2021	5,55	6,07
19/01/2021	5,67	6,42
19/01/2021	5,67	6,42
19/01/2021	5,67	6,42
20/01/2021	5,36	5,61
20/01/2021	5,36	5,61
20/01/2021	5,36	5,61

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
20/01/2021	5,39	7,02
20/01/2021	5,39	7,02
20/01/2021	5,39	7,02
21/01/2021	5,49	6,32
21/01/2021	5,49	6,32
21/01/2021	5,49	6,32
21/01/2021	5,19	6,20
21/01/2021	5,19	6,20
21/01/2021	5,19	6,20
22/01/2021	5,52	6,54
22/01/2021	5,52	6,54
22/01/2021	5,52	6,54
23/01/2021	5,43	4,93
23/01/2021	5,43	4,93
23/01/2021	5,43	4,93
26/01/2021	5,55	5,61
26/01/2021	5,55	5,61
26/01/2021	5,55	5,61
27/01/2021	5,53	6,67
27/01/2021	5,53	6,67
27/01/2021	5,53	6,67
28/01/2021	5,25	5,19
28/01/2021	5,25	5,19
28/01/2021	5,25	5,19
02/03/2020	5,51	5,15
02/03/2020	5,51	5,15
02/03/2020	5,51	5,15
03/03/2020	5,32	5,26
03/03/2020	5,32	5,26
03/03/2020	5,32	5,26
03/03/2020	5,40	4,60
03/03/2020	5,40	4,60
03/03/2020	5,40	4,60
15/07/2021	5,44	5,32
15/07/2021	5,44	5,32
15/07/2021	5,44	5,32
15/07/2021	5,50	6,56
15/07/2021	5,50	6,56
15/07/2021	5,50	6,56
16/07/2021	5,53	6,30
16/07/2021	5,53	6,30
16/07/2021	5,53	6,30

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
16/07/2021	5,65	6,71
16/07/2021	5,65	6,71
16/07/2021	5,65	6,71
17/07/2021	5,50	5,60
17/07/2021	5,50	5,60
17/07/2021	5,50	5,60
17/07/2021	5,48	6,61
17/07/2021	5,48	6,61
17/07/2021	5,48	6,61
18/07/2021	5,33	5,69
18/07/2021	5,33	5,69
18/07/2021	5,33	5,69
18/07/2021	5,60	5,09
18/07/2021	5,60	5,09
18/07/2021	5,60	5,09
19/07/2021	5,41	6,59
19/07/2021	5,41	6,59
19/07/2021	5,41	6,59
10/08/2021	5,56	4,83
10/08/2021	5,56	4,83
10/08/2021	5,56	4,83
11/08/2021	5,67	5,67
11/08/2021	5,67	5,67
11/08/2021	5,67	5,67
14/08/2021	5,72	6,63
14/08/2021	5,72	6,63
14/08/2021	5,72	6,63
14/08/2021	5,44	5,61
14/08/2021	5,44	5,61
14/08/2021	5,44	5,61
10/08/2021	5,56	4,83
10/08/2021	5,56	4,83
10/08/2021	5,56	4,83
11/08/2021	5,67	5,67
11/08/2021	5,67	5,67
11/08/2021	5,67	5,67
18/08/2021	5,66	7,51
18/08/2021	5,66	7,51
18/08/2021	5,66	7,51
19/08/2021	5,38	6,75
19/08/2021	5,38	6,75
19/08/2021	5,38	6,75

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
25/08/2021	5,56	6,22
25/08/2021	5,56	6,22
25/08/2021	5,56	6,22
26/08/2021	5,32	5,46
26/08/2021	5,32	5,46
26/08/2021	5,32	5,46
27/08/2021	5,49	5,07
27/08/2021	5,49	5,07
27/08/2021	5,49	5,07
28/08/2021	5,41	5,98
28/08/2021	5,41	5,98
28/08/2021	5,41	5,98
28/08/2021	5,53	5,35
28/08/2021	5,53	5,35
28/08/2021	5,53	5,35
06/09/2021	5,74	5,61
06/09/2021	5,74	5,61
06/09/2021	5,74	5,61
07/09/2021	5,49	5,66
07/09/2021	5,49	5,66
07/09/2021	5,49	5,66
08/09/2021	5,79	6,75
08/09/2021	5,79	6,75
08/09/2021	5,79	6,75
09/09/2021	5,50	5,60
09/09/2021	5,50	5,60
09/09/2021	5,50	5,60
09/09/2021	5,64	5,73
09/09/2021	5,64	5,73
09/09/2021	5,64	5,73
10/09/2021	5,77	6,43
10/09/2021	5,77	6,43
10/09/2021	5,77	6,43
10/09/2021	5,45	5,33
10/09/2021	5,87	5,33
10/09/2021	5,45	5,33
13/09/2021	5,64	5,69
13/09/2021	5,64	5,69
13/09/2021	5,64	5,69
14/09/2021	5,69	5,80
14/09/2021	5,69	5,80
14/09/2021	5,69	5,80

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
17/09/2021	5,62	5,03
17/09/2021	5,62	5,03
17/09/2021	5,62	5,03
18/09/2021	5,68	6,51
18/09/2021	5,68	6,51
18/09/2021	5,68	6,51
20/09/2021	5,51	5,77
20/09/2021	5,51	5,77
20/09/2021	5,51	5,77
20/09/2021	5,58	5,48
20/09/2021	5,58	5,48
20/09/2021	5,58	5,48
21/09/2021	5,67	5,67
21/09/2021	5,67	5,67
21/09/2021	5,67	5,67
21/09/2021	5,69	5,60
21/09/2021	5,69	5,60
21/09/2021	5,69	5,60
22/09/2021	5,66	6,38
22/09/2021	5,66	6,38
22/09/2021	5,66	6,38
22/09/2021	5,49	5,82
22/09/2021	5,49	5,82
22/09/2021	5,49	5,82
23/09/2021	5,50	5,42
23/09/2021	5,50	5,42
23/09/2021	5,50	5,42
23/09/2021	5,33	5,30
23/09/2021	5,33	5,30
23/09/2021	5,33	5,30
25/09/2021	5,60	5,42
25/09/2021	5,60	5,42
25/09/2021	5,60	5,42
30/09/2021	5,66	5,83
30/09/2021	5,66	5,83
30/09/2021	5,66	5,83
04/10/2021	5,90	5,50
04/10/2021	5,90	5,50
04/10/2021	5,90	5,50
05/10/2021	5,57	3,76
05/10/2021	5,57	3,76
05/10/2021	5,57	3,76

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>N° 200 (%)</b>
05/10/2021	5,61	5,00
05/10/2021	5,61	5,00
05/10/2021	5,61	5,00
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,40	5,22
06/10/2021	5,25	5,26
06/10/2021	5,25	5,26
06/10/2021	5,25	5,26

**APÊNDICE B – PLANILHA DE DADOS DA OBRA 2**

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
07/07/2014	5,46	4,10
07/07/2014	5,46	4,10
07/07/2014	5,46	4,10
16/07/2014	5,93	4,20
16/07/2014	5,93	4,20
16/07/2014	5,93	4,20
07/07/2014	5,79	4,10
07/07/2014	5,79	4,10
07/07/2014	5,79	4,10
16/07/2014	5,93	4,20
16/07/2014	5,93	4,20
16/07/2014	5,93	4,20
17/07/2014	5,81	4,10
17/07/2014	5,81	4,10
17/07/2014	5,81	4,10
18/07/2014	5,73	4,80
18/07/2014	5,73	4,80
18/07/2014	5,73	4,80
19/07/2014	6,11	4,40
19/07/2014	6,11	4,40
19/07/2014	6,11	4,40
28/08/2014	5,74	3,90
28/08/2014	5,74	3,90
28/08/2014	5,74	3,90
08/09/2014	6,20	4,90
08/09/2014	6,20	4,90
08/09/2014	6,20	4,90
08/09/2014	6,05	4,30
08/09/2014	6,05	4,30
08/09/2014	6,05	4,30
10/10/2014	5,46	4,10
10/10/2014	5,46	4,10
10/10/2014	5,46	4,10
09/10/2014	5,25	2,10
09/10/2014	5,25	2,10
09/10/2014	5,25	2,10
15/10/2014	6,06	2,70
15/10/2014	6,06	2,70
15/10/2014	6,06	2,70

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
16/10/2014	5,92	4,40
16/10/2014	5,92	4,40
16/10/2014	5,92	4,40
29/10/2014	6,24	3,60
29/10/2014	6,24	3,60
29/10/2014	6,24	3,60
31/10/2014	5,94	3,40
31/10/2014	5,94	3,40
31/10/2014	5,94	3,40
04/11/2014	6,17	4,10
04/11/2014	6,17	4,10
04/11/2014	6,17	4,10
10/11/2014	5,46	4,70
10/11/2014	5,46	4,70
10/11/2014	5,46	4,70
27/11/2014	5,56	5,50
27/11/2014	5,56	5,50
27/11/2014	5,56	5,50
05/02/2015	5,89	4,50
05/02/2015	5,89	4,50
05/02/2015	5,89	4,50
09/02/2015	5,46	4,70
09/02/2015	5,46	4,70
09/02/2015	5,46	4,70
10/02/2015	5,86	4,00
10/02/2015	5,86	4,00
10/02/2015	5,86	4,00
10/02/2015	6,00	3,20
10/02/2015	6,00	3,20
10/02/2015	6,00	3,20
11/02/2015	6,12	3,30
11/02/2015	6,12	3,30
11/02/2015	6,12	3,30
11/02/2015	6,12	2,60
11/02/2015	6,12	2,60
11/02/2015	6,12	2,60
13/02/2015	6,54	3,40
13/02/2015	6,54	3,40
13/02/2015	6,54	3,40
13/02/2015	4,95	4,40
13/02/2015	4,95	4,40
13/02/2015	4,95	4,40

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
14/03/2015	6,43	3,70
14/03/2015	6,43	3,70
14/03/2015	6,43	3,70
16/03/2015	6,15	5,10
16/03/2015	6,15	5,10
16/03/2015	6,15	5,10
09/04/2015	5,98	3,30
09/04/2015	5,98	3,30
09/04/2015	5,98	3,30
18/03/2015	5,41	4,10
18/03/2015	5,41	4,10
18/03/2015	5,41	4,10
10/04/2015	6,30	3,20
10/04/2015	6,30	3,20
10/04/2015	6,30	3,20
16/03/2015	6,15	5,10
16/03/2015	6,15	5,10
16/03/2015	6,15	5,10
19/05/2015	5,76	3,70
19/05/2015	5,76	3,70
19/05/2015	5,76	3,70
20/05/2015	5,88	3,80
20/05/2015	5,88	3,80
20/05/2015	5,88	3,80
21/05/2015	5,84	3,70
21/05/2015	5,84	3,70
21/05/2015	5,84	3,70
22/05/2015	5,79	3,20
22/05/2015	5,79	3,20
22/05/2015	5,79	3,20
03/06/2015	5,80	3,20
03/06/2015	5,80	3,20
03/06/2015	5,80	3,20
22/06/2015	5,91	4,10
22/06/2015	5,91	4,10
22/06/2015	5,91	4,10
26/06/2015	5,78	3,60
26/06/2015	5,78	3,60
26/06/2015	5,78	3,60
08/10/2015	5,91	3,60
08/10/2015	5,91	3,60
08/10/2015	5,91	3,60

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
08/10/2015	5,85	3,20
08/10/2015	5,85	3,20
08/10/2015	5,85	3,20
09/10/2015	5,76	3,40
09/10/2015	5,76	3,40
09/10/2015	5,76	3,40
10/10/2015	5,76	3,60
10/10/2015	5,76	3,60
10/10/2015	5,76	3,60
13/10/2015	5,83	4,00
13/10/2015	5,83	4,00
13/10/2015	5,83	4,00
13/10/2015	5,83	3,00
13/10/2015	5,83	3,00
13/10/2015	5,83	3,00
14/10/2015	5,78	3,30
14/10/2015	5,78	3,30
14/10/2015	5,78	3,30
14/10/2015	5,90	3,60
14/10/2015	5,90	3,60
14/10/2015	5,90	3,60
15/10/2015	5,68	3,60
15/10/2015	5,68	3,60
15/10/2015	5,68	3,60
15/10/2015	5,78	3,60
15/10/2015	5,78	3,60
15/10/2015	5,78	3,60
16/10/2015	5,68	3,00
16/10/2015	5,68	3,00
16/10/2015	5,68	3,00
16/10/2015	5,92	3,40
16/10/2015	5,92	3,40
16/10/2015	5,92	3,40
29/10/2015	5,91	3,50
29/10/2015	5,91	3,50
29/10/2015	5,91	3,50
30/10/2015	5,73	3,50
30/10/2015	5,73	3,50
30/10/2015	5,73	3,50
30/10/2015	5,84	3,60
30/10/2015	5,84	3,60
30/10/2015	5,84	3,60

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
04/11/2015	5,93	2,80
04/11/2015	5,93	2,80
04/11/2015	5,93	2,80
04/11/2015	5,78	3,40
04/11/2015	5,78	3,40
04/11/2015	5,78	3,40
09/11/2015	5,82	3,90
09/11/2015	5,82	3,90
09/11/2015	5,82	3,90
10/11/2015	5,93	3,40
10/11/2015	5,93	3,40
10/11/2015	5,93	3,40
16/11/2015	5,80	4,00
16/11/2015	5,80	4,00
16/11/2015	5,80	4,00
17/11/2015	5,69	3,80
17/11/2015	5,69	3,80
17/11/2015	5,69	3,80
01/12/2015	5,75	3,80
01/12/2015	5,75	3,80
01/12/2015	5,75	3,80
30/11/2015	5,71	3,50
30/11/2015	5,71	3,50
30/11/2015	5,71	3,50
26/11/2015	5,71	2,80
26/11/2015	5,71	2,80
26/11/2015	5,71	2,80
02/12/2015	5,96	3,30
02/12/2015	5,96	3,30
02/12/2015	5,96	3,30
09/12/2015	5,78	3,90
09/12/2015	5,78	3,90
09/12/2015	5,78	3,90
10/12/2015	5,75	4,40
10/12/2015	5,75	4,40
10/12/2015	5,75	4,40
11/12/2015	5,73	4,60
11/12/2015	5,73	4,60
11/12/2015	5,73	4,60
11/12/2015	5,89	3,90
11/12/2015	5,89	3,90
11/12/2015	5,89	3,90

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
12/12/2015	5,83	4,40
12/12/2015	5,83	4,40
12/12/2015	5,83	4,40
11/01/2016	5,85	5,10
11/01/2016	5,85	5,10
11/01/2016	5,85	5,10
13/01/2016	5,83	5,10
13/01/2016	5,83	5,10
13/01/2016	5,83	5,10
14/01/2016	5,80	3,90
14/01/2016	5,80	3,90
14/01/2016	5,80	3,90
15/02/2016	5,82	4,30
15/02/2016	5,82	4,30
15/02/2016	5,82	4,30
16/02/2016	5,74	4,30
16/02/2016	5,74	4,30
16/02/2016	5,74	4,30
13/02/2016	5,80	4,70
13/02/2016	5,80	4,70
13/02/2016	5,80	4,70
12/02/2016	5,93	5,10
12/02/2016	5,93	5,10
12/02/2016	5,93	5,10
04/02/2016	5,80	4,30
04/02/2016	5,80	4,30
04/02/2016	5,80	4,30
03/02/2016	5,80	4,30
03/02/2016	5,80	4,30
03/02/2016	5,80	4,30
02/02/2016	5,80	4,70
02/02/2016	5,80	4,70
02/02/2016	5,80	4,70
01/02/2016	5,87	3,80
01/02/2016	5,87	3,80
01/02/2016	5,87	3,80
17/01/2016	5,78	3,90
17/01/2016	5,78	3,90
17/01/2016	5,78	3,90
29/01/2016	5,89	4,10
29/01/2016	5,89	4,10
29/01/2016	5,89	4,10

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
28/01/2016	5,83	4,40
28/01/2016	5,83	4,40
28/01/2016	5,83	4,40
25/02/2016	5,87	3,80
25/02/2016	5,87	3,80
25/02/2016	5,87	3,80
25/02/2016	5,89	4,10
25/02/2016	5,89	4,10
25/02/2016	5,89	4,10
25/02/2016	5,83	4,40
25/02/2016	5,83	4,40
25/02/2016	5,83	4,40
25/02/2016	5,78	3,90
25/02/2016	5,78	3,90
25/02/2016	5,78	3,90
17/09/2016	5,80	3,80
17/09/2016	5,80	3,80
17/09/2016	5,80	3,80
17/09/2016	5,83	4,40
17/09/2016	5,83	4,40
17/09/2016	5,83	4,40
17/09/2016	5,89	4,10
17/09/2016	5,89	4,10
17/09/2016	5,89	4,10
16/09/2016	5,87	3,80
16/09/2016	5,87	3,80
16/09/2016	5,87	3,80
16/09/2016	5,80	4,70
16/09/2016	5,80	4,70
16/09/2016	5,80	4,70
16/09/2016	5,80	4,30
16/09/2016	5,80	4,30
16/09/2016	5,80	4,30
23/09/2016	5,87	4,20
23/09/2016	5,87	4,20
23/09/2016	5,87	4,20
24/09/2016	5,83	4,40
24/09/2016	5,83	4,40
24/09/2016	5,83	4,40
05/10/2016	5,77	3,90
05/10/2016	5,77	3,90
05/10/2016	5,77	3,90

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
06/10/2016	5,87	3,80
06/10/2016	5,87	3,80
06/10/2016	5,87	3,80
07/10/2016	5,96	5,00
07/10/2016	5,96	5,00
07/10/2016	5,96	5,00
14/10/2016	5,80	4,30
14/10/2016	5,80	4,30
14/10/2016	5,80	4,30
12/11/2016	5,83	3,70
12/11/2016	5,83	3,70
12/11/2016	5,83	3,70
12/11/2016	5,83	4,40
12/11/2016	5,83	4,40
12/11/2016	5,83	4,40
14/11/2016	5,77	3,90
14/11/2016	5,77	3,90
14/11/2016	5,77	3,90
17/11/2016	5,87	3,80
17/11/2016	5,87	3,80
17/11/2016	5,87	3,80
23/11/2016	5,70	3,90
23/11/2016	5,70	3,90
23/11/2016	5,70	3,90
24/11/2016	5,84	4,60
24/11/2016	5,84	4,60
24/11/2016	5,84	4,60
28/11/2016	5,77	3,90
28/11/2016	5,77	3,90
28/11/2016	5,77	3,90
29/11/2016	5,87	3,80
29/11/2016	5,87	3,80
29/11/2016	5,87	3,80
05/12/2016	5,96	3,90
05/12/2016	5,96	3,90
05/12/2016	5,96	3,90
06/12/2016	5,80	4,30
06/12/2016	5,80	4,30
06/12/2016	5,80	4,30
15/03/2017	5,80	4,80
15/03/2017	5,80	4,80
15/03/2017	5,80	4,80

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
07/03/2017	5,92	4,40
07/03/2017	5,92	4,40
07/03/2017	5,92	4,40
24/02/2017	5,84	3,40
24/02/2017	5,84	3,40
24/02/2017	5,84	3,40
19/05/2017	5,78	4,10
19/05/2017	5,78	4,10
19/05/2017	5,78	4,10
19/05/2017	5,75	4,70
19/05/2017	5,75	4,70
19/05/2017	5,75	4,70
10/06/2017	5,84	4,80
10/06/2017	5,84	4,80
10/06/2017	5,84	4,80
12/06/2017	5,85	5,50
12/06/2017	5,85	5,50
12/06/2017	5,85	5,50
13/06/2017	5,93	4,70
13/06/2017	5,93	4,70
13/06/2017	5,93	4,70
14/06/2017	5,82	4,50
14/06/2017	5,82	4,50
14/06/2017	5,82	4,50
11/07/2017	5,84	4,80
11/07/2017	5,84	4,80
11/07/2017	5,84	4,80
11/07/2017	5,92	5,40
11/07/2017	5,92	5,40
11/07/2017	5,92	5,40
14/07/2017	5,82	4,50
14/07/2017	5,82	4,50
14/07/2017	5,82	4,50
14/07/2017	5,72	4,40
14/07/2017	5,72	4,40
14/07/2017	5,72	4,40
09/08/2017	5,81	4,90
09/08/2017	5,81	4,90
09/08/2017	5,81	4,90
09/08/2017	5,85	5,50
09/08/2017	5,85	5,50
09/08/2017	5,85	5,50

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
10/08/2017	5,93	4,70
10/08/2017	5,93	4,70
10/08/2017	5,93	4,70
10/08/2017	5,82	4,50
10/08/2017	5,82	4,50
10/08/2017	5,82	4,50
11/09/2017	5,73	4,90
11/09/2017	5,73	4,90
11/09/2017	5,73	4,90
11/09/2017	5,82	4,70
11/09/2017	5,82	4,70
11/09/2017	5,82	4,70
13/09/2017	5,84	4,70
13/09/2017	5,84	4,70
13/09/2017	5,84	4,70
14/09/2017	5,32	4,80
14/09/2017	5,32	4,80
14/09/2017	5,32	4,80
15/09/2017	5,86	4,80
15/09/2017	5,86	4,80
15/09/2017	5,86	4,80
16/09/2017	5,84	4,30
16/09/2017	5,84	4,30
16/09/2017	5,84	4,30
16/10/2017	5,87	4,00
16/10/2017	5,87	4,00
16/10/2017	5,87	4,00
17/10/2017	5,70	4,70
17/10/2017	5,70	4,70
17/10/2017	5,70	4,70
03/11/2017	5,87	4,00
03/11/2017	5,87	4,00
03/11/2017	5,87	4,00
04/11/2017	5,75	4,40
04/11/2017	5,75	4,40
04/11/2017	5,75	4,40
10/11/2017	5,85	4,30
10/11/2017	5,85	4,30
10/11/2017	5,85	4,30
13/11/2017	5,81	3,70
13/11/2017	5,81	3,70
13/11/2017	5,81	3,70

**APÊNDICE C – PLANILHA DE DADOS DA OBRA 3**

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
14/11/2018	5,38	5,10
14/11/2018	5,47	5,20
14/11/2018	5,46	5,20
14/11/2018	5,45	5,20
14/11/2018	5,40	5,30
14/11/2018	5,50	6,30
14/11/2018	5,60	8,00
14/11/2018	6,55	6,50
14/11/2018	5,47	5,40
14/11/2018	5,40	5,30
14/11/2018	5,36	5,10
14/11/2018	5,40	5,20
14/11/2018	5,44	5,20
14/11/2018	5,43	5,70
14/11/2018	5,43	6,10
14/11/2018	5,41	5,60
14/11/2018	5,40	5,10
14/11/2018	5,50	5,30
14/11/2018	5,55	5,20
14/11/2018	5,60	5,10
14/11/2018	5,30	5,50
14/11/2018	5,42	5,30
14/11/2018	5,37	5,30
14/11/2018	5,30	5,20
14/11/2018	5,40	5,80
14/11/2018	5,45	6,00
14/11/2018	5,50	6,40
14/11/2018	5,45	5,70
14/11/2018	5,40	5,20
14/11/2018	5,52	5,00
14/11/2018	5,53	5,10
14/11/2018	5,55	5,20
14/11/2018	5,50	6,00
14/11/2018	5,56	6,80
14/11/2018	5,54	5,90
14/11/2018	5,48	5,60
14/11/2018	5,37	5,30
14/11/2018	5,40	5,20
14/11/2018	5,62	5,10

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
14/11/2018	5,41	5,00
18/11/2018	5,35	6,00
18/11/2018	5,44	5,10
18/11/2018	5,43	7,70
18/11/2018	5,38	6,40
18/11/2018	5,36	5,90
18/11/2018	5,48	6,10
06/12/2018	5,41	5,20
06/12/2018	5,43	5,30
06/12/2018	5,34	5,20
06/12/2018	5,41	5,30
06/12/2018	5,33	5,30
06/12/2018	5,42	5,20
06/12/2018	5,58	5,20
20/02/2019	5,43	5,10
20/02/2019	5,52	5,10
20/02/2019	5,70	5,10
20/02/2019	5,42	5,40
20/02/2019	5,29	5,20
20/02/2019	5,61	5,20
20/02/2019	5,81	5,30
20/02/2019	5,46	5,10
20/02/2019	5,69	5,70
20/02/2019	5,42	5,50
20/02/2019	5,44	5,30
25/07/2019	5,51	5,20
25/07/2019	5,44	5,30
25/07/2019	5,51	6,20
25/07/2019	5,41	5,30
25/07/2019	5,47	5,60
25/07/2019	5,39	5,80
25/07/2019	5,78	5,30
25/07/2019	5,43	5,30
25/07/2019	5,40	5,50
25/07/2019	5,56	5,60
25/07/2019	5,48	5,30
25/07/2019	5,43	5,40
25/07/2019	5,54	6,10
25/07/2019	5,39	5,50
25/07/2019	5,50	5,70
25/07/2019	5,54	5,70
25/07/2019	5,54	5,60

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
25/07/2019	5,52	6,20
25/07/2019	5,49	6,70
25/07/2019	5,46	5,90
25/07/2019	5,62	5,90
25/07/2019	5,48	5,70
25/07/2019	5,45	5,60
25/07/2019	5,46	5,30
25/07/2019	5,41	5,20
25/07/2019	5,38	5,30
25/07/2019	5,42	5,70
25/07/2019	5,49	5,80
25/07/2019	5,48	6,00
25/07/2019	5,44	6,10
25/07/2019	5,38	5,50
25/07/2019	5,54	5,40
25/07/2019	5,55	6,10
25/07/2019	5,47	5,50
25/07/2019	5,56	5,60
25/07/2019	5,44	5,30
25/07/2019	5,44	5,30
25/07/2019	5,41	5,20
25/07/2019	5,39	5,20
19/08/2019	5,43	5,20
19/08/2019	5,47	5,10
19/08/2019	5,19	5,90
19/08/2019	5,55	6,10
19/08/2019	5,49	6,50
19/08/2019	5,56	6,00
19/08/2019	5,50	5,80
19/08/2019	5,53	5,40
19/08/2019	5,43	5,60
19/08/2019	5,46	5,70
19/08/2019	5,44	5,40
19/08/2019	5,48	5,30
19/08/2019	5,62	5,10
18/08/2019	5,48	5,90
13/09/2019	5,43	5,20
13/09/2019	5,44	5,30
13/09/2019	5,45	5,30
13/09/2019	5,39	5,70
13/09/2019	5,40	5,20
13/09/2019	5,38	5,40

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
13/09/2019	5,45	5,30
13/09/2019	5,44	5,20
13/09/2019	5,56	5,60
13/09/2019	5,47	5,50
13/09/2019	5,57	5,40
21/09/2019	5,40	5,50
21/09/2019	5,55	5,60
13/09/2019	5,36	5,60
13/09/2019	5,39	5,30
13/09/2019	5,32	5,90
13/09/2019	5,50	5,50
13/09/2019	5,68	5,10
13/09/2019	5,44	5,50
13/09/2019	5,71	6,00
13/09/2019	5,79	5,90
13/09/2019	5,42	5,30
13/09/2019	5,37	6,00
17/09/2019	5,44	5,50
17/09/2019	5,42	5,50
17/09/2019	5,41	5,50
17/09/2019	5,41	5,30
17/09/2019	5,20	5,20
17/09/2019	5,30	5,30
17/09/2019	5,44	5,20
17/09/2019	5,39	5,70
17/09/2019	5,41	5,70
17/09/2019	5,51	5,80
17/09/2019	5,70	5,90
17/09/2019	5,39	5,70
18/10/2019	5,52	5,40
18/10/2019	5,41	5,50
18/10/2019	5,40	5,40
18/10/2019	5,57	5,30
18/10/2019	5,62	5,90
18/10/2019	5,66	5,80
18/10/2019	5,43	5,70
18/10/2019	5,43	5,60
18/10/2019	5,46	5,20
18/10/2019	5,47	5,50
02/10/2019	5,54	5,40
02/10/2019	5,41	5,30
02/10/2019	5,66	5,30

<b>Data</b>	<b>Teor de ligante asfáltico (%)</b>	<b>Nº 200 (%)</b>
02/10/2019	5,51	5,80
02/10/2019	5,42	5,60
02/10/2019	5,43	6,10
02/10/2019	5,48	5,50
02/10/2019	5,39	5,60
02/10/2019	5,42	5,30
18/10/2019	5,47	5,70
18/10/2019	5,43	5,30
18/10/2019	5,44	5,20
18/10/2019	5,44	5,40
18/10/2019	5,51	5,30
18/10/2019	5,56	5,40
18/10/2019	5,42	5,50
18/10/2019	5,40	5,40
21/10/2019	5,51	6,20
21/11/2019	5,52	5,10
21/11/2019	5,56	5,20
02/12/2019	5,49	5,20
02/12/2019	5,56	5,20
02/12/2019	5,46	5,20
02/12/2019	5,45	5,20
02/12/2019	5,46	5,20
21/10/2019	5,58	6,20
02/12/2019	5,35	5,50
02/12/2019	5,49	5,00
02/12/2019	5,51	6,10
20/12/2019	5,45	5,00
20/12/2019	5,56	5,60
13/01/2020	5,46	7,00
17/01/2020	5,40	6,00
11/12/2019	5,45	5,30
13/12/2019	5,49	5,90
13/12/2019	5,48	5,50

## APÊNDICE D – CÓDIGO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

% Método de Monte Carlo para a verificação da não normalidade

clc; clear;

% Carregar dados e definir parâmetros

CAP = load ("CAP\_OBRA\_1.txt"); % Dados do teor de ligante asfáltico (%) da Obra 1

VP = 5.5; % Valor de Projeto da propriedade

m = mean (CAP); % Média amostral

dp = std (CAP); % Desvio padrão amostral

LSE = VP + 0.3; % Limite Superior de Especificação (LSE)

LIE = VP - 0.3; % Limite Inferior de Especificação (LIE)

% Parâmetros do Método de Monte Carlo

v = 100000; % Número de iterações definido pelo usuário

n\_values = [5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21]; % Tamanhos amostrais

k\_values = [1.55, 1.41, 1.36, 1.31, 1.25, 1.21, 1.16, 1.13, 1.11, 1.1, 1.08, 1.06, 1.04, 1.01];

% Constantes da norma DNER PRO 277/97

% Função auxiliar para verificar aceitação da amostra dentro dos limites

isAccepted = @(mean, std, k, LSE, LIE) ~ (mean + k \* std > LSE || mean - k \* std < LIE);

% Inicialização dos resultados

results = zeros (length(n\_values), 5); % Armazena os percentuais de aceitação

% Pré-cálculo das amostras

N\_samples = cell (length (n\_values), 1); % Normal

L\_samples = cell (length (n\_values), 1); % Logística

LN\_samples = cell (length (n\_values), 1); % Log-normal

G\_samples = cell (length (n\_values), 1); % Gama

LG\_samples = cell (length (n\_values), 1); % Log-logística

**% Geração das amostras baseadas nos parâmetros das distribuições**

**for** i = 1:length(n\_values)

N\_samples{i} = random ("Normal", m, dp, v, n\_values(i)); **% Normal**

L\_samples{i} = random ("Logistic", 5.529, 0.0998, v, n\_values(i)); **% Logística**

LN\_samples{i} = random ("Lognormal", 1.711, 0.0320, v, n\_values(i)); **% Log-normal**

G\_samples{i} = random ("Gamma", 973.576, 0.0057, v, n\_values(i)); **% Gama**

LG\_samples{i} = random ("Loglogistic", 1.709, 0.0179, v, n\_values(i)); **% Log-logística**

**end**

**% Loop do método de Monte Carlo para cada n**

**for** i = 1:length(n\_values)

n = n\_values(i);

k = k\_values(i);

**% Cálculo da média e do desvio padrão**

N\_means = mean (N\_samples{i}, 2);

N\_stds = std (N\_samples{i}, 0, 2);

L\_means = mean (L\_samples{i}, 2);

L\_stds = std (L\_samples{i}, 0, 2);

LN\_means = mean (LN\_samples{i}, 2);

LN\_stds = std (LN\_samples{i}, 0, 2);

G\_means = mean (G\_samples{i}, 2);

G\_stds = std (G\_samples{i}, 0, 2);

LG\_means = mean (LG\_samples{i}, 2);

LG\_stds = std (LG\_samples{i}, 0, 2);

**% Verificar aceitação/rejeição conforme os limites especificados**

D\_N = ~ (N\_means + k \* N\_stds > LSE | N\_means - k \* N\_stds < LIE);

D\_L = ~ (L\_means + k \* L\_stds > LSE | L\_means - k \* L\_stds < LIE);

D\_LN = ~ (LN\_means + k \* LN\_stds > LSE | LN\_means - k \* LN\_stds < LIE);

```
D_G = ~ (G_means + k * G_stds > LSE | G_means - k * G_stds < LIE);
D_LG = ~ (LG_means + k * LG_stds > LSE | LG_means - k * LG_stds < LIE);
```

```
% Cálculo dos percentuais de aceitação para cada distribuição
```

```
Ac_N = mean (D_N) * 100;
Ac_L = mean (D_L) * 100;
Ac_LN = mean (D_LN) * 100;
Ac_G = mean (D_G) * 100;
Ac_LG = mean (D_LG) * 100;
```

```
% Armazena os resultados para posterior exibição
```

```
results (i, :) = [Ac_N, Ac_L, Ac_LN, Ac_G, Ac_LG];
```

```
end
```

```
% Exibição dos resultados formatados
```

```
disp ('Percentuais de aceitação para diferentes valores de n:');
```

```
disp (' n Ac_N (%) Ac_L (%) Ac_LN (%) Ac_G (%) Ac_LG (%));
```

```
for i = 1:length(n_values)
```

```
fprintf (' %5d %8.2f %8.2f %8.2f %8.2f %8.2f\n', n_values(i), results (i, 1), results (i, 2),
results (i, 3), results (i, 4), results (i, 5));
```

```
end
```