



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RICARDO DE SOUSA RIBEIRO

**ANÁLISE DA EXECUÇÃO DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO UTILIZANDO
DIFERENTES MEDIDAS DE QUALIDADE**

CRATEÚS

2022

RICARDO DE SOUSA RIBEIRO

ANÁLISE DA EXECUÇÃO DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO UTILIZANDO
DIFERENTES MEDIDAS DE QUALIDADE

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

Aprovada em 13/04/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giannini Italino Alves Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R372a Ribeiro, Ricardo de Sousa.
Análise da execução de um revestimento asfáltico utilizando diferentes medidas de qualidade / Ricardo de Sousa Ribeiro. – 2022.
80 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira.
1. controle qualidade. 2. medida de qualidade. 3. fator de pagamento. 4. pavimento asfáltico. I. Título.
CDD 620
-

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pai, nosso criador, por me conceder a saúde, paciência e coragem tão necessárias para enfrentar todas as dificuldades encontradas no decorrer da graduação.

Aos meus pais, Liduina e Raimundo, por todo o empenho e dedicação para fornecer o básico, porém, o suficiente para educar a mim e aos meus irmãos, Rafael, Rodolfo e Raquel. Sobretudo, quero agradecer-lhes por todo o esforço despendido para realização do meu sonho de graduar-me em Engenharia Civil.

Ademais, quero lembrar do apoio incondicional recebido da minha esposa Rosane Marques, agradeço pelas palavras de incentivo e motivação quando o desânimo batia, devido aos inúmeros obstáculos encontrados durante todo o percurso. Contudo, não posso esquecer de agradecer pelos momentos de descontração, proporcionados pelos meus filhos Gustavo e Miguel, dois presentes que Deus me deu e pela compreensão destes, em entender a minha ausência em algumas ocasiões tão importantes da vida deles.

Ao meu orientador, Jorge Luis, por todas as orientações/conhecimentos repassados durante todo esse ano de acompanhamento. Destaco a boa relação criada entre orientador/orientando, o empenho deste mestre em me repassar seu conhecimento, esclarecer minhas dúvidas e a sua empatia, como fundamentais para elaboração deste trabalho. Grato, Professor Jorge.

À instituição Universidade Federal do Ceará, que por meio do seu processo de expansão e interiorização, pôde ampliar o acesso de inúmeros jovens do interior do nosso estado, como Eu, ao ensino superior. Agradeço a coordenação e todo o corpo docente do curso de Engenharia Civil do campus de Crateús, por todo o suporte dado aos discentes e pelos conhecimentos que me foram repassados durante a graduação.

Por fim, agradeço a todos os colegas e amigos que fiz durante estes cinco anos, principalmente ao meu amigo, João Matias, por compartilhar e participar em sua maioria dos momentos difíceis e alegres desta jornada.

“E sabemos que todas as coisas concorrem para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito.”

Romanos 8:28.

RESUMO

Atualmente a temática do controle de qualidade empregado em obras rodoviárias vem ganhando notoriedade no Brasil. Alguns estudos e projetos vêm sendo desenvolvidos nos meios técnico e científico na busca pela melhoria da qualidade dos pavimentos asfálticos. Nesta conjuntura, o presente trabalho avaliou a qualidade das camadas de *binder* e capa de um revestimento asfáltico aplicado em uma rodovia federal sob a ótica da norma DNER-PRO 277/97 (medida de qualidade PRO/277) à qual dá diretrizes a respeito da aceitação ou rejeição de obras e serviços rodoviários no Brasil. As camadas também foram avaliadas sob a perspectiva de medidas de qualidade adotadas em outros países, sobretudo nos Estados Unidos. Cita-se a Porcentagem Dentro dos Limites (PDL) e o Desvio Absoluto Médio (DAM). Por intermédio destas três medidas, avaliou-se conjuntos de amostras das propriedades: percentuais do Grau de Compactação (G_c), Teor de ligante asfáltico (%CAP) e do Volume de vazios (V_v), as espessuras (E_{sp}) das camadas de *binder* e capa, além dos percentuais passantes nas peneiras 19,00mm, 12,50mm, 4,75mm e 0,075mm da mistura asfáltica empregada em um trecho de revestimento de 1,58 km de extensão. Também estimou-se o impacto da qualidade mensurada pelas medidas PDL e DAM nos Fatores de Pagamento (FP) da empresa executora/contratada. Como resultados, as indicações da medida de qualidade PRO/277 e PDL são favoráveis à rejeição das camadas de *binder* e capa, devido ao baixo controle de qualidade quantificados por ambas as medidas, sobretudo relacionados à propriedade espessura (E_{sp}) das duas camadas de revestimento, a qual apresenta valores amostrais elevados em relação às especificações de projeto. Por outro lado, as medidas PRO/277, PDL e DAM apontaram para uma boa qualidade executiva para as propriedades %CAP e V_v , impactando beneficentemente o FP da contratada, pois resultou a este, o direito de pagamento integral e/ou bônus da ordem de até 5%, perspectiva contrária, ao se avaliar a E_{sp} , visto que ela resultou em penalizações no FP da contratada devido à má qualidade apontada pelas medidas PDL e DAM. Em síntese, concluiu-se que a variabilidade, fator preponderante na determinação da qualidade executiva de revestimentos asfálticos, está bem contemplada pelas medidas PRO/277 e PDL, mas em contrário, não ficou bem evidenciada através de DAM, acarretando divergências entre as três medidas, com destaque significativo na aplicação das indicações de PDL e DAM nas equações para determinação de seus respectivos fatores de pagamento FP_{PDL} e FP_{DAM} .

Palavras-chave: controle qualidade; medida de qualidade; fator de pagamento; pavimento asfáltico.

ABSTRACT

Currently, the issue of quality control used in road works is gaining notoriety in Brazil. Some studies and projects have been developed in technical and scientific circles in the search for improving the quality of asphalt sidewalks. In this context, the present study evaluated the quality of the binder and overlay layers of an asphalt pavement applied on a federal highway under the perspective of the DNER-PRO 277/97 standard (quality measure PRO/277) which provides guidelines regarding the acceptance or rejection of road works and services in Brazil. The layers were also evaluated from the perspective of quality measures adopted in other countries, especially in the United States. These are the Percentage Within Limits (PDL) and the Mean Absolute Deviation (DAM). By means of these three measures, sample sets of the following properties were evaluated: percentages of the degree of compaction (G_c), binder content (%CAP) and voids volume (V_v), the thicknesses (E_{sp}) of the binder and overlay layers, and the percentages of the asphalt mixture used in a 1.58 km long asphalt pavement section that passed through the 19mm, 12.50mm, 4.75mm and 0.075mm sieves. The impact of the quality measured by PDL and DAM on the Payment Factors (FP) of the contractor was also estimated. As results, the indications of PRO/277 and PDL are in favor of rejection of the binder and overlay layers, due to the low quality control quantified by both measures, especially related to the property thickness (E_{sp}) of the two overlay layers, which presents high sample values in relation to the design specifications. On the other hand, measures PRO/277, PDL and DAM pointed to good execution quality for the properties %CAP and V_v , with a beneficial impact on the contractor's FP, as it resulted in the right to full payment and/or bonuses of up to 5%. In summary, it was concluded that variability, a preponderant factor in determining the execution quality of asphalt pavements, is well covered by measures PRO/277 and PDL, but on the contrary, it was not well shown through DAM, leading to divergences between the three measures, with significant emphasis on the application of PDL and DAM indications in the equations for determining their respective payment factors FP_{PDL} and FP_{DAM} .

Keywords: quality control; quality measure; pay factor; asphalt pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferenciação entre as estatísticas Z e Q.....	25
Figura 2 – Histogramas das propriedades 19,00mm e 12,50mm	42
Figura 3 – Histogramas da propriedade 4,75mm	43
Figura 4 – Histogramas da propriedade 0,075mm	43
Figura 5 – Histogramas da propriedade Esp.....	44
Figura 6 – Histogramas da propriedade %CAP	45
Figura 7 – Histogramas da propriedade Vv.....	45
Figura 8 – Histogramas da propriedade Gc	46
Figura 9 – Coeficiente de variação propriedades da camada de <i>binder</i>	46
Figura 10 – Coeficiente de variação propriedades da camada de capa	47
Figura 11 – Comparativo de %CAP, Esp, Vv e 0,075mm com valor de projeto (<i>binder</i>)	48
Figura 12 – Comparativo de Gc, 19,00mm e 4,75mm com valor de projeto (<i>binder</i>).....	49
Figura 13 – Comparativo de %CAP, Esp, Vv e 0,075mm com valor de projeto (capa)	50
Figura 14 – Comparativo de Gc, 12,50mm e 4,75mm com valor de projeto (capa).....	51
Figura 15 – Resultados para %CAP pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	53
Figura 16 – Resultados para Vv pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	53
Figura 17 – Resultados para 0,075mm pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	54
Figura 18 – Resultados para Gc pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	54
Figura 19 – Resultados para Esp pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	55
Figura 20 – Resultados para 19,00mm pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	55
Figura 21 – Resultados para 4,75mm pela medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	56
Figura 22 – Resultados para Esp pela medida de qualidade PRO/277 capa	57
Figura 23 – Médias da Esp dos segmentos das camadas de <i>binder</i> e capa	58
Figura 24 - Diagrama de Pareto segmento I <i>binder</i>	59
Figura 25– Diagrama de Pareto segmento II <i>binder</i>	60
Figura 26 – Diagrama de Pareto segmento I capa	60
Figura 27 – Diagrama de Pareto segmento II capa.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Abordagens da qualidade segundo Garvin.	17
Quadro 2 – Eras da qualidade.....	19
Quadro 3 – Normativas para controle de qualidade em obras rodoviárias no Brasil	20
Quadro 4 – Alternativas de decisão unilateral para valores acima e/ou abaixo de LIE e LSE.	24
Quadro 5 – Alternativas de decisão bilateral para valores entre LIE e LSE	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de n e k segundo a norma DNER-PRO 277/97	23
Tabela 2 – Especificações de DAM para as propriedades % CAP e V_v	28
Tabela 3 – Limites LIE e LSE para as propriedades das camadas de <i>binder</i> e capa.....	31
Tabela 4 – Simbologia para as propriedades selecionadas e avaliadas	32
Tabela 5 – Descrição da divisão dos segmentos que serão avaliados	33
Tabela 6 – Banco de dados camada de <i>binder</i>	33
Tabela 7 – Banco de dados camada de capa.....	34
Tabela 8 – Valores alvo T para os segmentos I e II das camadas de revestimento.....	37
Tabela 9 – Número de amostras n para as propriedades %CAP e V_v	38
Tabela 10 – Resultados para caracterização estatística dos segmentos camada de <i>binder</i>	39
Tabela 11 – Resultados para caracterização estatística dos segmentos da camada de capa	40
Tabela 12 – Resultados do Teste de Shapiro-Wilk para as camadas do revestimento.....	41
Tabela 13 – Resultados de avaliação segundo a medida de qualidade PRO/277 <i>binder</i>	52
Tabela 14 – Resultados de avaliação segundo medida de qualidade PRO/277 capa	57
Tabela 15 – Resultados de avaliação segundo PDL camada de <i>binder</i>	62
Tabela 16 – Resultados de avaliação segundo PDL camada de capa	63
Tabela 17 – Resultados segundo a medida DAM camadas de <i>binder</i> e capa.....	64
Tabela 18 – Resultados das iterações para as propriedades %CAP e V_v com $n > 4$	66
Tabela 19 – Resultados de avaliação segundo a medida DAM para %CAP e V_v	66
Tabela 20 – Resultados de FP baseados em PDL, DAM e na especificação ALDOT	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CEQ	Controle Estatístico de Qualidade
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CV	Coeficiente(s) de Variação
DAM	Desvio Absoluto Médio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOT	<i>Department of Transportation</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
NBR	Norma Brasileira
FP	Fator de Pagamento
PDL	Porcentagem Dentro dos Limites

LISTA DE SÍMBOLOS

PRO/277	Medida de qualidade baseada na norma DNER-PRO 277/97
n	Número total de observações da amostra
k	Coefficiente multiplicador
$\lambda_{\text{mín}}$	Valor mínimo da medida de qualidade PRO/277
$\lambda_{\text{máx}}$	Valor máximo da medida de qualidade PRO/277
α	Risco da empresa executora
β	Risco do órgão gestor
P_1	Porcentagem máxima de defeitos que caracterizam um serviço de boa qualidade
P_2	Porcentagem mínima de defeitos que caracterizam um serviço de má qualidade
\bar{X}	Média amostral
s	Desvio padrão amostral
x_i	Valores amostrais
μ	Média populacional
%CAP	Teor de ligante
Esp	Espessura da camada de <i>binder</i> e/ou capa
Vv	Volume de vazios
Gc	Grau de compactação
19,00mm	Percentual passante na peneira de 19,00mm
12,50mm	Percentual passante na peneira de 12,50mm
4,75mm	Percentual passante na peneira de 4,75mm
0,075mm	Percentual passante na peneira de 0,075mm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Conceituação de qualidade	17
2.2	Controle de qualidade	18
2.3	Controle de qualidade em obras rodoviárias	20
2.3.1	<i>PRO/277</i>	22
2.3.2	<i>Porcentagem dentro dos limites</i>	24
2.3.3	<i>Desvio absoluto médio</i>	27
2.4	Fator de pagamento	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Descrição do banco de dados e parâmetros de projeto	31
3.2	Etapas metodológicas	32
3.2.1	<i>Organização do banco de dados</i>	32
3.2.2	<i>Caracterização estatística</i>	35
3.2.3	<i>Cálculo das medidas de qualidade e fatores de pagamento</i>	35
3.2.3.1	<i>Cálculo da medida PRO/277</i>	35
3.2.3.2	<i>Cálculo da medida PDL</i>	36
3.2.3.3	<i>Cálculo da medida DAM</i>	36
3.2.3.4	<i>Cálculo do fator de pagamento</i>	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Caracterização estatística	39
4.2	Verificação da normalidade dos dados	41
4.3	Análise dos coeficientes de variação	46
4.4	Comparativo entre as médias dos segmentos com valor do projeto	48
4.5	Resultados de avaliação das medidas de qualidade	51
4.5.1	<i>Resultados de avaliação pela PRO/277</i>	52
4.5.2	<i>Resultados de avaliação pela medida PDL</i>	61
4.5.3	<i>Resultados de avaliação pela medida DAM</i>	64
4.6	Resultados dos fatores de pagamento	67

5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	75
	ANEXO B – TABELA VALORES DE PDL COM BASE EM QI E QS.....	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Embora seja considerado como um dos principais indutores do desenvolvimento do país, o modal rodoviário já enfrentou grandes percalços ao longo de toda sua trajetória no Brasil, sendo alvo constante de inúmeras críticas. Corroborando com este cenário, “em 2021, foram pesquisados 109.103 quilômetros de rodovias pavimentadas em todo o território nacional, abrangendo a totalidade das rodovias federais e ainda, trechos de rodovias estaduais consideradas relevantes estrategicamente para o desenvolvimento regional. Constatou-se que desse total 61,8% apresentam algum tipo de problema, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via.” (CNT, 2021). Os fatores que contribuem para esta conjuntura são diversos, o estudo da CNT “porque os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?” apontou que os problemas vão desde falta de grandes investimentos em infraestrutura rodoviária e manutenção preventiva até o descumprimento de normas/projetos e falta de fiscalização no controle de qualidade dos pavimentos. Conseqüentemente, muitas das obras recebidas não apresentam os padrões mínimos de qualidade exigidos, propiciando precocemente novos gastos para correção dos defeitos que chegam em torno de 24% do valor total da obra (CNT, 2017).

Os primeiros esforços no intuito de melhorar as condições do controle de qualidade em obras rodoviárias no Brasil, foram executados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no final dos anos 1980, o que incluiu trabalhos e pesquisas para o aprimoramento das atribuições de responsabilidades das empresas contratadas para a execução de serviços de pavimentação. Atualmente, o procedimento DNIT-PRO 011/2004 (DNIT, 2004) é a ferramenta que especifica a gestão da qualidade em obras rodoviárias (LEITE; MOTTA, 2019). Há também o procedimento DNER-PRO 277/97 (DNER, 1997), que traz a metodologia para controle estatístico de obras e serviços.

Nota-se a existência de material técnico orientador dos procedimentos a serem seguidos para a obtenção de rodovias com o nível de qualidade adequado e assim, com maior durabilidade. No entanto, essa não é a realidade observada. Dentre as principais hipóteses que podem justificar as más condições observadas em campo, destaca-se, a fiscalização inadequada da execução das obras rodoviárias, ou seja, a ausência de um controle de qualidade efetivo.

A efetividade do controle de qualidade também está atrelada aos indicadores ou medidas adotadas para expressar o nível de qualidade da obra ou serviço rodoviário. Como já

citado, no Brasil tem-se o controle estatístico previsto na norma DNER-PRO 277/97, mas em âmbito internacional outras alternativas têm sido exploradas e aplicadas com êxito. Aponta-se, por exemplo, a Porcentagem Dentro dos Limites (PDL) e o Desvio Absoluto Médio (DAM), os quais, ainda não foram avaliadas de modo amplo em nosso país.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral comparar e analisar a qualidade executiva da camada de revestimento asfáltico, mensurada a partir de diferentes medidas de qualidade. Contudo, para melhor definir o caminho a ser traçado para alcance do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Comparar o nível de variabilidade das propriedades das camadas de *binder* e capa de um revestimento asfáltico;
- b) Confrontar as indicações das diferentes medidas de qualidade executiva;
- c) Avaliar o possível impacto do nível de qualidade executiva sobre o valor a ser pago pela obra.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por cinco seções, inclusa esta Introdução (seção 1), cuja finalidade é apresentar uma breve contextualização acerca do tema estudado, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

A seção 2 Revisão bibliográfica, busca fundamentar teoricamente esta pesquisa. Elencando-se os principais conceitos concernentes ao termo qualidade, um breve histórico do controle de qualidade aplicado no meio da pavimentação rodoviária, adentrando-se no conceito de Controle Estatístico de Qualidade (CEQ) o qual embasa/fundamenta as três medidas de qualidade utilizadas para avaliar a camadas do revestimento asfáltico, das quais são: PRO/277 medida baseada na norma DNER-PRO 277/97, PDL e DAM.

A seção 3, Materiais e métodos, traz aspectos relativos ao tratamento e caracterização do banco de dados estudado, além de apresentar toda a metodologia aplicada para geração dos resultados obtidos na presente pesquisa. A seção 4 se destina a apresentação e discussão dos Resultados alcançados. E por último, a seção 5 discorre a respeito das principais Conclusões obtidas a partir desta pesquisa e além disso, apresenta sugestões para trabalhos futuros que visem complementar/aprofundar o assunto aqui iniciado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceituação de qualidade

Para Deming (1990) qualidade é tudo aquilo que melhora do ponto de vista do cliente. O consumidor é o elo mais importante da linha de produção e desse modo, o produto deve atender às expectativas do cliente. Seguindo na ênfase ao cliente final, temos que “qualidade é desenvolver, projetar, produzir e comercializar um produto que é mais econômico, mais útil e sempre satisfatório para o consumidor.” (ISHIKAWA, 1993 p.43). Já sob a ótica que identifica qualidade como algo próprio do serviço e/ou produto gerado, obtém-se qualidade quando concomitantemente se obtém uma adequação ao uso juntamente com ausência de falhas neste processo de produção (JURAN, 1992). Por fim, Garvin (2002) diz que, qualidade pode ser definida segundo cinco abordagens principais, as quais seguem descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Abordagens da qualidade segundo Garvin.

Abordagem	Conceito
Transcendente	Não se pode definir qualidade com precisão, porque ela é uma propriedade simples, não passível de análise, que aprendemos a reconhecer apenas pela experiência. Ou seja, qualidade é sinônimo de “excelência inata”.
Baseada no produto	Qualidade é uma variável precisa e mensurável. Os produtos são classificados de acordo com a quantidade de um determinado atributo desejado.
Baseada no usuário	A qualidade está “nos olhos de quem vê”, ou seja, a qualidade é igualada a satisfação máxima do cliente.
Baseada na produção	Identifica-se à qualidade quando temos “conformidade com as especificações”, é necessário “fazer certo da primeira vez” e “atender as especificações do projeto”.
Baseada no valor	Qualidade é definida como sendo aquele produto ou serviço que oferece um desempenho ou conformidade a um preço ou custo aceitável.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Garvin (2002).

Esta pesquisa insere-se na temática do controle de qualidade de revestimentos asfálticos. Dentre as abordagens supracitadas sobre qualidade a que melhor define, de modo geral o contexto ao qual esta pesquisa se insere é aquela baseada na produção, visto que, esta deve estar relacionada a algo que seja mensurável e sobretudo atrelada à exatidão e precisão, ao ponto de poder ser avaliada segundo normas, critérios ou especificações pré-estabelecidas.

Já no contexto específico da engenharia civil, a *American Society of Civil Engineers* (ASCE) (2000) define qualidade como o cumprimento das responsabilidades do projeto na entrega de produtos e serviços de uma maneira que atenda/exceda as exigências e expectativas

declaradas do proprietário, profissional de projeto e construtor. As responsabilidades referem-se às tarefas que se espera que um participante desempenhe para realizar as atividades do projeto, conforme especificado no acordo contratual e nas leis aplicáveis, requisitos de licenciamento, códigos, padrões prevalentes no setor e diretrizes regulatórias.

2.2 Controle de qualidade

A NBR ISO 9000 (2015) - Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário, traz de forma sucinta e objetiva os conceitos a respeito de gestão, garantia e controle de qualidade, abaixo descritos:

- a) Gestão da qualidade - Atividades coordenadas para dirigir e controlar uma organização, no que diz respeito à qualidade;
- b) Garantia da qualidade - Parte da gestão da qualidade focada em prover confiança de que os requisitos da qualidade serão atendidos;
- c) Controle da qualidade - Parte da gestão da qualidade focada em atender os requisitos da qualidade.

Partindo dos conceitos supracitados e trazendo-os, para o contexto do controle de qualidade em revestimentos asfálticos, tem-se como organização, aquela que se apresenta e faz parte da definição de *stakeholder*, Freeman (1984) “qualquer indivíduo ou organização que, de alguma forma, é impactado pelas ações de uma determinada empresa”.

Neste sentido, o órgão gestor (contratante) assume o posto de Empresa e responsabiliza-se por gerir todas as etapas da concepção de um empreendimento rodoviário, aliando-se a organização, caracterizada pela empresa executora (contratada), fornecedores de materiais, laboratórios de ensaios entre outros que contribuem de maneira bem específica para realização do empreendimento, no entanto, unidos à Empresa devem primar pelo objetivo comum de conceber um produto/serviço que possua garantia e controle da qualidade, confirmados inicialmente pelo atendimento aos requisitos de qualidade pré-estabelecidos em projeto.

No tocante às origens do termo controle de qualidade, busca-se denotar a figura do artesão no final do século XIX, que procurando atender às necessidades específicas de cada cliente, propunha a si próprio, ter um controle de qualidade rigoroso relativo ao produto fabricado pelo mesmo, na tentativa de mitigar falhas. Nesta época o foco era o produto, não o processo de produção, feito via inspeção de todos os produtos pelo próprio artesão (CARVALHO; PALADINI, 2012). No entanto, a medida que novas necessidades foram

surgindo, novas formas de se fazer o controle de qualidade também surgiram, Garvin (2002) classifica historicamente quatro diferentes eras da qualidade, cujas quais são: Inspeção; Controle estatístico da qualidade; Garantia da qualidade e Gestão total da qualidade. O Quadro 2, descreve as principais características dessas eras, retratando resumidamente os avanços alcançados, a partir das ideias dos principais estudiosos da temática, também intitulados “gurus da qualidade”.

Quadro 2 – Eras da qualidade

Características Básicas	Interesse principal	Visão da Qualidade	Ênfase	Métodos	Papel dos profissionais da qualidade
Inspeção	verificação	um problema a ser resolvido	uniformidade e do produto	inspeção, de medição	inspeção, classificação, contagem, avaliação e reparo.
Controle Estatístico de Qualidade	controle	um problema a ser resolvido	uniformidade e do produto com menos inspeção	ferramentas e técnicas estatísticas	solução de problemas e a aplicação de métodos estatísticos.
Garantia da Qualidade	coordenação	um problema a ser resolvido, mas enfrentado proativamente	cadeia de fabricação, desde o projeto até o mercado, contribuição de todos os grupos funcionais para impedir falhas de qualidade	programas e sistemas	planejamento, medição da qualidade e desenvolvimento de programas.
Gestão Total da Qualidade	impacto Estratégico	uma oportunidade de diferenciação da concorrência	as necessidades de mercado e do cliente	planejamento estratégico, estabelecimento de objetivos e a mobilização da organização	estabelecimento de metas, educação e treinamento, consultoria a outros departamentos e desenvolvimento de programas.

Fonte: Adaptado de Garvin (2002).

A partir da descrição das diferentes eras elencadas no quadro acima, delimita-se a

presente pesquisa, a qual norteia-se na era do controle estatístico de qualidade, pois tem-se como principal interesse, a análise e avaliação da qualidade da camada de revestimento asfáltico, mensurada a partir de ferramentas e técnicas estatísticas. Em resumo no que concerne especificamente a era do controle estatístico de qualidade para Montgomery e Runger (2009), este campo de estudo pode ser largamente definido como métodos estatísticos e de engenharia que são usados, na monitoração, no controle e na melhoria da qualidade.

É um campo de conhecimento relativamente novo quando comparado a outras abordagens de controle, data do ano de 1920, quando se deu sob a tutela de Walter A. Shewhart os primeiros conhecimentos e teorias oriundos desta área, como o gráfico de controle ou carta de controle, cuja qual é uma das ferramentas básicas do controle estatístico de processo. Mais tarde, também campos do conhecimento como amostragem com base estatística e métodos de inspeção foram bem estudados e desenvolvidos por Harold F. Dodge e Harry G. Romig (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

2.3 Controle de qualidade em obras rodoviárias

O controle de qualidade aplicado em obras rodoviárias envolve além da verificação de resultados dos ensaios realizados para controle, a sua referência normativa e uma análise quanto ao atendimento ou não das especificações do empreendimento, também o acompanhamento da adequação das instalações, da devida calibração dos instrumentos ou equipamentos utilizados para medição de qualquer propriedade, dos métodos e documentação utilizados, da competência técnica e da experiência profissional dos envolvidos, enfim, todas as condicionantes para garantir confiabilidade e adequação aos resultados obtidos (FORTES; MERIGHI, 2004). Neste âmbito, no Brasil para execução de uma obra rodoviária os órgãos gestores e as empresas executoras dispõem de normas, especificações de serviço e métodos de ensaios que conduzem, ao menos em teoria, a um controle de qualidade eficaz. O Quadro 3 objetiva apresentar as principais referências utilizadas para controle de qualidade em pavimentos rodoviários as quais por extensão, também se aplicam especificamente aos revestimentos produzidos em concreto asfáltico, objeto de estudo desta pesquisa.

Quadro 3 – Normativas para controle de qualidade em obras rodoviárias no Brasil

Norma	Descrição	Objetivo
DNER - PRO 277/97	Metodologia para controle estatístico de obras e serviços	estabelecer a sistemática a ser adotada no controle estatístico da qualidade da execução de obras e serviços rodoviários.

continua

conclusão

Norma	Descrição	Objetivo
DNIT 013/2004 - PRO	Requisitos para a qualidade na execução de obras rodoviárias - Procedimento	fixa as condições exigíveis dos requisitos para a qualidade na execução de obras rodoviárias, definindo as diretrizes e critérios para o planejamento, implementação e verificação do Sistema de Gestão da Qualidade.
DNIT 011/2004 - PRO, 2004	Gestão da qualidade em obras rodoviárias - Procedimento	define conceitos da qualidade e fixa diretrizes para incorporação de procedimentos e técnicas exigíveis no planejamento, na implantação, na implementação e na verificação da gestão da qualidade em obras rodoviárias do DNIT.
DNIT 031/2006 - ES, 2006	Pavimentos flexíveis Concreto asfáltico - Especificação de serviço	estabelecer a sistemática a ser empregada na produção de misturas asfálticas para a construção de camadas do pavimento de estradas de rodagem, de acordo com os alinhamentos, greide e seção transversal de projeto.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Percebe-se ao longo do tempo, a elaboração de material técnico e científico como normas e especificações voltadas para o controle de qualidade em obras de pavimentação. Verifica-se também, o desenvolvimento de metodologias e medidas de qualidade que buscam mensurar quantitativamente parâmetros de projeto. É o caso da medida que será simbolizada/denominada no presente trabalho de (PRO/277), oriunda da norma DNER-PRO 277/97, cuja qual fundamenta-se em conceitos de controle estatístico para inferir indicações a respeito da qualidade dos serviços prestados em obras rodoviárias e a partir da mensuração dos parâmetros de projeto, indicar entre a aceitação ou rejeição de um serviço avaliado. Não somente no Brasil, se faz uso deste tipo de metodologia para mensuração da qualidade de revestimentos, nos Estados Unidos, medidas como porcentagem dentro dos limites e desvio absoluto médio já são bem consolidadas neste segmento. Isto vem se tornando uma tendência mundial, uma vez que a busca pelo atendimento aos aspectos construtivos de projeto, normas e demais especificações são de fundamental importância para a obtenção da qualidade desejada, visto que segundo Fortes e Merighi (2004) “o controle de qualidade, quando realizado de maneira adequada, impede falhas patológicas da construção”.

Como supracitado, em nível de Brasil, a norma DNER-PRO 277/97 elenca os procedimentos necessários para verificação do atendimento a parâmetros de projeto nas construções de rodovias, afim de subsidiar e auxiliar no processo de tomada de decisão entre a aceitação ou rejeição do pavimento construído fundamentando-se em conceitos estatísticos. Além desta medida, buscou-se avaliar as camadas de revestimento através de medidas de

controle estatístico já bem sedimentadas em países desenvolvidos como os Estados Unidos, tais como PDL e DAM, a fim de aplicar suas abordagens avaliativas sob o mesmo objeto de estudo, estimando a qualidade executiva de um revestimento asfáltico, além de identificar as principais diferenças e/ou semelhanças entre as indicações das três medidas de qualidade.

2.3.1 PRO/277

A norma vigente no Brasil para controle estatístico de qualidade é a DNER-PRO 277/97, que tem como principal objetivo estabelecer a sistemática adotada no controle estatístico da qualidade da execução de obras e serviços rodoviários, como mencionado no Quadro 3. Nesta, estão dispostos os procedimentos para formulação de planos de amostragem baseados em riscos de aceitação/rejeição tanto para o contratante como para a contratada, além de definir níveis de qualidade que indicam um serviço de boa ou má qualidade.

Em síntese, a qualidade do serviço executado será quantificada através do cálculo da variável aleatória ($\bar{X} \pm ks$), a qual nesta pesquisa receberá a denominação de medida de qualidade PRO/277. Ela ficará estabelecida por meio da determinação dos valores $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$, definidos a seguir. A metodologia utilizada para controle estatístico abrange o estabelecimento de um plano de amostragem, na qual pressupõe-se a aleatoriedade no processo de coleta das amostras, além disto define-se alguns conceitos e riscos que se, está disposto a assumir DNER-PRO 277/97 (DNER, 1997). As definições são as seguintes:

α = risco da empresa executora de ter um serviço de boa qualidade rejeitado;

β = risco do órgão gestor de ter um serviço de má qualidade aceito;

P_1 = nível de qualidade aceitável ou porcentagem máxima de defeitos que caracterizam um serviço de boa qualidade;

P_2 = nível de qualidade inaceitável ou porcentagem mínima de defeitos que caracterizam um serviço de má qualidade.

As definições supracitadas servem para delimitar o plano de amostragem para especificações baseadas na PRO/277. O plano caracteriza-se pelo cálculo do valor n que representa o número total de observações da amostra a ser avaliada e pelo valor k denominado coeficiente multiplicador do desvio padrão amostral s . De modo geral n e k são obtidos através das Equações 1 e 2.

$$n = \left[1 + \frac{k^2}{2} \right] \cdot \left[\frac{(Z_\alpha + Z_\beta)}{(Z_{p1} - Z_{p2})} \right]^2 \quad (1)$$

$$k = \frac{(Z_\alpha \cdot Z_{p2}) + (Z_\beta \cdot Z_{p1})}{(Z_\alpha + Z_\beta)} \quad (2)$$

Onde estabelece-se valores para α , β , P_1 e P_2 os quais são interpolados com a coluna (z) da tabela de distribuição normal padrão (Anexo A) para obtenção dos valores de Z_α , Z_β , Z_{p1} e Z_{p2} e por fim calcular n e k . A norma DNER-PRO 277/97 ressalta que a utilização da tabela normal se deve à variável aleatória $\bar{X} \pm ks$ deve ser assumida como aproximadamente normal. Convencionalmente para avaliação da qualidade de serviços rodoviários a norma DNER-PRO 277/97 estabelece os valores de n e k comumente adotados em planos de amostragem, estes foram calculados através das Equações 1 e 2 fixando-se os valores de $\beta=0,10$; $P_1=0,05$ e $P_2=0,25$ e variando-se o risco da contratada α como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de n e k segundo a norma DNER-PRO 277/97

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

legenda: **n** = núm. de observações; **k** = coeficiente multiplicador; **α** = risco do executante

Fonte: Adaptada da norma DNER-PRO 277/97 (1997).

Determinados o número total de observações da amostra e o coeficiente multiplicador, faz-se necessário o cálculo da média \bar{X} e do desvio padrão s da amostra avaliada, estes calculados a partir das Equações 3 e 4, respectivamente.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{(n - 1)}} \quad (4)$$

Como citado anteriormente, denota-se que a medida de qualidade $PRO/277 = \bar{X} \pm ks$, fica estabelecida em função de dois valores. O primeiro sendo dado pela média \bar{X} menos o

produto do coeficiente multiplicador k pelo desvio s , o qual por questões de convenção receberá a denominação $\lambda m\acute{i}n$, como segue descrito na Equação 5.

$$\lambda m\acute{i}n = \bar{X} - ks \quad (5)$$

E o segundo, $\lambda m\acute{a}x$ dado pela média \bar{X} mais o produto do coeficiente multiplicador k pelo desvio s , definido através das Equação 6.

$$\lambda m\acute{a}x = \bar{X} + ks \quad (6)$$

Com base nesses valores, será tomada a decisão entre a aceitação ou rejeição do serviço tendo como parâmetros avaliativos os limites estabelecidos em projeto, denominados limite inferior de especificação LIE e limite superior de especificação LSE os quais são definidos pelo órgão gestor (contratante). A norma indica que a abordagem avaliativa pode ser baseada em limites unilaterais vide Quadro 4 ou bilaterais Quadro 5, sendo esta última a abordagem adotada no presente trabalho pois, todas as propriedades aqui avaliadas possuem um limite inferior e outro superior como referência, ou seja a propriedade pode variar dentro destes limites. Diferentemente de propriedades que se tem como parâmetro, apenas um único valor individual e sua qualidade pode ser atestada quando, se encontra valores acima ou abaixo deste valor referência.

Quadro 4 – Alternativas de decisão unilateral para valores acima e/ou abaixo de LIE e LSE

Se	Conclusão sobre o serviço
$\lambda m\acute{i}n = \bar{X} - ks < \text{LIE}$	rejeita-se
$\lambda m\acute{i}n = \bar{X} - ks \geq \text{LIE}$	aceita-se
$\lambda m\acute{a}x = \bar{X} + ks > \text{LSE}$	rejeita-se
$\lambda m\acute{a}x = \bar{X} + ks \leq \text{LSE}$	aceita-se

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Quadro 5 – Alternativas de decisão bilateral para valores entre LIE e LSE

Se	Conclusão sobre o serviço
$\lambda m\acute{i}n = \bar{X} - ks < \text{LIE}$ ou $\lambda m\acute{a}x = \bar{X} + ks > \text{LSE}$	rejeita-se
$\lambda m\acute{i}n = \bar{X} - ks \geq \text{LIE}$ e $\lambda m\acute{a}x = \bar{X} + ks \leq \text{LSE}$	aceita-se

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

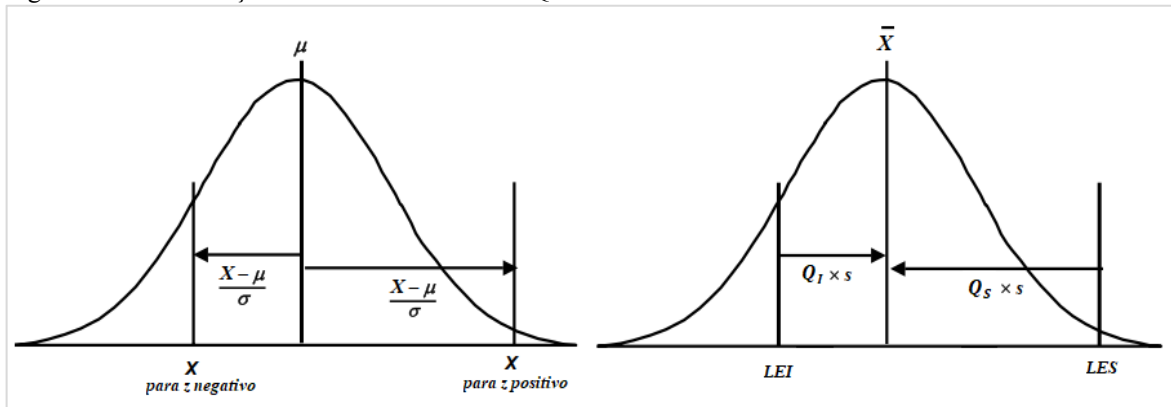
2.3.2 Porcentagem dentro dos limites

As especificações baseadas em porcentagem dentro dos limites, datam dos anos

1950 nos Estados Unidos. A princípio foram utilizadas pelos militares, sendo aplicadas posteriormente na área de transportes, tornando-se uma das primeiras a serem empregadas pelo Departamento de transportes de Nova Jersey a partir dos anos 1970 (BREAKAH *et al.*, 2007). Sendo considerada uma das preferidas para o controle estatístico de qualidade de pavimentos nos Estados Unidos, devido sua consideração tanto da medida de centralidade \bar{X} como da variabilidade dos dados s de uma forma estatisticamente sólida (BURATI *et al.*, 2003).

A abordagem utilizada para estimar PDL baseia-se na suposição de que as medições são variáveis aleatórias independentes e distribuídas de forma aproximadamente normal (MIL-STD 414, 1958). Burati e Wedd (2006a) definem que o PDL pode ser estimado pelo índice de qualidade Q , valor este utilizado em conjunto com uma tabela, (anexo B) para se determinar o valor de PDL da amostra avaliada. Em conceito, o valor Q desempenha a mesma função que o valor Z na estatística inferencial, porém o que diferencia um valor do outro, é o uso média amostral \bar{X} , ao invés da média populacional (μ). Além disso, especifica-se que os pontos de interesse com relação às áreas sob a curva normal, são os limites de especificação de PDL, conforme o representado na Figura 1.

Figura 1 – Diferenciação entre as estatísticas Z e Q



Fonte: Adaptada de Burati *et al.*, (2003).

Para o cálculo dos índices de qualidade Q_I e Q_S faz-se uso das Equações 7 e 8.

$$Q_I = \frac{\bar{X} - LIE}{s} \quad (7)$$

$$Q_S = \frac{LSE - \bar{X}}{s} \quad (8)$$

Onde:

Q_I = índice de qualidade para o limite inferior de especificação;
 Q_S = índice de qualidade para o limite superior de especificação;
 LIE = limite inferior de especificação;
 LSE = limite superior de especificação;
 \bar{X} = média amostral;
 s = desvio padrão amostral.

Vale salientar que a medida de qualidade PDL baseia-se de modo semelhante a PRO/277, ou seja, no estabelecimento de limites unilaterais e bilaterais. De modo que quando se objetiva encontrar valores estimados de PDL com limites unilaterais, utiliza-se Q_I quando o limite de especificação a ser atingido é o inferior e Q_S quando o limite de especificação a ser atingido for o superior. Já quando objetiva-se alcançar valores com limites de especificação bilaterais, cuja qual será a abordagem avaliativa utilizada nesta pesquisa, o valor PDL estimado será dado pela Equação 9,

$$PDL_T = PDL_S + PDL_I - 100 \quad (9)$$

Onde:

PDL_S = porcentagem abaixo do limite superior de especificação, com base em Q_S ;

PDL_I = porcentagem acima do limite inferior de especificação, com base em Q_I ;

PDL_T = porcentagem dentro dos limites superior e inferior de especificação.

Como supracitado, PDL é uma das principais medidas de qualidade adotadas pelos departamentos de transportes dos estados norte-americanos. Isto posto, as especificações de controle de qualidade que se baseiam na medida PDL, são frequentemente construídas utilizando limites de qualidade de 90%. Isto indica que se a empresa executora/contratada atingir um $PDL \geq 90\%$ o serviço avaliado será aceito e com isto o mesmo terá direito de receber, seu pagamento integralmente (AL-KHAYAT, 2018). Já para valores abaixo de 90% até 60% considera-se uma aceitação parcial com impacto direto no fator de pagamento da contratada e por fim, abaixo de 60% o serviço é considerado rejeitado (ADAMS; CASTORENA; KIM, 2019). Em casos de rejeição, alguns departamentos de transportes, como o do estado de Michigan (MDOT), propõe a empresa executora duas opções, sendo a primeira manter o lote defeituoso e esta aceitar a penalização máxima no valor a ser recebido pela mesma e a segunda,

remover e substituir o lote defeituoso, submetendo-se a uma nova avaliação da qualidade.

2.3.3 *Desvio absoluto médio*

Conduzir especificações de qualidade em obras rodoviárias, baseadas em medidas de controle estatístico que carreguem consigo algum viés implícito, pode tornar-se oneroso para o órgão gestor da obra rodoviária. Haja vista que nestas condições a medida de qualidade mensura inadequadamente a qualidade do serviço executado pela empresa contratada, podendo-se inferir que tais medidas sejam imparciais. Neste sentido, Frazier, Ray e Vecellio (1992) apontam como exemplo, algumas medidas de qualidade voltadas para atingir um valor alvo, das quais se destaca, o desvio médio de um valor alvo a qual foi bastante utilizada como meio para determinar-se aceitabilidade de obras rodoviárias.

Corroborando acerca da abordagem adotada pelo Desvio médio de um valor alvo, Burati e Wedd (2006a) alertam que esta medida de qualidade pode incentivar a empresa executora a manipular o processo de produção dos lotes. Por exemplo, se dois resultados de um teste realizado na parte da manhã estiverem abaixo do valor alvo, há um forte incentivo para que a contratada realize mudanças no processo, a fim de elevar os valores nos dois testes realizados na parte da tarde, desse modo, a média dos quatro testes para o lote ficarão próximos do valor do valor almejado. O que se percebe nesta conduta, é de que há um forte incentivo para que a empresa executora aumente a variabilidade no processo de produção, fazendo ajustes frequentes para o alcance do valor alvo.

Com intuito de não permitir tais ajustes durante o processo de produção, deu-se início a condução de especificações de qualidade baseadas no Desvio Absoluto Médio (DAM). Esta medida de qualidade foi formulada de maneira a não permitir que desvios positivos e/ou negativos se cancelem, impossibilitando-se o enviesamento por parte da contratada. (BURATI ; WEDD, 2006a). A Equação 10, apresenta como pode ser calculada a referida medida de qualidade.

$$DAM = \frac{\sum |x_i - T|}{n} \quad (10)$$

Onde:

x_i = valores amostrais;

T = valor alvo ou de projeto;

n = número total de observações da amostra.

Os principais departamentos de transportes dos estados norte-americanos que utilizam especificações de qualidade baseadas na medida de qualidade DAM são: Alabama, Carolina do Sul, Georgia e Tenessi (SMITH *et al.*, 2009). As especificações para DAM variam de um estado para outro, seja pela determinação do intervalo aceitável de DAM, ou pela definição de quais as propriedades que serão avaliadas pelo Desvio Absoluto Médio. A Tabela 2 apresenta intervalos de aceitação do DAM para as propriedades porcentagem de %CAP e Volume de vazios da mistura asfáltica aplicada em revestimentos de um destes estados norte-americanos. Esses intervalos para aceitação com base em DAM, variam com relação a propriedade avaliada e de acordo com o número total de observações da amostra n para a mesma. Nota-se por meio da Tabela 2 que n pode assumir os valores de 1 até 4.

Tabela 2 – Especificações de DAM para as propriedades % CAP e Vv

Intervalos de aceitação do DAM e fatores de pagamento relativos						
%CAP						
FP	1,02	1,00	0,98	0,95	0,90	0,80 e/ou remover/substituir
n = 1	-	0,00 - 0,48	0,49 - 0,51	0,52 - 0,57	0,58 - 0,66	Acima de 0,66
n = 2	-	0,00 - 0,34	0,35 - 0,36	0,37 - 0,40	0,41 - 0,47	Acima de 0,47
n = 3	-	0,00 - 0,28	0,29 - 0,29	0,30 - 0,33	0,34 - 0,38	Acima de 0,38
n = 4	0,00 - 0,14	0,15 - 0,24	0,25 - 0,26	0,27 - 0,28	0,29 - 0,33	Acima de 0,33
Vv						
FP	1,02	1,00	0,98	0,95	0,90	0,80 e/ou remover/substituir
n = 1	-	0,00 - 1,50	1,51 - 1,62	1,63 - 1,80	1,81 - 2,10	Acima de 2,10
n = 2	-	0,00 - 1,06	1,07 - 1,15	1,16 - 1,27	1,28 - 1,48	Acima de 1,48
n = 3	-	0,00 - 0,87	0,88 - 0,94	0,95 - 1,04	1,05 - 1,21	Acima de 1,21
n = 4	0,00 - 0,45	0,46 - 0,75	0,76 - 0,81	0,82 - 0,90	0,91 - 1,05	Acima de 1,05

Fonte: ALDOT (2022).

Além da descrição dos intervalos para DAM, percebe-se que atrelados a estes o Departamento de transportes do Alabama já especifica o Fator de Pagamento (FP) da empresa executora, diferentemente de outros departamentos que determinam este fator por intermédio de Equações como as apresentadas na subseção seguinte. Em resumo, denota-se que à medida que n aumenta, mais restrito e menores são os valores intervalares para DAM e por conseguinte, maiores são os valores FP com destaque para o máximo de 1,02 o qual indica o direito de a contratada receber seu pagamento integralmente e mais um bônus de 2% incidindo sobre este. Contrariamente, destaca-se os fatores menores que 0,80 esses indicam a opção de a empresa

executora escolher entre ser penalizada em 20% a menos no seu pagamento integral ou remover/substituir o serviço no revestimento. (ALDOT, 2022).

2.4 Fator de pagamento

Segundo Burati (2005), o principal objetivo do fator de pagamento (FP) é incentivar financeiramente a empresa executora a realizar um serviço no nível de qualidade desejado, ou seja, os fatores de pagamento funcionam como forma de estímulo/incentivo a estas empresas para a melhoria da qualidade na prestação de serviços voltados à construção de pavimentos rodoviários. A lógica ao se adotar um fator de pagamento, é o estabelecimento de especificações para garantia da qualidade do serviço prestado ligados a uma bonificação, em caso de qualidade superior à exigida, ou penalização no caso de qualidade inferior à exigida. No Brasil, ainda não se tem registros literários sobre a adoção de fatores de pagamento atrelados à medida de qualidade PRO/277. Nos Estados Unidos os órgãos de transportes que aderem às especificações baseadas nas medidas de qualidade PDL e DAM, adotam Equações de FP em função dos valores indicados por estas. Pois com isso, torna-se possível calcular o pagamento da contratada correspondente ao nível de qualidade atingido pela mesma, durante a construção do pavimento, nível esse mensurado a partir das medidas de qualidade.

Como exemplo, Muench e Mahoney (2001) apontam que para efeitos de pagamento, muitos (DOTs) *Departments of Transportations* (contratante) em todo o território norte-americano utilizam a medida PDL para calcular os pagamentos das empresas executoras. Onde realiza-se uma análise estatística para encontrar o valor PDL, sendo este definido como “a percentagem que cai acima de um limite inferior de especificação LIE e abaixo do limite superior de especificação LSE”. Entretanto, não somente para PDL foram definidas Equações de pagamento, mas também para DAM, segundo a AASHTO *American Association of State Highway and Transportation Officials* (1996) seguem formuladas através das Equações 11 e 12 os fatores de pagamento baseados nestas duas medidas, as quais são comumente utilizadas naquele país.

$$FP_{PDL} = 55 + (0,50 \cdot PDL), FP_{PDL} \leq 105\% \quad (11)$$

$$FP_{DAM} = 105 - 24,75 \cdot (DAM - 0,789), FP_{DAM} \leq 105\% \quad (12)$$

Onde:

FP_{PDL} = Fator de pagamento baseado em PDL;

FP_{DAM} = Fator de pagamento baseado em DAM;

PDL = Porcentagem dentro dos limites;

DAM = Desvio absoluto médio.

Ressalta-se que para ambos os fatores de pagamento fica estabelecido um bônus máximo de 5%, o qual incide pagamento integral da empresa executora. Verificado pela imposição denotada na Equação 12 ($FP_{DAM} \leq 105\%$) ou ao se observar que um $PDL = 100$, sendo esse o maior valor que pode ser alcançado pela contratada, resulte pela definição da Equação 11 em 105%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do banco de dados e parâmetros de projeto

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado um banco de dados do controle estatístico de qualidade referente ao revestimento asfáltico de um subtrecho rodoviário situado no estado do Ceará. Especificamente, este controle diz respeito às camadas de *binder* e capa. O subtrecho da rodovia federal avaliada tem uma extensão total de 1,58 km, iniciando na estaca [981 + 0,00m] e findando na estaca [1060 + 0,00m], totalizando 79 estacas.

Os dados brutos foram fornecidos em uma planilha no formato PDF (*Portable Document Format*) contendo as seguintes informações: (i) valores amostrais (x_i) para diversas propriedades da mistura asfáltica aplicada nas duas camadas do revestimento, (ii) data de coleta das amostras e (iii) estaca inicial e final do segmento em que a amostra foi coletada. Além destas informações, o banco de dados traz todas as especificações de projeto que devem ser seguidas pela empresa executora ao longo da implementação da obra rodoviária. Especificamente com relação à granulometria para a camada de *binder* deve-se utilizar a faixa A do DNIT e para capa, a faixa C. Com relação as espessuras de projeto das camadas de *binder* e capa, elas devem possuir 6,0 e 5,0 cm, respectivamente, totalizando 11,0 cm de revestimento asfáltico. A Tabela 3 descreve resumidamente os valores limite inferior (LIE) e superior (LSE) de especificação de todas as propriedades selecionadas para avaliação neste trabalho.

Tabela 3 – Limites LIE e LSE para as propriedades das camadas de *binder* e capa

Propriedade	Unidade	<i>binder</i>		capa	
		LIE	LSE	LIE	LSE
%CAP	%	4,00	4,60	4,90	5,50
Esp	cm	5,70	6,30	4,75	5,25
Vv	%	4,00	6,00	3,00	5,00
Gc	%	97,00	101,0	97,0	101,0
19,00mm	%	76,70	90,0	-	-
12,50mm	%	-	-	83,40	97,40
4,75mm	%	33,90	43,90	50,00	60,00
0,075mm	%	1,00	4,90	2,90	6,90

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Como supracitado o banco de dados recebido é composto por diversas propriedades referentes a mistura asfáltica aplicada no revestimento da rodovia. No entanto, selecionou-se apenas as propriedades comumente utilizadas para a avaliação da qualidade de revestimentos asfálticos tomando por base as indicações da literatura técnico-científica associada. Em seu

trabalho, Uddin (2020) mostra que nos Estados Unidos, em mais de 75% dos departamentos de transporte estaduais por ele pesquisados, utilizam parâmetros volumétricos (densidade, teor de ligante asfáltico, volume de vazios) e granulométricos (percentuais passantes nas peneiras). Esta constatação encontra amparo na literatura, a qual indica que tais parâmetros estão vinculados ao maior desempenho e durabilidade do revestimento asfáltico (BARDINI *et al.*, 2012; LEITE; MOTTA, 2019; WANG *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2020). As propriedades aqui avaliadas estão listadas na Tabela 4, que também traz a simbologia adotada para representá-las no decorrer deste documento.

Tabela 4 – Simbologia para as propriedades selecionadas e avaliadas

Símbolo	Propriedade	Unidade
%CAP	Teor de ligante asfáltico	%
Esp	Espessura das camadas de <i>binder</i> e/ou capa	cm
Vv	Volume de vazios	%
Gc	Grau de compactação	%
19,00mm	Percentual passante na peneira de 19,00mm	%
12,50mm	Percentual passante na peneira de 12,50mm	%
4,75mm	Percentual passante na peneira de 4,75mm	%
0,075mm	Percentual passante na peneira de 0,075mm	%

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.2 Etapas metodológicas

3.2.1 Organização do banco de dados

O subtrecho em análise foi dividido em dois segmentos, denominados Segmentos I e II, a fim de confrontar o controle de qualidade empregado nas diferentes extensões das camadas de *binder* e capa, ou seja, verificar se a qualidade empregada no segmento I foi a mesma empregada no segmento II. A definição dos segmentos foi feita buscando-se compatibilizar os locais de amostragem das camadas de *binder* e capa de modo a se obter segmentos de extensão aproximada em cada camada diferente.

A Tabela 5 indica os detalhes geométricos dos segmentos, como pode-se observar há uma diferenciação nas extensões dos dois segmentos avaliados em ambas as camadas de revestimento. A estaca que finaliza o segmento I da camada de *binder* é a 1030, já a da camada de capa é a 1038, isto se deu devido a não adoção de distâncias iguais na coleta de dados amostrais para as camadas de *binder* e capa. Entretanto isto não influencia nas análises, haja visto que as especificações para as propriedades avaliadas também diferenciam-se entre as duas camadas de revestimento. Já as Tabela 6 e 7 apresentam o banco de dados disponibilizado.

Tabela 5 – Descrição da divisão dos segmentos que serão avaliados

Camada	Segmento	Estaca inicial	Estaca final	Extensão (km)
<i>binder</i>	I	[981+ 0,00m]	[1030 + 0,00m]	0,98
	II	[1030 + 0,10m]	[1060 + 0,00m]	0,60
capa	I	[981+0,00m]	[1038 + 0,00m]	1,14
	II	[1038 + 0,10m]	[1060 + 0,00m]	0,44

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Tabela 6 – Banco de dados camada de *binder*

Segmento I							
<i>n</i>	%CAP (%)	Esp (cm)	Vv (%)	Gc (%)	19,00mm (%)	4,75mm (%)	0,075mm (%)
1	4,34	5,80	4,50	100,00	80,28	42,74	2,77
2	4,33	6,11	4,40	98,40	89,61	43,23	3,21
3	4,31	6,90	4,50	99,60	84,86	40,04	2,33
4	4,37	6,00	4,60	97,20	88,59	43,76	3,13
5	4,34	5,90	4,50	101,10	88,55	43,60	3,21
6	4,28	4,70	4,40	99,10	88,70	44,40	3,30
7	4,33	7,00	-	100,50	89,87	42,52	3,59
8	4,34	5,20	-	100,20	86,03	42,12	3,51
9	4,28	4,70	-	99,20	87,70	43,70	2,60
10	4,32	4,50	-	99,70	85,30	42,50	3,40
11	4,35	5,10	-	100,90	88,92	38,90	3,60
12	4,39	4,40	-	99,40	88,90	42,93	2,87
13	4,31	5,60	-	101,10	85,13	43,11	3,20
14	4,34	4,80	-	99,60	-	38,06	4,03
15	-	5,10	-	99,20	-	-	-
16	-	6,80	-	100,60	-	-	-
17	-	6,60	-	100,40	-	-	-
18	-	7,50	-	101,60	-	-	-
19	-	7,00	-	99,20	-	-	-
Segmento II							
<i>n</i>	%CAP (%)	Esp (cm)	Vv (%)	Gc (%)	19,00mm (%)	4,75mm (%)	0,075mm (%)
1	4,28	6,10	4,60	99,50	85,86	43,56	2,60
2	4,36	5,50	4,30	100,80	83,53	42,55	2,72
3	4,30	5,60	4,50	99,10	87,93	42,46	3,43
4	4,44	5,90	-	99,70	89,86	43,56	3,34
5	4,35	5,20	-	97,50	81,62	40,79	2,98
6	4,32	5,40	-	98,90	87,70	42,50	3,40
7	4,32	5,60	-	98,80	88,36	39,61	2,86
8	-	5,80	-	100,40	-	-	-
9	-	6,80	-	100,30	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Tabela 7 – Banco de dados camada de capa

segmento I							
<i>n</i>	%CAP (%)	Esp (cm)	Vv (%)	Gc (%)	12,50mm (%)	4,75mm (%)	0,075mm (%)
1	5,15	6,00	3,70	98,00	92,97	57,92	3,16
2	5,21	5,80	3,30	99,20	89,08	54,46	4,83
3	5,30	6,00	3,60	98,90	87,18	56,56	4,48
4	5,31	6,10	3,50	98,10	84,42	58,65	4,14
5	5,10	6,30	3,60	98,60	90,38	58,77	4,72
6	5,15	6,10	-	100,70	90,25	56,44	3,79
7	5,27	4,90	-	99,10	87,85	52,12	4,93
8	5,28	5,50	-	97,50	86,46	57,38	4,64
9	5,35	4,70	-	101,30	89,40	54,66	4,93
10	5,31	5,10	-	98,20	87,70	56,64	4,42
11	5,19	5,60	-	99,80	93,12	57,78	3,26
12	5,27	6,50	-	98,70	90,28	58,34	4,87
segmento II							
<i>n</i>	%CAP (%)	Esp (cm)	Vv (%)	Gc (%)	12,50mm (%)	4,75mm (%)	0,075mm (%)
1	5,17	5,10	3,60	98,70	90,70	56,70	3,89
2	5,22	5,50	3,50	97,60	88,28	59,07	3,61
3	5,28	5,70	3,40	99,30	90,25	59,47	4,83
4	5,25	5,10	3,40	97,50	86,80	57,37	4,97
5	5,24	5,80	-	99,30	85,74	56,12	4,53
6	5,30	5,90	-	98,90	83,48	58,53	5,29

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Como pode-se observar nas Tabela 6 e 7, há um desequilíbrio no número total de observações *n* entre os segmentos, entre as camadas e entre as propriedades, o que é um cenário comum em obras rodoviárias, isto é, decisões sobre aceitação ou rejeição dos serviços podem ser tomadas a partir de diferentes números totais de observações de campo (vide DNER-PRO 277/97).

Observa-se também nestas tabelas que nem todas as peneiras granulométricas comumente utilizadas na pavimentação rodoviária são avaliadas. Decidiu-se avaliar apenas três peneiras, as quais se referem às partículas de agregado graúdo, intermediário e miúdo. Em termos de peneira do agregado graúdo, para a camada de *binder* escolheu-se a peneira de 19,00mm e para a capa a peneira de 12,50mm. Para os demais tamanhos de agregado não houve distinção entre peneiras de modo que para as duas camadas definiu-se as peneiras de 4,75mm e 0,075mm representando os agregados intermediário e miúdo, respectivamente.

3.2.2 *Caracterização estatística*

Cada um dos dois segmentos de cada camada (Segmentos I e II) foram caracterizados por meio da estatística descritiva a fim de sumarizar e descrever o banco de dados em estudo. Assim, para cada segmento obteve-se média, variância, desvio padrão amostral, assimetria, valor máximo, valor mínimo, amplitude, mediana e coeficiente de variação. Alguns histogramas também foram gerados.

De modo complementar e em atenção ao fato de que a literatura indica que as medidas de qualidade devem ser provenientes de uma população aproximadamente normal, optou-se por investigar a normalidade das amostras para cada uma das propriedades. Neste sentido, adotou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, o qual foi realizado por meio do *software* estatístico Past4.08, com um nível de significância $\alpha = 5\%$.

3.2.3 *Cálculo das medidas de qualidade e fatores de pagamento*

De posse dos resultados obtidos na etapa de caracterização estatística, partiu-se para o cálculo das três medidas de qualidade em estudo, a começar pela medida de qualidade PRO/277 baseada na norma DNER PRO 277/97, seguidamente por porcentagem dentro dos limites (PDL) e finalmente, desvio absoluto médio (DAM). Ademais, com os resultados obtidos através do cálculo destas medidas tornou-se possível calcular os fatores de pagamento considerando o PDL (FP_{PDL}) e o DAM (FP_{DAM}). Ressalta-se que ambas as medidas (PDL e DAM) não são normatizadas em nosso país. A seguir, descreve-se brevemente as etapas metodológicas adotadas para o cálculo das medidas de qualidade investigadas neste trabalho.

3.2.3.1 *Cálculo da medida PRO/277*

Para o cálculo da medida de qualidade PRO/277 fez-se uso das Equações 5 e 6 que determinam os valores de $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ para cada uma das propriedades avaliadas, referentes ao segmento I e II das camadas de *binder* e capa. O cálculo de $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ para cada propriedade ocorreu da seguinte maneira:

- a) para uma propriedade específica obteve-se a média \bar{X} e desvio padrão s , estes oriundos da etapa de caracterização estatística;
- b) verificou-se qual o número total de observações n para a propriedade;
- c) de posse do valor n , buscou-se na Tabela 1 o valor do coeficiente multiplicador k correspondente;

- d) aplicou-se então as Equações 5 e 6 para determinação dos valores de $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ para a propriedade;
- e) por fim repetiu-se todo o procedimento para as demais propriedades.

3.2.3.2 Cálculo da medida PDL

A medida de qualidade PDL, é determinada por meio do cálculo dos índices de qualidade inferior Q_I e superior Q_S . No entanto, como definido nas Equações 7 e 8, para o cálculo destes, faz-se necessário além dos valores de média \bar{X} e desvio s , a definição dos limites de especificação inferior LIE e superior LSE, esses limites dizem respeito às tolerâncias previstas nas especificações de projeto (DNIT 031/2006-ES) para concreto asfáltico. A partir da determinação de LIE e LSE pode-se calcular os índices Q_I e Q_S e por conseguinte, o valor de PDL para cada propriedade, como segue:

- a) para uma propriedade específica, calculou-se os índices de qualidade Q_I e Q_S através das Equações 7 e 8 a partir da média, desvio padrão amostral e limites de especificação;
- b) analogamente à PRO/277, verificou-se qual o número total de observações n para a propriedade, para que conjuntamente com os índices Q_I e Q_S se encontre respectivamente os valores de PDL_I e PDL_S tabelados (vide anexo B);
- c) calculou-se PDL_T a partir dos valores de PDL_I e PDL_S conforme a Equação 9;
- d) por fim, repetiu-se todo o procedimento descrito acima para as demais propriedades.

3.2.3.3 Cálculo da medida DAM

De início, para o cumprimento desta etapa metodológica, necessitou-se estabelecer o valor alvo T para cada propriedade, ou seja, o valor de projeto de referência este valor fica estabelecido através da média entre os limites inferior e superior de especificação ambos delimitados pelo órgão gestor (contratante). Todas as propriedades em análise têm valores de projeto, com exceção do grau de compactação (G_c) para o qual se estabelece apenas uma margem de variação possível (97 a 101%). Como dito para a aplicação desta medida de qualidade, optou-se por utilizar o valor médio entre LIE e LSE, como valor alvo T . A Tabela 8 resume os valores alvo para todas as propriedades avaliadas.

Tabela 8 – Valores alvo T para os segmentos I e II das camadas de revestimento

Propriedade	Unidade	<i>binder</i>	<i>capa</i>
		Valor alvo T	Valor alvo T
%CAP	%	4,30	5,20
Esp	cm	6,00	5,00
Vv	%	5,00	4,00
Gc	%	99,00	99,00
19,00mm	%	83,35	-
12,50mm	%	-	90,40
4,75mm	%	38,90	55,00
0,075mm	%	2,95	4,90

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Definidos os valores alvo T para cada uma das propriedades, tornou-se possível determinar a medida de qualidade DAM, através da Equação 10. Para esta medida de qualidade adotou-se duas etapas metodológicas. A primeira visa determinar unicamente o valor DAM de todas as propriedades considerando todas as amostras disponíveis no banco de dados referente a cada propriedade, ou seja, com (n variável em razão da disponibilidade de amostras).

Observou-se que especificamente quanto a medida de qualidade DAM, a literatura ainda é limitada na indicação de que valores são aceitáveis ou desejáveis para algumas propriedades. O Departamento de Transportes do Alabama (EUA) possui uma especificação de qualidade executiva um pouco mais clara quanto ao uso do DAM como medida de qualidade, mas limita-se a avaliar apenas o teor de ligante asfáltico (%CAP) e o volume de vazios (Vv) da mistura asfáltica para um número de amostras menor ou igual a quatro (ALDOT, 2022).

Frente a esta limitação, adotou-se uma segunda etapa metodológica, qual seja, o cálculo do DAM apenas para as propriedades %CAP e Vv pela equação 10 limitando o número de amostras a quatro $n = 4$. Justifica-se esta análise apenas com quatro amostras para que seja possível aplicar as diretrizes de avaliação da qualidade executiva do ALDOT em termos de aceitação total, aceitação parcial ou rejeição do serviço relativo ao teor de ligante asfáltico (%CAP) e ao volume de vazios (Vv). Esta segunda etapa metodológica foi realizada segundo os passos abaixo descritos.

- a) primeiramente verificou-se o número total de observações n , para as duas propriedades especificadas pelo ALDOT em ambos os segmentos e camadas. O resultado está sintetizado na Tabela 9;
- b) em seguida, exclusivamente para as amostras que possuíam $n > 4$, calculou-se para estas o DAM pela Equação 10. Como exemplo, para a amostra de %CAP que possui $n = 6$, segmento II da camada de capa, selecionava-se aleatoriamente

quatro dos seis valores disponíveis e aplicava-os na Equação 10, fazendo $n = 4$ sempre. Caracterizando-se assim a primeira iteração/combinção para o cálculo de DAM desta amostra;

Tabela 9 – Número de amostras n para as propriedades %CAP e Vv

Propriedade	Segmento	<i>binder</i>	<i>capa</i>
		n	n
%CAP	I	14	12
	II	7	6
Vv	I	6	5
	II	3	4

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

- c) repetiu-se a seleção aleatória descrita no passo anterior, novamente combinado outros quatro valores, caracterizando-se a segunda iteração. Por dez vezes, repetiu-se o passo 2 resultando nas 10 iterações apresentadas na Tabela 18.
- d) feito isto para a amostra de %CAP que possui $n = 6$, repetiu-se esta segunda etapa metodológica para %CAP e Vv, exceto para Vv no segmento II de ambas as camadas, pois possuem $n \leq 4$ e já foram calculados através da primeira etapa.

Ressalta-se novamente que esta segunda etapa se deu para que fosse possível aplicar as diretrizes de avaliação da qualidade executiva do ALDOT, a qual só designa intervalos de aceitação DAM para $n \leq 4$.

3.2.3.4 Cálculo do fator de pagamento

Para cálculo dos fatores de pagamento FP, referentes às medidas de qualidade PDL e DAM, fez-se uso das Equações 11 e 12, respectivamente. A determinação de (FP_{PDL}) e (FP_{DAM}) para cada uma das propriedades avaliadas, nos segmentos I e II das camadas de *binder* e *capa*, se deu após o cálculo de PDL_T e DAM obtidos nas subseções anteriores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização estatística

Apresenta-se a seguir os resultados da etapa de caracterização estatística realizada com o intuito de obter as principais medidas de tendência central, como média e mediana, além das medidas de dispersão dos dados como variância, desvio padrão, amplitude e coeficiente de variação. Essas medidas são essenciais para a proposta deste trabalho, pois parte delas mostra-se útil para o cálculo das três medidas de qualidade aqui estudadas. Além disso, possibilitaram a extração de respostas relativas à apresentação, distribuição e comportamento dos dados disponibilizados para a construção do mesmo. A Tabela 10 resume os resultados de caracterização estatística da camada de *binder*. Enquanto, a Tabela 11 traz os resultados da camada de capa.

Tabela 10 – Resultados para caracterização estatística dos segmentos camada de *binder*

Segmento I							
Medidas	%CAP	Esp	Vv	Gc	19,00mm	4,75mm	0,075mm
Número de amostras	14	19	6	19	13	14	14
Média	4,33	5,77	4,48	99,84	87,11	42,26	3,19
Mediana	4,33	5,80	4,50	99,70	88,55	42,83	3,21
Assimetria	-0,00	0,20	0,31	-0,59	-1,43	-1,33	-0,23
Variância	0,00	0,95	0,01	1,11	7,29	3,62	0,19
Desvio padrão amostral	0,03	0,97	0,07	1,05	2,70	1,90	0,44
Coeficiente de variação	0,7	16,9	1,7	1,1	3,1	4,5	13,9
Máximo	4,39	7,50	4,60	101,6	89,87	44,40	4,03
Mínimo	4,28	4,40	4,40	97,20	80,28	38,06	2,33
Amplitude	0,11	3,10	0,20	4,40	9,59	6,34	1,70
Segmento II							
Medidas	%CAP	Esp	Vv	Gc	19,00mm	4,75mm	0,075mm
Número de amostras	7	9	3	9	7	7	7
Média	4,34	5,77	4,47	99,44	86,40	42,15	3,05
Mediana	4,30	5,60	4,50	99,50	87,70	42,50	2,98
Assimetria	1,27	1,35	-0,93	-0,59	-0,74	-0,99	-0,03
Variância	0,00	0,22	0,02	1,02	8,54	2,11	0,12
Desvio padrão amostral	0,05	0,47	0,15	1,01	2,92	1,45	0,34
Coeficiente de variação	1,2	8,2	3,4	1,0	3,4	3,5	11,2
Máximo	4,44	6,80	4,60	100,8	89,86	43,56	3,43
Mínimo	4,28	5,20	4,30	97,50	81,62	39,61	2,60
Amplitude	0,16	1,60	0,30	3,30	8,24	3,95	0,83

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Tabela 11 – Resultados para caracterização estatística dos segmentos da camada de capa

Segmento I							
Medidas	%CAP	Esp	Vv	Gc	12,50mm	4,75mm	0,075mm
Número de amostras	12	12	5	12	12	12	12
Média	5,24	5,72	3,54	99,01	89,01	56,64	4,35
Mediana	5,27	5,90	3,60	98,80	89,24	57,01	4,56
Assimetria	-0,49	-0,60	-1,12	0,89	-0,02	-1,14	-1,05
Variância	0,00	0,32	0,02	1,26	6,51	4,01	0,40
Desvio padrão amostral	0,08	0,57	0,15	1,12	2,55	2,00	0,63
Coefficiente de variação	1,5	9,9	4,3	1,1	2,9	3,5	14,5
Máximo	5,35	6,50	3,70	101,3	93,12	58,77	4,93
Mínimo	5,10	4,70	3,30	97,50	84,42	52,12	3,16
Amplitude	0,25	1,80	0,40	3,80	8,70	6,65	1,77
Segmento II							
Medidas	%CAP	Esp	Vv	Gc	12,50mm	4,75mm	0,075mm
Número de amostras	6	6	4	6	6	6	6
Média	5,24	5,52	3,47	98,55	87,54	57,88	4,52
Mediana	5,24	5,60	3,45	98,80	87,54	57,95	4,68
Assimetria	-0,54	-0,42	0,85	-0,64	-0,31	-0,14	-0,46
Variância	0,01	0,12	0,01	0,65	7,63	1,82	0,42
Desvio padrão amostral	0,05	0,35	0,10	0,81	2,76	1,35	0,65
Coefficiente de variação	0,9	6,3	2,8	0,8	3,2	2,3	14,4
Máximo	5,30	5,90	3,60	99,30	90,70	59,47	5,29
Mínimo	5,17	5,10	3,40	97,50	83,48	56,12	3,61
Amplitude	0,13	0,80	0,20	1,80	7,22	3,35	1,68

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em resumo, sob análise dos resultados de caracterização estatística é notória a maior quantidade de dados amostrais na camada de *binder* em relação a de capa, entretanto verifica-se uma maior homogeneidade no quantitativo total de amostras da segunda em relação à primeira. Observa-se também que para a maioria das propriedades em ambos os segmentos e camadas, a média é superada em valor numérico pela mediana, isto indica que a grande maioria dos dados coletados encontram-se acima da média, algo corroborado quando observa-se os valores de assimetria, cujos mesmos também em sua maioria apresentam-se acompanhados do sinal (-). Visualmente isto pode ser denotado, pelo enviesamento para à direita, apresentado na maior parte dos histogramas de frequência, posteriormente.

Ressalta-se também que as propriedades Esp e porcentagem passante na peneira 0,075mm, obtiveram os maiores coeficientes de variação em ambos os segmentos da camada de *binder*. Analogamente, para a camada de capa estas foram a propriedades que apresentaram a maior dispersão em torno da média em ambos os segmentos desta camada. Em última análise, em termos de amplitude, destacam-se as porcentagens passantes nas peneiras 19,00mm,

12,50mm e 4,75mm apresentando as maiores variações entre o máximo e mínimo valores amostrais dentre todas as propriedades avaliadas nesta pesquisa.

4.2 Verificação da normalidade dos dados

A Tabela 12 apresenta os valores de Shapiro-p-valor, respectivamente, para as camadas de *binder* e capa, referentes ao teste de Shapiro-Wilk. Estes valores servem de parâmetro comparativo para a aceitação da hipótese nula (H_0) que indica que os dados são provenientes de uma população aproximadamente normal. Isto se dá quando, Shapiro-p-valor $\geq \alpha = 0,05$ (nível de significância adotado no teste de normalidade realizado no presente trabalho). Já quando, o Shapiro-p-valor $< \alpha = 0,05$ rejeita-se a hipótese nula (H_0), o que indicia que as amostras não são provenientes de uma população normal.

Tabela 12 – Resultados do Teste de Shapiro-Wilk para as camadas do revestimento

Propriedade	Segmento	<i>binder</i>	capa
		Shapiro-p-valor	Shapiro-p-valor
%CAP	I	0,56	0,37
	II	0,35	0,92
Esp	I	0,21	0,43
	II	0,26	0,23
Vv	I	0,21	0,49
	II	0,63	0,27
Gc	I	0,59	0,39
	II	0,77	0,11
19,00mm	I	0,02	-
	II	0,52	-
12,50mm	I	-	0,12
	II	-	0,62
4,75mm	I	0,01	0,86
	II	0,17	0,78
0,075mm	I	0,95	0,03
	II	0,27	0,65

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

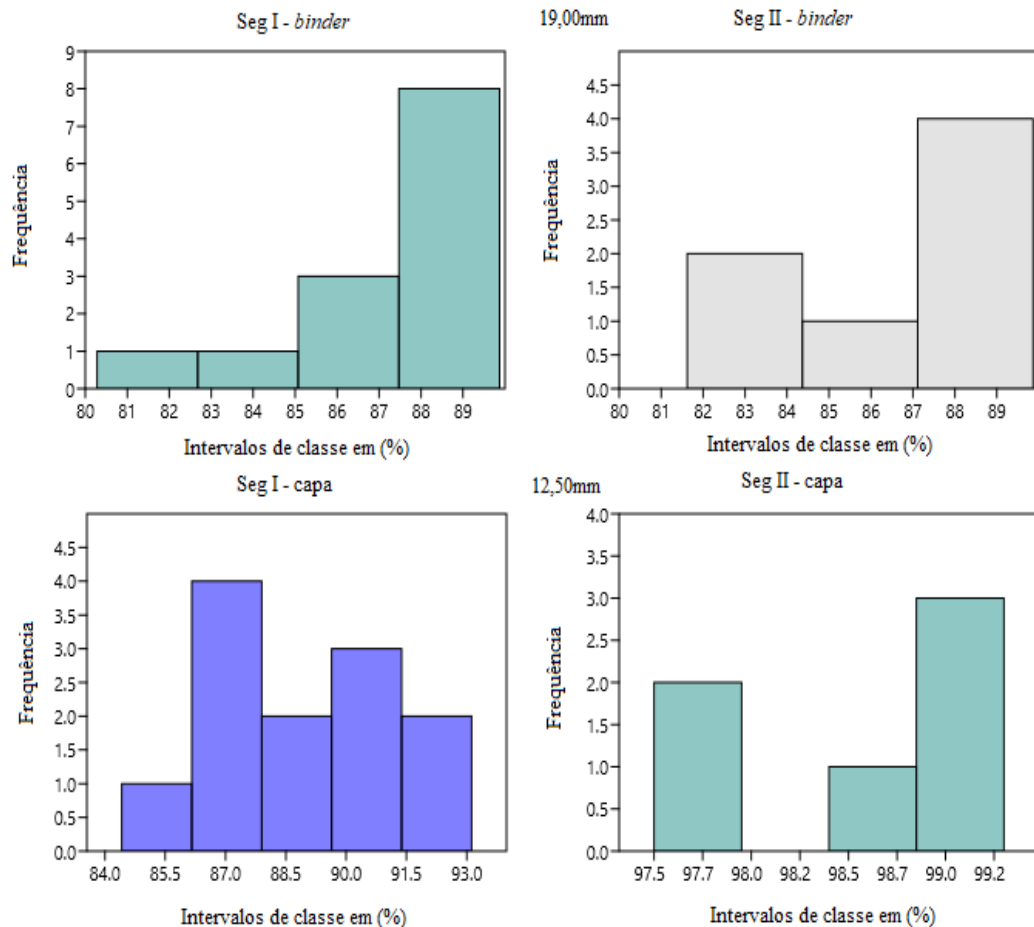
Os resultados dos testes apresentados chamam atenção para o segmento I da camada de *binder* referente às propriedades peneira 19,00mm e 4,75mm, visto que Shapiro-p-valor para estas encontram-se abaixo do 0,05 valor de referência entre aceitação/rejeição da hipótese de normalidade dos dados. Desse modo, pode-se afirmar com 95% de confiança que os dados não são provenientes de uma população aproximadamente normal. Esta mesma afirmação pode ser feita para a propriedade peneira 0,075mm no segmento I da camada de capa. Com respeito às

demais propriedades verifica-se que os respectivos Shapiro-p-valor para estas são maiores que 0,05 o que permite afirmar com 95% de confiança que elas são provenientes de populações aproximadamente normais e com isso podem ser avaliadas quanto às medidas de qualidade aqui exploradas sem qualquer restrição.

No tocante às propriedades indicadas como não-normais, resolveu-se não eliminá-las da avaliação, pois segundo Burati e Weed (2006b), embora seja razoável supor que a maioria dos materiais de construção sejam aproximadamente normais, a hipótese de normalidade pode ser violada sob a forma de uma distribuição assimétrica dos dados ou sob a forma de uma distribuição bimodal destes. Diante disso, decidiu-se construir e analisar os histogramas referentes às amostras de cada uma das propriedades avaliadas nesta pesquisa.

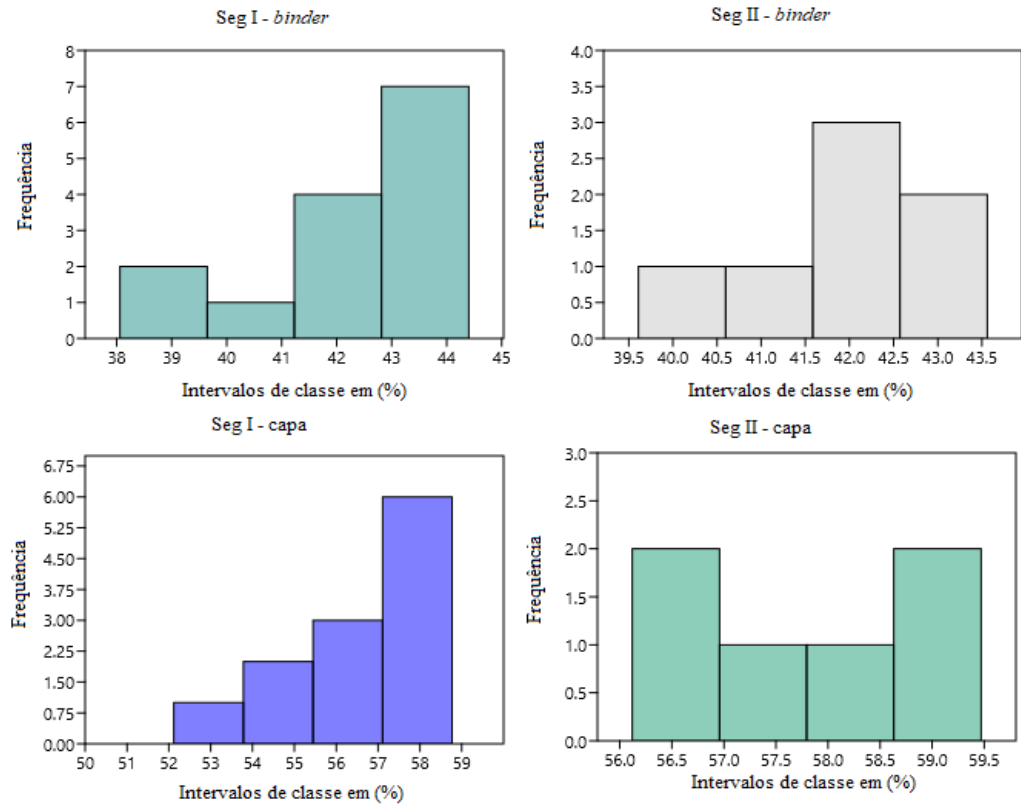
Corroborando a hipótese supracitada, tratando-se especificamente das peneiras 19,00mm, 4,75mm e 0,075mm tidas como não-normais, verifica-se visualmente através das Figura 2, 3 e 4 a falta de simetria nos histogramas de frequência das propriedades mencionadas.

Figura 2 – Histogramas das propriedades 19,00mm e 12,50mm



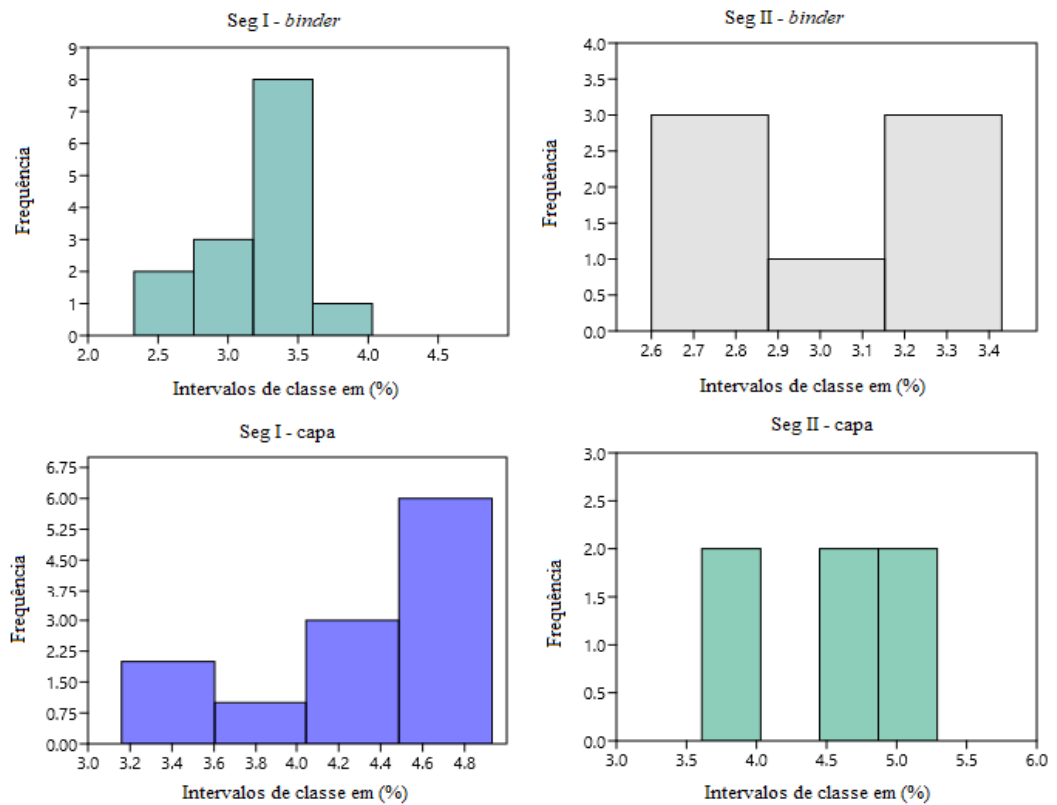
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 3 – Histogramas da propriedade 4,75mm



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 4 – Histogramas da propriedade 0,075mm

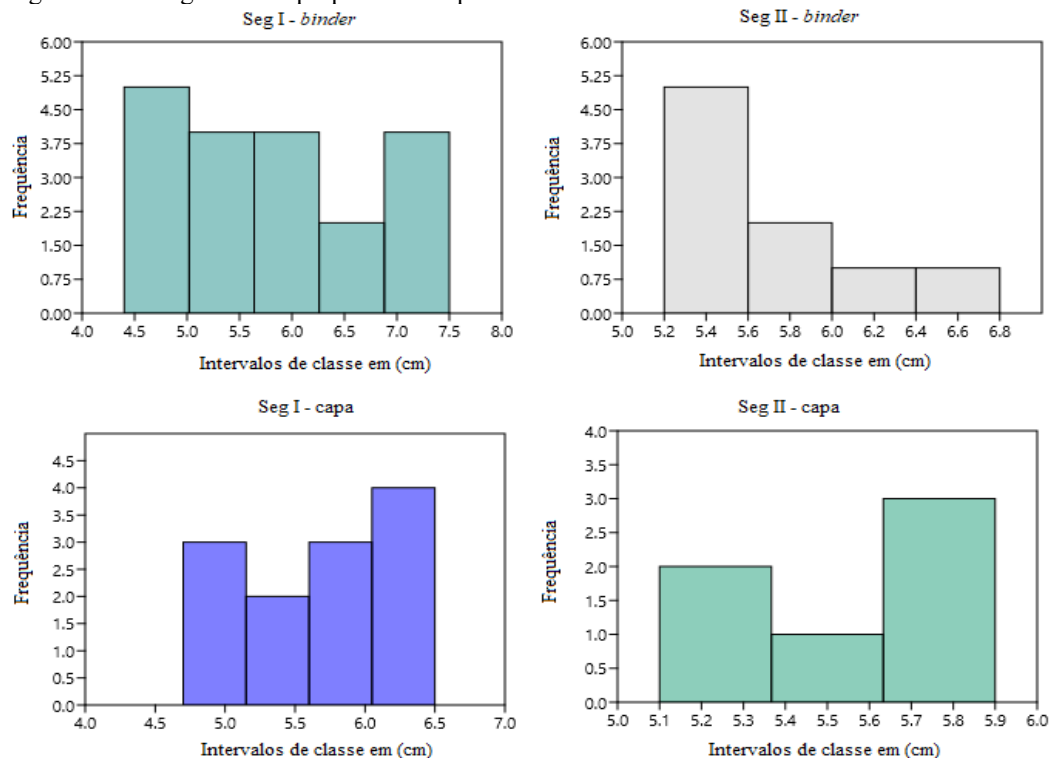


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

As assimetrias constatadas visualmente através dos histogramas, podem ser comprovadas quantitativamente nas Tabela 10 e 11 e como anteriormente citado pelos autores podem ter influenciado na análise de normalidade das propriedades. Estes autores atribuem a presença de assimetria, como decorrente de alguns limites físicos que entram em jogo para uma propriedade particular. Por exemplo, a porcentagem que passa em uma peneira para análise da granulometria não pode exceder 100. Assim, se a porcentagem média de passagem estiver perto dos 100%, suponha-se 95%, é possível com isso ter uma maior distribuição no lado abaixo da média do que no lado acima desta (BURATI; WEED, 2006b).

Além da assimetria gerada através das peneiras, outra barreira imposta pode ser a espessura do pavimento, na qual o controle de qualidade da empresa executora é conduzido para evitar que a espessura desça abaixo de uma espessura mínima de projeto, ocasionando as distorções nas amostras (BURATI; WEED, 2006b).

Figura 5 – Histogramas da propriedade Esp

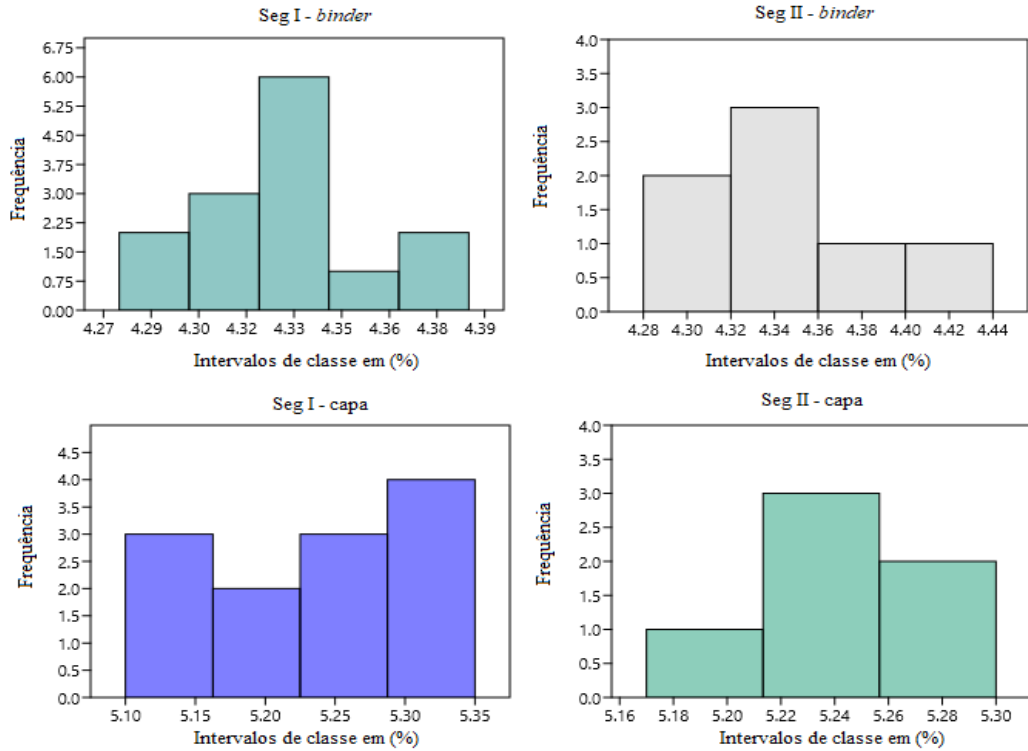


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Como pode ser observado pela Figura 5, além da assimetria, percebe-se a uma grande variabilidade definida pela quantidade de classes de espessuras nos histogramas referentes aos segmentos das camadas de *binder* e *capa*. Ademais, em última análise dos histogramas, percebe-se através das Figura 6, 7 e 8 que apesar destas propriedades terem sido consideradas normais também observa-se uma falta de simetria nestas, o que sugere a hipótese

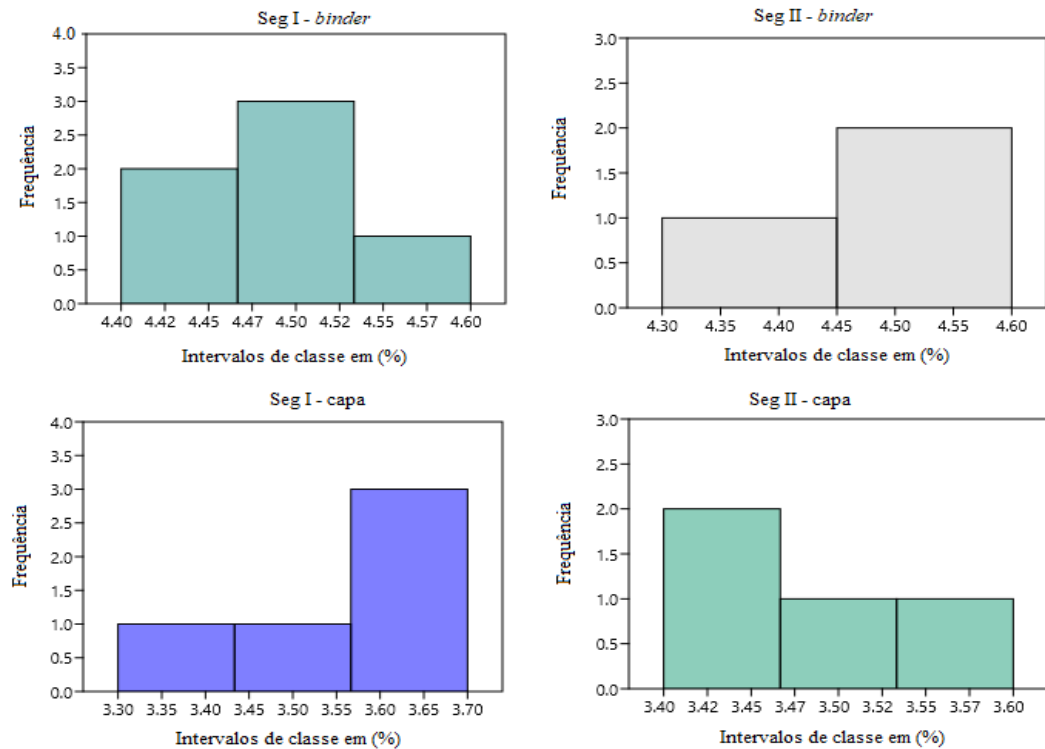
de que uma baixa quantidade de dados amostrais favorece o tipo de distribuição observada.

Figura 6 – Histogramas da propriedade %CAP



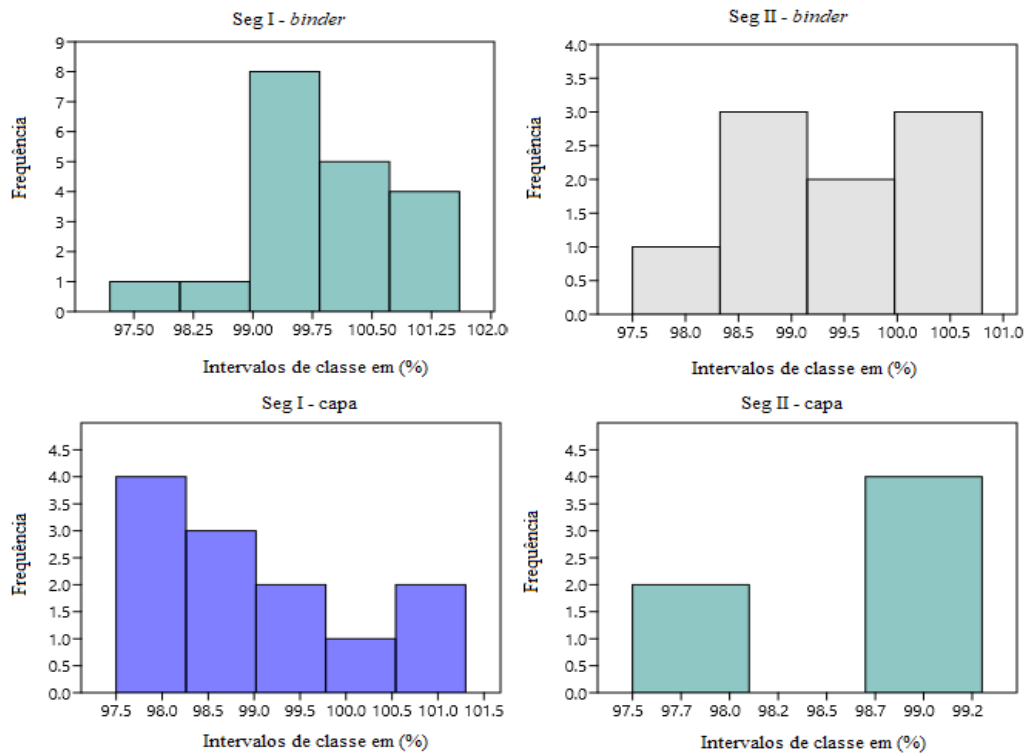
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 7 – Histogramas da propriedade Vv



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 8 – Histogramas da propriedade Gc

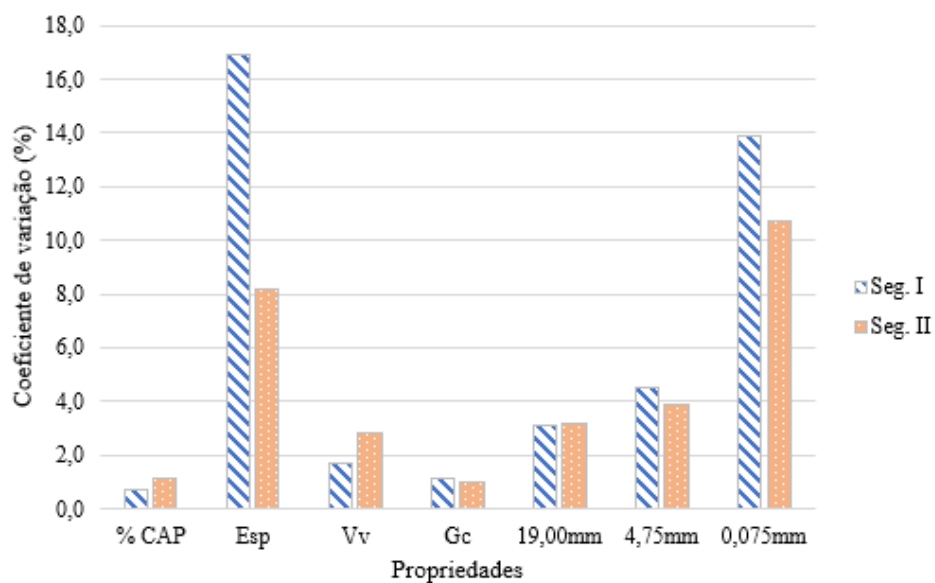


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

4.3 Análise dos coeficientes de variação

A comparação das variabilidades entre as diferentes propriedades foi feita com o uso do coeficiente de variação (CV) medida de dispersão comumente utilizada para comparar conjuntos de dados que estão em unidades de medidas distintas.

Figura 9 – Coeficiente de variação propriedades da camada de binder

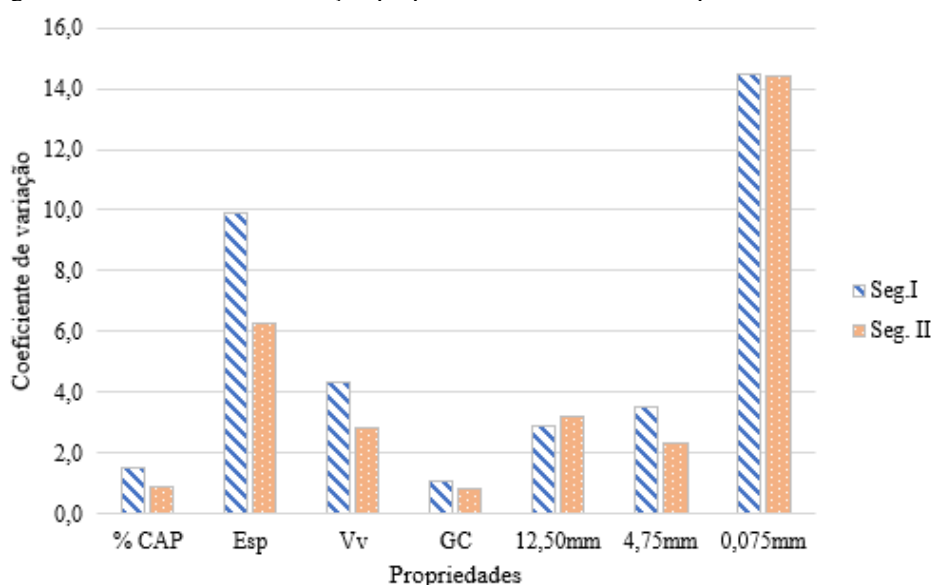


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Ao se observar a Figura 9 verifica-se a diferença entre os coeficientes de variação para os dois segmentos avaliados na camada de *binder*. Para esta camada percebe-se que as propriedades Esp e peneira 0,075mm obtiveram os maiores valores de CV, sendo 16,9% e 13,9%, respectivamente, ambos referentes ao Segmento I. Na sequência tem-se as peneiras 4,75mm (4,5%) e 19,00mm (3,1%). No que concerne ao Segmento II da camada de *binder* percebe-se a repetição destas quatro propriedades com os maiores CV, no entanto, verifica-se uma proximidade no caso da propriedade peneira 19,00mm, ou diminuição no caso das outras três nos valores de CV destas, em relação ao CV apresentados pelas mesmas no segmento I. Sugerindo-se a hipótese de uma possível melhora no controle de qualidade do Segmento II em relação ao Segmento I e/ou que o CV diminui à medida que n diminui, algo que também aconteceu na maioria das propriedades da camada de capa vide CV (Tabela 11).

Com relação à camada de capa observa-se pela Figura 10 a repetição das propriedades Esp e peneira 0,075mm com os maiores valores de CV. No Segmento I, Esp apresentou CV de 9,9% já a peneira 0,075mm teve um CV de aproximadamente 14,5% em ambos os segmentos. Logo, mostraram-se como as propriedades que mais apresentaram variabilidade nos seus dados em relação à média.

Figura 10 – Coeficiente de variação propriedades da camada de capa



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Como percebeu-se na camada anterior (*binder*), excetuando-se a peneira 0,075mm cujos CV para ambos os segmentos da camada de capa foram bem próximos, existe uma maior dispersão dos dados das propriedades no Segmento I, em relação ao Segmento II o que reforça

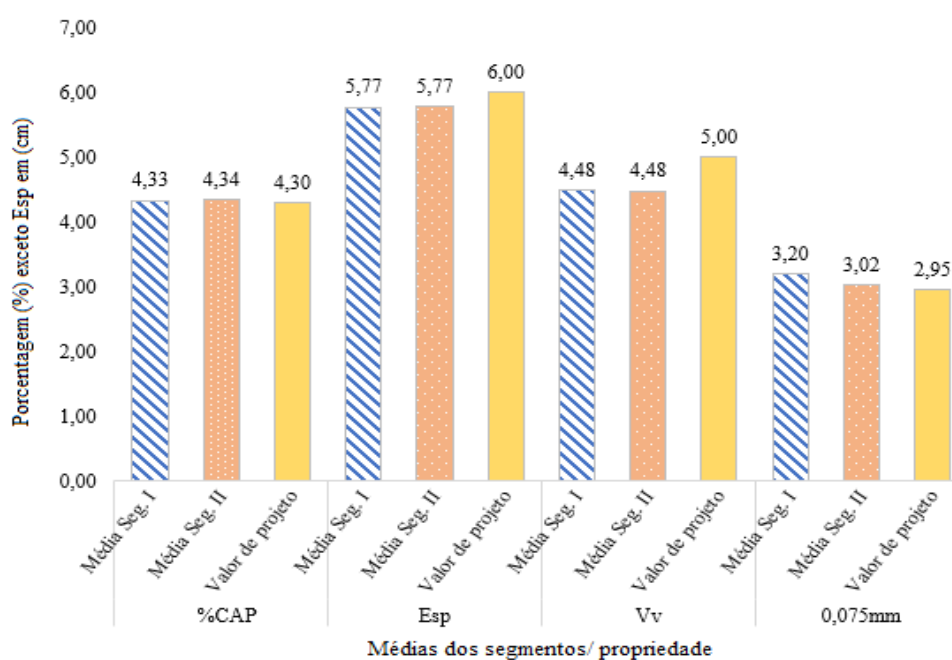
a hipótese de melhor controle de qualidade aplicado entre os diferentes segmentos de ambas as camadas. Naturalmente, como estas indicações provêm de um número distinto de dados amostrais, há um risco de decisão associado a estas considerações.

Traçando-se um paralelo entre as duas camadas de revestimento com base no CV, e excluindo-se desta análise as propriedades peneira 19,00mm e peneira 12,50mm, observa-se que as propriedades Esp e 4,75mm obtiveram uma queda no CV da camada de *binder* em relação à capa, ou seja, os coeficientes de variação destas propriedades na camada de capa são inferiores ao encontrados na de *binder*. Já para as propriedades peneira 0,075mm e Vv houve uma inversão nos CV, sendo que os menores resultados ocorreram na camada de *binder* e os maiores na capa. Por fim, para Gc e %CAP os valores de CV foram bem próximos entre as camadas. Isso reforça também a natureza estocástica das propriedades construtivas de obras de pavimentação.

4.4 Comparativo entre as médias dos segmentos com valor do projeto

A começar pela Figura 11, comparou-se a média das propriedades analisadas nos segmentos I e II da camada de *binder* com os valores médios definidos em projeto. Dividiu-se a apresentação das médias em dois gráficos por camada, a fim de adequar aquelas propriedades que estão próximas em escala numérica, em favor da melhor visualização destes resultados.

Figura 11 – Comparativo de %CAP, Esp, Vv e 0,075mm com valor de projeto (*binder*)

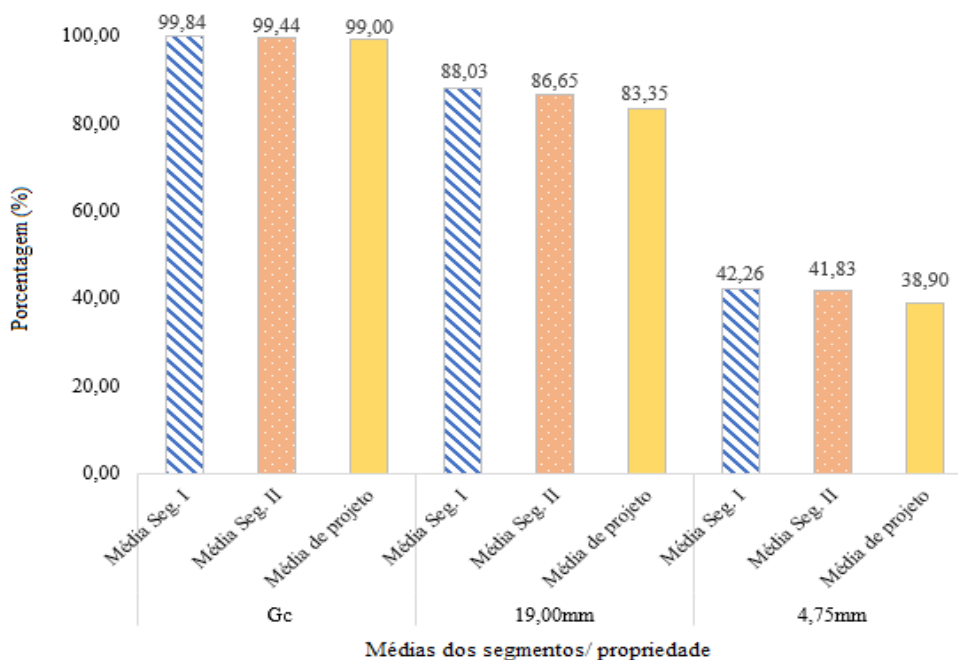


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 11 encontram-se denotadas as médias das propriedades %CAP, Esp, Vv e peneira 0,075mm da camada de *binder*. Verifica-se que apenas a propriedade %CAP tem os valores médios para os Segmentos I e II bem próximos do parâmetro de projeto, registrando um aumento percentual de menos de 1% em relação ao valor de referência. Ao analisar-se as propriedades Esp e Vv, observa-se o contrário do ocorrido na propriedade anterior, uma redução percentual em relação ao valor de projeto, para a propriedade Esp as diferenças percentuais ficaram em torno de 3,8%, já para Vv observa-se que esta redução foi de aproximadamente 10,5% em ambos os segmentos, a maior diferença dentre as quatro propriedades apresentadas. Por fim, para a peneira 0,075mm, as médias dos segmentos I e II ficaram acima da média de projeto em torno de 8 e 2%.

A Figura 12 traz os valores de média para as propriedades Gc e peneiras 19,00mm e 4,75mm. Percebe-se que analogamente ao ocorrido com a propriedade %CAP, apenas a propriedade Gc apresenta valores próximos ao valor de projeto em ambos os segmentos, estando estes com menos de 1% acima do valor de projeto. No tocante à peneira 19,00mm observa-se um aumento percentual de 5,6 e 3,9 % para os segmentos e por fim, na peneira 4,75mm verifica-se que as médias dos segmentos I e II encontram-se 8,6% e 7,5% respectivamente, acima do valor referência

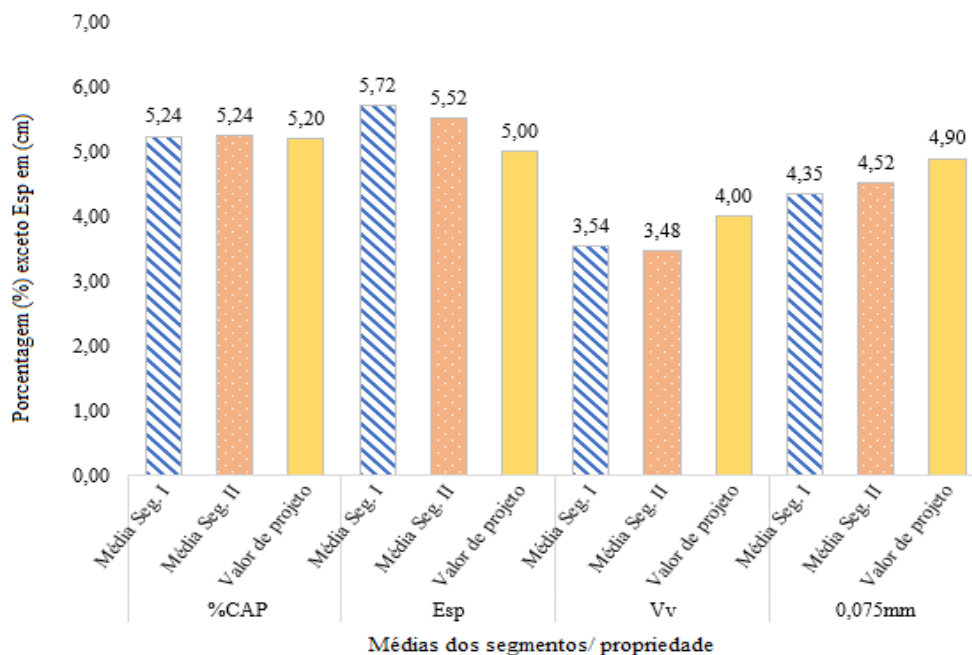
Figura 12 – Comparativo de Gc, 19,00mm e 4,75mm com valor de projeto (*binder*)



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em continuidade à análise dos resultados para os valores de média das propriedades, as figuras a seguir apresentam os resultados para a camada de capa. Ao se observar a Figura 13, verifica-se que %CAP, similarmente ao ocorrido na camada de *binder* manteve-se com percentuais menores que 1% acima do valor de projeto, indicando a proximidade deste valor referência. Para a Esp ao contrário do que se observou na camada de *binder* os valores médios sofreram um acréscimo percentual ao invés de um decréscimo em relação ao valor de projeto, tendo destaque o valor médio encontrado no segmento I de 5,72 cm o qual representa um percentual de 14,4%, sendo este o maior encontrado entre as medias de ambos os segmentos nas camadas de *binder* e capa. Com relação a Vv igualmente ao constatado na camada de *binder* os valores médios encontram-se também abaixo do parâmetro de projeto em aproximadamente 13 e 11%. Por fim na peneira 0,075mm registrou-se uma diminuição percentual de 11,3% para o segmento I e 7,7% para o II.

Figura 13 – Comparativo de %CAP, Esp, Vv e 0,075mm com valor de projeto (capa)

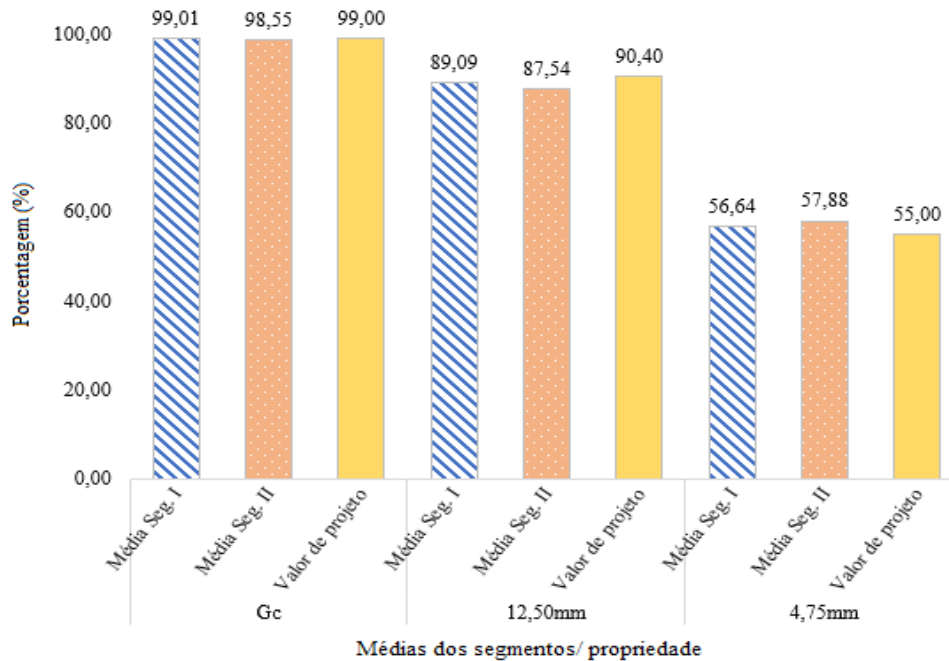


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em última análise, mediante a observação da Figura 14 tem-se os valores médios das propriedades Gc e peneiras 12,50mm e 4,75mm. Com respeito à primeira, observa-se que para o segmento I o valor médio encontra-se igual ao valor de referência, já para o II este valor ficou 0,45% abaixo no entanto, bem próximo. Já a peneira 12,50mm, as médias ficaram abaixo

do parâmetro de projeto em ambos os segmentos da camada de capa, estes percentuais foram de 1,0% para o segmento I e 2,7% para o segmento II. Por último, ao se observar a peneira 4,75mm igualmente ao ocorrido na camada de *binder* houve um acréscimo percentual, sendo estes de 3% no segmento I e 5,25% no segmento II.

Figura 14 – Comparativo de Gc, 12,50mm e 4,75mm com valor de projeto (capa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De modo geral, ao se comparar as médias dos segmentos avaliados com os valores de projeto, é possível afirmar que tomando-se como referência apenas os valores médios das propriedades, para a maioria das avaliações as diferenças observadas estariam dentro das variações limites de especificação, no entanto isto leva a uma interpretação equivocada e uma decisão de aceitação temerária quanto à qualidade executiva do serviço, pois como é sabido, a variabilidade das propriedades é um fator relevante para avaliação da qualidade. Tal variabilidade pode ser estimada através do desvio padrão s , que é um parâmetro estatístico de entrada para as medidas de qualidade aqui estudadas. Como será visto adiante, ao incluir a variabilidade construtiva nas análises, algumas das propriedades seriam rejeitadas, indicando uma qualidade executiva inferior ao mínimo desejado.

4.5 Resultados de avaliação das medidas de qualidade

4.5.1 Resultados de avaliação pela PRO/277

A Tabela 13 traz os resultados de avaliação relativos à medida de qualidade PRO/277. Nesta tabela constam os resultados para $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$, os valores de referência LIE e LSE, bem como a decisão entre aceitação ou rejeição das propriedades avaliadas nos segmentos I e II da camada de *binder*. A rejeição do segmento se configura quando, no mínimo uma das propriedades avaliadas no referido segmento for rejeitada. Já a rejeição da propriedade ocorre quando, os valores de $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ estiverem abaixo ou acima, respectivamente, dos limites estabelecidos LIE e LSE conforme o estabelecido no Quadro 5.

Tabela 13 – Resultados de avaliação segundo a medida de qualidade PRO/277 *binder*

Propriedade	unidade	Segmento	LIE	LSE	$\lambda_{mín}$	$\lambda_{máx}$	Decisão
%CAP	%	I	4,00	4,60	4,30	4,36	aceita-se
		II	4,00	4,60	4,27	4,41	aceita-se
Esp	cm	I	5,70	6,30	4,76	6,79	rejeita-se
		II	5,70	6,30	5,18	6,36	rejeita-se
Vv	%	I	4,00	6,00	4,38	4,59	aceita-se
		II	4,00	6,00	4,23	4,70	aceita-se
Gc	%	I	97,00	101,00	98,75	100,94	aceita-se
		II	97,00	101,00	98,18	100,71	aceita-se
19,00mm	%	I	76,70	90,00	84,06	90,16	rejeita-se
		II	76,70	90,00	82,43	90,38	rejeita-se
4,75mm	%	I	33,90	43,90	40,15	44,37	rejeita-se
		II	33,90	43,90	40,17	44,12	rejeita-se
0,075mm	%	I	1,00	4,90	2,70	3,69	aceita-se
		II	1,00	4,90	2,58	3,51	aceita-se

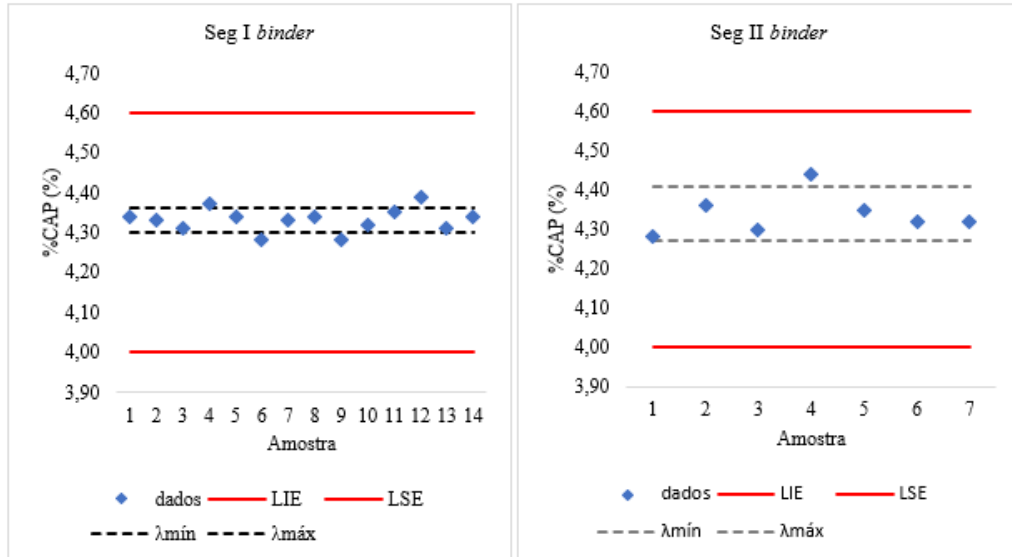
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que as propriedades Esp da camada e os percentuais passantes na peneira 19,00mm e 4,75mm foram as responsáveis pela rejeição de ambos os segmentos da camada de *binder*. As figuras a seguir demonstram graficamente como os dados amostrais e os valores de $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ estão dispostos em relação aos limites estabelecidos em projeto, definidos por LIE e LSE, auxiliando no entendimento da metodologia empregada na medida de qualidade PRO/277.

Na Figura 15 observa-se que os dados amostrais da propriedade %CAP encontram-se bem próximos de um valor médio, como já constatado na subseção 4.4. Isto contribui para que as variáveis aleatórias $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ se mantenham sob controle. Visto que, pela definição destas variáveis elas são significativamente afetadas pela quantidade de observações da amostra

n que majora ou minora o valor de k , mas sobretudo, pela média e desvio padrão amostrais. Ou seja, quanto maior o desvio s , maior será a variação de $\lambda_{\text{mín}}$ ou $\lambda_{\text{máx}}$, resultando na permanência ou não destas variáveis dentro dos limites LIE e LSE estabelecidos em projeto.

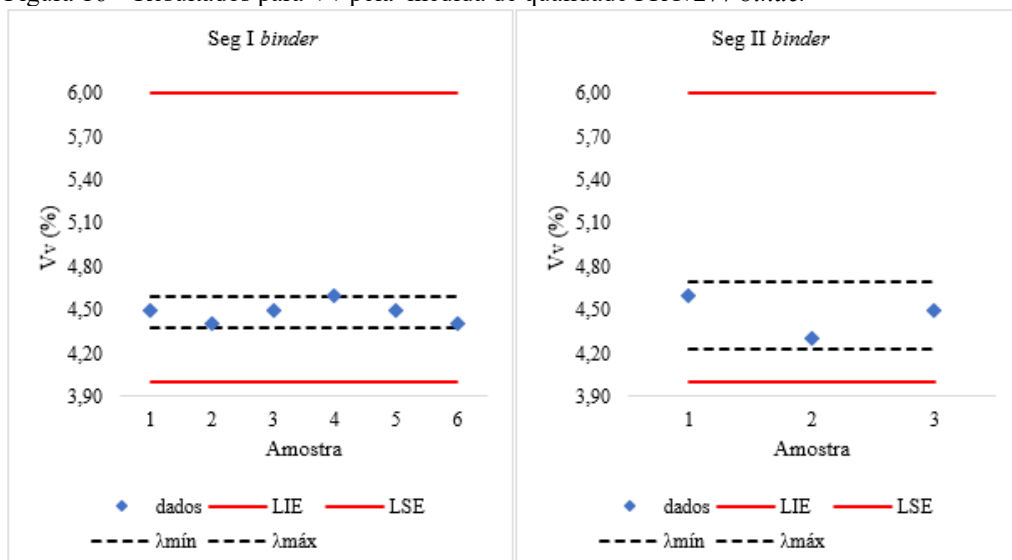
Figura 15 – Resultados para %CAP pela medida de qualidade PRO/277 binder



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

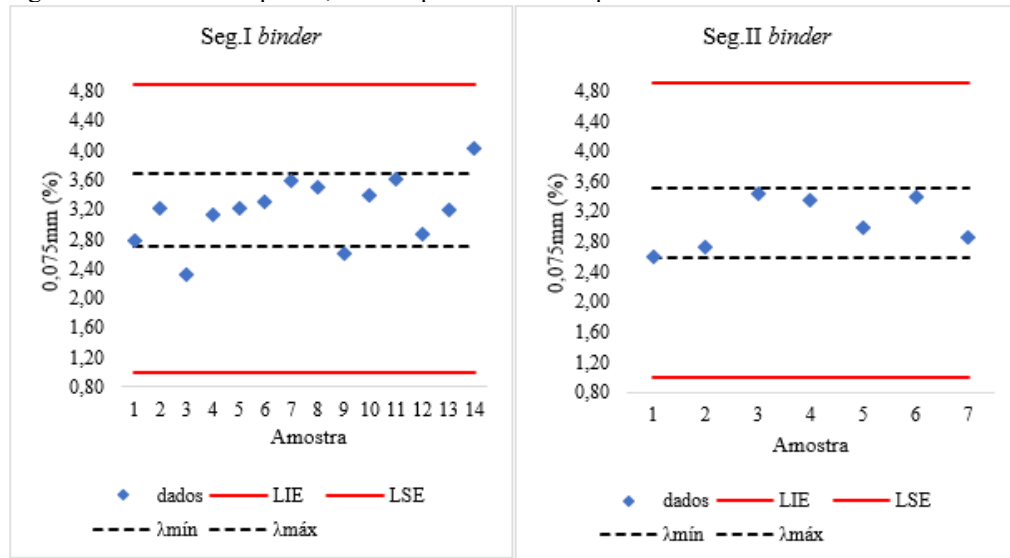
A mesma conclusão anterior se estende para V_v e peneira 0,075mm. Observa-se pelas Figura 16 e 17 que os dados destas propriedades em ambos os segmentos, encontram-se centrados próximos da média e não muito dispersos, o que pode ser confirmado pelos baixos valores de desvio denotados na Tabela 10.

Figura 16 – Resultados para V_v pela medida de qualidade PRO/277 binder



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

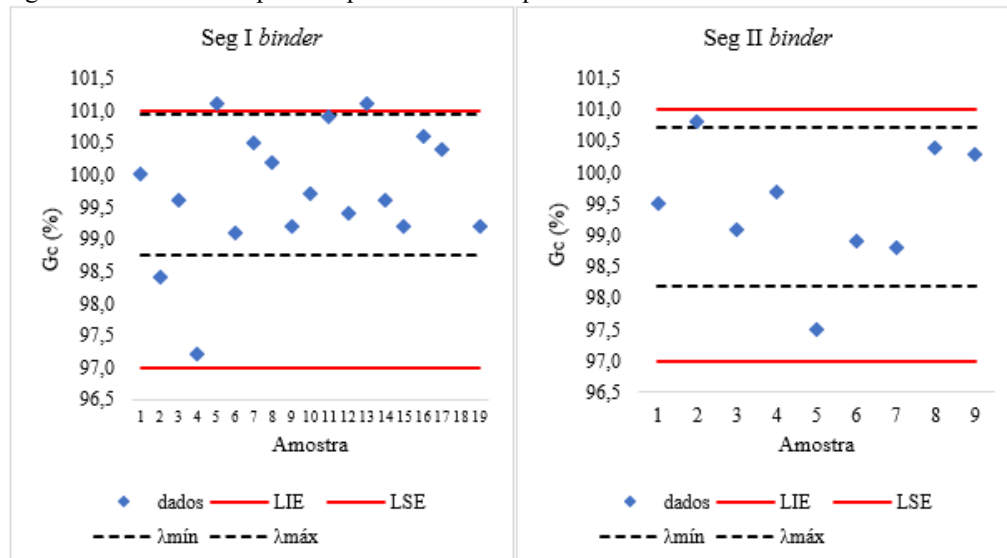
Figura 17 – Resultados para 0,075mm pela medida de qualidade PRO/277 binder



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A real consequência desta baixa dispersão é que $\lambda_{mín}$ e $\lambda_{máx}$ permanecem dentro dos limites estabelecidos, corroborando o atendimento as especificações de projeto. Percebe-se até aqui, que a influência da variabilidade quantificada pelo desvio padrão s , é significativa para a medida de qualidade PRO/277. Ao se observar a Figura 18, denota-se nesta uma maior dispersão dos dados amostrais da propriedade G_c e concomitantemente uma maior aproximação de $\lambda_{máx}$ do limite superior de especificação LSE em ambos os segmentos da camada de binder.

Figura 18 – Resultados para G_c pela medida de qualidade PRO/277 binder



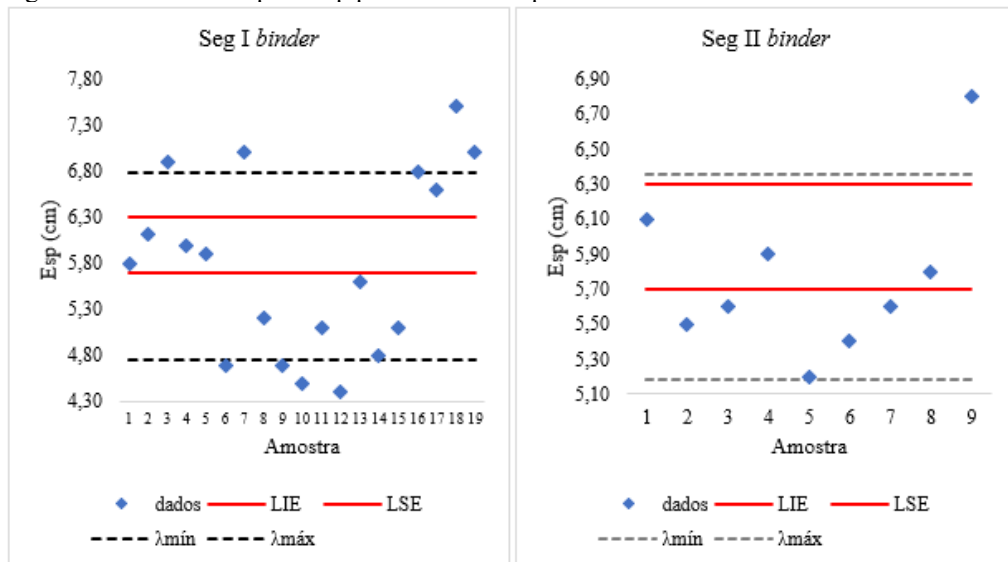
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Tabela 10 denota que quantitativamente o desvio s para G_c foram bem próximos entre si, sendo 1,05 para o segmento I e 1,01 para o segmento II, indicando compatibilidade no

controle de qualidade da propriedade Gc entre os dois segmentos. No entanto, ressalta-se novamente que este controle como percebido, centrou-se muito próximo de LSE, algo que majora o risco de ultrapassagem deste valor por $\lambda_{m\acute{a}x}$, abrindo-se uma maior oportunidade para rejei\c{c}\~ao desta propriedade.

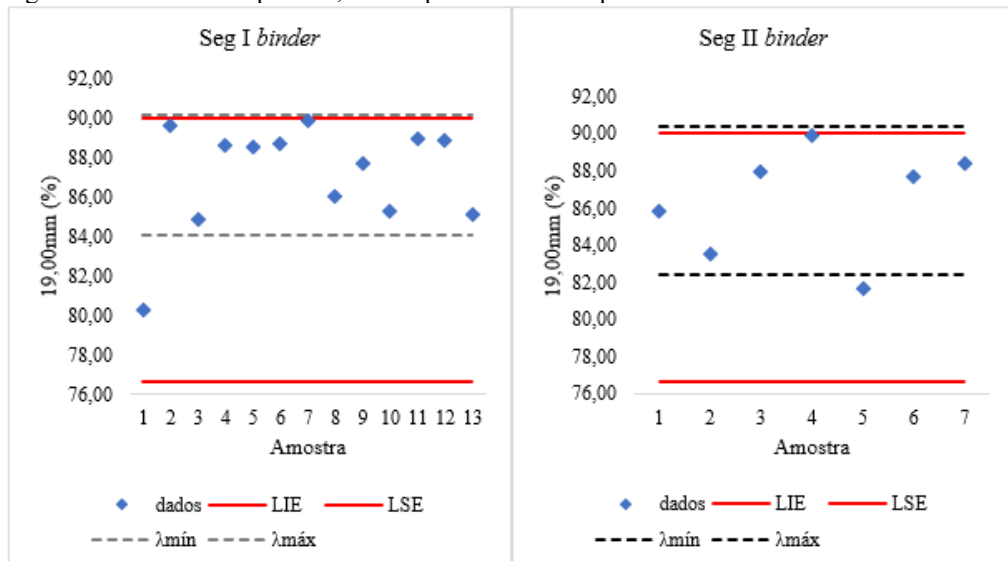
As Figura 19 e 20 ilustram bem como uma grande variabilidade dos dados afeta diretamente nos resultados de $\lambda_{m\acute{i}n}$ e $\lambda_{m\acute{a}x}$, fazendo com que estes extrapolem os limites de especifica\c{c}\~ao e conseq\~uente, se opte pela rejei\c{c}\~ao do segmento significando que a qualidade exigida pelo \c{o}rg\~ao gestor n\~ao foi atendida

Figura 19 – Resultados para Esp pela medida de qualidade PRO/277 binder



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 20 – Resultados para 19,00mm pela medida de qualidade PRO/277 binder



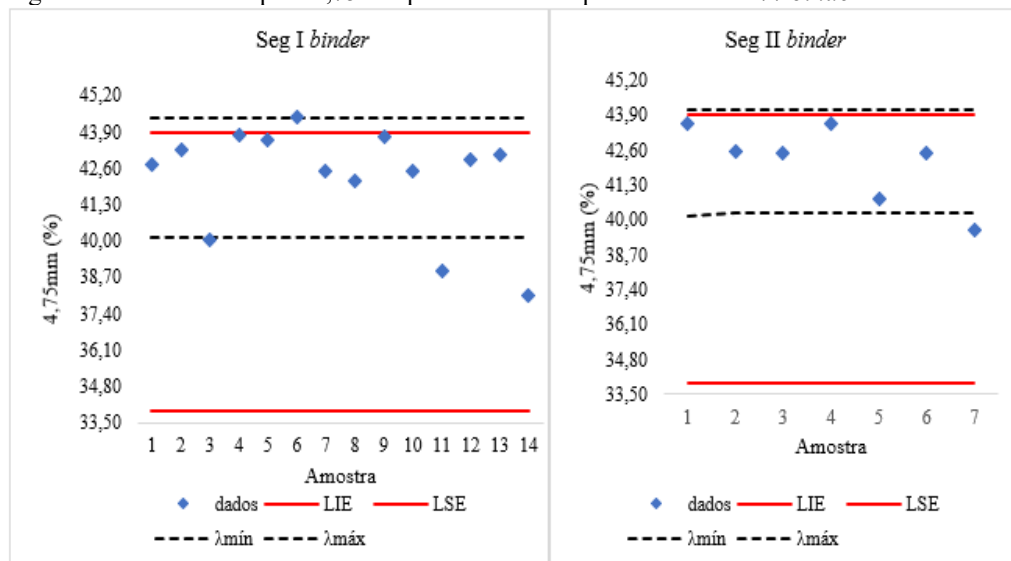
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Especificamente quanto à propriedade Esp, através da Figura 19, percebe-se uma grande dispersão nos dados desta propriedade nos segmentos I e II da camada de *binder*. Observa-se que nos dois segmentos a grande maioria dos dados encontram-se abaixo de 6 cm, que é o valor de projeto para esta camada, indicando-se uma camada de menor espessura que a especificação, algo já apresentado no gráfico da Figura 11.

Com relação à propriedade porcentagem passante na peneira 19,00mm, observa-se através da Figura 20 que há também uma grande dispersão dos dados amostrais, o que favorece a rejeição desta propriedade. Entretanto vale ressaltar, que está se deu apenas devido a variável $\lambda_{m\acute{a}x}$ que ficou acima de LSE, enquanto $\lambda_{m\acute{i}n}$ permanece dentro dos limites estabelecidos.

Por fim, verifica-se através da Figura 21 que a peneira 4,75mm também foi rejeitada devido ao mesmo motivo apresentado à peneira 19,00mm, mas com uma observação quanto à distribuição dos dados. Para a peneira 4,75mm houve a classificação para os dados como não-normais. No entanto, não foi possível estabelecer uma relação clara entre esta classificação e a decisão entre rejeição ou aceitação de uma propriedade.

Figura 21 – Resultados para 4,75mm pela medida de qualidade PRO/277 *binder*



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em continuidade na análise de resultados da medida de qualidade PRO/277, a Tabela 14 traz os resultados de avaliação das propriedades referentes à camada de capa. Verifica-se que de todas as propriedades aqui avaliadas, apenas a propriedade Esp, contribuiu preponderantemente para rejeição dos segmentos I e II da referida camada.

Como pode-se observar, os valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$ para a propriedade Esp são de 6,38 e 6,01 cm para os segmentos I e II, respectivamente. Estes encontram-se 1,38 e 1,01 centímetros

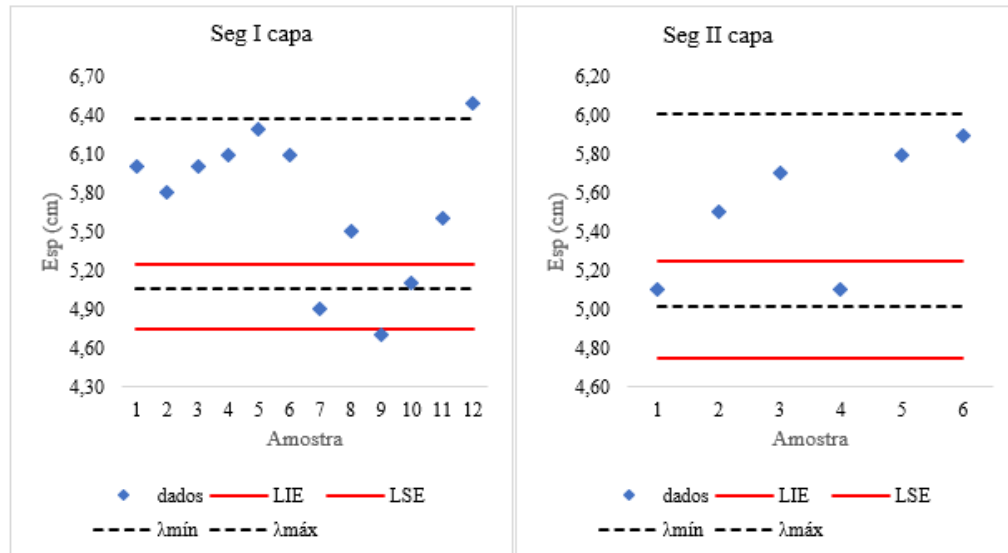
acima do valor de projeto para esta camada, que é de 5 cm. A Figura 22 ilustra de modo claro esta dispersão, onde se observa uma grande quantidade de dados acima de LSE, contribuindo para a rejeição dos dois segmentos da referida camada.

Tabela 14 – Resultados de avaliação segundo medida de qualidade PRO/277 capa

Propriedade	unidade	Segmento	LIE	LSE	$\lambda_{\text{mín}}$	$\lambda_{\text{máx}}$	Decisão
%CAP	%	I	4,90	5,50	5,15	5,33	aceita-se
		II	4,90	5,50	5,18	5,31	aceita-se
Esp	cm	I	4,75	5,25	5,06	6,38	rejeita-se
		II	4,75	5,25	5,02	6,01	rejeita-se
Vv	%	I	3,00	5,00	3,30	3,78	aceita-se
		II	3,00	5,00	3,33	3,62	aceita-se
Gc	%	I	97,00	101,0	97,71	100,31	aceita-se
		II	97,00	101,0	97,41	99,69	aceita-se
12,50mm	%	I	83,40	97,40	86,13	92,05	aceita-se
		II	83,40	97,40	83,65	91,44	aceita-se
4,75mm	%	I	50,00	60,00	54,32	58,97	aceita-se
		II	50,00	60,00	55,97	59,78	aceita-se
0,075mm	%	I	2,90	6,90	3,62	5,08	aceita-se
		II	2,90	6,90	3,60	5,44	aceita-se

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 22 – Resultados para Esp pela medida de qualidade PRO/277 capa

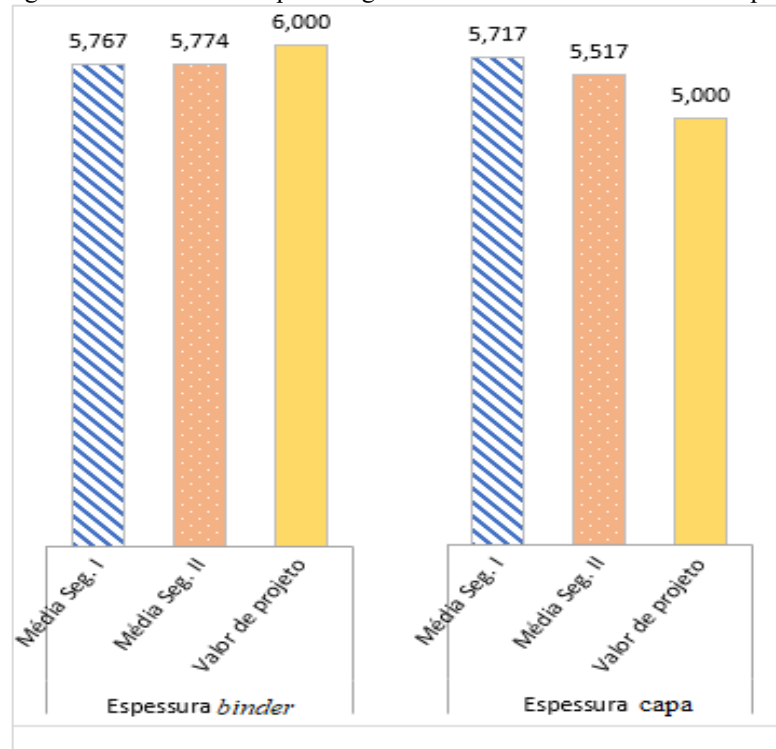


Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Com base na medida de qualidade PRO/277, ao se comparar as duas camadas de revestimento percebe-se um possível aumento no controle de qualidade na camada de capa em relação a camada de *binder*. Visto que nesta última foram três as propriedades que contribuíram para a rejeição dos dois segmentos, enquanto na camada de capa, apenas uma.

Ao se analisar especificamente a camada ESP, propriedade que foi rejeitada em ambos os segmentos e camadas, pode-se observar pela Figura 23, que enquanto na camada de *binder* as espessuras médias dos segmentos I e II encontram-se abaixo da espessura de projeto, na camada de capa as espessuras médias encontram-se acima do valor de projeto.

Figura 23 – Médias da Esp dos segmentos das camadas de *binder* e capa



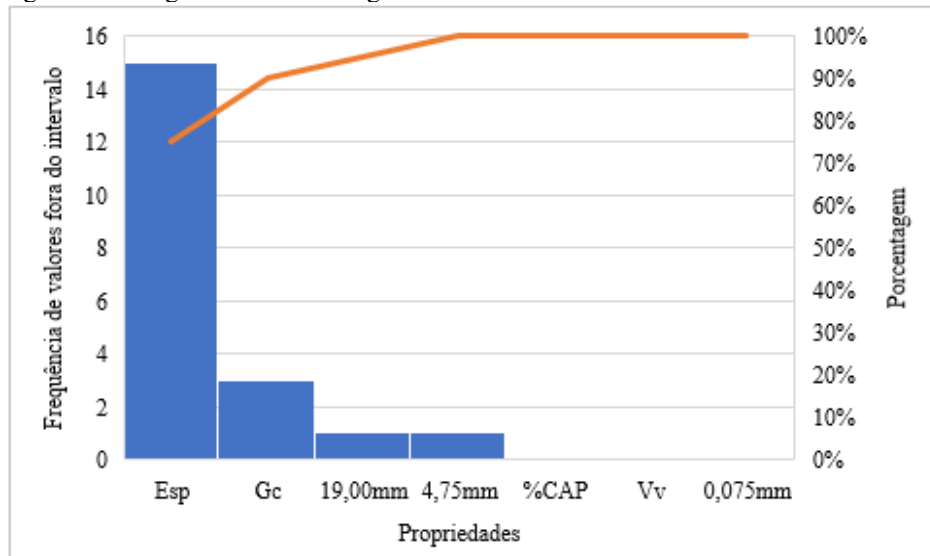
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Isto posto, pode-se hipotetizar a ocorrência de uma tentativa de acrescentar a falta de revestimento da camada de *binder* na camada de capa visando alcançar o valor de 11 cm, que é a espessura total especificada para o revestimento asfáltico da rodovia. Esta hipótese ganha força ao se analisar os valores de assimetria desta propriedade. Para a camada de *binder* estes valores são de 0,20 e 1,35 referentes aos segmentos I e II, respectivamente. Já para a camada de capa os valores de assimetria são de -0,60 e -0,42. Ao se analisar estes resultados os valores de assimetria mudam de positivo para negativo o que dá a entender que pode ter ocorrido uma intervenção deliberada em busca de alcançar um valor desejado, aumentando a variabilidade nesta propriedade e como efeito, ocasionou sua rejeição ao se avaliar pela medida de qualidade PRO/277.

Ainda com base na medida de qualidade PRO/277, buscou-se fazer uso do diagrama de Pareto para esboçar graficamente o percentual de dados amostrais de cada propriedade que se encontram fora dos limites LIE e LSE. Isto foi feito para os segmentos I e II das camadas de

binder e capa com intuito de demonstrar quais as propriedades que obtiveram as maiores quantidades de dados fora das especificações de projeto por segmento avaliado. Com base na Figura 24 referente ao segmento I da camada de *binder* tem-se: Esp (15), Gc (3), 19,00mm (1) e 4,75mm (1) totalizando 20 dados amostrais fora do intervalo estabelecido em projeto.

Figura 24 - Diagrama de Pareto segmento I *binder*



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

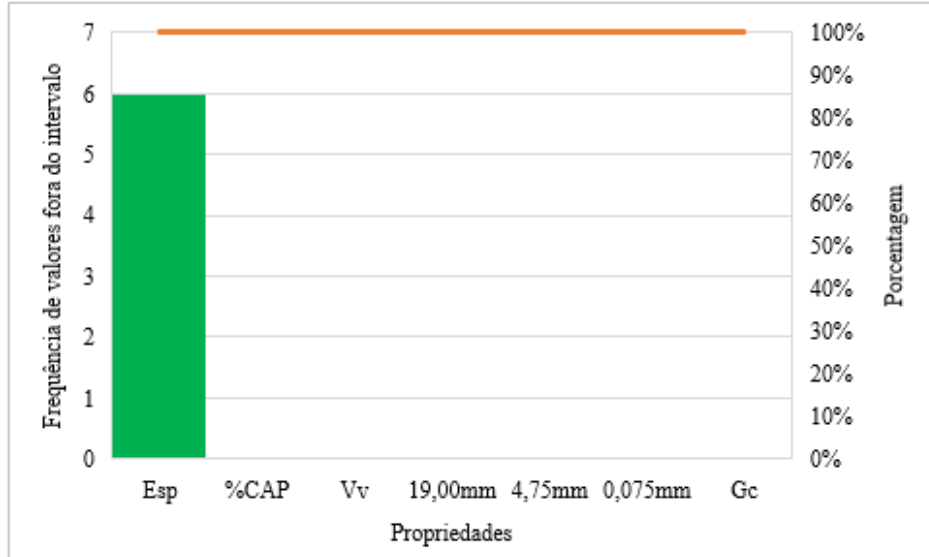
Diante disto, destacam-se as propriedades Esp com 75% dos dados, logo em seguida Gc com 15% e as peneiras 19,00mm e 4,75mm com 5% cada. Já as propriedades %CAP, Vv e 0,075mm não denotaram valores amostrais fora dos limites estabelecidos por LIE e LSE, indicando um alto controle de qualidade aplicado a estas propriedades. Ademais, ressalta-se que a grande quantidade de dados fora do intervalo observados na propriedade Esp foram preponderantes para a rejeição do segmento I da camada de *binder*, algo já constatado pela medida de qualidade PRO/277, indiciando-se um baixo controle de qualidade empregado na mesma.

No tocante a Gc que apesar de possuir mais dados amostrais fora do intervalo delimitado que as peneiras 19,00mm e 4,75mm, Gc não foi uma propriedade rejeitada em nenhum dos segmentos avaliados na camada de *binder* como foi constatado para as peneiras. Isto se deve pois, o desvio padrão s é um fator relevante na avaliação pela medida de qualidade PRO/277, haja visto na Tabela 10 que os valores de s para as propriedades 19,00mm e 4,74mm são maiores que Gc, algo que contribuiu significativamente para rejeição das peneiras.

Partindo para o segmento II da camada de *binder*, ao se avaliar a Figura 25 percebe-se que apenas a propriedade Esp possui valores amostrais fora do intervalo especificado em

projeto para esta propriedade, no total foram 6 valores encontrados o que representa 100% dos dados no segmento, com isto indica-se que apenas a propriedade Esp contribuiu para a rejeição do segmento II da camada de *binder*, o que realmente foi constatado vide Tabela 13.

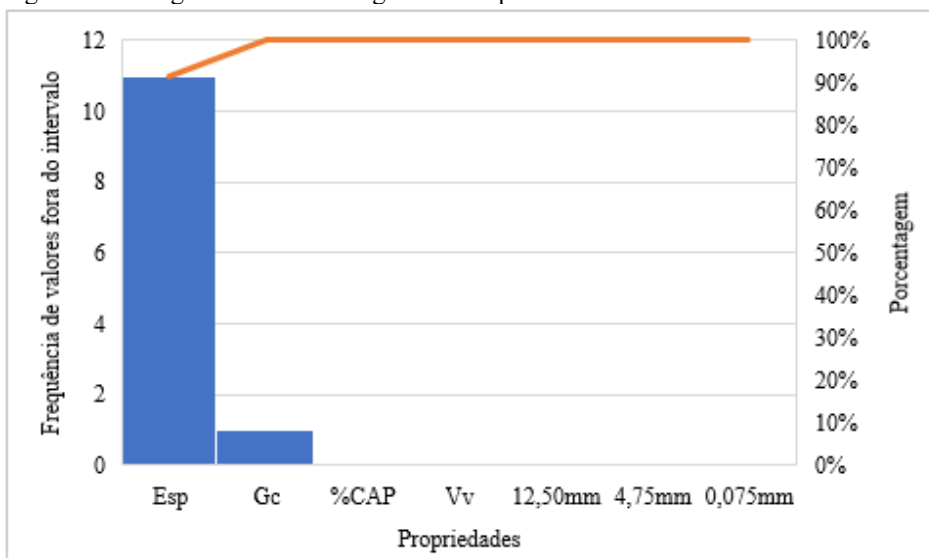
Figura 25– Diagrama de Pareto segmento II *binder*



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em continuidade, verifica-se pela Figura 26 referente ao segmento I da camada de capa que a propriedade Esp foi novamente destaque diante das demais na contribuição com dados amostrais fora do intervalo estabelecido. Com 11 valores os quais representam 95% do total de dados fora do intervalo para o segmento I da capa, fundamentais para rejeição do mesmo. Por fim com apenas 1 dado fora dos limites, ou seja 5% dos dados pertencem a propriedade Gc.

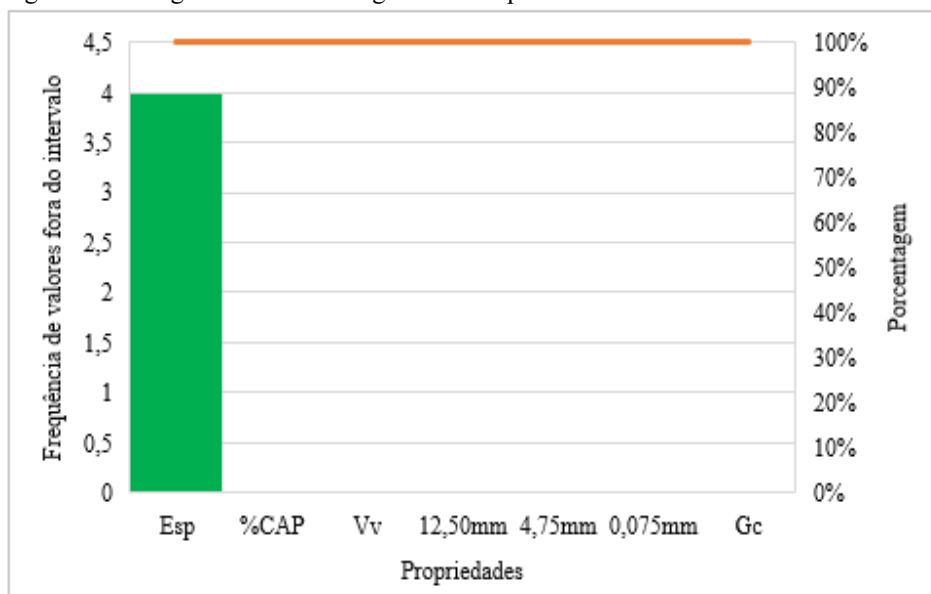
Figura 26 – Diagrama de Pareto segmento I capa



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em última análise, ao avaliar-se a Figura 27 (Segmento II da camada de capa) percebe-se que como o ocorrido no segmento II da camada de *binder*, a Esp foi a única propriedade que contribuiu com dados fora do intervalo estabelecido. Neste segmento a propriedade possui 4 valores fora do intervalo permitido. Ou seja, de todas as inconformidades do segmento, 100% delas dizem respeito a espessura (Esp) o que responsabiliza apenas esta propriedade pela rejeição do mesmo, como o já constatado pela medida de qualidade PRO/277.

Figura 27 – Diagrama de Pareto segmento II capa



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

4.5.2 Resultados de avaliação pela medida PDL

As propriedades avaliadas pela medida de qualidade PDL, serão consideradas aceitas diretamente quando, $PDL \geq 90\%$. Isto significa que 90% ou mais dos valores da amostra avaliada estão dentro dos limites de especificação estabelecidos, isto é, limite inferior especificação (LIE) e limite superior de especificação (LSE). A partir desta constatação a empresa executora terá direito ao pagamento integral e/ou bônus de até 5%, já para porcentagens abaixo de 90 até 60% elas serão consideradas aceitas parcialmente com impacto (penalização) no fator de pagamento da contratada. Por fim, no caso de no mínimo uma propriedade avaliada em um segmento, apresentar porcentagens abaixo de 60%, isto resultará na rejeição direta da propriedade e concomitantemente do segmento.

A Tabela 15 apresenta os resultados de decisão entre aceitação/aceitação parcial/rejeição dos segmentos I e da camada de *binder* com base nos valores de PDL obtidos.

Tabela 15 – Resultados de avaliação segundo PDL camada de *binder*

<i>binder</i>			
Propriedade	Segmento	PDL (%)	Decisão
%CAP	I	100,00	aceita-se
	II	100,00	aceita-se
Esp	I	23,45	rejeita-se
	II	42,55	rejeita-se
Vv	I	100,00	aceita-se
	II	100,00	aceita-se
Gc	I	86,36	aceita-se parcial.
	II	94,79	aceita-se
19,00mm	I	67,28	aceita-se parcial.
	II	88,83	aceita-se parcial.
4,75mm	I	80,31	aceita-se parcial.
	II	90,53	aceita-se
0,075mm	I	100,00	aceita-se
	II	100,00	aceita-se

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

No tocante a decisão de aceitação direta verifica-se que as propriedades %CAP, Vv e 0,075mm em ambos os segmentos desta camada foram aceitas, igualmente ao constatado pela medida de qualidade PRO/277. Já para Gc e 4,75mm apenas no segmento II, haja visto que o segmento I destas foram aceitas parcialmente, algo que também se configurou para a propriedade 19,00mm em ambos os segmentos. Por fim, quanto a rejeição direta tem-se apenas a propriedade Esp, com valores de 23,45% e 42,55% os quais encontram-se bem abaixo de 60%.

Diante destes resultados, percebe-se que se PDL considerasse apenas a opção binária (aceitação/rejeição) como a medida de qualidade PRO/277, haveria semelhanças significativas entre as indicações destas duas medidas com relação ao segmento I da camada de *binder*. Visto que, no mesmo as duas medidas indicaram igualmente aceitas diretamente as propriedades %CAP, Vv e 0,075mm e rejeitadas diretamente Esp e as peneiras 19,00mm e 4,75mm, caso este limite para rejeição fosse $PDL < 90$. Levando-se adiante esta perspectiva as duas divergiriam apenas na propriedade Gc, que em PDL recebeu um valor de 86,36% bem próximo de 90%, no entanto não suficiente para ser aceita como pela medida de qualidade PRO/277, entretanto como pode-se observar pela Figura 18, que ($\lambda_{m\acute{a}x}$) para Gc, encontra-se no limiar entre a aceitação e rejeição naquela medida, haja vista a proximidade deste de LSE, destacando-se que por pouco Gc também poderia ter sido rejeitada pela medida de qualidade

PRO/277. Corroborando a semelhança dentre as duas medidas de qualidade.

Em continuidade, os resultados para a camada de capa baseados na medida PDL são apresentados pela Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados de avaliação segundo PDL camada de capa

capa			
Propriedade	Segmento	PDL (%)	Decisão
%CAP	I	100,00	aceita-se
	II	100,00	aceita-se
Esp	I	24,49	rejeita-se
	II	23,37	rejeita-se
Vv	I	100,00	aceita-se
	II	100,00	aceita-se
Gc	I	94,41	aceita-se
	II	99,74	aceita-se
12,50mm	I	99,49	aceita-se
	II	95,19	aceita-se
4,75mm	I	96,21	aceita-se
	II	97,48	aceita-se
0075mm	I	99,63	aceita-se
	II	100,00	aceita-se

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Observa-se que de todas as propriedades avaliadas nesta camada, exceto a propriedade Esp, foram aceitas diretamente resultando à empresa executora o pagamento integral e/ou bônus à mesma. Haja visto, que os valores de PDL encontram-se acima de 90%.

Especificamente com relação a Esp, destacam-se os valores de PDL de 24,49% para o segmento I e 23,37% para o II, estes bem abaixo da porcentagem limite para rejeição direta 60%, comumente adotada em especificações baseadas na medida PDL nos Estados Unidos. Tais valores indiciam para um baixo controle de qualidade executivo empregado nesta propriedade com respeito a camada de capa, analogamente ao constatado na camada de *binder*. A partir destes resultados, tem-se como conclusão de que os segmentos I e II da camada de capa devem ser rejeitados por conta da propriedade (Esp).

Em virtude dos resultados observados, através da medida de qualidade PRO/277 e PDL com relação aos segmentos I e II da camada de capa, constata-se a semelhança indicativa entre estas duas medidas. Pois a primeira apontou similarmente à segunda, apenas a propriedade Esp como responsável pela rejeição dos dois segmentos da camada de capa, corroborado pelo fato de que enquanto, PDL numericamente apontou baixos valores de porcentagens dentro dos limites estabelecidos, por outro lado verifica-se pela Figura 22, a quantidade de dados que estão

acima do limite superior e o quanto que $\lambda_{m\acute{a}x}$ baseado na medida de qualidade PRO/277 ultrapassou o limite LSE.

Em última análise, como anteriormente enunciado pela medida de qualidade PRO/277, por PDL também verifica-se uma diminuição no número de propriedades que contribuem para a rejeição de um segmento avaliado, ocorrendo-se esta diminuição da camada mais interna (*binder*) para a mais externa (capa). Enfatizando-se com isto, um possível aumento no controle de qualidade da camada de capa em relação a camada de *binder*, algo também constatado por CV.

4.5.3 Resultados de avaliação pela medida DAM

Como já mencionado anteriormente, há uma limitação quanto às especificações de intervalos para a aceitação ou rejeição de todas as propriedades avaliadas no presente estudo, através da medida de qualidade DAM. Diante destas circunstâncias, resolveu-se avaliar apenas as propriedades %CAP e Vv, com base nas especificações do departamento de transportes do Alabama (ALDOT).

Tabela 17 – Resultados segundo a medida DAM camadas de *binder* e capa

Propriedade	Segmento	DAM <i>binder</i>	DAM capa
%CAP	I	0,04	0,08
	II	0,04	0,05
Esp	I	0,85	0,78
	II	0,43	0,52
Vv	I	0,52	0,46
	II	0,53	0,53
Gc	I	1,09	0,84
	II	0,84	0,65
19,00mm	I	4,23	-
	II	3,55	-
12,50mm	I	-	2,19
	II	-	2,96
4,75mm	I	3,48	2,27
	II	3,25	2,88
0,075mm	I	0,42	0,56
	II	0,29	0,53

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Diante desta circunstância, os resultados apresentados na Tabela 17 são oriundos do cálculo do Desvio Absoluto Médio (DAM), conforme apresentado na primeira etapa

metodológica (subseção 3.2.3.3, p. 37). Isto é, para todas as propriedades avaliadas nesta pesquisa e considerando todas as amostras disponíveis no banco de dados. Estes resultados exclusivamente para as propriedades Esp, Gc, 19,00mm, 12,50mm, 4,75mm e 0,075mm serviram para se determinar o FP da empresa executora (FP_{DAM}). Já para as propriedades %CAP e Vv, além do cálculo do FP_{DAM} estes serviram como parâmetro comparativo para os valores de DAM calculados para %CAP e Vv, conforme a segunda etapa metodológica (subseção 3.2.3.3, p. 37-38), estes resultados seguem descritos na Tabela 18.

Em primeira análise apesar de não se realizar avaliações quanto a aceitação/rejeição de todas as propriedades aqui estudadas com base em DAM, pode-se inferir algumas hipóteses a respeito da qualidade indicada por esta medida, sedimentando-se na Equação 12 proposta pela AASHTO (1996), pois a partir desta determina-se o valor pago à empresa executora com base na qualidade empregada, durante a execução dos serviços de pavimentação. Ou seja, a indicação dada por DAM impacta diretamente no cálculo de FP_{DAM} .

A partir desta premissa, observa-se matematicamente através da Equação proposta que os menores valores DAM, próximos do zero, originaram altas bonificações à contratada, basta-se observar que os maiores fatores de pagamento (Tabela 20) estão correlacionados aos mesmos. Neste sentido, infere-se indiretamente que as propriedades Esp, Gc e 0,075mm que estão associadas aos menores valores de DAM, abaixo de 1,09 denotado para Gc, caso houvesse especificações vigentes, seriam consideradas aceitas. Em contraste, os maiores valores DAM, resultaram em baixos valores de FP_{DAM} acarretando penalização ao pagamento da contratada, tão logo a partir desta constatação, infere-se indiretamente que o controle de qualidade executivo empregado nas propriedades 19,00mm, 12,50mm e 4,75mm não foi atendido. Haja vista a magnitude dos valores DAM registrados para as mesmas, onde o mínimo valor DAM foi de (2,19) para a propriedade 12,50mm e o máximo de (4,23) para 19,00mm, valores que resultam em fatores de pagamento que penalizam a contratada com exemplo, tem-se que um DAM de 2,19 resultou a mesma um FP_{DAM} de 70% referente a propriedade 12,50mm vide Tabela 20.

A Tabela 18 traz os resultados de DAM para as amostras de %CAP e Vv que possuem $n > 4$ (segunda etapa metodológica). Através da Tabela 9, observa-se que estas se deram para %CAP em ambos os segmentos e camadas, já para Vv isto se configurou apenas do segmento I duas camadas de revestimento. De modo que para o segmento II das camadas de *binder* e capa Vv possui $n = 3$ e 4, respectivamente. Isto implicou na exclusão destas amostras perante à segunda etapa metodológica, pois já foram abordadas na primeira.

Tabela 18 – Resultados das iterações para as propriedades %CAP e Vv com $n > 4$

Iteração	%CAP				Vv	
	DAM seg. I <i>binder</i>	DAM seg. II <i>binder</i>	DAM seg. I capa	DAM seg. II capa	DAM seg. I <i>binder</i>	DAM seg. I capa
1	0,05	0,05	0,06	0,06	0,55	0,50
2	0,04	0,04	0,08	0,05	0,53	0,50
3	0,05	0,06	0,04	0,04	0,50	0,48
4	0,02	0,02	0,08	0,05	0,53	0,50
5	0,04	0,06	0,10	0,05	0,48	0,40
6	0,03	0,02	0,09	0,05	0,50	0,40
7	0,02	0,06	0,08	0,06	0,55	0,40
8	0,05	0,07	0,07	0,06	0,53	0,45
9	0,02	0,06	0,09	0,06	0,50	0,40
10	0,03	0,07	0,03	0,06	0,48	0,50
DAM médio	0,04	0,05	0,07	0,05	0,52	0,45

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Comparando-se os resultados referentes às 10 iterações feitas para %CAP e Vv que possuíam mais de quatro amostras $n > 4$ (Tabela 18) com os valores de DAM da Tabela 17, verifica-se a grande proximidade entre os valores DAM oriundos das diferentes etapas metodológicas. Diante desta constatação observa-se que para avaliação de %CAP e Vv com base na especificação do ALDOT, a qual especifica intervalos DAM com base em $n \leq 4$, não faz diferença avaliá-las com base nos valores calculados pela primeira, ou segunda etapas metodológicas, pois as diferenças entre os valores DAM oriundos das duas são irrisórias e ambos os valores encontram-se dentro do intervalo especificado vide Tabela 2. Em resumo a Tabela 19 traz os resultados de decisão para estas duas propriedades com base na especificação do ALDOT.

Tabela 19 – Resultados de avaliação segundo a medida DAM para %CAP e Vv

Propriedade	Segmento	<i>binder</i>		<i>capa</i>	
		DAM	Decisão	DAM	Decisão
%CAP	I	0,04	aceita-se	0,08	aceita-se
	II	0,04	aceita-se	0,05	aceita-se
Vv	I	0,52	aceita-se	0,46	aceita-se
	II	0,53	aceita-se	0,53	aceita-se

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em primeira análise, verifica-se que para a propriedade %CAP em ambos os segmentos e camadas os valores DAM vão de no mínimo 0,04 a no máximo 0,08. Pela Tabela

2 estes valores encontram-se no intervalo $[0,00;0,14]$ para $n = 4$, diante disto a propriedade foi considerada aceita e caso dependesse apenas desta, os dois segmentos em ambas as camadas seriam também aceitos, ressalta-se que além disto a empresa executora receberia o bônus máximo previsto nesta especificação, equivalente a 2%.

Já com relação a propriedade V_v esta foi avaliada quanto aos seus segmentos da seguinte forma: Segmento I da camada de *binder* e segmentos I e II da camada de capa com base em $n = 4$ e por último para o segmento II da camada de *binder* baseou-se em $n = 3$. Isto posto verifica-se através da Tabela 2 que V_v para o primeiro segmento da camada de *binder* quantificou-se um DAM de 0,52 isto faz com que se opte pela aceitação da mesma, haja visto que este valor encontra-se no intervalo $[0,46;0,75]$, denota-se também que atrelado a este intervalo o fator de pagamento é igual a 1, ou seja a contratada receberá integralmente o seu pagamento, mas sem bônus.

Nos segmentos I e II da camada de capa os valores DAM para V_v foram de 0,46 e 0,53 respectivamente, os mesmos também encontram-se no intervalo $[0,46;0,75]$ resultando na aceitação da propriedade e pagamento integral à empresa executora. Em última análise para o segmento II da camada de *binder*, o qual baseou-se em $n = 3$, conclui-se que para um DAM de 0,53 a propriedade pode ser considerada aceita, pois este encontra-se no intervalo $[0,00;0,87]$ o qual também fornece a contratada, pagamento integral.

4.6 Resultados dos fatores de pagamento

As especificações atualmente vigentes nos Estados Unidos, baseadas em PDL determinam que porcentagens dentro dos limites estabelecidos, iguais a 90% resultam em pagamento integral a empresa executora, para valores acima de 90% além de receber integralmente está tem direito a um bônus de até 5%, para valores abaixo de 90 até 60% mínimo aceitável, geram penalizações no FP da contratada, sendo máxima quando o serviço é rejeitado. Quanto as especificações baseadas em DAM, os fatores de pagamento ou são calculados através da Equação 12, como recomenda a AASHTO (1996), ou estes fatores já se encontram tabelados como na especificação ALDOT (2022), vide Tabela 2.

A Tabela 20 apresenta os resultados dos fatores de pagamento, em porcentagem, baseados nas medidas de qualidade PDL e DAM, calculados através das Equações 11 e 12 e também especificamente para as propriedades %CAP e V_v , os respectivos fatores de pagamento oriundos da especificação do Departamento de Transportes do Alabama (EUA).

Tabela 20 – Resultados de FP baseados em PDL, DAM e na especificação ALDOT

Propriedade	Segmento	<i>binder</i>			<i>capa</i>		
		FP _{PDL} (%)	FP _{DAM} (%)	ALDOT (%)	FP _{PDL} (%)	FP _{DAM} (%)	ALDOT (%)
%CAP	I	105	124	102	105	123	102
	II	105	124	102	105	123	102
Esp	I	68	104	-	67	105	-
	II	76	114	-	67	112	-
Vv	I	105	112	100	105	113	100
	II	105	112	100	105	112	100
Gc	I	98	98	-	102	104	-
	II	102	104	-	105	109	-
19,00mm	I	88	20	-	-	-	-
	II	99	32	-	-	-	-
12,50mm	I	-	-	-	105	70	-
	II	-	-	-	103	52	-
4,75mm	I	95	39	-	103	68	-
	II	100	52	-	104	53	-
0,075mm	I	105	114	-	105	111	-
	II	105	118	-	105	112	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Sabe-se que não se realizou a avaliação quanto à aceitação ou rejeição das propriedades Esp, Gc, 19,00mm, 12,50mm, 4,75mm e 0,075mm mediante a medida DAM devido à falta de especificações quanto a estas. No entanto foi calculado os valores DAM para posterior cálculo dos fatores de pagamento baseados nesta medida, os quais seguem descritos na Tabela 20 para averiguação do pagamento da empresa executora. Cabe ressaltar que se observa-se as maiores porcentagens relacionadas a FP_{DAM}, no entanto salienta-se que pela definição da Equação 12 é estabelecido um limite máximo especificado para pagamento que é de 105%. Isto implica em dizer que por mais que se tenham valores de FP_{DAM} da ordem de 124% isto não resulta no FP da contratada pois o mesmo encontra-se limitado à no máximo 105%.

Em continuidade verifica-se que as propriedades %CAP, Vv e 0,075mm foram as que obtiveram os maiores FP. As três propriedades sob o ponto de vista de FP_{PDL} e FP_{DAM} resultariam à empresa executora o bônus máximo de 5% incidindo no pagamento integral acordado em contrato. Isto se deu por conta dos altos valores de PDL encontrados para estas propriedades quando, avaliadas por PDL e pelos baixos valores de DAM quando, avaliadas pela medida DAM. Haja vista, que as formulações matemáticas preveem bonificar a empresa executora que atingir o maior percentual dentro dos limites, em relação a primeira medida, já em relação a segunda, o contrário acontece bonificá-la quando esta atingir baixos valores DAM,

pois quanto mais próximo de zero for o DAM, mais próximos os valores amostrais estão do valor alvo T , inferindo em alta qualidade empregada durante o processo executivo.

Já no cenário avaliativo com base na especificação do ALDOT que apenas as propriedades %CAP e V_v estão inseridas, a contratada também receberia o bônus máximo, porém de 2%. Este menor que quando calculados pelas Equações 11 e 12, no entanto, em hipótese supõe-se que estas diferenças entre as bonificações se dão meramente por questões orçamentárias, subjetivas e/ou específicas de cada órgão gestor e ficam definidas durante a elaboração das especificações baseadas em medidas de controle qualidade. Pois como já mencionado anteriormente por mais que a Equação 12, calcule FP da ordem de 124% a bonificação se limita a 105%, possivelmente por considerar um valor justo com base nos valores praticados naquele país. Dentro desta mesma perspectiva, supõe-se que o departamento de transportes do Alabama, considera que um bônus de 2% incidindo no valor acordado em contrato, já sirva de incentivo/estímulo para as empresas executoras melhorarem as práticas construtivas, visando maiores ganhos e entregando maior qualidade.

Partindo-se para a análise do FP referente à propriedade Esp, verifica-se que quando avaliada com base em PDL a empresa executora receberia o equivalente a apenas 70% em média do valor estipulado em contrato. No entanto há uma total inversão no pagamento da contratada quando se avalia sob a perspectiva da medida DAM, mesmo não havendo especificações referentes a esta propriedade, verifica-se que os baixos valores de DAM vide Tabela 17, proporcionariam a esta o bônus máximo de 5% em seu pagamento, ao invés de ser penalizada em 30% como constatado por PDL.

Corroborando a discordância apresentada, entre os fatores de pagamento baseados nas medidas PDL e DAM, verifica-se para as propriedades 19,00mm, 12,50mm e 4,75mm que sob análise de PDL estas três propriedades ou receberiam em média, ou pagamento integral ou bônus de até 2% e quando analisadas perante o DAM, seriam penalizadas como observa-se através das diferenças dos FP destas duas medidas. Por fim, constata-se quanto aos fatores de pagamento relativos a G_c pelas duas medidas, estes foram em média equivalentes, resultando em pagamento integral ou bônus a empresa executora.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho avaliou-se a qualidade executiva das camadas de *binder* e capa de um revestimento feito em concreto asfáltico a partir de fichas de controle de qualidade de uma obra real no estado do Ceará. Fez-se o uso de medidas de controle estatístico de qualidade utilizadas nos Estados Unidos, tais como PDL e DAM, além da metodologia vigente no Brasil, referenciada neste trabalho como medida de qualidade PRO/277. Além disso, buscou-se quantificar o impacto financeiro do nível de qualidade obtido pela empresa sobre o pagamento a ser recebido a partir de métricas adotadas em outros países.

Seguem elencadas a seguir as principais conclusões extraídas a partir dos resultados obtidos sob a análise da qualidade executiva empregada nas camadas de *binder* e capa do revestimento avaliado na presente pesquisa:

- a) Houve grande variabilidade nas duas camadas do revestimento avaliado, sobretudo com relação as propriedades Esp da camada e peneiras 19,00mm e 4,75mm sendo preponderantes para a rejeição tanto da camada de *binder* quanto de capa.
- b) Quando avaliou-se todo o revestimento somando-se *binder* e capa, observou-se uma espessura maior que a exigida em projeto de 11cm, em hipótese isto gerou gastos desnecessários para o empreendimento, devido ao maior consumo de material.
- c) Destaca-se o aumento do controle de qualidade na camada de capa em relação a camada de *binder*, indicado pela medida de qualidade PRO/277 e PDL, corroborado mediante a diminuição no número de propriedades contribuintes para a rejeição.
- d) Em referência às indicações das medidas de qualidade, ressalta-se a grande semelhança entre os apontamentos das medidas PDL e PRO/277. Observou-se que em sua maioria, as mesmas propriedades consideradas aceitas e/ou rejeitadas primeiramente pela medida de qualidade PRO/277 foram igualmente aceitas e/ou rejeitadas em segunda análise por PDL.
- e) Percebeu-se também que as abordagens adotadas pelas duas medidas PDL e PRO/277 as quais se baseiam na média e no desvio padrão são importantes. Pois é significativo o nível variabilidade para a aceitação ou rejeição das camadas de revestimento, com isso variabilidade está bem abordada nas duas medidas.

- f) Com relação à medida DAM, quando consideradas apenas as propriedades %CAP e Vv verificou-se que esta medida apontou igualmente as medidas PDL e PRO/277 para a aceitação destas duas propriedades.
- g) No tocante aos fatores de pagamento, evidenciou-se grandes diferenças nos resultados encontrados para as propriedades, a depender da medida considerada para avaliação seja PDL ou DAM.
- h) A propriedade Esp, foi rejeitada pelas medidas PRO/277 e PDL e diante desta última a empresa executora estaria sujeita a uma penalização de em média 30% no seu pagamento. No entanto quando avaliada por DAM receberia a bonificação máxima de 5% caso houvesse uma especificação atualmente válida para esta propriedade. Isto em hipótese sugere uma divergência entre esta medida e as medidas PRO/277 e PDL.
- i) Pode-se concluir que os fatores de pagamento baseados em equações para DAM e PDL devem ser mais bem estudados a fim de melhor defini-los, pois a depender da medida adotada para aceitação/rejeição do serviço a contratada pode estar sendo muito bem recompensada, mesmo não fornecendo a qualidade exigida em projeto, ou sendo penalizada entregando mais que a qualidade exigida.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar do esforço empenhado neste trabalho, ainda vislumbra-se uma vastidão de oportunidades a serem exploradas nesta temática, seja pela inclusão de outras medidas de qualidade empregadas no controle de qualidade de obras rodoviárias ou utilizando mais propriedades do revestimento asfáltico. Isto posto e na perspectiva de superação de algumas limitações oriundas desta pesquisa, descreve-se a seguir algumas recomendações/sugestões para trabalhos futuros:

- a) Avaliação da qualidade dos revestimentos asfálticos através de outras medidas de controle estatístico de qualidade;
- b) Análise dos riscos do contratante e da contratada associados a aceitação/rejeição mediante as indicações das medidas PRO/277, PDL e DAM;
- c) Proposição de especificações baseadas em DAM para as propriedades de um revestimento asfáltico, tais como espessura, grau de compactação e porcentagens passantes nas peneiras 19,00mm, 12,50mm, 4,75mm e 0,075mm;

- d) Avaliação e análise do impacto gerado pela não-normalidade dos dados amostrais empregados em medidas PRO/277, PDL e DAM;
- e) Proposição de fatores de pagamento vinculados à medida de qualidade PRO/277, embasada na norma DNER-PRO 277/97;
- f) Composição de fatores de pagamento que englobem/abordem duas ou mais propriedades da camada de revestimento.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. Quality Assurance Guide Specification, AASHTO Quality Construction Task Force, American Association of State Highway and Transportation Officials. [S. l.: s. n.], 1996.
- ADAMS, J.; CASTORENA, C.; KIM, Y. R. Construction quality acceptance performance-related specifications for chip seals. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 6, n. 4, p. 337–348, 2019.
- ALDOT. Standard Specifications for Highway Construction. [S. l.: s. n.], 2022. . Acesso em: 5 mar. 2022.
- AL-KHAYAT, H. T. A. A Case Study for Developing Specification Limits for Hot-Mix Asphalt and the Impact on Pay Factors. 2018. Thesis – 2018. Disponível em: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/173949>. Acesso em: 25 fev. 2022.
- ASCE. Quality in the constructed project: a guide for owners, designers, and constructors. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2000.
- BREAKAH, T. M.; WILLIAMS, R. C.; KANDIL, A.; SHANE, J. S. Implementing Percent within Limits for Hot Mix Asphalt. [S. l.: s. n.], 2007.
- BURATI, J. L.; WEED, R. M.; HUGHES, C. S.; HILL, H. S.; CLEMSON UNIVERSITY. DEPT. OF CIVIL ENGINEERING. Optimal procedures for quality assurance specifications, n. FHWA-RD-02-095. [S. l.: s. n.], 1 abr. 2003. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/755>. Acesso em: 23 dez. 2021.
- BURATI, James L.; WEDD, R. M. Accuracy and Precision of Typical Quality Measures. *Accuracy and Precision of Typical Quality Measures*, v. 1946, n. 1, p. 82–91, jan. 2006. <https://doi.org/10.1177/0361198106194600110>.
- BURATI JR, J. L. Risks with multiple pay factor acceptance plans. *Transportation research record*, v. 1907, n. 1, p. 36–42, 2005.
- CARVALHO, M. M. de; PALADINI, E. P. *Gestão de qualidade: teoria e casos*. 2º ed. [S. l.]: Elsevier, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9788535248876>. Acesso em: 21 fev. 2022.
- CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2021. Brasília: CNT, 2021.
- CNT. Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Brasília: CNT, 2017.
- DEMING, W. E. *Qualidade: a revolução da administração*. [S. l.: s. n.], 1990.
- DNER-PRO 277/97. NORMA DNER-PRO 277/97 - Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- DNIT 011/2004 - PRO. NORMA DNIT 011/2004 - PRO Gestão da qualidade em obras rodoviárias - Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.
- DNIT 013/2004 - PRO. NORMA DNIT 013/2004 - PRO Requisitos para a qualidade na

execução de obras rodoviárias - Procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

DNIT 031/2006 - ES. NORMA DNIT 031/2006 - ES Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DOS SANTOS BARDINI, V. S.; KLINSKY, L. M. G.; JUNIOR, J. L. F.; ROQUE, R. Influência do filer mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. *Transportes*, v. 20, n. 4, p. 19–26, 2012.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. Controle tecnológico e controle de qualidade - um alerta sobre sua importância. *buy it now.*, p. 13, 2004.

FRAZIER, P.; RAY, E.; VECCELLIO, L. Development of new criteria for control of hot-mix asphalt construction. *Transportation Research Record*, v. 1389, p. 1–8, 1992.

FREEMAN, R. E. *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Boston, 1984. MA: Pi Iman, 1984.

GARVIN, D. A. *Gerenciando a qualidade a visão estratégica e competitiva*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

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

JURAN, J. M. *Juran Planejando para a Qualidade*. 2ª ed. [S. l.: s. n.], 1992.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. da. Fator de ajuste de pagamento em obras rodoviárias: Vantagens e desvantagens e utilização no Brasil. , p. 9, 2019.

MIL-STD 414. *Mathematical and Statistical Principles Underlying Military Standard 414, Technical Report: Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Defective*. [S. l.]: U.S. Government Printing Office, 1958.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

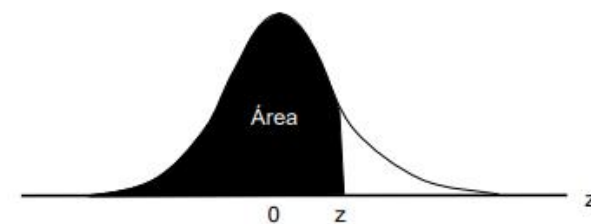
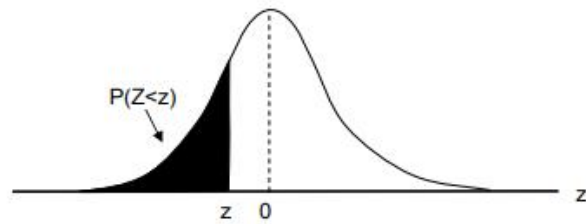
MUENCH, S. T.; MAHONEY, J. P. *A Quantification and Evaluation of WSDOTs Hot-Mix Asphalt Concrete Statistical Acceptance Specification*. , p. 47, 2001. .

NBR ISO 9000. *ISO 9000:2015 Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

SMITH, K. L.; RAO, S. P.; VIDALIS, S.; DARTER, M. I. *Advanced quality systems: probabilistic optimization for profit (Prob. O. Prof) software*. [S. l.]: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2009.

WANG, Y. D.; GHANBARI, A.; UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. Development of a performance-volumetric relationship for asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, v. 2673, n. 6, p. 416–430, 2019.

ANEXO A – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL



z	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
-3,4	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
-3,3	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005
-3,2	0,0005	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007
-3,1	0,0007	0,0007	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0009	0,0009	0,0009	0,0010
-3,0	0,0010	0,0010	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013	0,0013
-2,9	0,0014	0,0014	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0017	0,0017	0,0018	0,0019
-2,8	0,0019	0,0020	0,0021	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0024	0,0025	0,0026
-2,7	0,0026	0,0027	0,0028	0,0029	0,0030	0,0031	0,0032	0,0033	0,0034	0,0035
-2,6	0,0036	0,0037	0,0038	0,0039	0,0040	0,0041	0,0043	0,0044	0,0045	0,0047
-2,5	0,0048	0,0049	0,0051	0,0052	0,0054	0,0055	0,0057	0,0059	0,0060	0,0062
-2,4	0,0064	0,0066	0,0068	0,0069	0,0071	0,0073	0,0075	0,0078	0,0080	0,0082
-2,3	0,0084	0,0087	0,0089	0,0091	0,0094	0,0096	0,0099	0,0102	0,0104	0,0107
-2,2	0,0110	0,0113	0,0116	0,0119	0,0122	0,0125	0,0129	0,0132	0,0136	0,0139
-2,1	0,0143	0,0146	0,0150	0,0154	0,0158	0,0162	0,0166	0,0170	0,0174	0,0179
-2,0	0,0183	0,0188	0,0192	0,0197	0,0202	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222	0,0228
-1,9	0,0233	0,0239	0,0244	0,0250	0,0256	0,0262	0,0268	0,0274	0,0281	0,0287
-1,8	0,0294	0,0301	0,0307	0,0314	0,0322	0,0329	0,0336	0,0344	0,0352	0,0359
-1,7	0,0367	0,0375	0,0384	0,0392	0,0401	0,0409	0,0418	0,0427	0,0436	0,0446
-1,6	0,0455	0,0465	0,0475	0,0485	0,0495	0,0505	0,0516	0,0526	0,0537	0,0548
-1,5	0,0559	0,0571	0,0582	0,0594	0,0606	0,0618	0,0630	0,0643	0,0655	0,0668
-1,4	0,0681	0,0694	0,0708	0,0722	0,0735	0,0749	0,0764	0,0778	0,0793	0,0808
-1,3	0,0823	0,0838	0,0853	0,0869	0,0885	0,0901	0,0918	0,0934	0,0951	0,0968
-1,2	0,0985	0,1003	0,1020	0,1038	0,1056	0,1075	0,1093	0,1112	0,1131	0,1151
-1,1	0,1170	0,1190	0,1210	0,1230	0,1251	0,1271	0,1292	0,1314	0,1335	0,1357
-1,0	0,1379	0,1401	0,1423	0,1446	0,1469	0,1492	0,1515	0,1539	0,1562	0,1587
-0,9	0,1611	0,1635	0,1660	0,1685	0,1711	0,1736	0,1762	0,1788	0,1814	0,1841
-0,8	0,1867	0,1894	0,1922	0,1949	0,1977	0,2005	0,2033	0,2061	0,2090	0,2119
-0,7	0,2148	0,2177	0,2206	0,2236	0,2266	0,2296	0,2327	0,2358	0,2389	0,2420
-0,6	0,2451	0,2483	0,2514	0,2546	0,2578	0,2611	0,2643	0,2676	0,2709	0,2743
-0,5	0,2776	0,2810	0,2843	0,2877	0,2912	0,2946	0,2981	0,3015	0,3050	0,3085
-0,4	0,3121	0,3156	0,3192	0,3228	0,3264	0,3300	0,3336	0,3372	0,3409	0,3446
-0,3	0,3483	0,3520	0,3557	0,3594	0,3632	0,3669	0,3707	0,3745	0,3783	0,3821
-0,2	0,3859	0,3897	0,3936	0,3974	0,4013	0,4052	0,4090	0,4129	0,4168	0,4207
-0,1	0,4247	0,4286	0,4325	0,4364	0,4404	0,4443	0,4483	0,4522	0,4562	0,4602
-0,0	0,4641	0,4681	0,4721	0,4761	0,4801	0,4840	0,4880	0,4920	0,4960	0,5000

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9278	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5869350/mod_folder/content/0/Tabela_Normal_negativa.pdf

ANEXO B – TABELA VALORES DE PDL COM BASE EM QI E QS

Quality Index Q _U or Q _L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
0.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
0.01	50.28	50.33	50.36	50.37	50.37	50.38	50.38	50.38	50.39	50.39	50.40	50.40	50.40
0.02	50.55	50.67	50.71	50.73	50.75	50.76	50.76	50.77	50.78	50.79	50.79	50.79	50.80
0.03	50.83	51.00	51.07	51.10	51.12	51.14	51.15	51.15	51.17	51.18	51.19	51.19	51.19
0.04	51.10	51.33	51.42	51.47	51.50	51.51	51.53	51.54	51.56	51.57	51.58	51.59	51.59
0.05	51.38	51.67	51.78	51.84	51.87	51.89	51.91	51.92	51.95	51.96	51.98	51.98	51.99
0.06	51.65	52.00	52.13	52.20	52.24	52.27	52.29	52.30	52.34	52.36	52.37	52.38	52.39
0.07	51.93	52.33	52.49	52.57	52.62	52.65	52.67	52.69	52.73	52.75	52.76	52.78	52.78
0.08	52.21	52.67	52.85	52.94	52.99	53.03	53.05	53.07	53.12	53.14	53.16	53.17	53.18
0.09	52.48	53.00	53.20	53.30	53.37	53.41	53.43	53.46	53.51	53.53	53.55	53.57	53.58
0.10	52.76	53.33	53.56	53.67	53.74	53.78	53.82	53.84	53.90	53.92	53.95	53.96	53.97
0.11	53.04	53.67	53.91	54.04	54.11	54.16	54.20	54.22	54.29	54.31	54.34	54.36	54.37
0.12	53.31	54.00	54.27	54.40	54.49	54.54	54.58	54.60	54.67	54.70	54.73	54.75	54.76
0.13	53.59	54.33	54.62	54.77	54.86	54.92	54.96	54.99	55.06	55.09	55.12	55.14	55.16
0.14	53.87	54.67	54.98	55.14	55.23	55.29	55.34	55.37	55.45	55.48	55.52	55.54	55.55
0.15	54.15	55.00	55.33	55.50	55.60	55.67	55.71	55.75	55.84	55.87	55.91	55.93	55.95
0.16	54.42	55.33	55.69	55.87	55.97	56.04	56.09	56.13	56.22	56.26	56.30	56.32	56.34
0.17	54.70	55.67	56.04	56.23	56.35	56.42	56.47	56.51	56.61	56.65	56.69	56.71	56.73
0.18	54.98	56.00	56.40	56.60	56.72	56.79	56.85	56.89	56.99	57.04	57.08	57.11	57.12
0.19	55.26	56.33	56.75	56.96	57.09	57.17	57.23	57.27	57.38	57.43	57.47	57.50	57.52
0.20	55.54	56.67	57.10	57.32	57.46	57.54	57.60	57.65	57.76	57.81	57.85	57.89	57.91
0.21	55.82	57.00	57.46	57.69	57.83	57.92	57.98	58.03	58.15	58.20	58.24	58.27	58.30
0.22	56.10	57.33	57.81	58.05	58.20	58.29	58.36	58.40	58.53	58.58	58.63	58.66	58.69
0.23	56.38	57.67	58.16	58.41	58.56	58.66	58.73	58.78	58.91	58.97	59.01	59.05	59.07
0.24	56.66	58.00	58.52	58.78	58.93	59.03	59.11	59.16	59.29	59.35	59.40	59.44	59.46
0.25	56.95	58.33	58.87	59.14	59.30	59.41	59.48	59.53	59.67	59.73	59.78	59.82	59.85
0.26	57.23	58.67	59.22	59.50	59.67	59.78	59.85	59.91	60.05	60.11	60.17	60.21	60.23
0.27	57.51	59.00	59.57	59.86	60.03	60.15	60.23	60.28	60.43	60.49	60.55	60.59	60.62
0.28	57.80	59.33	59.92	60.22	60.40	60.52	60.60	60.66	60.81	60.87	60.93	60.97	61.00
0.29	58.08	59.67	60.28	60.58	60.77	60.89	60.97	61.03	61.19	61.25	61.31	61.35	61.38
0.30	58.37	60.00	60.63	60.94	61.13	61.25	61.34	61.40	61.56	61.63	61.69	61.73	61.76
0.31	58.65	60.33	60.98	61.30	61.50	61.62	61.71	61.77	61.94	62.01	62.07	62.11	62.14
0.32	58.94	60.67	61.33	61.66	61.86	61.99	62.08	62.14	62.31	62.38	62.45	62.49	62.52
0.33	59.23	61.00	61.68	62.02	62.22	62.35	62.45	62.51	62.69	62.76	62.82	62.87	62.90
0.34	59.51	61.33	62.03	62.38	62.58	62.72	62.81	62.88	63.06	63.13	63.20	63.25	63.28
0.35	59.80	61.67	62.38	62.73	62.94	63.08	63.18	63.25	63.43	63.51	63.57	63.62	63.65
0.36	60.09	62.00	62.72	63.09	63.31	63.45	63.54	63.62	63.80	63.88	63.95	63.99	64.03
0.37	60.38	62.33	63.07	63.45	63.67	63.81	63.91	63.98	64.17	64.25	64.32	64.37	64.40
0.38	60.67	62.67	63.42	63.80	64.02	64.17	64.27	64.35	64.54	64.62	64.69	64.74	64.77
0.39	60.97	63.00	63.77	64.16	64.38	64.53	64.63	64.71	64.90	64.98	65.06	65.11	65.14
0.40	61.26	63.33	64.12	64.51	64.74	64.89	65.00	65.07	65.27	65.35	65.42	65.47	65.51
0.41	61.55	63.67	64.46	64.86	65.10	65.25	65.36	65.43	65.63	65.72	65.79	65.84	65.88
0.42	61.85	64.00	64.81	65.21	65.45	65.61	65.71	65.79	66.00	66.08	66.15	66.21	66.24
0.43	62.15	64.33	65.15	65.57	65.81	65.96	66.07	66.15	66.36	66.44	66.52	66.57	66.61
0.44	62.44	64.67	65.50	65.92	66.16	66.32	66.43	66.51	66.72	66.80	66.88	66.93	66.97

Quality Index Q _U or Q _L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
0.45	62.74	65.00	65.84	66.27	66.51	66.67	66.79	66.87	67.08	67.16	67.24	67.29	67.33
0.46	63.04	65.33	66.19	66.62	66.87	67.03	67.14	67.22	67.43	67.52	67.60	67.65	67.69
0.47	63.34	65.67	66.53	66.96	67.22	67.38	67.49	67.58	67.79	67.88	67.96	68.01	68.05
0.48	63.65	66.00	66.88	67.31	67.57	67.73	67.85	67.93	68.15	68.23	68.31	68.37	68.40
0.49	63.95	66.33	67.22	67.66	67.92	68.08	68.20	68.28	68.50	68.59	68.67	68.72	68.76
0.50	64.25	66.67	67.56	68.00	68.26	68.43	68.55	68.63	68.85	68.94	69.02	69.07	69.11
0.51	64.56	67.00	67.90	68.35	68.61	68.78	68.90	68.98	69.20	69.29	69.37	69.43	69.46
0.52	64.87	67.33	68.24	68.69	68.96	69.13	69.24	69.33	69.55	69.64	69.72	69.77	69.81
0.53	65.18	67.67	68.58	69.04	69.30	69.47	69.59	69.68	69.90	69.99	70.07	70.12	70.16
0.54	65.49	68.00	68.92	69.38	69.64	69.82	69.93	70.02	70.24	70.33	70.41	70.47	70.51
0.55	65.80	68.33	69.26	69.72	69.99	70.16	70.28	70.36	70.59	70.68	70.76	70.81	70.85
0.56	66.12	68.67	69.60	70.06	70.33	70.50	70.62	70.71	70.93	71.02	71.10	71.15	71.19
0.57	66.43	69.00	69.94	70.40	70.67	70.84	70.96	71.05	71.27	71.36	71.44	71.49	71.53
0.58	66.75	69.33	70.27	70.74	71.01	71.18	71.30	71.39	71.61	71.70	71.78	71.83	71.87
0.59	67.07	69.67	70.61	71.07	71.34	71.52	71.64	71.72	71.95	72.04	72.11	72.17	72.21
0.60	67.39	70.00	70.95	71.41	71.68	71.85	71.97	72.06	72.28	72.37	72.45	72.50	72.54
0.61	67.72	70.33	71.28	71.75	72.02	72.19	72.31	72.40	72.61	72.70	72.78	72.84	72.87
0.62	68.04	70.67	71.61	72.08	72.35	72.52	72.64	72.73	72.95	73.04	73.11	73.17	73.20
0.63	68.37	71.00	71.95	72.41	72.68	72.85	72.97	73.06	73.28	73.37	73.44	73.50	73.53
0.64	68.70	71.33	72.28	72.74	73.01	73.18	73.30	73.39	73.61	73.69	73.77	73.82	73.86
0.65	69.03	71.67	72.61	73.08	73.34	73.51	73.63	73.72	73.93	74.02	74.10	74.15	74.18
0.66	69.37	72.00	72.94	73.40	73.67	73.84	73.96	74.04	74.26	74.34	74.42	74.47	74.51
0.67	69.70	72.33	73.27	73.73	74.00	74.17	74.28	74.37	74.58	74.67	74.74	74.79	74.83
0.68	70.04	72.67	73.60	74.06	74.32	74.49	74.61	74.69	74.90	74.99	75.06	75.11	75.14
0.69	70.39	73.00	73.93	74.39	74.65	74.81	74.93	75.01	75.22	75.30	75.38	75.43	75.46
0.70	70.73	73.33	74.26	74.71	74.97	75.14	75.25	75.33	75.54	75.62	75.69	75.74	75.77
0.71	71.08	73.67	74.59	75.04	75.29	75.46	75.57	75.65	75.85	75.94	76.01	76.05	76.09
0.72	71.43	74.00	74.91	75.36	75.61	75.77	75.89	75.97	76.17	76.25	76.32	76.36	76.40
0.73	71.78	74.33	75.24	75.68	75.93	76.09	76.20	76.28	76.48	76.56	76.63	76.67	76.70
0.74	72.14	74.67	75.56	76.00	76.25	76.41	76.51	76.59	76.79	76.87	76.93	76.98	77.01
0.75	72.50	75.00	75.89	76.32	76.56	76.72	76.83	76.90	77.10	77.17	77.24	77.28	77.31
0.76	72.87	75.33	76.21	76.63	76.88	77.03	77.14	77.21	77.40	77.48	77.54	77.58	77.61
0.77	73.24	75.67	76.53	76.95	77.19	77.34	77.44	77.52	77.70	77.78	77.84	77.88	77.91
0.78	73.61	76.00	76.85	77.26	77.50	77.65	77.75	77.82	78.01	78.08	78.14	78.18	78.21
0.79	73.98	76.33	77.17	77.58	77.81	77.96	78.06	78.13	78.30	78.37	78.43	78.47	78.50
0.80	74.36	76.67	77.49	77.89	78.12	78.26	78.36	78.43	78.60	78.67	78.73	78.77	78.79
0.81	74.75	77.00	77.81	78.20	78.42	78.56	78.66	78.73	78.90	78.96	79.02	79.06	79.08
0.82	75.14	77.33	78.13	78.51	78.73	78.86	78.						

Quality Index Q _U or Q _L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
0.90	78.45	80.00	80.62	80.93	81.10	81.21	81.28	81.33	81.46	81.50	81.54	81.57	81.58
0.91	78.89	80.33	80.93	81.22	81.39	81.49	81.56	81.61	81.73	81.77	81.81	81.83	81.85
0.92	79.34	80.67	81.23	81.51	81.67	81.77	81.84	81.89	82.00	82.04	82.08	82.10	82.11
0.93	79.81	81.00	81.54	81.81	81.96	82.05	82.12	82.16	82.27	82.31	82.34	82.36	82.37
0.94	80.27	81.33	81.84	82.10	82.24	82.33	82.39	82.44	82.54	82.57	82.60	82.62	82.63
0.95	80.75	81.67	82.14	82.39	82.52	82.61	82.67	82.71	82.80	82.84	82.86	82.88	82.89
0.96	81.25	82.00	82.45	82.67	82.80	82.88	82.94	82.97	83.06	83.10	83.12	83.13	83.14
0.97	81.75	82.33	82.75	82.96	83.08	83.15	83.21	83.24	83.32	83.35	83.37	83.39	83.39
0.98	82.26	82.67	83.04	83.24	83.35	83.43	83.47	83.51	83.58	83.61	83.63	83.64	83.64
0.99	82.79	83.00	83.34	83.52	83.63	83.69	83.74	83.77	83.84	83.86	83.88	83.88	83.89
1.00	83.33	83.33	83.64	83.80	83.90	83.96	84.00	84.03	84.09	84.11	84.12	84.13	84.13
1.01	83.89	83.67	83.93	84.08	84.17	84.22	84.26	84.28	84.34	84.36	84.37	84.37	84.38
1.02	84.47	84.00	84.22	84.36	84.44	84.49	84.52	84.54	84.59	84.60	84.61	84.62	84.62
1.03	85.07	84.33	84.52	84.63	84.70	84.75	84.77	84.79	84.83	84.85	84.85	84.85	84.85
1.04	85.69	84.67	84.81	84.91	84.97	85.00	85.03	85.04	85.08	85.09	85.09	85.09	85.09
1.05	86.34	85.00	85.09	85.18	85.23	85.26	85.28	85.29	85.32	85.33	85.33	85.32	85.32
1.06	87.02	85.33	85.38	85.45	85.49	85.51	85.53	85.54	85.56	85.56	85.56	85.55	85.55
1.07	87.73	85.67	85.67	85.71	85.74	85.76	85.78	85.78	85.80	85.80	85.79	85.78	85.78
1.08	88.49	86.00	85.95	85.98	86.00	86.01	86.02	86.03	86.03	86.03	86.02	86.01	86.00
1.09	89.29	86.33	86.24	86.24	86.25	86.26	86.27	86.27	86.26	86.26	86.25	86.23	86.23
1.10	90.16	86.67	86.52	86.50	86.51	86.51	86.51	86.50	86.49	86.48	86.47	86.46	86.45
1.11	91.11	87.00	86.80	86.76	86.75	86.75	86.74	86.74	86.72	86.71	86.69	86.68	86.66
1.12	92.18	87.33	87.07	87.02	87.00	86.99	86.98	86.97	86.95	86.93	86.91	86.89	86.88
1.13	93.40	87.67	87.35	87.28	87.25	87.23	87.21	87.20	87.17	87.15	87.13	87.11	87.09
1.14	94.92	88.00	87.63	87.53	87.49	87.46	87.45	87.43	87.39	87.37	87.34	87.32	87.30
1.15	97.13	88.33	87.90	87.78	87.73	87.70	87.68	87.66	87.61	87.58	87.55	87.53	87.51
1.16	100.00	88.67	88.17	88.03	87.97	87.93	87.90	87.88	87.82	87.79	87.76	87.74	87.72
1.17	100.00	89.00	88.44	88.28	88.21	88.16	88.13	88.10	88.04	88.00	87.97	87.94	87.92
1.18	100.00	89.33	88.71	88.53	88.44	88.39	88.35	88.32	88.25	88.21	88.18	88.15	88.12
1.19	100.00	89.67	88.98	88.77	88.67	88.61	88.57	88.54	88.46	88.42	88.38	88.35	88.32
1.20	100.00	90.00	89.24	89.01	88.90	88.83	88.79	88.76	88.66	88.62	88.58	88.54	88.52
1.21	100.00	90.33	89.50	89.25	89.13	89.06	89.00	88.97	88.87	88.82	88.78	88.74	88.71
1.22	100.00	90.67	89.77	89.49	89.35	89.27	89.22	89.18	89.07	89.02	88.97	88.93	88.91
1.23	100.00	91.00	90.03	89.72	89.58	89.49	89.43	89.39	89.27	89.22	89.16	89.12	89.09
1.24	100.00	91.33	90.28	89.96	89.80	89.70	89.64	89.59	89.47	89.41	89.36	89.31	89.28
1.25	100.00	91.67	90.54	90.19	90.02	89.91	89.85	89.79	89.66	89.60	89.54	89.50	89.47
1.26	100.00	92.00	90.79	90.42	90.23	90.12	90.05	90.00	89.85	89.79	89.73	89.68	89.65
1.27	100.00	92.33	91.04	90.64	90.45	90.33	90.25	90.19	90.04	89.98	89.91	89.87	89.83
1.28	100.00	92.67	91.29	90.87	90.66	90.53	90.45	90.39	90.23	90.16	90.10	90.05	90.01
1.29	100.00	93.00	91.54	91.09	90.87	90.74	90.65	90.58	90.42	90.34	90.28	90.22	90.18
1.30	100.00	93.33	91.79	91.31	91.07	90.94	90.84	90.78	90.60	90.52	90.45	90.40	90.36
1.31	100.00	93.67	92.03	91.52	91.28	91.13	91.04	90.97	90.78	90.70	90.63	90.57	90.53
1.32	100.00	94.00	92.27	91.74	91.48	91.33	91.23	91.15	90.96	90.88	90.80	90.74	90.70
1.33	100.00	94.33	92.51	91.95	91.68	91.52	91.41	91.34	91.14	91.05	90.97	90.91	90.87
1.34	100.00	94.67	92.75	92.16	91.88	91.71	91.60	91.52	91.31	91.22	91.14	91.08	91.03

Quality Index Q _U or Q _L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
1.35	100.00	95.00	92.98	92.37	92.08	91.90	91.78	91.70	91.48	91.39	91.31	91.24	91.19
1.36	100.00	95.33	93.21	92.58	92.27	92.09	91.96	91.88	91.65	91.56	91.47	91.40	91.35
1.37	100.00	95.67	93.44	92.78	92.46	92.27	92.14	92.05	91.82	91.72	91.63	91.56	91.51
1.38	100.00	96.00	93.67	92.98	92.65	92.45	92.32	92.23	91.99	91.88	91.79	91.72	91.67
1.39	100.00	96.33	93.90	93.18	92.83	92.63	92.49	92.40	92.15	92.04	91.95	91.88	91.82
1.40	100.00	96.67	94.12	93.37	93.02	92.81	92.67	92.56	92.31	92.20	92.10	92.03	91.98
1.41	100.00	97.00	94.34	93.57	93.20	92.98	92.83	92.73	92.47	92.36	92.26	92.18	92.13
1.42	100.00	97.33	94.56	93.76	93.38	93.15	93.00	92.90	92.63	92.51	92.41	92.33	92.27
1.43	100.00	97.67	94.77	93.95	93.55	93.32	93.17	93.06	92.78	92.66	92.56	92.48	92.42
1.44	100.00	98.00	94.98	94.13	93.73	93.49	93.33	93.22	92.93	92.81	92.70	92.62	92.56
1.45	100.00	98.33	95.19	94.32	93.90	93.65	93.49	93.37	93.08	92.96	92.85	92.76	92.70
1.46	100.00	98.67	95.40	94.50	94.07	93.81	93.65	93.53	93.23	93.10	92.99	92.90	92.84
1.47	100.00	99.00	95.61	94.67	94.23	93.97	93.80	93.68	93.37	93.25	93.13	93.04	92.98
1.48	100.00	99.33	95.81	94.85	94.40	94.13	93.96	93.83	93.52	93.39	93.27	93.18	93.12
1.49	100.00	99.67	96.01	95.02	94.56	94.29	94.11	93.98	93.66	93.52	93.40	93.31	93.25
1.50	100.00	100.00	96.20	95.19	94.72	94.44	94.26	94.13	93.80	93.66	93.54	93.45	93.38
1.51	100.00	100.00	96.39	95.36	94.87	94.59	94.40	94.27	93.94	93.80	93.67	93.58	93.51
1.52	100.00	100.00	96.58	95.53	95.03	94.74	94.55	94.41	94.07	93.93	93.80	93.71	93.64
1.53	100.00	100.00	96.77	95.69	95.18	94.88	94.69	94.55	94.20	94.06	93.93	93.83	93.76
1.54	100.00	100.00	96.95	95.85	95.33	95.03	94.83	94.69	94.33	94.19	94.05	93.96	93.89
1.55	100.00	100.00	97.13	96.00	95.48	95.17	94.97	94.82	94.46	94.31	94.18	94.08	94.01
1.56	100.00	100.00	97.31	96.16	95.62	95.31	95.10	94.95	94.59	94.44	94.30	94.20	94.13
1.57	100.00	100.00	97.48	96.31	95.76	95.44	95.23	95.08	94.71	94.56	94.42	94.32	94.25
1.58	100.00	100.00	97.65	96.46	95.90	95.58	95.36	95.21	94.84	94.68	94.54	94.44	94.36
1.59	100.00	100.00	97.81	96.60	96.04	95.71	95.49	95.34	94.96	94.80	94.66	94.55	94.48
1.60	100.00	100.00	97.97	96.75	96.17	95.84	95.62	95.46	95.08	94.92	94.77	94.67	94.59
1.61	100.00	100.00	98.13	96.89	96.31	95.97	95.74	95.59	95.19	95.03	94.88	94.78	94.70
1.62	100.00	100.00	98.28	97.03	96.43	96.09	95.86	95.70	95.31	95.14	94.99	94.89	94.81
1.63	100.00	100.00	98.43	97.16	96.56	96.21	95.98	95.82	95.42	95.25	95.10	94.99	94.92
1.64	100.00	100.00	98.58	97.29	96.69	96.33	96.10	95.94	95.53	95.36	95.21	95.10	95.02
1.65	100.00	100.00	98.72	97.42	96.81	96.45	96.22	96.05	95.64	95.47	95.32	95.21	95.13
1.66	100.00	100.00	98.85	97.55	96.93	96.57	96.33	96.16	95.75	95.57	95.42	95.31	95.23
1.67	100.00	100.00	98.98	97.67	97.05	96.68	96.44	96.27	95.85	95.68	95.52	95.41	95.33
1.68	100.00	100.00	99.11	97.79	97.16	96.79	96.55	96.38	95.95	95.78	95.62	95.51	95.43
1.69	100.00	100.00	99.23	97.91	97.27	96.90	96.66	96.48	96.06	95.88	95.72	95.61	95.53
1.70	100.00	100.00	99.34	98.02	97.38	97.01	96.76	96.59	96.16	95.98	95.82	95.70	95.62
1.71	100.00	100.00	99.45	98.13	97.49	97.11	96.86	96.69	96.25	96.07	95.91	95.80	95.71
1.72	100.00	100.00	99.55										

Quality Index Q_U or Q_L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
1.80	100.00	100.00	100.00	98.99	98.35	97.96	97.70	97.51	97.06	96.87	96.70	96.57	96.49
1.81	100.00	100.00	100.00	99.07	98.43	98.04	97.78	97.60	97.14	96.95	96.78	96.65	96.57
1.82	100.00	100.00	100.00	99.15	98.51	98.12	97.86	97.68	97.21	97.02	96.85	96.73	96.64
1.83	100.00	100.00	100.00	99.22	98.59	98.20	97.94	97.75	97.29	97.10	96.93	96.81	96.72
1.84	100.00	100.00	100.00	99.29	98.66	98.28	98.02	97.83	97.37	97.18	97.01	96.88	96.79
1.85	100.00	100.00	100.00	99.36	98.74	98.35	98.09	97.91	97.44	97.25	97.08	96.95	96.87
1.86	100.00	100.00	100.00	99.43	98.81	98.42	98.16	97.98	97.52	97.32	97.15	97.03	96.94
1.87	100.00	100.00	100.00	99.49	98.88	98.49	98.24	98.05	97.59	97.39	97.22	97.10	97.01
1.88	100.00	100.00	100.00	99.54	98.94	98.56	98.30	98.12	97.66	97.46	97.29	97.17	97.08
1.89	100.00	100.00	100.00	99.60	99.01	98.63	98.37	98.19	97.72	97.53	97.36	97.23	97.15
1.90	100.00	100.00	100.00	99.65	99.07	98.69	98.44	98.25	97.79	97.60	97.43	97.30	97.21
1.91	100.00	100.00	100.00	99.70	99.13	98.76	98.50	98.32	97.86	97.66	97.49	97.37	97.28
1.92	100.00	100.00	100.00	99.74	99.19	98.82	98.56	98.38	97.92	97.73	97.55	97.43	97.34
1.93	100.00	100.00	100.00	99.78	99.24	98.88	98.63	98.44	97.98	97.79	97.62	97.49	97.40
1.94	100.00	100.00	100.00	99.82	99.30	98.93	98.68	98.50	98.04	97.85	97.68	97.55	97.46
1.95	100.00	100.00	100.00	99.85	99.35	98.99	98.74	98.56	98.10	97.91	97.74	97.61	97.52
1.96	100.00	100.00	100.00	99.88	99.40	99.04	98.80	98.62	98.16	97.97	97.80	97.67	97.58
1.97	100.00	100.00	100.00	99.91	99.44	99.09	98.85	98.67	98.22	98.03	97.86	97.73	97.64
1.98	100.00	100.00	100.00	99.93	99.49	99.14	98.90	98.73	98.27	98.08	97.91	97.79	97.70
1.99	100.00	100.00	100.00	99.95	99.53	99.19	98.95	98.78	98.33	98.14	97.97	97.84	97.75
2.00	100.00	100.00	100.00	99.97	99.57	99.24	99.00	98.83	98.38	98.19	98.02	97.90	97.81
2.01	100.00	100.00	100.00	99.98	99.61	99.28	99.05	98.88	98.43	98.24	98.07	97.95	97.86
2.02	100.00	100.00	100.00	99.99	99.64	99.33	99.10	98.93	98.48	98.29	98.13	98.00	97.91
2.03	100.00	100.00	100.00	100.00	99.68	99.37	99.14	98.97	98.53	98.34	98.18	98.05	97.96
2.04	100.00	100.00	100.00	100.00	99.71	99.41	99.18	99.02	98.58	98.39	98.23	98.10	98.01
2.05	100.00	100.00	100.00	100.00	99.74	99.45	99.23	99.06	98.63	98.44	98.27	98.15	98.06
2.06	100.00	100.00	100.00	100.00	99.77	99.48	99.27	99.10	98.67	98.49	98.32	98.20	98.11
2.07	100.00	100.00	100.00	100.00	99.79	99.52	99.30	99.14	98.72	98.53	98.37	98.24	98.16
2.08	100.00	100.00	100.00	100.00	99.82	99.55	99.34	99.18	98.76	98.58	98.41	98.29	98.21
2.09	100.00	100.00	100.00	100.00	99.84	99.58	99.38	99.22	98.80	98.62	98.46	98.34	98.25
2.10	100.00	100.00	100.00	100.00	99.86	99.61	99.41	99.26	98.84	98.66	98.50	98.38	98.29
2.11	100.00	100.00	100.00	100.00	99.88	99.64	99.45	99.29	98.88	98.70	98.54	98.42	98.34
2.12	100.00	100.00	100.00	100.00	99.90	99.67	99.48	99.33	98.92	98.74	98.58	98.46	98.38
2.13	100.00	100.00	100.00	100.00	99.92	99.70	99.51	99.36	98.96	98.78	98.62	98.50	98.42
2.14	100.00	100.00	100.00	100.00	99.93	99.72	99.54	99.39	99.00	98.82	98.66	98.54	98.46
2.15	100.00	100.00	100.00	100.00	99.94	99.74	99.57	99.42	99.03	98.86	98.70	98.58	98.50
2.16	100.00	100.00	100.00	100.00	99.95	99.77	99.59	99.45	99.07	98.90	98.74	98.62	98.54
2.17	100.00	100.00	100.00	100.00	99.96	99.79	99.62	99.48	99.10	98.93	98.78	98.66	98.58
2.18	100.00	100.00	100.00	100.00	99.97	99.81	99.64	99.51	99.13	98.97	98.81	98.70	98.61
2.19	100.00	100.00	100.00	100.00	99.98	99.83	99.67	99.54	99.17	99.00	98.85	98.73	98.65
2.20	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.84	99.69	99.56	99.20	99.03	98.88	98.77	98.69
2.21	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.86	99.71	99.59	99.23	99.06	98.91	98.80	98.72
2.22	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.87	99.73	99.61	99.26	99.10	98.95	98.83	98.75
2.23	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.89	99.75	99.63	99.29	99.13	98.98	98.87	98.79
2.24	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.90	99.77	99.66	99.31	99.15	99.01	98.90	98.82

Quality Index Q_U or Q_L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
2.25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.91	99.79	99.68	99.34	99.18	99.04	98.93	98.85
2.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.92	99.80	99.70	99.37	99.21	99.07	98.96	98.88
2.27	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.93	99.82	99.71	99.39	99.24	99.10	98.99	98.91
2.28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.94	99.83	99.73	99.42	99.26	99.12	99.02	98.94
2.29	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.95	99.85	99.75	99.44	99.29	99.15	99.05	98.97
2.30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.96	99.86	99.77	99.46	99.32	99.18	99.07	99.00
2.31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.96	99.87	99.78	99.48	99.34	99.20	99.10	99.03
2.32	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.97	99.89	99.80	99.51	99.36	99.23	99.13	99.05
2.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.98	99.90	99.81	99.53	99.39	99.25	99.15	99.08
2.34	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.98	99.91	99.82	99.55	99.41	99.28	99.18	99.10
2.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.98	99.92	99.84	99.57	99.43	99.30	99.20	99.13
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.92	99.85	99.58	99.45	99.32	99.22	99.15
2.37	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.93	99.86	99.60	99.47	99.34	99.25	99.18
2.38	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.94	99.87	99.62	99.49	99.37	99.27	99.20
2.39	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.95	99.88	99.64	99.51	99.39	99.29	99.22
2.40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.95	99.89	99.65	99.53	99.41	99.31	99.25
2.41	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.96	99.90	99.67	99.55	99.43	99.33	99.27
2.42	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.96	99.91	99.68	99.56	99.44	99.35	99.29
2.43	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.97	99.92	99.70	99.58	99.46	99.37	99.31
2.44	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.97	99.92	99.71	99.60	99.48	99.39	99.33
2.45	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.93	99.73	99.61	99.50	99.41	99.35
2.46	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.94	99.74	99.63	99.52	99.43	99.37
2.47	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.94	99.75	99.64	99.53	99.45	99.38
2.48	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.95	99.95	99.76	99.66	99.55	99.46	99.40
2.49	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.95	99.95	99.77	99.67	99.56	99.48	99.42
2.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.96	99.96	99.79	99.68	99.58	99.50	99.44
2.51	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	99.96	99.80	99.70	99.59	99.51	99.45
2.52	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	99.97	99.81	99.71	99.61	99.53	99.47
2.53	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	99.97	99.82	99.72	99.62	99.54	99.49
2.54	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	99.97	99.83	99.73	99.63	99.56	99.50
2.55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.98	99.83	99.74	99.65	99.57	99.52
2.56	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.98	99.84	99.75	99.66	99.59	99.53
2.57	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.98	99.85	99.76	99.67	99.60	99.54
2.58	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.98	99.98	99.86	99.77	99.68	99.61	99.56
2.59	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	99.99	99.87	99.78	99.70	99.62	99.57
2.60	100.00	100.00	100.00	100.00									

Quality Index Q_U or Q_L	Percent Within Limits for Selected Sample Sizes												
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10	N=15	N=20	N=30	N=50	N=100
3.60	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99
3.61	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.62	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.63	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.64	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.65	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.66	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.68	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.69	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.71	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.72	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.73	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.74	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
3.76	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

The estimates of lot percent within limits (PWL) provided in the tables are obtained by numerically integrating the beta distribution function corresponding to Quality Index (Q) and Sample Size (N).

To find PWL from the tables, compute Q from the sample mean and sample standard deviation with unknown population variability, and the lower or upper specification limits.

To find the PWL for a negative Quality Index, first get the PWL for the positive value of the Quality Index from the tables and subtract the result from 100.

Fonte: Statistics Handbook 2019-2020 CIT program, KDOT (2020).