

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

NATHAN CLAUDINO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E PARÂMETROS DE
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS A QUENTE: ESTUDO DE
CASO BASEADO EM OBRAS EXECUTADAS NA CIDADE DE JOINVILLE/SC

Joinville

2022

NATHAN CLAUDINO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E PARÂMETROS DE
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS A QUENTE: ESTUDO DE
CASO BASEADO EM OBRAS EXECUTADAS NA CIDADE DE JOINVILLE/SC

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Civil de
Infraestrutura do Centro Tecnológico de
Joinville da Universidade Federal de Santa
Catarina.

Orientador: Dr. Breno Salgado Barra.

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Claudino, Nathan

Avaliação Comparativa das Propriedades Físicas e
Parâmetros de Dosagem de Misturas Asfálticas Produzidas a
Quente : Estudo de Caso Baseado em Obras Executadas na
Cidade de Joinville/SC / Nathan Claudino ; orientador,
Breno Salgado Barra, 2022.

102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Misturas
asfálticas. 3. Obras públicas. 4. Propriedades físicas. 5.
Parâmetros de dosagem. I. Salgado Barra, Breno. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Infraestrutura. III. Título.

NATHAN CLAUDINO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E PARÂMETROS DE
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS A QUENTE: ESTUDO DE
CASO BASEADO EM OBRAS EXECUTADAS NA CIDADE DE JOINVILLE/SC

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Breno Salgado Barra
Orientador/Presidente
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

Prof. Dr. Eng. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Membro
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

Prof. Dr. Fís. Alexandre Mikowski
Membro
UFSC - Centro Tecnológico de Joinville

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais Adelor e Lucia pelas oportunidades e privilégios que me concederam, pela educação que sempre foi prioridade e por fornecerem a oportunidade de estudar longe de casa, abdicando de vários interesses pessoais para que eu pudesse estudar em uma instituição de qualidade. Agradeço a compreensão da minha ausência e o incentivo de ir atrás dos meus sonhos.

Agradeço imensamente minha irmã Gabriela que mesmo distante em extensão, fez-se presente nos meus momentos mais escuros, sempre me apoiando, confortando e me aconselhando independentemente da ocasião.

Ao meu orientador Dr. Breno Salgado Barra, por compartilhar comigo suas experiências e conhecimentos na área de pavimentação e por me gerar curiosidade acerca do tema, servindo de exemplo a ser seguido.

Agradeço também a professora Vanessa, por me auxiliar na escrita e formatação deste trabalho, mostrando-se disposta a me ajudar em quaisquer dificuldades.

À empresa Marcos Trojan Engenharia e Geotecnia Ltda. e aos colegas de trabalho, pela colaboração, auxílio, disponibilidade de materiais e por estar sempre presente quando necessário.

Por fim, aos amigos que fiz durante todos estes anos, pelo companheirismo nos estudos e compartilhamento de conhecimentos.

*“Que eu nunca me sinta completo. Que eu nunca
me sinta satisfeito. Que eu nunca seja perfeito.”*

(Chuck Palahniuk, 1996)

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é analisar, de forma comparativa, as propriedades físicas e os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas produzidas a quente, a partir de um estudo de caso prático. Para tanto, foram selecionados cinco logradouros em Joinville/SC que receberam serviços de obras públicas de pavimentação. Foram procedidas avaliações tanto com amostras soltas coletadas no momento da execução dos trabalhos, quanto extraídas por sonda rotativa após a etapa de compactação da camada asfáltica, em pontos distintos de cada obra. No primeiro caso, as amostras tiveram a temperatura de compactação aferida momentos antes da aplicação na pista de rolamento e, ato contínuo, foram conduzidas ao ambiente laboratorial para a produção de corpos de prova pela metodologia Marshall, além da determinação dos seguintes indicadores: teor de ligante e granulometria por peneiramento após extração de betume com o uso do equipamento Rotarex, volume de vazios, massa específica aparente, relação betume/vazios, estabilidade e fluência. No segundo cenário, possível de ser avaliado em apenas dois logradouros, os testemunhos obtidos foram também levados ao laboratório, a fim de que fossem aferidas as espessuras das camadas, massa específica aparente, volume de vazios e grau de compactação. Os dados amostrais disponíveis, após compilação das informações, foram comparados aos dados originais previstos nos projetos das obras e aos limites normativos quando previstos, em cada caso. Os resultados obtidos demonstram que em todas as obras investigadas há fortes discrepâncias quanto ao atendimento das premissas técnicas estabelecidas em projeto para todos os parâmetros analisados, tanto na produção das misturas nas usinas quanto no processo executivo das camadas asfálticas no campo, respectivamente, indicando ausência do controle de qualidade dos serviços ofertados. Ainda, foram verificadas formulações fora das especificações de trabalho exigidas pelos órgãos de controle e, com comportamentos díspares em pontos distintos do mesmo trecho executado em campo. Como consequência, tem-se a entrega de produtos com desempenho indesejável à sociedade e passíveis de pouca durabilidade em relação à vida útil prevista em projeto.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. Obras públicas. Propriedades físicas. Parâmetros de dosagem.

ABSTRACT

The main aim of this research is to analyze, in comparative approach, the physical properties and dosing parameters of hot asphalt mixes, taking into account a real case study. Five public environments in Joinville/SC were selected, due to have been carried out paving public works along them. Evaluations comprised non-compacted samples collected at the time of arrival in the field, as well as post-compacting samples extracted by rotary probe, considering distinct points of each pavement structure. In the first case, temperature of the asphalt mixes was checked few moments before application in roadbed and, subsequently, sent to laboratory environment for units production upon using Marshall methodology, besides determination of the following indicators: binder content and granulometry by sieving process after bitumen extraction with use of Rotarex device, air void content, apparent specific gravity, bitumen/air voids ratio, stability and fluency. With regards to the second scenario, which was possible to be evaluated just for two public environments, the collected samples were also taken to the laboratory, in order to measure the layer thicknesses, apparent specific gravity, air void content and compacting degree. The sample data available, after compilation procedures, were compared to the original data of the public work projects and to the standardized limits when predicted, in each case. The results obtained demonstrate that for all public works investigated, there are strong discrepancies related to suitability of the technical specifications established in project, considering all parameters analyzed, both in the production of mixes in plants and in the executive process of the asphalt layers in the field, respectively, indicating absence of quality control of the services offered. In addition, they were verified formulations out of the standardized specifications demanded by the control agencies and with scattered behaviors in distinct points of the same segment built in the field. As a consequence, there is the delivery of products with undesirable performance to society and likely to have little durability, in relation to the service life estimated in project.

Keywords: Asphalt mixes. Public works. Physical properties. Dosing parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Esquema de fluxograma para atingir os objetivos da pesquisa	21
Figura 2.1	- Estrutura tipo pavimento rígido	25
Figura 2.2	- Estrutura tipo pavimento flexível	26
Figura 2.3	- Processo de destilação fracionada do CAP	29
Figura 2.4	- Comparativo das diferentes graduações granulométricas	30
Figura 2.5	- Variações do tamanho máximo do granular em uma mesma faixa granulométrica	32
Figura 3.1	- Curvas granulométricas utilizadas pela empresa A, B e E	40
Figura 3.2	- Curvas granulométricas utilizadas pela empresa C	41
Figura 3.3	- Curvas granulométricas utilizadas pela empresa D	42
Figura 3.4	- Amostra para o ensaio com presença de CAP	45
Figura 3.5	- Amostra ensaiada após a extração de CAP	46
Figura 3.6	- Conjunto de peneiras	47
Figura 3.7	- Compactadora automática de corpos de prova	49
Figura 3.8	- Partícula granular revestida com ligante betuminoso	50
Figura 3.9	- Corpos de prova desmoldados	51
Figura 3.10	- Amostra coletada por sonda rotativa	52
Figura 3.11	- Equipamento de banho maria	53
Figura 3.12	- Prensa Marshall para rompimento dos corpos de prova	53
Figura 3.13	- Medidor de fluência	54
Figura 3.14	- Curva característica do ensaio Marshall	54
Figura 4.1	- Representação gráfica dos resultados referente a empresa A: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios	60
Figura 4.2	- Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa A: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7 e 8; (d) Pontos 9, 10 e 11	62
Figura 4.3	- Representação gráfica dos resultados referente a empresa B: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios	64
Figura 4.4	- Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa B: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7, 8 e 9	67

Figura 4.5	- Representação gráfica das extrações por sonda rotativa referente a empresa B: (a) Espessura da Camada; (b) Densidade em pista; (c) Volume de Vazios; (d) Grau de Compactação	68
Figura 4.6	- Representação gráfica dos resultados referente a empresa C: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios	70
Figura 4.7	- Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa C: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7, 8 e 9; (d) Pontos 10, 11 e 12; (e) Pontos 13,14 e 15; (f) Pontos 16, 17 e 18	73
Figura 4.8	- Representação gráfica das extrações por sonda rotativa referente a empresa C: (a) Espessura da Camada; (b) Densidade em pista; (c) Volume de Vazios; (d) Grau de Compactação	76
Figura 4.9	- Representação gráfica dos resultados referente a empresa D: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios	78
Figura 4.10	- Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa D: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4 e 5	81
Figura 4.11	- Representação gráfica dos resultados referente a empresa E: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios	82
Figura 4.12	- Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa E: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7, 8 e 9	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Classificação dos granulares	27
Tabela 2.2	- Faixas granulométricas do DNIT	31
Tabela 3.1	- Caracterização dos granulares utilizados pelas empresas C e D	37
Tabela 3.2	- Propriedades típicas do CAP 50/70	38
Tabela 3.3	- Propriedades típicas do CAP 30/45	39
Tabela 3.4	- Granulometria dos granulares utilizados pelas empresas A, B e E	40
Tabela 3.5	- Granulometria dos granulares utilizados pela empresa C	41
Tabela 3.6	- Granulometria dos granulares utilizados pela empresa D	42
Tabela 4.1	- Datas das coletas de amostra da empresa A	59
Tabela 4.2	- Datas das coletas de amostra da empresa B	64
Tabela 4.3	- Datas das coletas de amostra da empresa C	70
Tabela 4.4	- Datas das coletas de amostra da empresa D	77
Tabela 4.5	- Datas das coletas de amostra da empresa E	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	- Cimento asfáltico de petróleo
CIRAM	- Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidro meteorologia de Santa Catarina
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CTJ	- Centro Tecnológico de Joinville
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
ES	- Especificação de Serviço
GC	- Grau de Compactação
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
ME	- Método de Ensaio
NTA	- Novas Técnicas de Asfalto
PR	- Paraná
RBV	- Relação Betume/Vazios
SC	- Santa Catarina
SEPUD	- Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
Vv	- Volume de Vazios

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	17
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2.1. Objetivo geral	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	19
1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	21
1.5. RELEVÂNCIA DO TEMA	22
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. ESTRUTURA DO PAVIMENTO	24
2.2. MATERIAIS COMPONENTES DA MISTURA ASFÁLTICA	27
2.2.1. Material granular	27
2.2.2. Ligante betuminoso	28
2.3. PROPRIEDADES GRANULOMÉTRICAS	30
2.3.1. Método por tentativas	31
2.3.2. Método teórico Füller-Talbot	32
2.4. MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	34

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	36
3.1.1. Caracterização dos granulares	36
3.1.2. Caracterização do ligante betuminoso	38
3.1.3. Curvas granulométricas	39

3.2.	MÉTODOS	43
3.2.1.	Considerações iniciais	43
3.2.2.	Ensaio de determinação do teor de betume	44
3.2.3.	Análise granulométrica	46
3.2.4.	Compactação Marshall	48
3.2.5.	Determinação da massa específica aparente	49
3.2.6.	Determinação da estabilidade e fluência	52

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
--------------------------------	-----------

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
-----------------------------	-----------

REFERÊNCIAS	89
--------------------	-----------

APÊNDICE A – IMPERFEIÇÕES OBSERVADAS NAS VIAS	92
--	-----------

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO	97
---	-----------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019) um sistema eficiente e de qualidade com diferentes modais de transporte garante a fomentação do desenvolvimento de um país, visto que é através desse sistema que o deslocamento de cargas e passageiros é realizado. Dentre diferentes modais de transporte disponíveis, o Brasil adota predominantemente o modal rodoviário para tal objetivo. Estima-se que é através do modal rodoviário que 61 % da movimentação de cargas e 95 % da movimentação de passageiros é realizada.

O Sistema Nacional de Viação (SNV, 2021) informa que a malha rodoviária brasileira é de aproximadamente 120 mil km de extensão sendo que aproximadamente 65 mil km são pavimentadas. Para uma atividade tão importante para o setor produtivo do país, é imprescindível que as estradas estejam em adequada condição de uso. O Fórum Econômico Mundial (2019) apresenta que o Brasil ocupa a 116ª posição em um ranking levantado entre 141 países, sendo atribuído para a malha rodoviária brasileira nota 3 em uma escala de 1 para ruim e 7 para bom.

Segundo a Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável de Joinville (SEPUD) (JOINVILLE, 2018), no ano de 2017 o município detinha uma malha viária de aproximadamente 1827 km, sendo que dessas, 50 % possui pavimentação asfáltica. Visto que isso corresponde à metade da malha viária de Joinville, é importante que a mesma tenha qualidade suficiente para garantir a trindade: conforto, segurança e economia.

Para assegurar a qualidade do pavimento é importante o emprego de materiais de qualidade, o dimensionamento adequado, concomitantemente à correta execução de todas as camadas do pavimento, posto que ambos os fatores funcionem em plena harmonia e não analisados isoladamente, a vida útil do pavimento é prolongada e a qualidade garantida. Para tal recomenda-se a consulta e o embasamento em normativas desenvolvidas por órgãos públicos e privados, normalmente mais rigorosos que os públicos. O emprego do controle tecnológico na execução das obras e o acompanhamento posterior contribui para atingir tais objetivos.

Além da qualidade dos materiais empregados e a execução apropriada, a longevidade do pavimento resulta também da formulação adequada da curva granulométrica e do ligante

betuminoso. Por compor a maior parcela da mistura, a adequada composição do esqueleto granulométrico concede a mistura resistência, enquanto o ligante betuminoso dosado ao teor ótimo é responsável pela consistência da mesma (BÚRIGO, 2015).

Outros parâmetros que influenciam na qualidade do pavimento estão fora do controle humano, como a ação do intemperismo devido à chuva e calor proveniente do sol. Segundo Bernucci (2008), a água da chuva que se infiltra no pavimento induz a diminuição da capacidade de suporte. A solicitação recorrente de tráfego de veículos provoca, por consequência, maiores deslocamentos das camadas do pavimento, prejudicando a estrutura. Uma vez que a superfície se encontra trincada, há maior facilidade para a água infiltrar nas camadas mais profundas.

Bernucci (2008) afirma que a temperatura contribui para a degradação do revestimento asfáltico de duas maneiras distintas. Com o aumento da temperatura há a redução da viscosidade do ligante asfáltico, isso faz com que a resistência às deformações permanentes da mistura asfáltica seja reduzida, em contrapartida, com a diminuição da temperatura há a tendência de o concreto asfáltico apresentar trincamentos por retração.

O município de Joinville é conhecido por apresentar temperaturas elevadas ao longo dos anos, bem como grandes quantidades de chuvas. Joinville teve uma média das temperaturas máximas mensais, no período do verão de 29,4 °C, atingido no ano de 2002 uma temperatura máxima de 42 °C (CIRAM, 2012). O município tem clima predominante do tipo mesotérmico, úmido, sem estação seca possuindo umidade relativa média anual do ar de 76,04 % (JOINVILLE, 2017). Diante disso, é importante que, no planejamento e desenvolvimento do pavimento, leve-se em consideração tais características.

Tendo em consideração a avaliação do pavimento, objetivou-se analisar as atuais condições das misturas asfálticas no município de Joinville, Santa Catarina (SC), a partir da coleta de mistura asfáltica solta provenientes de obras públicas de pavimentação no momento da execução e, posteriormente à execução, a coleta de corpos de prova extraídos por sonda rotativa. Dessa forma, a principal contribuição deste trabalho consiste em avaliar a qualidade dos pavimentos implementados no município através do estudo comparativo das propriedades físicas e de parâmetros de dosagem concebida através da metodologia Marshall, com os critérios determinados no projeto.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar comparativamente propriedades físicas e parâmetros de dosagem de misturas asfálticas coletadas e extraídas em campo, com base no projeto de mistura asfáltica a quente.

1.2.2. Objetivos específicos

De modo a alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- ✓ Definir os locais de coleta das misturas asfálticas com base em obras públicas no município de Joinville, Santa Catarina (SC);
- ✓ Compilar as características de projeto das misturas asfálticas coletadas em campo;
- ✓ Determinar as propriedades físicas das misturas asfálticas soltas coletadas em campo;
- ✓ Determinar as propriedades de dosagem conforme parâmetro da metodologia Marshall;
- ✓ Comparar as propriedades físicas e parâmetros de dosagem das misturas asfálticas coletadas em campo com o projeto de dosagem;

1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessário identificar vias públicas que seriam pavimentadas com concreto asfáltico, possibilitando a presença do pesquisador no momento de execução, a fim de realizar a coleta de mistura asfáltica solta e, posteriormente, a extração de corpos de prova através da sonda rotativa, como também a aferição da temperatura de compactação no momento de aplicação da camada de revestimento asfáltico, proporcionando, assim, que a coleta de amostragem seja acompanhada do controle tecnológico.

A coleta das amostras de mistura asfáltica solta ocorreu no momento de execução do revestimento, e foi realizada pelo equipamento de vibra acabadora, por se acreditar que, dessa forma, tanto a coleta quanto a aferição da temperatura, fossem as mais representativas da

condição que seria empregue ao pavimento, preocupando-se em coletar quantidade de material suficiente para executar todos os ensaios previstos.

Para tal objetivo e no intuito de realizar o acompanhamento constante da via executada, inúmeras amostras foram coletadas periodicamente ao longo de toda execução da via, bem como a extração por sonda rotativa em segmentos aonde não foi possível a coleta de mistura asfáltica solta. Dependendo da extensão da via e da necessidade de aferir tais propriedades físicas e parâmetros de dosagem, foram coletadas quantidades de amostras diferentes para cada via.

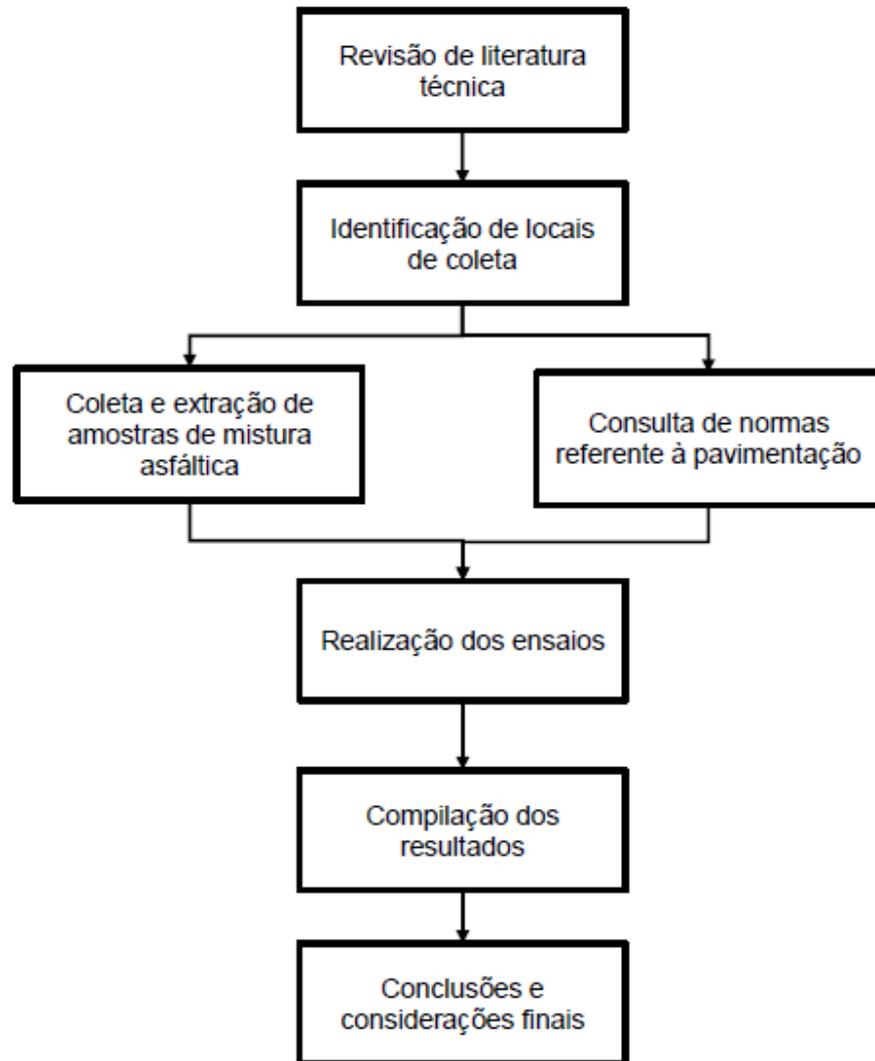
A realização da coleta de amostras de mistura asfáltica, dos estudos laboratoriais, espaço, equipamentos e insumos para o presente trabalho, foi exequível graças à empresa Marcos Trojan Engenharia e Geotecnia Ltda., situada no norte de Santa Catarina, no município de Joinville. A empresa atua em diversas atividades do escopo de engenharia civil, com ênfase no controle tecnológico de obras de pavimentação. Outro colaborador para a realização deste trabalho foi o Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Dado que a execução do revestimento asfáltico ocorreu por diferentes empresas e em vias distintas, faz-se necessário confrontar as propriedades físicas e parâmetros de dosagem das amostras coletadas de mistura asfáltica solta, assim como as amostras extraídas por sonda rotativa, com o projeto executado pela empreiteira. Informações como os materiais empregados e proporções, bem como a destruição granulométrica proposta, podem ser encontradas em tais projetos de mistura asfáltica a quente, servindo como referência para a comparação.

Ensaio laboratoriais foram realizados visando a verificação complementar do desempenho mecânico do material, como: ensaio Marshall, método que determina a estabilidade e fluência de misturas asfálticas usinadas a quente (DNER-ME 043, 1995); determinação do teor de ligante betuminoso; ensaio que define a porcentagem de ligante betuminoso extraído de misturas asfálticas, por meio de extrator centrífugo (DNER-ME 053, 1994); análise granulométrica de misturas de agregados por peneiramento (DNIT-ME 412, 2019); e determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados (DNIT-ME 428, 2020) .

A partir dos resultados obtidos, foi possível confrontar o que foi estabelecido nos projetos, pelas empreiteiras, e a realidade da execução em campo, bem como, estabelecer conclusões e recomendações a respeito do tema pesquisado. Para alcançar os objetivos, neste trabalho foi definido um conjunto de atividades, de acordo com a Figura 1.1.

Figura 1.1 - Esquema de fluxograma para atingir os objetivos da pesquisa.



Fonte: Autor.

1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

As delimitações da pesquisa são derivadas da coleta de amostra da mistura asfáltica *in situ* no município de Joinville/SC em conjunto com procedimentos e interpretações dos resultados executados em laboratório. Entretanto, apesar das amostras serem limitadas a campo, nenhum ensaio *in situ* foi necessário, sendo realizados exclusivamente em laboratório.

A pesquisa foi executada, em parte, no laboratório fornecido pela empresa Marcos Trojan Engenharia e Geotecnia Ltda., o qual dispõe de todos equipamentos e insumos para a realização dos ensaios. Para as demais atividades, servindo como suporte de eventuais ensaios e auxílio da interpretação e tratamento dos dados obtidos, teve-se o LDTPav do CTJ da UFSC,

que colaborou com a pesquisa através de instruções e orientações pertinentes ao andamento da pesquisa.

1.5. RELEVÂNCIA DO TEMA

O modal rodoviário é largamente utilizado com a finalidade de escoar a produção concebida ao longo do país, o que torna plausível presumir que esse modal, dentre outros, ganha relevância nos investimentos de infraestrutura, percebe-se, entretanto, a deficiência do modal rodoviário e a negligência de tais investimentos. Devido a essa precariedade, o modal não é capaz de atender as necessidades de transporte, tornando o Brasil pouco competitivo quando comparado ao mercado exterior (BERNUCCI, 2008).

Com a ausência de tais investimentos, a alternativa para manter o modal rodoviário operante, sendo o principal meio de escoamento da produção, é através da manutenção das vias existentes, entretanto, essa saída apresenta-se ineficaz pelo elevado custo de manutenção e reconstrução precoce das vias. Segundo Bernucci (2008), estima-se que os gastos para tais atividades são da ordem 1 a 2 bilhões de reais por ano.

Com objetivo de contrapor a realidade frustrada do país com relação à infraestrutura das rodovias, evidencia-se que, conhecer as características dos pavimentos e o comportamento dos mesmos promove o prolongamento da vida útil, a redução de constantes manutenções e a eficiência no escoamento da produção, tornando o país mais competitivo no mercado exterior. Para tanto, faz-se necessário o dimensionamento adequado e o emprego de materiais de qualidade na concepção dos pavimentos.

Além do investimento precário, o uso constante de métodos empíricos para a formulação de misturas asfálticas no Brasil, tem contribuído para a ineficiência do pavimento, do que se pode citar a metodologia empírica para compor as curvas granulométricas, que são enquadradas através de tentativas (empirismo), dentro dos limites das faixas estabelecidas pelo DNIT. Segundo Barra (2005), o método empírico tem possibilitado a obtenção, dentre uma determinada faixa granulométrica, diferentes comportamentos de concreto asfáltico.

A displicência na produção do granular fornecido pelas centrais de britagem e peneiramento implicam em frações mal definidas. As discontinuidades das frações dos granulares provocam a oscilação da curva granulométrica entre os limites superiores e inferiores das faixas normatizadas (BARRA, 2005).

Através do controle tecnológico é possível prevenir e/ou mitigar tais problemas. Seja através do âmbito administrativo ou técnico, o controle tecnológico deve garantir que a

execução de tais obras responda às normas de qualidade mínima. É dessa maneira, que a qualidade do pavimento é promovida (DNIT, 2006).

Para responder a essa problemática, esta pesquisa aferiu o cenário das atuais condições do pavimento de Joinville, a fim de avaliar as propriedades físicas e parâmetros de dosagem, por intermédio de análise crítica e técnica. A pesquisa também tenta contribuir com a diminuição de gastos com manutenção de pavimentos e o uso desnecessário de dinheiro público, portanto, colaborar com o uso eficiente dos esforços administrativos para conceber pavimentos de qualidade para a população.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A seguir, é apresentada a estrutura e organização deste trabalho, conforme cada capítulo:

Capítulo 1: apresenta a introdução do trabalho, deixando o leitor a par da problemática levantada, estipulando os objetivos e relevância da temática.

Capítulo 2: discorre sobre a revisão literária acerca do tema proposto, embasando para o desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 3: aborda os materiais e métodos utilizados para a execução da pesquisa.

Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos e respectiva discussão técnica.

Capítulo 5: Baseado nos resultados obtidos, são dadas as considerações finais do estudo, e algumas recomendações para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os temas e definições relacionados aos tópicos de pesquisa, que servirão de embasamento, assim como impulso para o desenvolvimento da mesma. Inicialmente, são discutidos os principais tipos de pavimento executados no Brasil e suas respectivas características, em seguida, são apresentados os materiais componentes das misturas asfálticas, as propriedades granulométricas e diferentes métodos de obtenção de curvas granulométrica e, por fim, as misturas de concreto asfálticas.

2.1. ESTRUTURA DO PAVIMENTO

A estrutura do pavimento é composta por camadas constituídas de diferentes materiais compactados sobrepostos, cada qual exercendo função estrutural e funcional, com o objetivo de transmitir as cargas impostas pelo tráfego às camadas inferiores, possibilitando aos usuários a máxima segurança e conforto utilizando-se do menor custo possível. “O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento.” (BERNUCCI, 2008, p. 337)

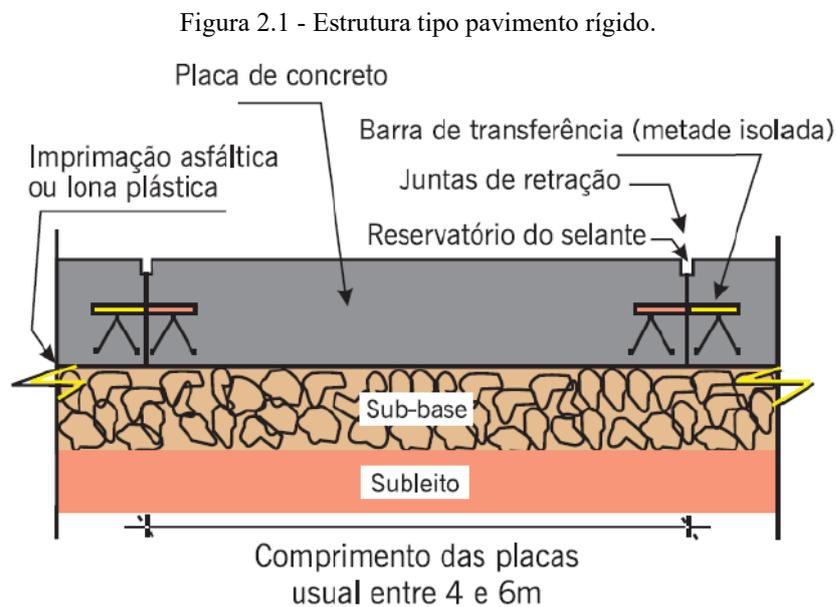
O pavimento, por injunções de ordem técnico-econômico é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato resultando daí um elevado grau de complexibilidade no que respeita ao cálculo de tensões e deformações e atuantes nas mesmas resultantes cargas impostas pelo tráfego. (DNIT, 2006, p. 95).

Segundo Balbo (2007), a estrutura do pavimento deve garantir, a transmissão dos esforços para as camadas inferiores, dissipando a energia para as camadas menos resistentes. Cada camada deve ser dimensionada e concebida para resistir aos esforços que receberão e para que não ocorra processos de ruptura ou danificação de forma prematura. “As cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento acabam por gerar determinadas tensões na estrutura, que muito dependerá do comportamento de cada uma das camadas e dos conjuntos destas.” (BALBO, 2007, p. 35).

De forma geral os pavimentos podem ser categorizados em rígidos e flexíveis. Para Senço (2007), os pavimentos rígidos são aqueles constituídos majoritariamente por concreto de cimento e que apresentam como característica principal a baixa deformabilidade da camada e,

quando sujeitos a esforços que implicam deformações, rompem normalmente por tração na flexão.

Ainda segundo Senço (2007), um pavimento de base rígida dispõe para sua composição de concreto de cimento uma mistura a base de cimento, areia, agregados graúdos e água, obedecendo a dosagem prevista em projeto. Dependendo da necessidade de projeto, um pavimento de concreto de cimento pode ou não apresentar armaduras de transição com barras metálicas. A Figura 2.1 apresenta uma estrutura típica de pavimento rígido a base de concreto de cimento:



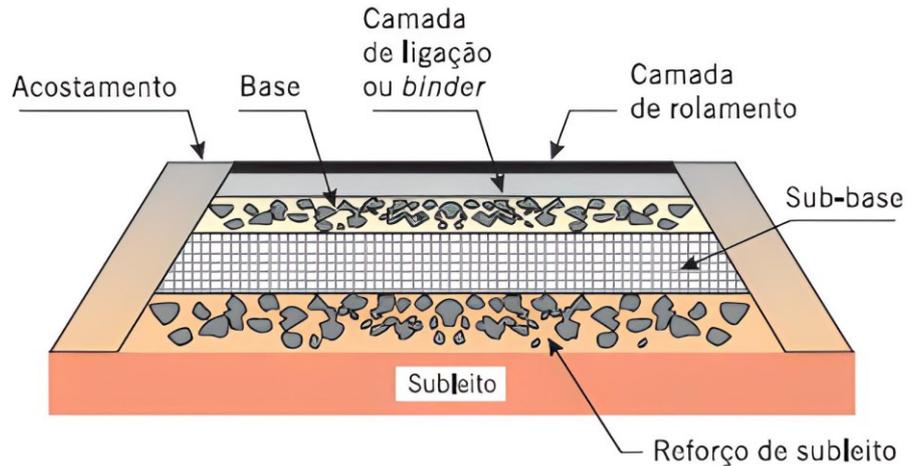
Fonte: Bernucci (2008, p. 10).

Um pavimento também pode ser dito flexível. “Entende-se por pavimento flexível o pavimento que é constituído por uma fina camada superficial, sobreposta a uma camada de base, sub-base assentes sobre o subleito.” (YODER; WITCZAK, 1975, p. 5). Pavimentos flexíveis são caracterizados por apresentarem as camadas mais resistentes quanto mais próximas da superfície. Diferentemente de pavimentos rígidos, a resistência do pavimento flexível ocorre pelo resultado conjunto de todas as camadas, onde devem ser espessas o suficiente para dissipar a carga até o subleito, ao invés de solicitar através de flexão a laje, como ocorre no pavimento rígido (YODER; WITCZAK, 1975).

Senço (2007) estabelece que pavimentos flexíveis são aqueles projetados para resistirem aos esforços de compressão e tração na flexão. Até certo limite conhecido, os esforços não levam ao rompimento do pavimento. Esses esforços são “[...] provocados pelo

aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga.” (SENÇO, 2007, p. 23). A estrutura genérica de um pavimento flexível é apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Estrutura tipo pavimento flexível.



Fonte: Bernucci (2008, p. 10).

Para Thom (2014), cada um dos diferentes tipos de pavimento tem suas vantagens e desvantagens. Como o pavimento rígido e flexível tem características diferentes entre si, é evidente que há também uma diferença na resposta as cargas impostas pelo tráfego, fazendo com que um tipo pavimento responda de maneira mais satisfatório do que outro a depender do tipo de tráfego que solicitará. Um pavimento rígido, por suas características, suporta melhor cargas de tráfego pesadas e praticamente estáticas, por outro lado, o pavimento flexível atende melhor cargas leves com tráfegos mais rápidos.

Como o presente trabalho tem enfoque em pavimentos de concreto asfáltico, anteriormente tratado como flexível, esse tipo de pavimento receberá maior atenção no decorrer da pesquisa.

2.2. MATERIAIS COMPONENTES DA MISTURA ASFÁLTICA

As misturas asfálticas são compostas de um arranjo desejado e adequada de materiais granulares, contendo diferentes tamanhos, formas e origens e de ligante asfáltico, devidamente aquecido e compactado (MOMM, 1998).

De acordo com Bernucci (2008), a combinação apropriada entre os materiais constituintes, garante características ao pavimento como: impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência a derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico.

2.2.1. Material granular

Os granulares utilizados na pavimentação podem ter origem de forma natural ou artificial. Granulares naturais são aqueles que, assim que extraídos da natureza, não necessitam de processos de transformação para seu emprego, como os pedregulhos e os seixos rolados. Granulares que demandam transformações físicas ou químicas, a partir do granular natural, são chamados de artificiais (DNIT 2006). Os agregados (neste trabalho chamados de granulares) podem ser classificados de acordo com a natureza, tamanho e distribuição dos grãos (DNIT 2006), como exemplificado no Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação dos granulares.

Granulares	Natureza	granular natural granular artificial
	Tamanho	granular graúdo granular miúdo granular de enchimento
	Graduação	denso aberto tipo macadame

Fonte: adaptado de Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 78).

Momm (1998) define características fundamentais para a seleção dos materiais granulares, a saber: tamanho e forma do granular, graduação, dureza, sanidade, adesividade, aspereza da superfície e absorção de água pelas partículas.

O tamanho pode ser determinado a partir do peneiramento dos granulares através de uma série de peneiras, gradualmente dispostas numa ordem decrescente de abertura padrão (BARRA, 2005). A forma dos granulares é inerente à rocha-mãe e pode ser modificada através de métodos de britagem, tais características estão relacionadas à boa aderência entre os

granulares, sendo preferencialmente adotados aqueles com forma subangular com superfície áspera (MOMM, 1998).

Pode-se entender dureza do material granular como a característica do mesmo resistir aos esforços de choque ou desgaste provenientes do tráfego, ou ainda, a movimentos de diversas partículas. Essa característica pode ser verificada por ensaios de abrasão Los Angeles (DNIT, 2006). Já a sanidade, é a resistência a degradação química do granular quando imerso ao sulfato de sódio ou de magnésio (BERNUCCI, 2008).

A adesividade é a característica do granular possibilitar a boa aderência ao ligante betuminoso (BARRA, 2005). Essa característica está associada a afinidade química entre ambos materiais. Os granulares originários de rochas basálticas ou calcárias, apresentam maior adesividade quando comparados granulares advindos de gnaisses ou granitos (DNIT 2006).

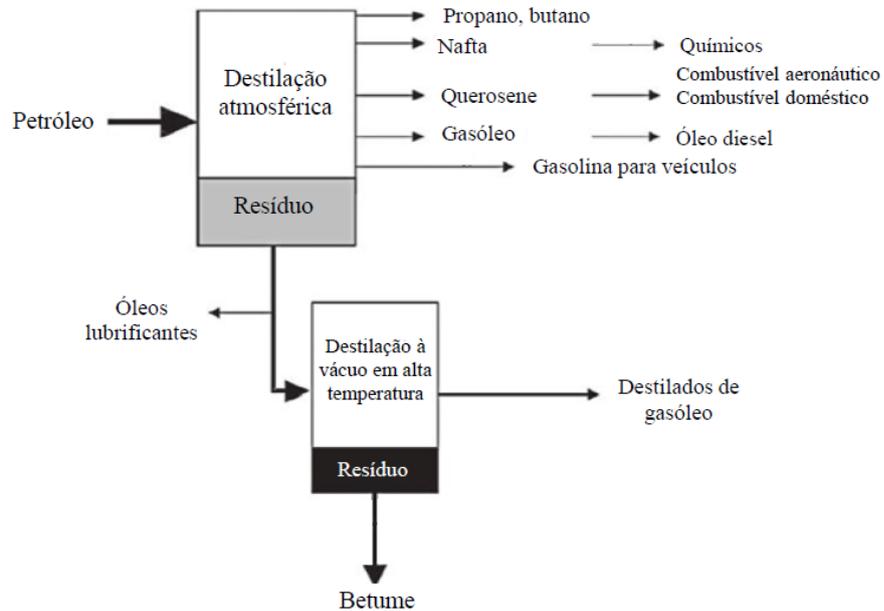
2.2.2. Ligante betuminoso

O ligante betuminoso, também chamado de cimento asfáltico de petróleo (CAP), é responsável por realizar a adesão, através do envolvimento superficial, das partículas granulares (GUERRERO, 2013). Em termos de composição química do ligante betuminoso, pode-se dividir em duas frações, a saber: asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos são compostos aromáticos complexos, de alto peso molecular. A fração de asfaltenos na composição está diretamente relacionada com a propriedade reológica do ligante (NIKOLAIDES, 2015).

Quando o ligante betuminoso contém elevado teor de asfaleno, tem-se, também, elevada resistência à penetração e elevado ponto de amolecimento. Os maltenos, por sua vez, atuam como meio dispersante dos asfaltenos, ou seja, um meio intermicelar coloidal, apresentando comportamento viscoso. Qualquer variação na proporção de asfaltenos e/ou maltenos, impacta nas propriedades de viscosidade e de sensibilidade à temperatura do ligante (NIKOLAIDES, 2015).

O uso frequente do ligante betuminoso para pavimentação justifica-se por apresentar forte adesão entre os granulares, agir como impermeabilizante e apresentar resistência à maioria dos ácidos, álcalis e sais (BERNUCCI, 2008). O ligante betuminoso é obtido diretamente do processo de destilação fracionada do petróleo (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Processo de destilação fracionada do CAP.



Fonte: Highway Engineering Pavements (2015, p. 100, tradução nossa).

Segundo Momm (1998), os ligantes betuminoso são considerados materiais viscoelásticos linear termo susceptível por responderem de maneiras distintas, a depender da temperatura, da frequência e duração da aplicação de carga e podem ser classificados através de ensaios de caracterização e ensaios reológicos.

Os ensaios de caracterização consistem em avaliar as características físicas do ligante através de ensaios de penetração, ponto de amolecimento, envelhecimento e fragilidade. Já os ensaios reológicos procuram caracterizar o ligante através das características intrínsecas do material, a fim de avaliar o desempenho quando aplicados aos pavimentos (MOMM, 1998).

Barra (2005) descreve que, ligantes betuminoso com elevada resistência a penetração estão menos suscetíveis à deformação permanente, enquanto que os que apresentam baixa resistência à penetração oferecem possibilidade de deformação permanente.

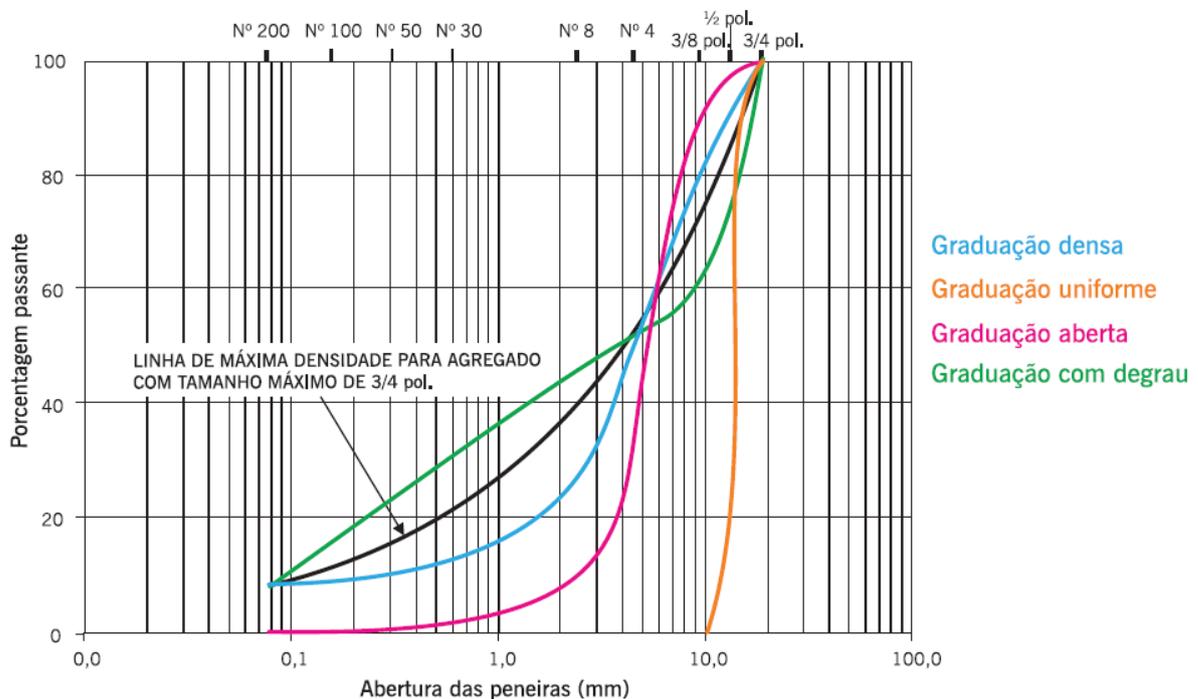
2.3. PROPRIEDADES GRANULOMÉTRICAS

Segundo Guerrero (2013), a composição do esqueleto mineral é atingida através do arranjo de frações granulares com tamanhos nominais mínimos e máximos distintos, sendo que, cada fração granular é caracterizada por uma curva granulométrica própria.

Uma curva granulométrica é dita contínua ou densa, quando há uniformidade na distribuição dos granulares, isto é, frações com diâmetros menores ocupam os vazios deixados por frações de grãos maiores, favorecendo o entrosamento dos mesmos. Por outro lado, uma curva granulométrica descontínua ou aberta, é aquela que as frações granulares que compõe a mistura contêm dimensões similares, não favorecendo o preenchimento gradativo dos vazios deixados pelos grãos maiores (BARRA 2005; SENÇO, 2008).

Bernucci (2008) demonstra, comparativamente, as diferentes graduações das curvas granulométrica mencionadas no parágrafo acima, incluindo ainda uma distribuição uniforme e outra com degrau. A Figura 2.4 evidencia tais diferenças.

Figura 2.4 - Comparativo das diferentes graduações granulométricas.



Fonte: Bernucci (2008, p. 123).

Há diferentes maneiras para obtenção da composição do esqueleto mineral, entretanto, este trabalho será limitado ao método por tentativas e o método teórico Fuller-Talbot (SENÇO, 2008).

2.3.1. Método por tentativas

A composição da curva granulométrica por este método é concebida por meio de tentativas na qual cada fração granular irá compor. Através da granulometria de cada material constituinte da mistura, é realizado um ajuste nos percentuais de cada fração para enquadrá-las nas faixas normatizadas (BARRA, 2005).

A escolha da curva granulométrica dependerá de vários fatores, dentre os quais a função da mistura em campo (GUERRO, 2013), sendo assim, busca-se enquadrar a mistura em uma faixa granulométrica que atenda as especificações. Para tanto, o DNIT estabelece através da especificação de serviço DNIT-ES 031 (2006) os limites de cada faixa granulométrica. Os limites podem ser visualizados na Tabela 2.2.

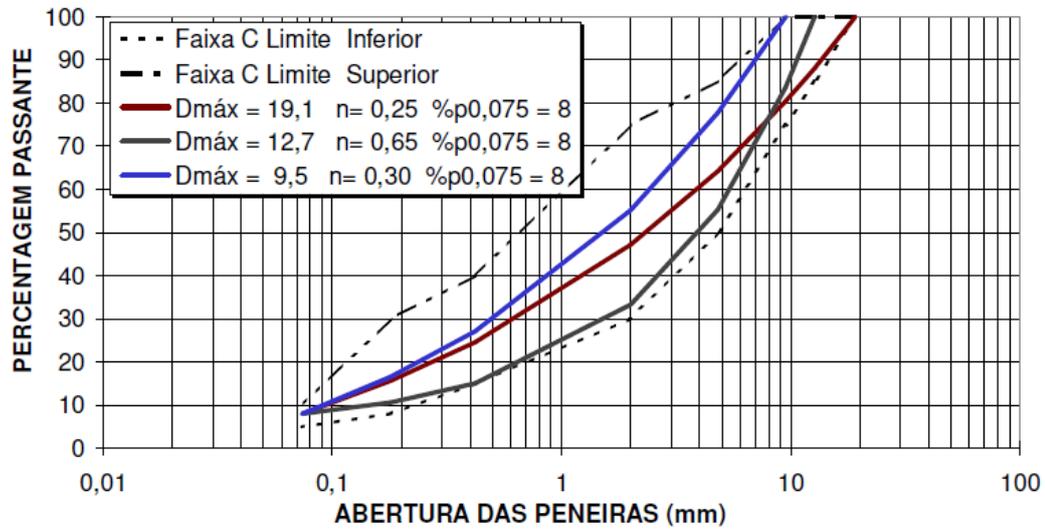
Tabela 2.2 - Faixas granulométricas do DNIT.

Peneira de malha		% em massa, passando			Tolerâncias
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%

Fonte: adaptado de DNIT 031/2006 -ES (2006, p. 5).

Momm (1998) demonstra (Figura 2.5), que a partir dos limites estabelecidos pelo DNIT para as faixas granulométricas, diferentes curvas podem ser enquadradas em uma mesma faixa, neste caso, tomando a faixa C do DNIT como exemplo. Isto pressupõe que, misturas com diferentes comportamentos mecânico podem ser empregadas para a mesma condição de carregamento, não atendendo de maneira satisfatória as condições impostas pelo tráfego.

Figura 2.5 - Variações do tamanho máximo do granular em uma mesma faixa granulométrica.



Fonte: Momm (1998, p. 58).

Embora a curva possa satisfazer a especificação determinada pelo DNIT, a oscilação entre o limite superior e inferior da faixa especificada, indica um material mal distribuído (SENÇO, 2008). Barra (2005) destaca que, a qualidade da curva granulométrica está relacionada ao granular que é comercializado pelas centrais de britagem e peneiramento, fornecendo frações mal definidas. A alternância dos limites superiores e inferiores nas faixas, pode ser explicada pela descontinuidade dos diâmetros dos granulares, pois prejudica o arranjo das frações granulométricas que visam uma curva contínua, sendo assim, a escolha para determinar a composição de uma curva granulométrica por este método, apresentasse um tanto quanto precária.

2.3.2. Método teórico Füller-Talbot

Através do método teórico Füller-Talbot, pode-se determinar com maior assertividade as frações granulares que irão compor a mistura asfáltica, a partir da determinação prévia do percentual de material passante na peneira de menor diâmetro e do diâmetro máximo do grão (BARRA, 2005). A definição precisa das frações constituintes da curva granulométrica, assegura ao esqueleto mineral, o preenchimento gradativo dos vazios formados pelos granulares de maior dimensão (BARRA, 2009).

A Equação (1), determina o percentual de cada fração constituinte da mistura asfáltica.

$$\%p = a \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

Em que:

$\%p$ – percentagem em peso que passa na peneira de abertura d ;

a – Constante, tomada igual a 100;

d – Abertura de peneira, dada em mm;

D – Diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100%, dada em mm;

n – expoente obtido pela Equação (2).

$$n = \frac{\log(\%p_{200}) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (2)$$

Em que:

n – expoente indicador de graduação da curva granulométrica;

$\%p_{200}$ – percentagem de material passante na peneira de nº 200;

d – Abertura da peneira de menor diâmetro da série utilizada;

D – Diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100%, dada em mm.

Segundo o DNIT (2006), a graduação da curva granulométrica pode ser classificada como:

- Granulares de graduação densa: $0,35 < n \leq 0,55$;
- Granulares de graduação aberta: $0,55 < n \leq 0,75$;
- Granulares tipo macadame: $D \cong 2d$; $n \cong 1,0$

Momm (1998) menciona que, o granular de maior dimensão pode ser identificado de duas formas distintas. Tal processo se dá através do tamanho máximo, que corresponde a menor abertura de peneira na qual passa 100 % do material e também do tamanho nominal máximo, correspondente à maior abertura de peneira que retém algum material, geralmente limitado ao máximo de 10 %.

Por meio do método racional, onde previamente determina-se a porcentagem passante na peneira de menor e de maior dimensão, é possível a obtenção de curvas granulométricas contínuas (BARRA, 2005). Ao contrário do método de tentativas, onde procura-se enquadrada a curva granulométrica em faixas estabelecidas pelo DNIT, o método racional não exige impõe

tal enquadramento, pois já dispões de diâmetros bem definidos ao longo da composição granulométrica (BÚRIGO, 2015), sendo assim, o emprego deste método para a determinação das curvas granulométricas mostra-se mais interessante quando comparado ao método anterior.

2.4. MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

As misturas de concreto asfáltico podem ser definidas como a combinação de granulares de diferentes tamanhos e formas, organizados de acordo com a função das propriedades previstas, com o cimento asfáltico de petróleo (CAP), que envolve os granulares e favorece a adesão (GUERRERO, 2013), é permitido também, quando conveniente, o uso de aditivos em proporções adequadas (BARRA, 2005). As misturas de concreto asfáltico podem desempenhar as funções de revestimento, camada de ligação e camada de regularização ou reforço do pavimento (DNER-ES 313/97, 1997).

A agregação dos granulares ocorre com o envolvimento ao ligante asfáltico, normalmente em altas temperaturas. Quando o ligante asfáltico é aquecido, apresenta baixa viscosidade e propicia maior facilidade para aderir à superfície do granular, criando uma película aderente (GUERRERO, 2013).

Segundo Yoder (1975), a superfície de rolamento do pavimento deve prover para o usuário tráfego seguro e confortável, além de resistir aos esforços solicitantes de carregamento e descarregamento, assim como deformação permanente. O tipo de superfície empregada está associado ao tipo de carregamento esperado, como também aos materiais disponíveis para o emprego e fatores econômicos.

O desempenho de um concreto asfáltico em um pavimento pode ser otimizado através das propriedades desejáveis das misturas de concreto asfáltico: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência mecânica, à fadiga, à deformação plástica e à derrapagem (aderência), impermeabilidade e trabalhabilidade. (MOMM, 1998, p. 54).

Para Bernucci (2008) o comportamento da mistura asfáltica está fortemente associado com a resposta à temperatura, sendo assim um material dito termo viscoelástico. Em baixas temperaturas, a viscosidade do ligante é elevada e dificulta o deslocamento das moléculas em relação às outras, fazendo com que a mistura asfáltica se comporte como um sólido. Em contrapartida, em elevadas temperaturas as moléculas podem deslocar-se umas em relação às outras, uma vez que há redução da viscosidade, fazendo com que o asfalto se comporte como um líquido.

Guerrero (2013) afirma que, nas misturas asfálticas, cada procedimento executado necessita do adequado emprego de temperatura. Dessa forma, pode-se diferenciar três níveis de temperatura: temperatura adequada à trabalhabilidade, temperatura de amolecimento do CAP e a temperatura que estará submetida no pavimento.

O comportamento das misturas asfálticas pode ser complexo de ser previsto, por herdar do ligante betuminoso, características sensíveis à temperatura e aplicação de carga solicitante. Devido ao comportamento viscoelástico, torna-se difícil generalizar o comportamento da mistura asfáltica, uma vez que responde de forma distinta para cada combinação de temperatura e aplicação de carga, portanto, algumas variáveis podem ser hipoteticamente constantes (BARRA, 2009; GUERRERO 2013). A seguir são apresentadas as três variáveis que podem ser ditas constantes.

A linearidade da mistura asfáltica é dita como constante na esfera das pequenas deformações (BARRA, 2009). É possível compreender o comportamento da mistura asfáltica numa solicitação de carregamento composta de um conjunto de pequenas solicitações, somando a resposta da mistura asfáltica a cada uma das solicitações individuais (MOMM, 1998).

Uma mistura asfáltica pode ser considerada homogênea, em uma perspectiva macroscópica, para simplificação da investigação do comportamento. A interação da composição do esqueleto mineral, o modo e intensidade da aplicação da carga e do tipo de compactação, torna complexa a formulação de um modelo matemático para descrever com precisão a heterogeneidade da mistura (GUERRERO, 2013).

O concreto asfáltico exibe comportamento anisotrópico devido ao espalhamento do material e a consecutiva compactação em campo, gerando gradientes de densidades no sentido da espessura da camada. Os granulares de maiores dimensões tendem a se alojar na base da camada. Com a geração do gradiente de densidade, torna-se complexo a compreensão do comportamento, para tanto, simplifica-se o material como isotrópico. A isotropia é a condição na qual o material assume a mesma característica independente da direção (BARRA, 2009).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve os materiais e procedimentos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Por se tratar de materiais utilizados pelas empreiteiras para a execução de suas respectivas obras em vias públicas, os materiais apresentados neste capítulo são referentes aos dados fornecidos em projeto das mesmas, sendo que essas, preocuparam-se em realizar os ensaios que julgaram ser necessários para caracterizar os materiais. Além disso, é de interesse apresentar desde a coleta e obtenção das amostras, bem como o desenvolvimento de ensaios laboratoriais para obtenção das propriedades físicas e parâmetros de dosagem.

No decorrer da pesquisa, foram omitidos propositalmente o nome das empreiteiras e o nome das ruas em que ocorreram os serviços, para garantir o sigilo necessário à não exposição das empresas, que gentilmente cederam os seus dados para esta pesquisa.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1. Caracterização dos granulares

De forma a caracterizar os materiais granulares utilizados na mistura asfáltica, faz-se necessário apresentar os materiais utilizados para as diferentes empresas, em virtude de, possuírem origens distintas umas das outras. As empresas denominadas com A, B e E, apresentam a mesma origem de seu material granular e diferenciam das empresas C e D. O material granular, do primeiro grupo de empresas, é proveniente de rocha basáltica, na qual apresenta boa característica para a composição da mistura asfáltica, posto que, possui maior afinidade química, em forma de adesividade, com o ligante betuminoso, quando comparada ao gnaïsse (DNIT, 2006).

Entretanto, as empresas não disponibilizaram em seus respectivos projetos, as propriedades dos granulares utilizados. Tal fato, pode servir de exemplo, para perceber as limitações que o controle tecnológico encontra com os dados fornecidos pelas empresas fiscalizadas.

Apesar das empresas denominadas como C e D apresentarem projetos distintos, a origem do material granular é a mesma, sendo oriundo de rocha gnaïsse. A adesividade do material com o ligante betuminoso apresenta-se como insatisfatório, visto que existe menor

afinidade entre os materiais (DNIT 2006). Diferentemente das empresas anteriores, as empresas C e D apresentam em seus respectivos projetos a caracterização de seus granulares. A Tabela 3.1 apresenta os resultados.

Tabela 3.1 - Caracterização dos granulares utilizados pelas empresas C e D.

Ensaio	Normativa	Resultado
Desgaste por Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98 e DNER-ME 037/97	11,40 %
Resistência ao Ataque Químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/94 e DNER-ME 037/97	3,04 %
Adesividade ao Ligante Betuminoso (sem dope)	DNER-ME 078/94	Insatisfatório
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97	61,50 %
Massa Específica Real de Material Finamente Pulverizado	DNER-ME 085/94	2,721 g/cm ³
Densidade Real do Agregado Miúdo	DNER-ME 084/95	2,719 g/cm ³
Densidade do Agregado Graúdo		-
Aparente (Apparent Specific Gravity)	DNER-ME 081/98	2,725 g/cm ³
Real (Bulk Specific Gravity)		2,765 g/cm ³
Absorção	DNER-ME 081/98	0,52 %

Fonte: Autor.

Apresentada a caracterização do material granular utilizado pelas empresas C e D, pode-se aferir que, de acordo com a normativa DNER-ME 037 (1997), estipulado no item 7.1.3, o valor obtido no ensaio de Desgaste Abrasão Los Angeles, encontra-se abaixo do limite máximo admissível, condicionado pela norma, pois o mesmo apresentou perda inferior a 50 % do material. Pode-se julgar também, que a durabilidade do material ensaiado, encontra-se abaixo do limite máximo de 12 %, condicionado pela normativa DNER-ME 37 (1997), conforme o item 7.1.5. Todavia, a adesividade do granular, proveniente da rocha gnaisse, apresentou deslocamento da película de ligante betuminoso para a amostra sem a adição de dope, entretanto, a adesividade do material granular pode ser melhorada com a adição de a partir 0,5 % de dope, tornando o granular satisfatório para o emprego especificado.

3.1.2. Caracterização do ligante betuminoso

Similarmente ao material granular, faz-se necessário a caracterização do ligante betuminoso utilizado nos projetos das empreiteiras. O ligante betuminoso utilizado pelas empresas A, B e E foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 produzido pela refinaria NTA (Novas Técnicas de Asfalto), com sede em São Paulo/SP, mas distribuído à região sul do país pela filial em Araucária/PR. A distribuidora adverte que o CAP 50/70 não deve ser aquecido acima de 177 °C, devendo ser respeitada a temperatura ideal de emprego obtida no ensaio de viscosidade e temperatura. O aquecimento acima do valor especificado pode contribuir para o craqueamento do material. Recomenda-se, também, a não aplicação em dias de chuva e/ou superfícies molhadas, bem como, em temperaturas ambientes inferiores a 10 °C. Os parâmetros de caracterização do ligante betuminoso são encontrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades típicas do CAP 50/70.

Características	Unidade	Métodos		Especificação
		ABNT	ASTM	CAP 50-70
Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)	0,1mm	NBR 6576	D 5	50 - 70
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	D 36	46
Viscosidade Saybolt Furol				
a 135 °C, mín.	SSD	NBR 14950	E 102	141
a 150 °C, mín.				50
a 177 °C				30-150
Viscosidade Brookfield				
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín.	cP	NBR 15184	D 4402	274
a 150 °C, SP 21, mín.				112
a 177 °C, SP 21				57-285
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-	-	-1,47
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR 11341	D 92	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	NBR 14855	D 2042	99,5
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	NBR 6293	D 113	60
Varição em Massa, máx.	%	-	D 2872	0,5
Ductilidade a 25 °C, mín.	-	NBR 6293	D 113	20
Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR 6560	D 36	8
Penetração retida, mín.	%	NBR 6570	D 5	55

Fonte: NTA (2015).

O ligante betuminoso utilizado pelas empresas C e D foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30/45, produzido pela refinaria GRECA Asfaltos, com unidades de distribuição a serviço da região sul, em Araucária/PR, Cascavel/PR e em Esteio/RS. Os parâmetros de caracterização do ligante betuminoso são encontrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedades típicas do CAP 30/45.

Características	Unidade	Métodos		Especificação
		ABNT	ASTM	CAP 30-45
Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)	0,1mm	NBR 6576	D 5	30 - 45
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	NBR 6560	D 36	52
Viscosidade Saybolt Furol				
a 135 °C, mín.	SSD	NBR 14950	E 102	192
a 150 °C, mín.				90
a 177 °C				40 - 150
Viscosidade Brookfield				
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín.	cP	NBR 15184	D 4402	374
a 150 °C, SP 21, mín.				203
a 177 °C, SP 21				76 - 285
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-	-	-0,94
Ponto de Fulgor, mín.	°C	NBR 11341	D 92	235
Solubilidade em Tricloroetileno, mín.	% massa	NBR 14855	D 2042	99,5
Ductilidade a 25 °C, mín.	cm	NBR 6293	D 113	60
Varição em Massa, máx.	%	-	D 2872	0,5
Ductilidade a 25 °C, mín.	-	NBR 6293	D 113	10
Aumento do Ponto de Amolecimento, máx.	°C	NBR 6560	D 36	8
Penetração retida, mín.	%	NBR 6570	D 5	60

Fonte: Greca Asfaltos (2005).

3.1.3. Curvas granulométricas

Outra importante informação na concepção do projeto das empreiteiras, é a composição granulométrica utilizada na mistura asfáltica. Todas as empresas, optaram por conceber a curva granulométrica pelo método das tentativas, conforme apresentado previamente no item 2.3.1. As Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam os materiais adotados para compor a curva granulométrica, as porcentagens de cada material empregue, bem como suas respectivas granulometrias individuais e também a curva granulométrica resultante obtida para a concepção da mistura asfáltica.

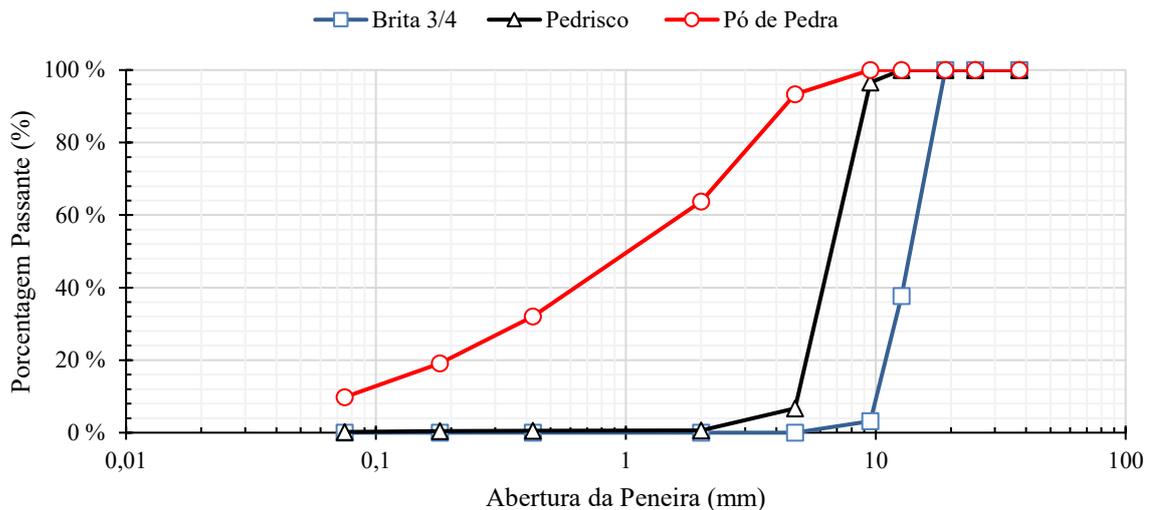
A Tabela 3.4 exibe a granulometria dos granulares utilizados pelas empresas A, B, E e a Figura 3.1, as curvas granulométricas respectivas. As empresas projetaram uma curva granulométrica caracterizada pela Faixa C do DNIT, conforme a Tabela 2.2, onde se apresenta os limites superiores e inferiores da faixa. A faixa de especificação, compreendida dentro dos limites da Faixa C do DNIT, também é vista na Tabela 3.4. Os pavimentos das respectivas empresas receberam somente a camada de rolamento.

Tabela 3.4 – Granulometria dos granulares utilizados pelas empresas A, B e E.

Material	Brita 3/4	Pedrisco	Pó de Pedra	Total	Especificação	
					Inferior	Superior
% Constituinte	15 %	25 %	60 %	100 %	% Passante	
Pol.	mm	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante	
1 1/2	37,5	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
1	25	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
3/4	19	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
1/2	12,7	37,7 %	100 %	100 %	80 %	100 %
3/8	9,5	3,2 %	96,6 %	100 %	70 %	90 %
Nº 4	4,75	0 %	6,7 %	93,3 %	44 %	72 %
Nº 10	2	0 %	0,6 %	63,7 %	22 %	50 %
Nº 40	0,425	0 %	0,5 %	32,0 %	8 %	26 %
Nº 80	0,18	0 %	0,4 %	19,1 %	4 %	16 %
Nº 200	0,075	0 %	0,2 %	9,8 %	2 %	10 %

Fonte: Autor.

Figura 3.1 - Curvas granulométricas utilizadas pela empresa A, B e E.



Fonte: Autor.

Similar à Tabela 3.4 e a Figura 3.1, os mesmos parâmetros são apresentados para a empresa C na Tabela 3.5 e Figura 3.2. É de interesse ressaltar, a presença de cal na composição

da curva granulométrica. Conforme exposto no item 3.1 e constatado na Tabela 3.5, por apresentar insatisfatória condição de adesividade ao ligante betuminoso, herança proveniente da rocha gnaíse, a adição da cal procura melhorar a adesividade do granular (BERNUCCI, 2008).

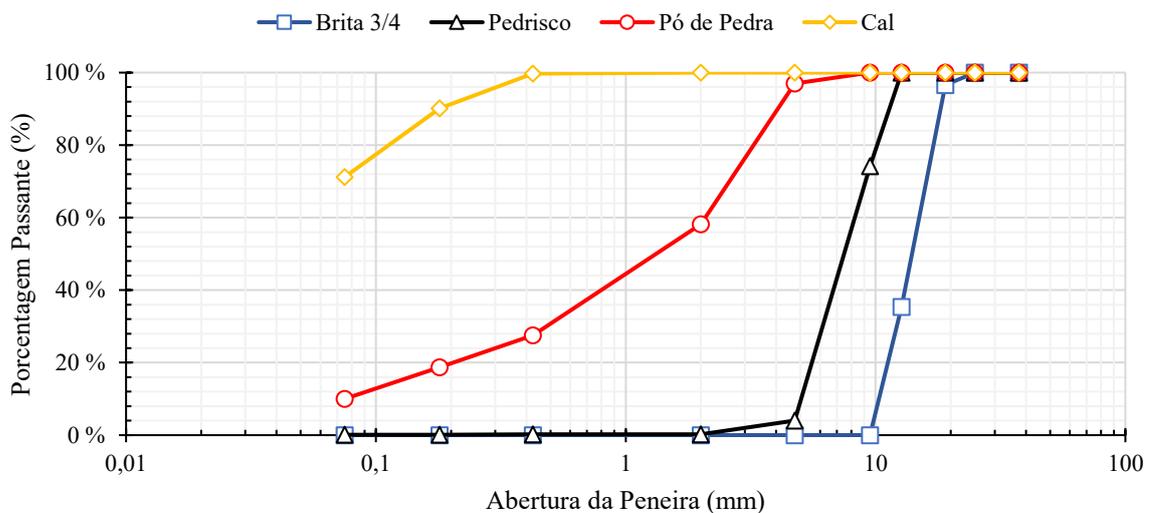
A empresa C procurou caracterizar a curva granulométrica, dentro dos limites de Faixa B do DNIT, conforme a Tabela 2.2. O pavimento recebeu primeiramente a camada de ligação com a faixa mencionada e posteriormente, em uma etapa fora do alcance desta pesquisa, irá receber camada de rolamento.

Tabela 3.5 - Granulometria dos granulares utilizados pela empresa C.

Material	Brita 3/4	Pedrisco	Pó de Pedra	Cal	Total	Especificação	
						Inferior	Superior
% Constituinte	20 %	25 %	54 %	1 %	100 %	% Passante	
Pol. mm	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante		
1 1/2	37,5	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
1	25	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
3/4	19	96,6 %	100 %	100 %	100 %	92,3 %	99 %
1/2	12,7	35,4 %	100 %	100 %	100 %	80,1 %	94,1 %
3/8	9,5	0 %	74,2 %	100 %	100 %	66,6 %	80,6 %
Nº 4	4,75	0 %	4,0 %	97,0 %	100 %	49,4 %	59,4 %
Nº 10	2	0 %	0,2 %	58,2 %	100 %	27,4 %	37,4 %
Nº 40	0,425	0 %	0,2 %	27,5 %	99,7 %	10,9 %	20,9 %
Nº 80	0,18	0 %	0,1 %	18,7 %	90,1 %	8 %	14 %
Nº 200	0,075	0 %	0,1 %	10 %	71,2 %	4,1 %	8,1 %

Fonte: Autor.

Figura 3.2 - Curvas granulométricas utilizadas pela empresa C.



Fonte: Autor.

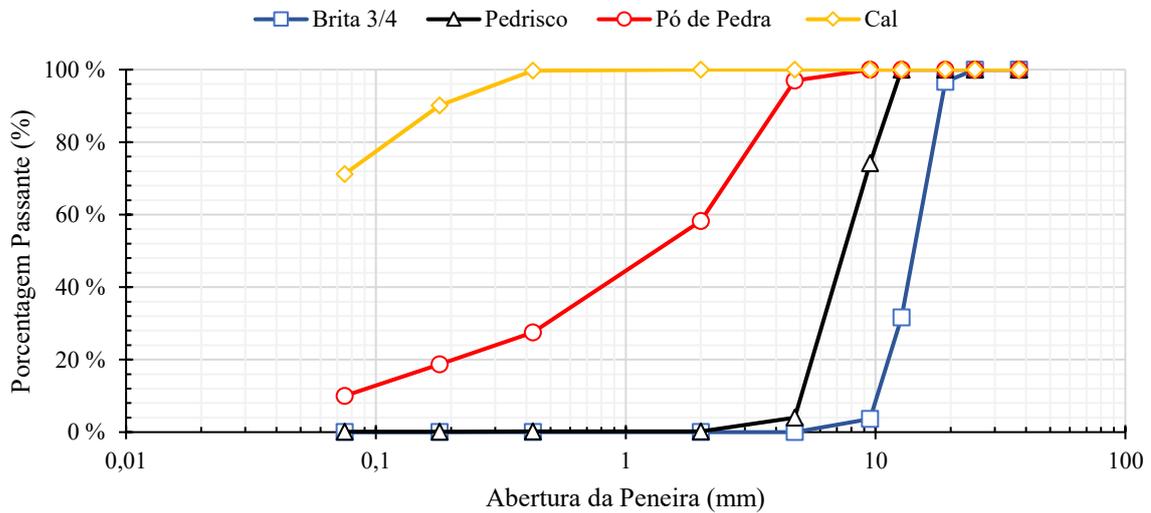
A Tabela 3.6 e o Figura 3.3 exibem os mesmos parâmetros para a empresa D. Da mesma forma que a empresa C, a empresa D também faz o emprego da cal na sua composição granulométrica, com o intuito de ser um melhorador de adesividade. A empresa D procurou caracterizar a curva granulométrica, dentro dos limites de Faixa C do DNIT, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 3.6 - Granulometria dos granulares utilizados pela empresa D.

Material % Constituinte	Brita 3/4 0 %	Pedrisco 49 %	Pó de Pedra 50 %	Cal 1 %	Total 100 %	Especificação	
						Inferior	Superior
Pol.	mm	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante	
1 1/2	37,5	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
1	25	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
3/4	19	96,6 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
1/2	12,7	31,6 %	100 %	100 %	100 %	93 %	100 %
3/8	9,5	3,6 %	74,2 %	100 %	100 %	80,4 %	94,4 %
Nº 4	4,75	0 %	4,0 %	97,0 %	100 %	51,46 %	56,5 %
Nº 10	2	0 %	0,2 %	58,2 %	100 %	30,20 %	35,2 %
Nº 40	0,425	0 %	0,2 %	27,5 %	99,7 %	14,85 %	9,9 %
Nº 80	0,18	0 %	0,1 %	18,7 %	90,1 %	10,30 %	7,4 %
Nº 200	0,075	0 %	0,1 %	10 %	71,2 %	5,76 %	7,7 %

Fonte: Autor.

Figura 3.3 - Curvas granulométricas utilizadas pela empresa D.



Fonte: Autor.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Considerações iniciais

Com o objetivo de aferir as propriedades físicas e parâmetros de dosagem das misturas asfálticas empregues em obras públicas, executadas no município de Joinville/SC, foram realizados os ensaios de teor de betume, granulometria da mistura, determinação da massa específica aparente, compactação da mistura asfáltica, rompimento para a determinação da estabilidade e fluência. Todos os procedimentos e ensaios, salvo as coletas de amostras, foram realizados no laboratório de asfalto da empresa Marcos Trojan Engenharia e Geotecnia Ltda., sendo que, a metodologia Marshall foi utilizada para aferir tais parâmetros.

Desenvolvida por Bruce Marshall, no decorrer da segunda Guerra Mundial, a metodologia Marshall é um procedimento para definir a proporção ideal entre granular e ligante betuminoso, capaz de resistir as cargas impostas e oferecer a máxima estabilidade frente ao carregamento (BERNUCCI, 2008). Esse método ainda é amplamente utilizado no Brasil e é regido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNER-ME 043, 1995).

As atividades experimentais foram divididas em várias etapas a fim de obter resultados que contribuam para os objetivos da pesquisa. A primeira etapa foi caracterizada como a coleta de amostra. Nessa etapa, fez-se a divisão entre as coletas de mistura asfáltica solta e a coleta feita via extração por sonda rotativa.

A coleta de amostra da mistura asfáltica solta ocorreu no mesmo momento da pavimentação das ruas, preocupando-se em coletar o material proveniente do equipamento de vibro acabadora, procedimento que se constatou ser o mais representativo possível do material empregado na execução. Tal precaução apresentou-se como a mais coerente, visto que essa etapa antecede o lançamento e distribuição da mistura asfáltica solta no pavimento e o equipamento de vibro acabadora homogeneiza o material para tal atividade. Outro motivo para a coleta acontecer dessa maneira, deveu-se ao fato de aferir a temperatura exata de aplicação da mistura asfáltica no pavimento e confrontar com a temperatura de compactação estabelecida em projeto.

A obtenção de amostras por sonda rotativa, quando necessária para complementar os demais ensaios, aconteceu em pontos previamente determinados. A extração dos corpos de provas foi realizada com um equipamento móvel disposto de um cilindro giratório, normalmente com 100 mm de diâmetro, capaz de perfurar as camadas do pavimento. Este equipamento deve ser alimentado por uma fonte de energia e por um sistema hidráulico, normalmente galões de água e mangueiras, com objetivo de resfriar o cilindro giratório com

ponta diamantada no momento de perfuração das camadas. A investigação pelo método de sondagem rotativa traz como benefício preliminar, a avaliação visual da qualidade do pavimento. Ainda que de forma qualitativa, a análise visual pode proporcionar a avaliação da condição do ligante betuminoso, ou seja, o grau de envelhecimento, a presença de vazios nas camadas asfálticas, a profundidade de fissuras propagadas, evidenciar a falta de ligação entre as camadas e principalmente, aferir a espessura de cada camada do pavimento (PEARSON, 2012; THOM, 2014).

Os procedimentos e métodos de ensaios, citados no primeiro parágrafo e realizados nas atividades experimentais serão descritos nos itens subsequentes.

3.2.2. Ensaio de determinação do teor de betume

O ensaio de determinação do teor de betume consiste em aferir o percentual de CAP presente na mistura asfáltica. É um ensaio importante no controle tecnológico, pois qualquer mínima variação, fora dos limites estabelecidos em projeto, comprometerá a qualidade do pavimento executado. O procedimento de execução do ensaio, embora simples, é sensível, pois a eventual perda de material no decorrer do ensaio, pode contribuir para a falta de precisão do resultado final do ensaio.

Inicialmente, foi preparada a mistura asfáltica solta, previamente coletada em campo, inserindo-a em estufa por aproximadamente uma hora, submetendo-a a uma temperatura de 100 °C a 120 °C. A quantidade de amostra a ser ensaiada deve ser pesada previamente e colocada no prato de extração, sendo que, é comumente ensaiado aproximadamente 1200 gramas de amostra. Em seguida, o prato extrator é colocado no interior do equipamento centrifugo, conforme a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Amostra para o ensaio com presença de CAP.



Fonte: Autor.

Numa próxima etapa do ensaio, foi inserido o filtro de papel e a tampa do prato extrator e fixado firmemente ao conjunto, com a finalidade de garantir, no processo subsequente de extração, que não haja perda de material fino presente na amostra. Posteriormente, foi adicionado à amostra o solvente tricloroetileno até que cobrisse por completo a mesma e então, aguardou-se 15 minutos para que o solvente dissolva o CAP, conforme estipula a normativa DNER-ME 053 (1994).

Passado o tempo de reação do solvente, o aparelho foi acionado e o prato de extração rotaciona, aumentando gradativamente a velocidade para a extração do CAP presente na amostra. Quando a primeira quantia de solvente adicionada a amostra for completamente escoada do equipamento, desligou-se o mesmo e esperou o final da rotação.

Uma nova quantia de solvente foi novamente adicionada à amostra. A DNER-ME 053(1994) recomenda a adição de 150 ml de solvente a cada nova extração. Esse procedimento foi repetido até que o solvente adicionado, fosse escoado do conjunto com a mesma coloração de quando foi adicionado, isso significa que todo o betume contido na amostra foi extraído com sucesso, restando apenas o material granular. A Figura 3.5 exemplifica o aspecto da amostra, agora contendo somente material granular, presente no prato extrator após a extração do CAP.

Figura 3.5 - Amostra ensaiada após a extração de CAP.



Fonte: Autor.

Todo o material granular contido no prato extrator, bem como o aderido ao filtro de papel no decorrer do ensaio, foi transferido a um recipiente capaz de ser aquecido em estufa. Devendo-se tomar a precaução de que todo o material contido no prato e no filtro, fosse transferido, visto que, a mínima perda de material compromete o valor exato de CAP presente na amostra, prejudicando a confiabilidade do ensaio.

Consecutivamente, a amostra de material granular foi levada à estufa a uma temperatura em torno de 100 °C, para que toda a umidade e resquício do solvente seja evaporado. O granular recuperado, depois de seco em estufa, foi então pesado novamente para a obtenção do teor de betume presente na amostra ensaiada. O teor de betume, pode ser calculado como a razão entre o peso de betume extraído sobre o peso de amostra inicial ensaiado, multiplicando por cem.

3.2.3. Análise granulométrica

Este ensaio, tem por objetivo determinar a composição granulométrica do granular graúdo, bem como do granular miúdo, presente na mistura asfáltica solta, através do peneiramento da amostra, cumprindo as exigências presentes na norma DNIT-ME 411 (2019). Para a realização do ensaio, foi utilizado o material granular recuperado do ensaio de determinação do teor de betume, citado no item 3.2.2. Em uma primeira etapa, fez-se a extração

do CAP da amostra e reaproveitou-se, o material granular, para suceder com o ensaio de granulometria. Não é uma exigência da normativa DNIT-ME 411 (2019) reutilizar o material recuperado, entretanto a possibilidade de realizar desta maneira, confere a amostra maior informação para a caracterização. Dessa forma, a precaução de transferir todo o material do prato extrator do ensaio anterior para um recipiente, faz-se aqui também, importante para a precisão do resultado de análise granulométrica.

O ensaio consiste em passar o material por uma série de peneiras, determinadas pela norma referente e registrar a massa de material contido em cada abertura de peneira. Inicialmente, deve-se pesar a quantidade de material a ser ensaiada, como mencionado, a mesma quantidade de material granular recuperado do ensaio anterior, é agora ensaiada para a granulometria, devendo então, estes valores de massa coincidirem.

A amostra foi, então, transferida para o conjunto de peneiras, certificando-se de estar presente o fundo e tampa do mesmo. A distribuição das peneiras, acontece de forma decrescente de abertura de malha, respeitando a sequência: 50,0 mm; 37,50 mm; 25,0 mm; 19,0 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,0 mm; 0,42 mm; 0,18 mm e 0,075 mm, conforme apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Conjunto de peneiras.



Fonte: Autor.

Preferiu-se realizar a agitação do conjunto de peneiras de forma manual, porque desta forma, o operador possui maior sensibilidade do procedimento. Um cuidado extra foi tomado no processo de peneiramento, o operador preocupou-se em agitar individualmente cada peneira, com a finalidade de garantir que todo o material passasse pela série de peneiras. Na última etapa, a massa de material retido em cada peneira foi determinada, tomando a precaução de limpar as malhas da peneira com um pincel, com o objetivo de que os grãos presos a malha, sejam considerados na massa retida.

3.2.4. Compactação Marshall

A compactação Marshall é um procedimento importante na qual objetiva-se moldar os corpos de prova para os ensaios subsequentes, sendo o processo regido pela norma DNER-ME 043 (1995). Preliminarmente preparou-se a amostra que será ensaiada. Para o presente trabalho, foram compactados 3 corpos de prova por amostragem, com aproximadamente 1200 gramas de mistura asfáltica solta, previamente coletadas em campo.

A quantidade de material destinada para cada corpo de prova, foi então levada separadamente à estufa, pré-aquecida a temperatura de compactação, conforme presente no projeto, e mantida por um período de duas horas, com o propósito de homogeneizar a amostra. Foi adicionado à estufa também, os moldes cilíndricos dos corpos de prova, com diâmetro de 100 mm, bem como a base do soquete, conferindo assim que, tanto a amostra quando o molde, esteja na mesma temperatura no momento de compactação, a fim de evitar, ao máximo, a troca de calor entre os mesmos, garantindo que a temperatura de compactação de projeto seja respeitada.

Decorrido o tempo de homogeneização, posicionou-se o molde cilíndrico e a base do soquete, previamente aquecidos, na máquina de compactação, inserindo o filtro dentro do molde cilíndrico. Prendeu-se o cilindro junto a máquina através das travas laterais e despejou-se o material que foi aquecido dentro do molde, acomodando-o dentro do molde através da aplicação de 15 golpes de espátula no interior e nas laterais do molde e 10 golpes no centro da amostra. Outro filtro foi então inserido na parte superior da amostra e encaixou-se a haste com o soquete dentro do molde e na guia superior da máquina compactadora, certificando-se que o martelo encostasse na haste, dando início assim, a compactação da amostra, conforme apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Compactadora automática de corpos de prova.



Fonte: Autor.

O processo de compactação ocorreu através de uma máquina automática, na qual confere ao ensaio, a altura de queda livre do soquete de 45,72 cm, conforme estipula a referente norma e a contagem automática do número de golpes. Foi aplicado à amostra, 75 golpes de cada lado do corpo de prova. O procedimento foi repetido para todos os corpos de prova ensaiados por amostragem.

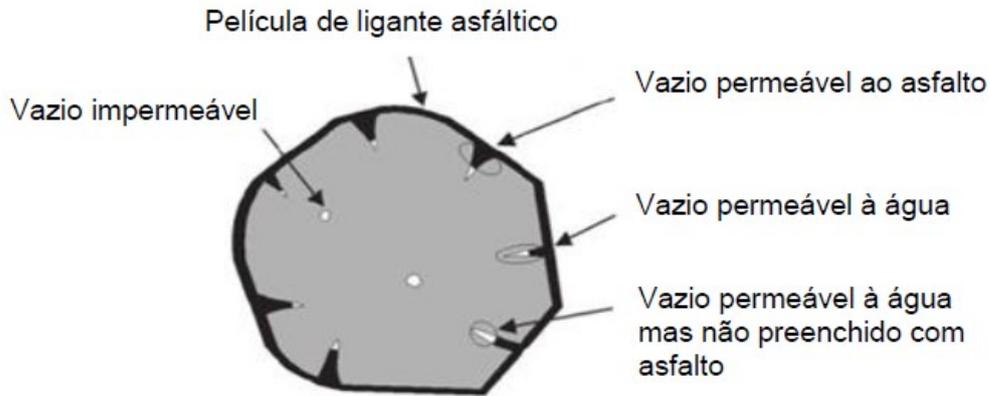
Na última etapa, retirou-se o molde cilíndrico, com a amostra compactada, e aguardou o resfriamento da mesma à temperatura ambiente, por aproximadamente 12 horas. Foi de interesse, a remoção do filtro da parte superior e inferior da amostra, no início do resfriamento, para que o mesmo não grudasse no material após o resfriamento.

3.2.5. Determinação da massa específica aparente

O ensaio pode ser aplicado tanto a amostras moldadas em laboratório, conforme descrito no item 3.2.4, bem como para amostras extraídas em campo. Através da extração de corpos de prova, normalmente realizado por meio de sonda rotativa, preserva-se as características de compactação do material, podendo-se aferir parâmetros físicos vigentes a

mistura asfáltica, como por exemplo, a massa específica aparente e o grau de compactação. Na Figura 3.8 é apresentado o desenho esquemático de um granular envolto de ligante betuminoso.

Figura 3.8 - Partícula granular revestida com ligante betuminoso.



Fonte: Highway Engineering (2015, p. 243, tradução nossa).

De acordo com Nikolaidis (2015), o volume da mistura asfáltica compactada, corresponde ao volume dos granulares, volume ocupado pelo ligante betuminoso que se adere à superfície do granular e também preenche parte dos poros e, do volume dos vazios de ar.

Os valores dos volumes mencionados no parágrafo anterior, são determinados através de ensaios laboratoriais, regidos pela norma DNER-ME 428 (2020), que estabelece os procedimentos para determinar a massa específica aparente das misturas asfálticas compactadas tanto em laboratório quanto em campo (BERNUCCI, 2008), portanto, este ensaio aplicou-se para ambas as condições de amostragem.

Para o caso de amostras moldadas em laboratório, foi necessário a extração dos corpos de prova dos moldes cilíndricos, após o resfriamento dos mesmos. Para tanto, foi utilizado o extrator mecânico. A Figura 3.9 apresenta o aspecto dos corpos de prova após o desmolde.

Figura 3.9 - Corpos de prova desmoldados.



Fonte: Autor.

Em ambos os casos, sendo os corpos de prova moldados em laboratório ou extraídos em campo, foi realizado a medida de espessura de pelo menos três diferentes pontos do corpo de prova, a fim de obter uma média do valor.

O ensaio consiste em pesar previamente a massa da amostra compactada e em seguida submergir completamente a amostra em água, suspendendo-a em uma balança capaz de aferir com precisão, por pesagem hidrostática a massa da amostra em água. Decorrido 3 a 5 minutos, e com a estabilização do conjunto, o peso é determinado como a massa da amostra submersa (NIKOLAIDES, 2015).

Desse modo, a massa específica aparente da mistura asfáltica pode ser determinada por meio da relação entre a massa seca do corpo de prova compactado, pesada previamente e a diferença entre a massa seca e massa submersa do corpo de prova (BERNUCCI, 2008).

Segundo Mallick e El-Korchi (2018), o mesmo procedimento pode ser realizado para corpos de prova extraídos por sonda rotativa, todavia, em casos onde a extração for realizada com auxílio da água, para quaisquer que sejam a necessidade do uso, a amostra deve passar por um processo de secagem prévia até obter massa constante. A Figura 3.10 exemplifica a aparência de uma amostra coletada por sonda rotativa.

Figura 3.10 - Amostra coletada por sonda rotativa.



Fonte: Autor.

3.2.6. Determinação da estabilidade e fluência

A determinação de tais parâmetros é importante para a caracterização da mistura asfáltica, conforme apresentado no item 3.2.1. O ensaio consiste em aplicar ao corpo de prova de interesse um carregamento constante até levar ao rompimento do mesmo. Assim como a compactação dos corpos de prova, a determinação da estabilidade e fluência também é regida pela norma DNER-ME 043 (1995). A estabilidade pode ser entendida como a resistência máxima que um corpo de prova possui quando submetido a uma carga de compressão radial e a fluência, como a deformação total que o corpo de prova é sujeitado a aplicação deste mesmo carregamento.

Os corpos de prova moldados em laboratório, foram submergidos em um banho de água de 60 °C por um período de 30 minutos. Esta condição na qual o corpo de prova foi submetido, saturado e aquecido, tem por objetivo simular uma condição drástica na qual um pavimento pode ser sujeitado em campo. Os corpos de prova foram inseridos ao banho com um intervalo de 5 minutos cada, com a finalidade de garantir tempo suficiente para realizar o rompimento.

O controle da temperatura aconteceu por um equipamento que mantém a temperatura constante, chamado de banho maria, conforme apresenta a Figura 3.11 e o controle de tempo foi aferido através de um cronômetro manual.

Figura 3.11 – Equipamento de banho maria.



Fonte: Autor.

Decorrido os 30 minutos, os corpos de prova foram levados rapidamente até o molde de compressão, para que o corpo de prova conserve o máximo possível a temperatura, e então iniciou-se o rompimento. O molde de compressão, contendo o corpo de prova, foi ajustado na prensa para que o chanfro da haste de aplicação de carga e a guia central do molde de compressão, estejam encaixados. A Figura 3.12 apresenta o momento de medição de estabilidade e fluência. A prensa dispõe de um sistema de aplicação de carga automático, com velocidade constante de 5 cm por minuto, feita por um motor que é acionado por uma chave.

Figura 3.12 - Prensa Marshall para rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

A leitura de estabilidade foi realizada por um relógio comparador analógico acoplado ao sistema da prensa. A estabilidade de um corpo de prova ocorre quando o ponteiro deste relógio encerra sua rotação em um valor máximo. A leitura desse valor máximo foi então anotada e corrigida para a espessura do corpo de prova ensaiado e pela constante do anel deflectométrico.

Similarmente, a leitura da fluência foi realizada através de um relógio comparador analógico. O relógio foi acoplado em um equipamento que é fixado ao molde de compressão, que mede o deslocamento do molde de compressão no momento de aplicação de carga. A Figura 3.13 apresenta o equipamento medidor de fluência.

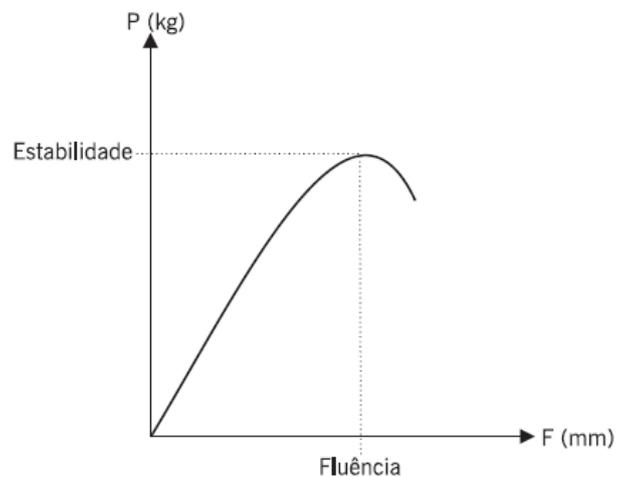
Bernucci (2008) exemplifica o comportamento em que um corpo de prova é submetido ao longo do ensaio de compressão axial (Figura 3.14).

Figura 3.13 - Medidor de fluência.



Fonte: Autor.

Figura 3.14 - Curva característica do ensaio Marshall.



Fonte: Bernucci (2008, p. 289).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos a partir dos ensaios desenvolvidos no capítulo anterior. Por meio da campanha de ensaios, foram obtidos dados capazes de auxiliar na compreensão das propriedades físicas e parâmetros de dosagem das misturas asfálticas utilizadas em obras públicas na cidade de Joinville.

Para cada amostra de mistura asfáltica solta coletada em campo, três corpos de prova foram compactados para a determinação da estabilidade, fluência, densidade aparente, volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV). Os resultados exibidos no decorrer do capítulo, se referem a média aritmética dos três corpos de prova. Para os demais ensaios, como determinação do teor de betume e granulometria, foram efetuados um único ensaio por amostragem. Os parâmetros avaliados podem ser encontrados nas Figuras 4.1 a 4.12. Os resultados completos para cada corpo de prova podem ser visualizados no Apêndice B.

É igualmente apresentado, para cada ensaio, a média de todos os pontos coletados com objetivo de visualizar a discrepância com o projeto proposto por cada empresa e a realidade da execução. A avaliação e discussão dos resultados, é também enriquecida, com gráficos que apresentarão as temperaturas, determinada no momento da coleta da mistura asfáltica solta, bem como, tabelas informando a data exata das coletas (Tabela 4.1 a 4.5).

Para as amostras extraídas através da sonda rotativa, serão apresentados gráficos correspondentes à espessura da camada asfáltica extraída, densidade da mistura asfáltica compactada em campo, volume de vazios (Vv) e o grau de compactação (GC) atingido em campo.

Expostos os resultados a seguir, é possível desenvolver discussões a respeito da qualidade da mistura asfáltica, assim como, da execução e aplicação da mesma no pavimento, em obras públicas no município de Joinville.

Em uma análise geral, pode-se observar a discrepância das propriedades ensaiadas com as especificadas em projeto. É importante ressaltar que as condições de contorno em campo não são asseguradas como em laboratório, portanto, mesmo com a devida atenção, podem apresentar divergências entre a realidade de aplicação em campo e os resultados obtidos em laboratório, entretanto, essa justificativa mostra-se fracamente fundamentada, pois a maioria dos pontos de coleta submetidos aos ensaios apresentam incoerência com o projeto, não sendo

estas divergências atribuídas a condição de contorno. Para entender melhor essa realidade, pode se discorrer com maior atenção sobre cada condição exibida nos gráficos abaixo.

Conforme discutido no Capítulo 2, o teor de betume para o comportamento de uma mistura asfáltica é uma propriedade crucial, pois rege todo comportamento mecânico da mesma. É notável a dificuldade que todas as empresas analisadas apresentam em garantir uma constância no teor de betume, durante todo o período de aplicação em campo, fazendo com que, em muitos casos, haja excedente do ligante betuminoso, em outros, haja oscilação entre os limites inferiores e superiores das tolerâncias permitidas e, nos demais casos, a extrapolação dos limites, conforme preconiza a norma DNER-ME 053 (1994). Tal constatação sugere uma falta de controle prévio da mistura asfáltica antes da aplicação em campo, pelas próprias empreiteiras, visto que, em muitos casos, a divergência para com o projeto é recorrente ao longo da execução.

É importante ressaltar que o próprio ensaio realizado para a determinação do teor de betume, utilizando o extrator centrífugo, possui limitações. No momento de extração do CAP da amostra, ainda que mínima, existe a perda do granular das frações finas através da centrifugação. Esta perda pode ser observada nos gráficos de granulometria, onde as frações finas dos granulares, tendem a se aproximar do limite inferior da faixa de trabalho. Esta condição atribuída ao método de extração sugere o aumento no teor de betume, pois o material perdido induz, erroneamente maior quantidade de CAP na mistura. Todavia, a limitação do ensaio não justifica teores elevados de CAP empregues pelas empresas.

No momento de aplicação em campo da mistura asfáltica foi constatada elevada temperatura quando equiparada com a de projeto em todas as empresas, devendo a mesmo ser correspondida conforme DNER-ME 043 (1995). Esta condição indica um possível desrespeito do controle de temperatura no momento da fabricação da mistura asfáltica nas usinas, extrapolando até mesmo os limites superiores recomendáveis pelos fornecedores de ligante betuminoso. É passível de interpretação que a mistura asfáltica sai da própria usina tendo suas propriedades físicas e químicas comprometidas pelo envelhecimento precoce resultante da elevada temperatura, chegando no momento de aplicação e compactação em desacordo ao projeto.

No ponto 11 da empresa C é constatado temperatura no valor de 182,8 °C, conforme Figura 4.6 (b). É esperado que com o aumento da temperatura exista por consequência uma diminuição no volume de vazios, entretanto foi constatado comportamento oposto para esse ponto. Para uma mistura asfáltica convencional, tais valores de temperatura são extremamente elevados, extrapolando até mesmo as recomendações do próprio fornecedor do ligante

betuminoso. Como consequência, a temperatura elevada comprometeu o desempenho mecânico da mistura asfáltica devido ao envelhecimento precoce do CAP, prejudicando as propriedades elásticas e causando forte enrijecimento do material, gerando trincamento interligado, conforme apresenta a Figura A.6 do Apêndice A.

O volume de vazios pode ser diretamente relacionado com o teor de betume empregue na mistura asfáltica, bem como a temperatura e energia de compactação aplicada. Como a determinação do volume de vazios foi realizada em laboratório, deve-se dispensar interpretações inerentes a temperatura de aplicação e energia em campo, limitando somente ao teor de betume e a homogeneidade da amostra coletada. Condicionado a temperatura de projeto e a energia de compactação estipulada em norma, o volume de vazios tende a ser menor quando existe um excedente de ligante betuminoso na mistura asfáltica, pois o mesmo irá preencher os vazios disponíveis. A mesma interpretação pode ser realizada quando há falta de ligante betuminoso na mistura, pois o volume de vazios tenderá ser maior. Tal constatação pode ser observada nos gráficos de RBV, onde os valores desta relação são inversamente proporcionais ao volume de vazio e, ao equiparar ambos os gráficos, pode-se perceber um espelhamento das curvas. Tais valores de volume de vazios e RBV devem respeitar a norma DNIT-ES 031 (2006).

Em alguns casos, é possível observar esta interpretação divergindo dos resultados apresentados, como por exemplo o ponto 3 da empresa A, Figura 4.1 (a) e Figura 4.1 (c). Isto pode ser justificado pela falta de homogeneidade no momento da coleta da mistura asfáltica, onde existe a tendência de ser coletado, involuntariamente, frações mais graúdas, favorecendo o aumento do volume de vazios na hora da compactação.

A densidade da mistura asfáltica é inversamente proporcional ao volume de vazios e pode ser observada, similarmente como o RBV, com o comportamento espelhado ao volume de vazios. É interessante observar que, em todas as empresas, quando há o aumento do volume de vazios, existe, por consequência, a diminuição do valor da densidade. É importante salientar que, com o aumento da densidade, correspondido com o baixo volume de vazios apresentados em alguns casos, o pavimento provavelmente irá apresentar problemas de trincamento por não se comportar de forma flexível ao emprego de carga. Similarmente, o alto volume de vazios provocará ao pavimento o afundamento de trilha de roda. Tal condição pode ser observada, através das amostras de sonda rotativa, no ponto 10 e 11 da empresa B, Figura 4.5 (c), sendo regidas pela norma DNIT-ME 428 (2020).

Valores de estabilidade acima do estipulado em projeto são encontrados em todas as empresas. Esta condição é facilmente alcançada, principalmente pela condição do ensaio usado na metodologia Marshall. A estabilidade de uma mistura asfáltica é resultante, sobretudo, da

robustez dos granulares graúdos, na qual confere maior resistência ao emprego de cargas. O rompimento do corpo de prova é realizado em um volume confinado e utilizando uma aplicação e carga constante nos dois extremos do molde. Desta forma, a proporção do tamanho do granular graúdo, com o volume do molde que condiciona o corpo de prova, é pouco representativo com a realidade em campo. Somado a estes fatores, a coleta não homogênea, que favorece a obtenção de grãos maiores, bem como o envelhecimento precoce da mistura asfáltica nas usinas, beneficia resultados de estabilidade elevados.

Na Figura 4.6 (e), nos pontos 5 e 13 da empresa C são observados valores incomuns de estabilidade, estando em discordância com o comportamento dos demais pontos bem como a normativa DNER-ME 043 (1995). Tais valores atípicos podem ser explicados analisando o gráfico de teor de betume, Figura 4.6 (a), para estes mesmo pontos, na qual apresentam valores bem abaixo da tolerância mínima permitida. A falta do teor de ligante betuminoso nessas proporções provocam, na mistura asfáltica, fraca união entre os materiais. O envolvimento do material granular não é satisfatório e o masticque betuminoso não é capaz de fazer a conexão entre os granulares.

A fluência é um parâmetro conexo com a estabilidade, pois é obtida no momento de ruptura do corpo de prova, também orientada pelo DNER-ME 043 (1995), como exemplifica a Figura 3.14. Entretanto, por consequência da própria metodologia Marshall, os valores obtidos para a fluência mostram-se pouco confiáveis, pois não existe uma relação direta com os valores de estabilidade, tendendo a ter um comportamento aleatório. Este fato pode ser observado nos gráficos de todas as empresas, onde há um comportamento desordenado. A imprecisão na medição da fluência em laboratório é agravada devido à coleta não homogênea da amostra, não condizendo com a real aplicação em campo.

Conforme apresentado no Capítulo 2, item 2.3.1, o uso da metodologia por tentativas para a curva granulométrica é impreciso. Esta imprecisão pode ser observada em todas as empresas, onde as curvas granulométricas dos pontos apresentam, muitas vezes, comportamento oscilatórios entre os limites máximo e mínimos. Em muitos casos, é testemunhado a discrepância com a curva da mistura projetada e até mesmo, com valores fora da própria faixa de trabalho. É notável a dificuldade que a empresa C encontra em enquadrar a curva granulométrica da mistura dentro da faixa B do DNIT-ES 031(2006), conforme a Figura 4.7, caracterizando possivelmente, um problema em usina.

Curvas granulométricas que tendem ao limite superior apresentam granulares com frações mais finas, requerendo maior quantidade de ligante betuminoso devido ao aumento da superfície específica dos grãos. Em contrapartida, curvas granulométricas que tendem ao limite

inferior, caracterizam-se por possuir frações granulares maiores, induzindo a um baixo consumo de CAP na mistura e provocando um possível aumento no volume de vazios.

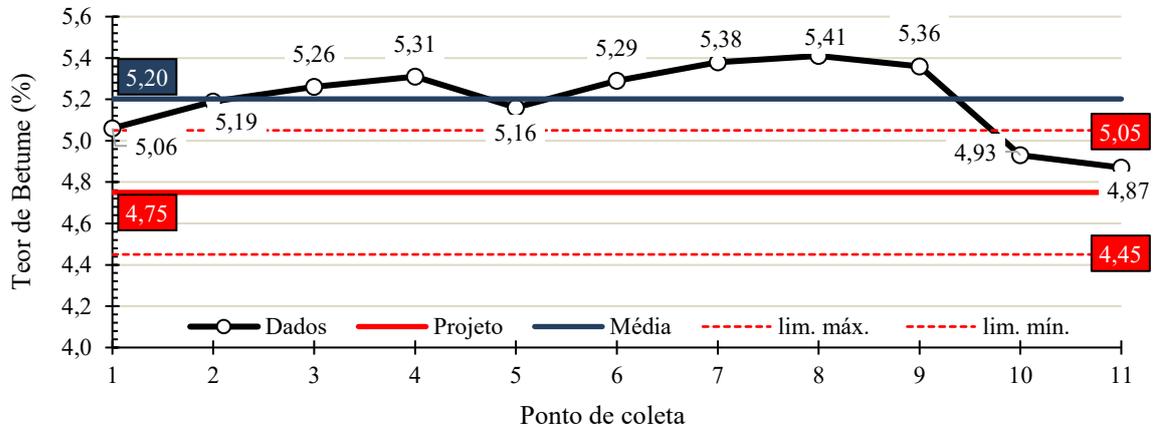
De forma a corroborar com o estudo promovido para cada empresa, foram realizadas visitas nos locais de coleta a fim de identificar prováveis falhas no pavimento. As visitas foram feitas no mês de abril de 2022 e as Figuras são apresentadas no Apêndice A. Para empresa A, as fotos tiradas no mês de abril correspondem a 4 meses após o término da obra. Para empresa B, correspondem a 3 meses após o término da obra. Já para as empresas C e D correspondem a 6 e 2 meses respectivamente. Por fim, para a empresa E correspondem a 8 meses após o término da obra. Considerando a presença de falhas tão avançadas no pavimento, pode-se pressupor que surgiram anteriormente aos períodos mencionados a cima.

Tabela 4.1 - Datas das coletas de amostra da empresa A.

Ponto	Data da Coleta	Ponto	Data da Coleta
1	29/07/2021	7	30/09/2021
2	29/07/2021	8	30/09/2021
3	01/09/2021	9	06/10/2022
4	01/09/2021	10	08/12/2021
5	05/10/2021	11	08/12/2021
6	05/10/2021	-	-

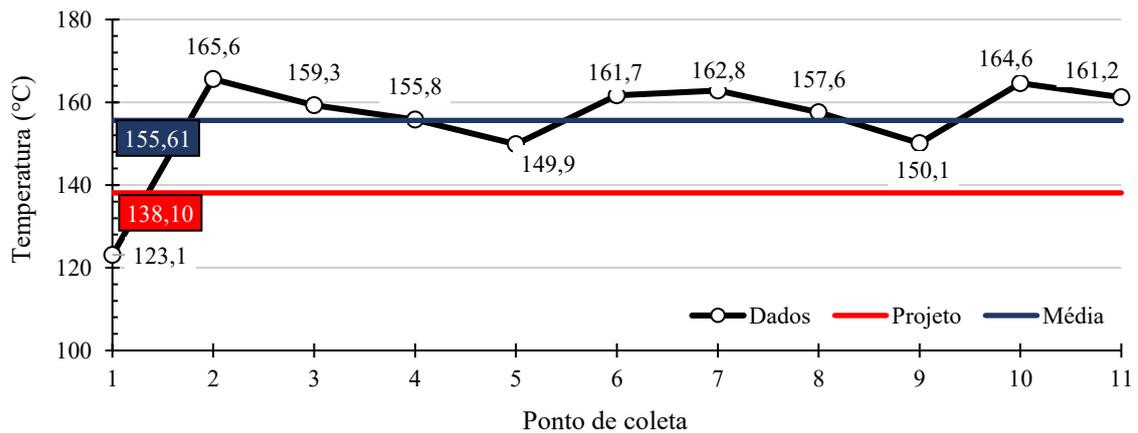
Fonte: Autor.

Figura 4.1 – Representação gráfica dos resultados referente a empresa A: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios.



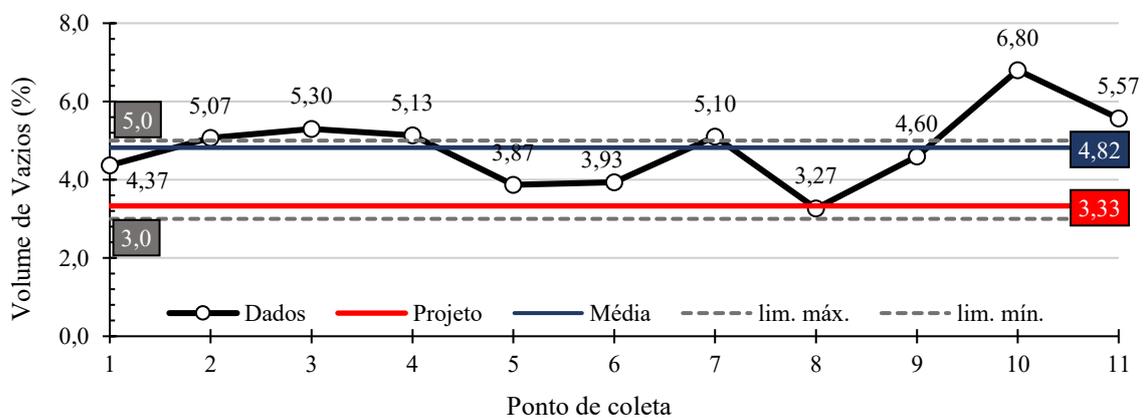
(a)

Fonte: Autor.



(b)

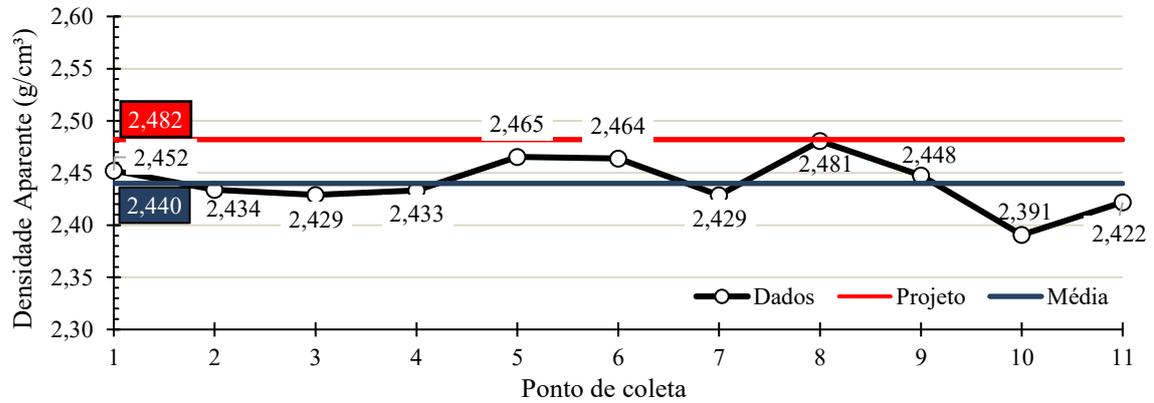
Fonte: Autor.



(c)

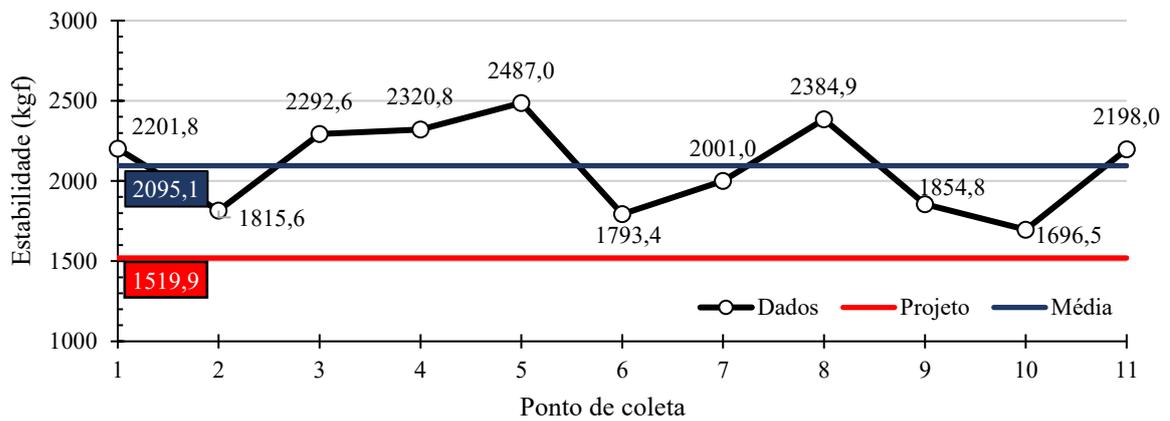
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.1



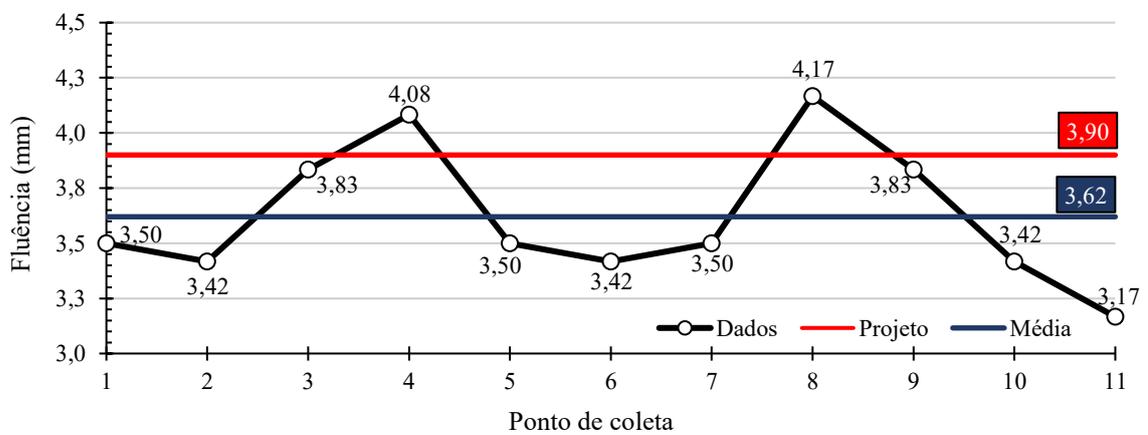
(d)

Fonte: Autor.



(e)

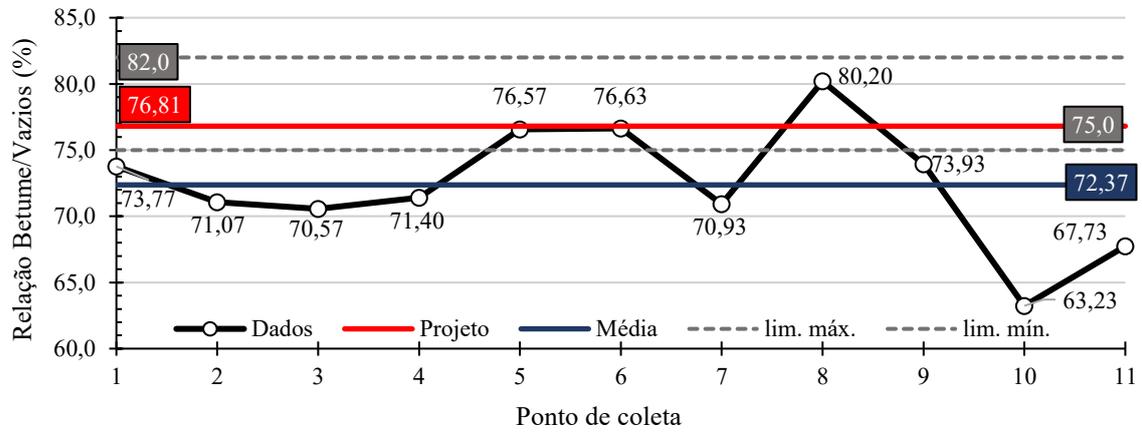
Fonte: Autor.



(f)

Fonte: Autor.

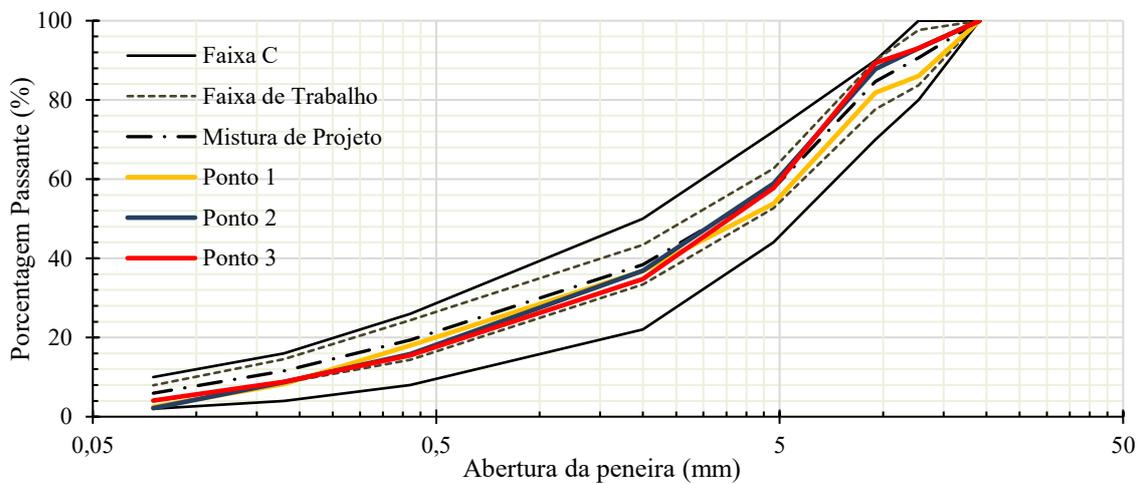
Continuação da Figura 4.1



(g)

Fonte: Autor.

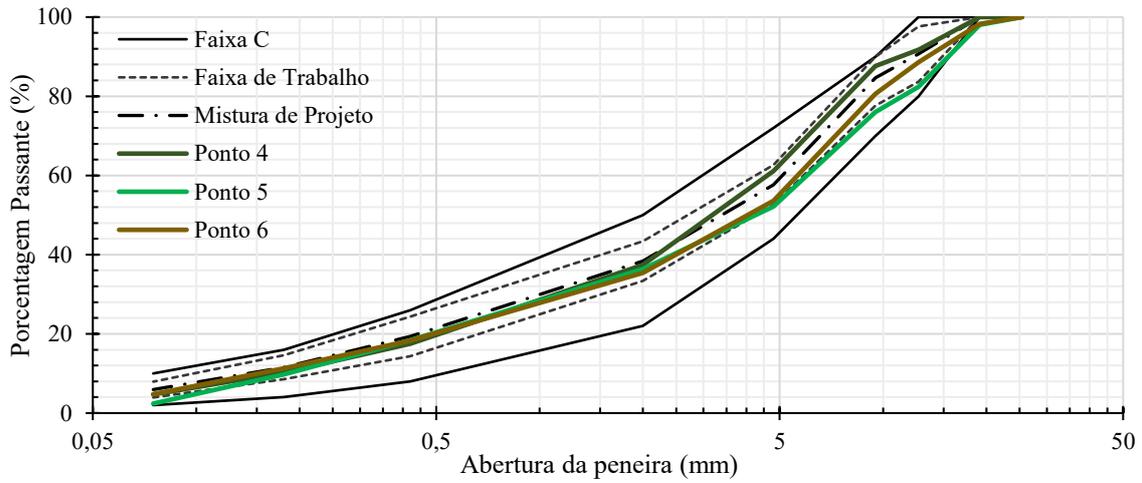
Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa A: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7 e 8; (d) Pontos 9, 10 e 11.



(a)

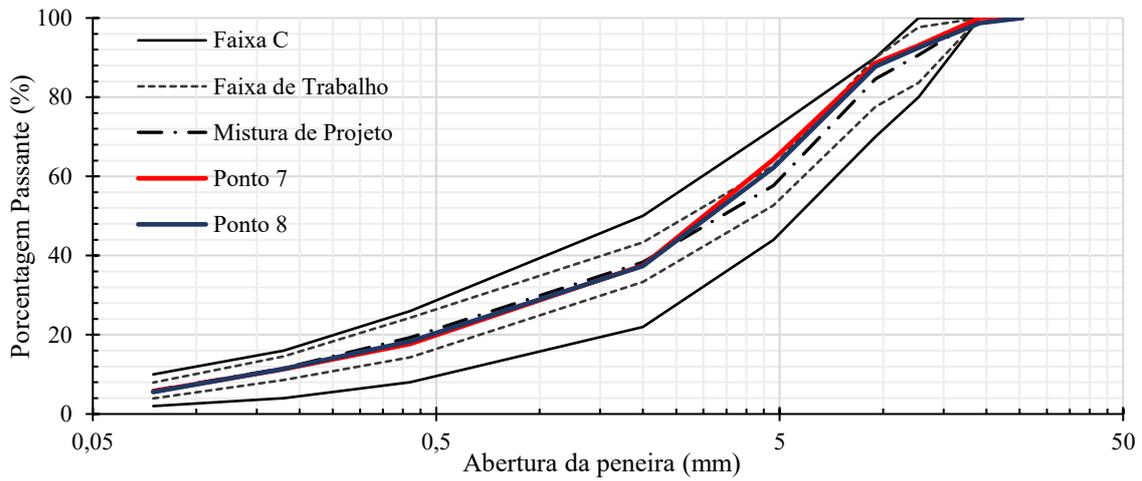
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.2



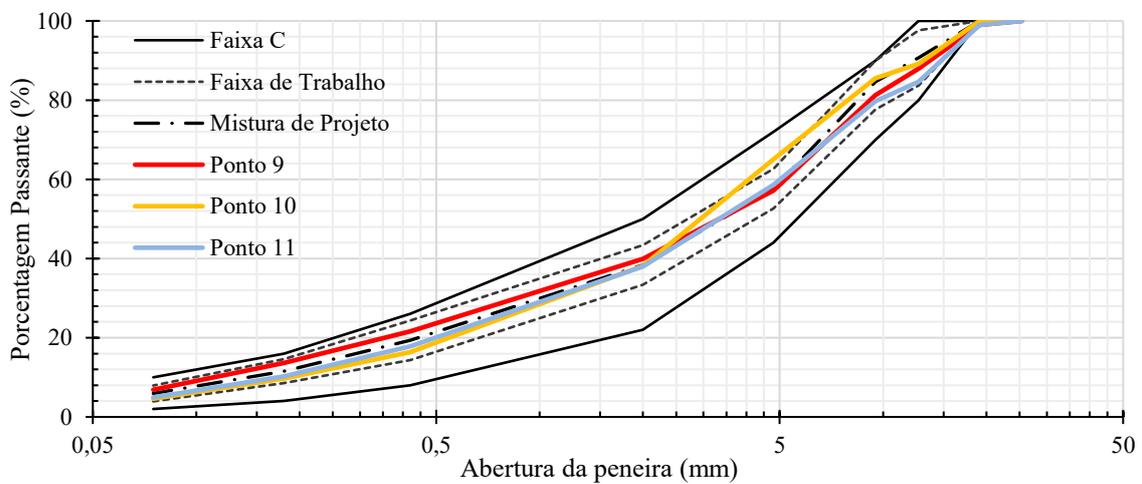
(b)

Fonte: Autor.



(c)

Fonte: Autor.



(d)

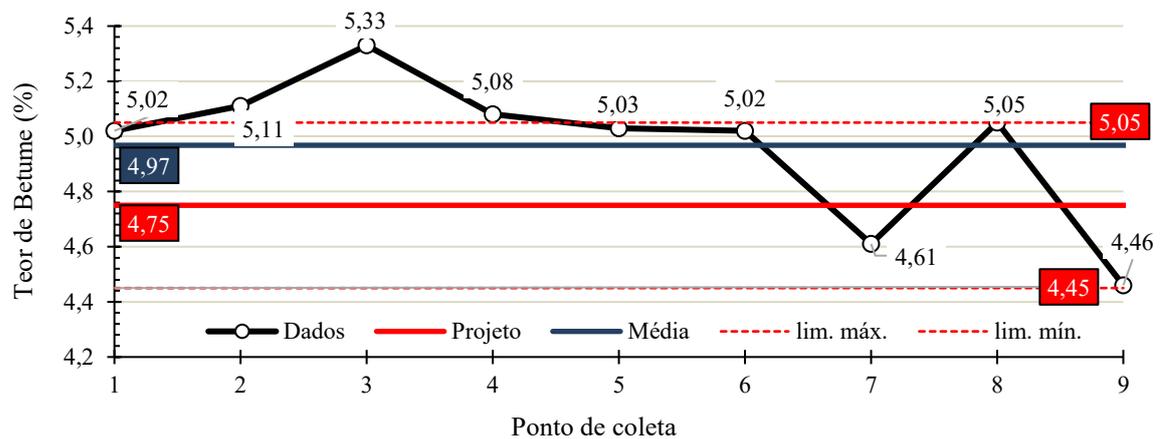
Fonte: Autor.

Tabela 4.2 - Datas das coletas de amostra da empresa B.

Ponto	Data de Coleta	Ponto	Data de Coleta
1	27/10/2021	8	07/12/2021
2	08/11/2021	9	25/01/2022
3	03/11/2021	10	07/12/2021
4	08/11/2022	11	07/12/2021
5	09/11/2021	12	07/12/2021
6	09/11/2021	13	07/12/2021
7	17/11/2021	-	-

Fonte: Autor.

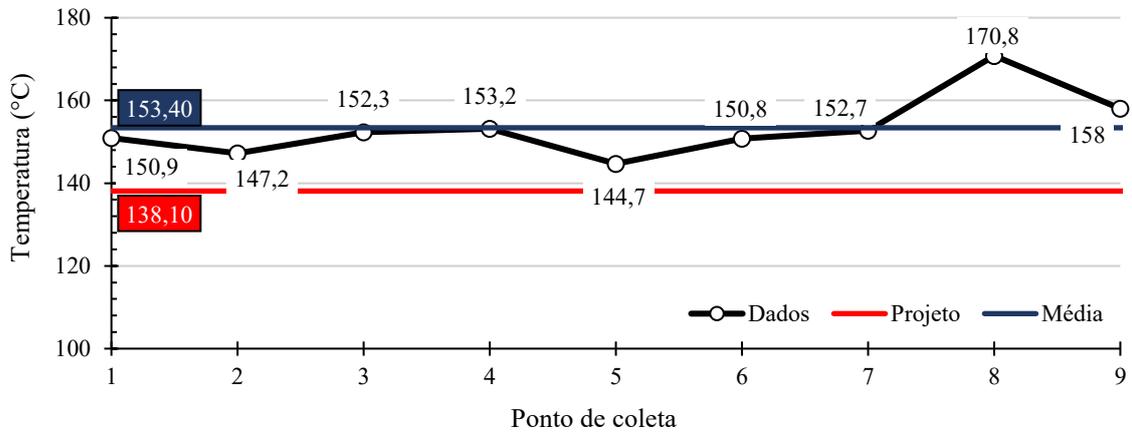
Figura 4.3 - Representação gráfica dos resultados referente a empresa B: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios.



(a)

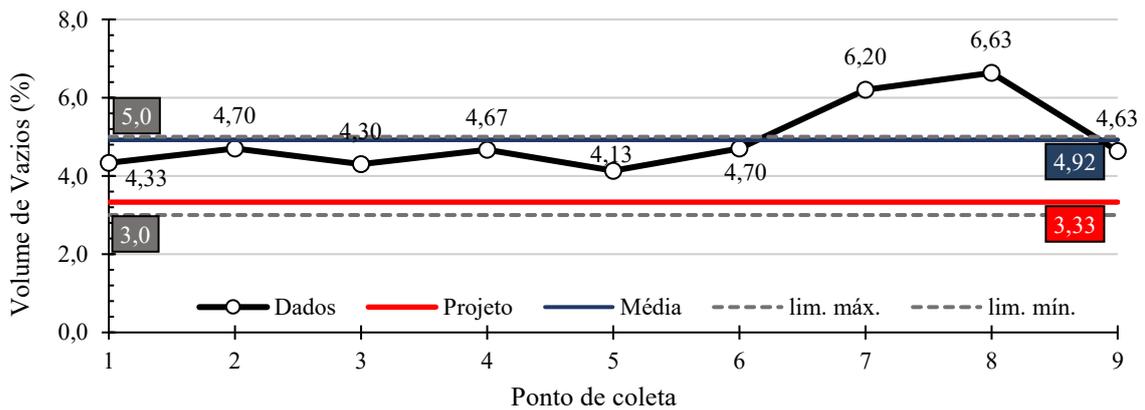
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.3



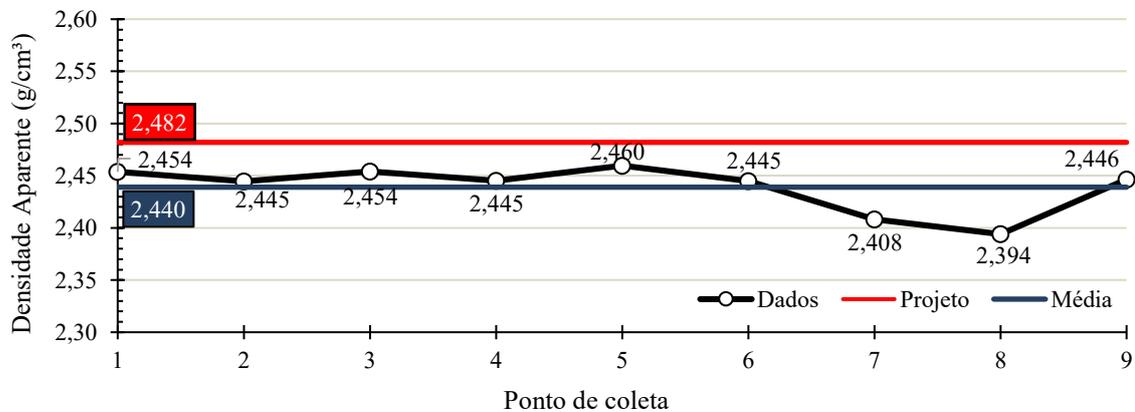
(b)

Fonte: Autor.



(c)

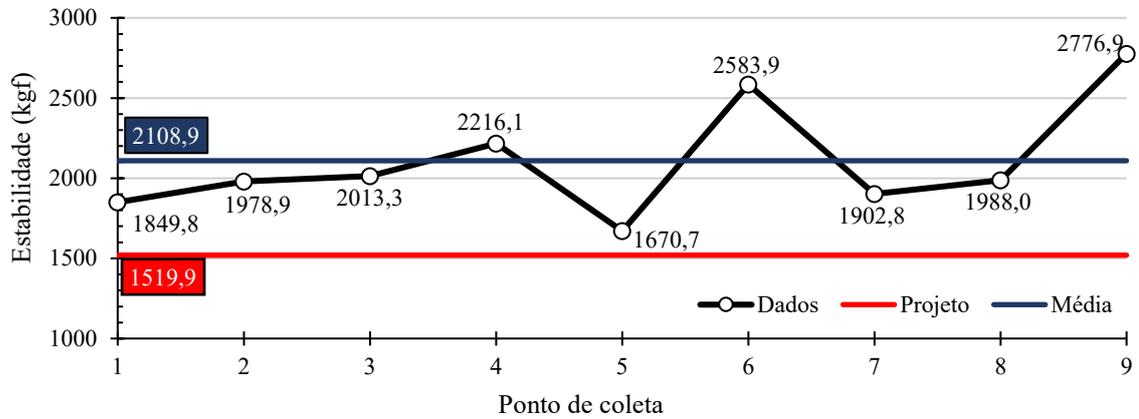
Fonte: Autor.



(d)

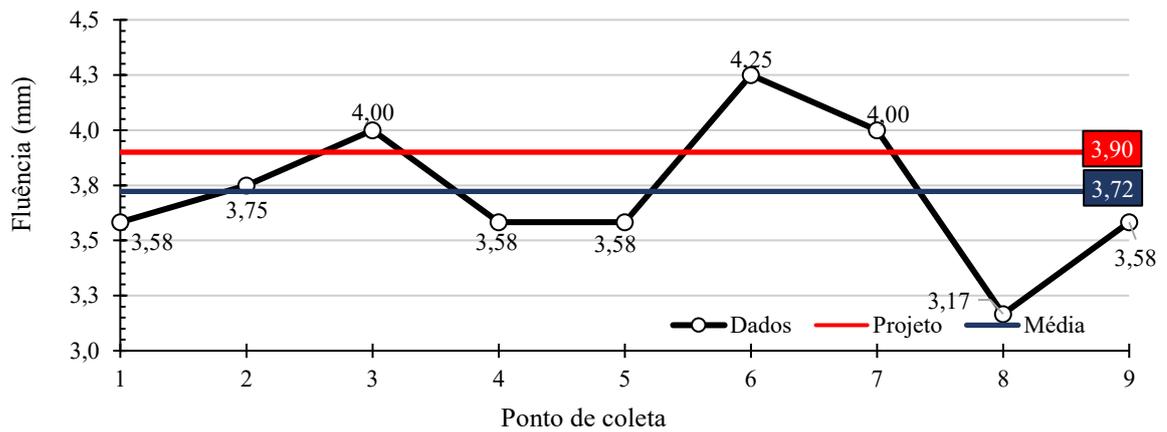
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.3



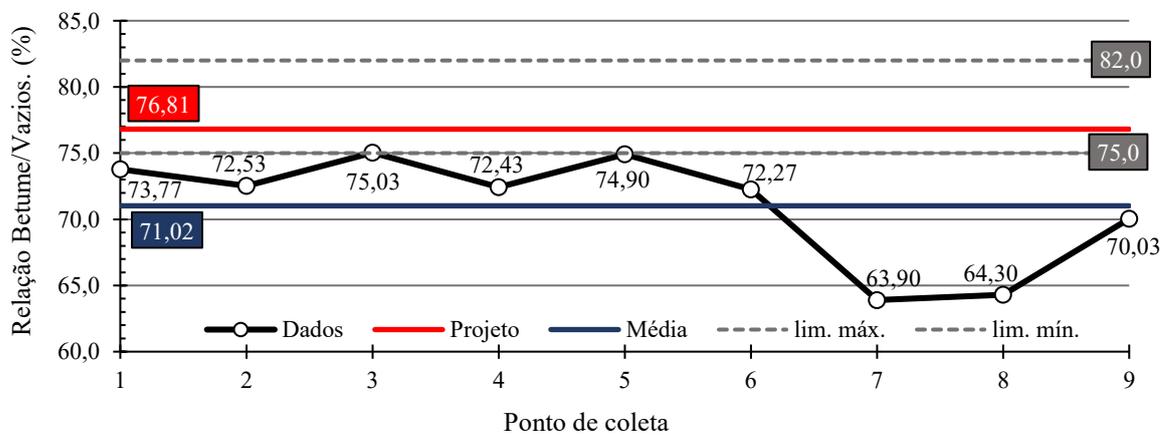
(e)

Fonte: Autor.



(f)

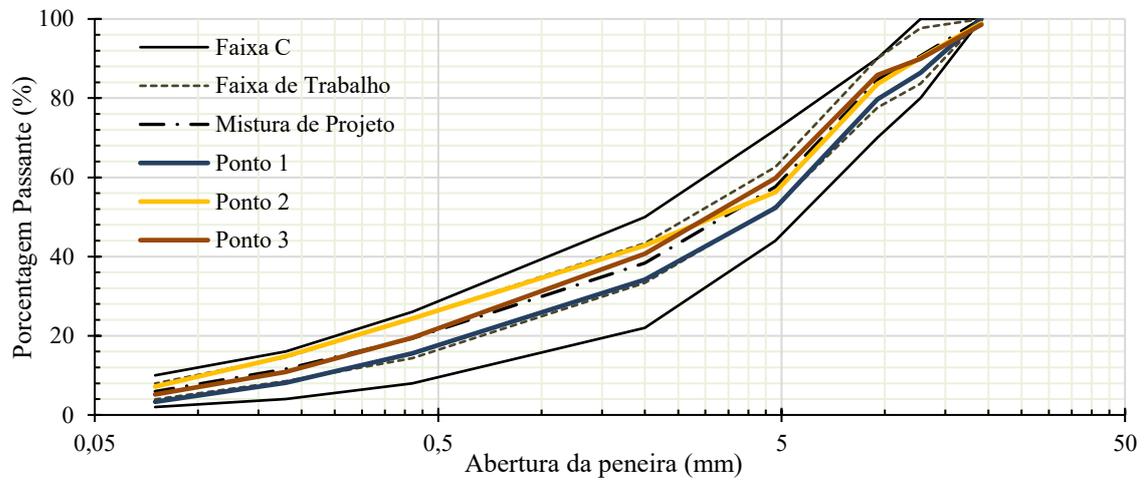
Fonte: Autor.



(g)

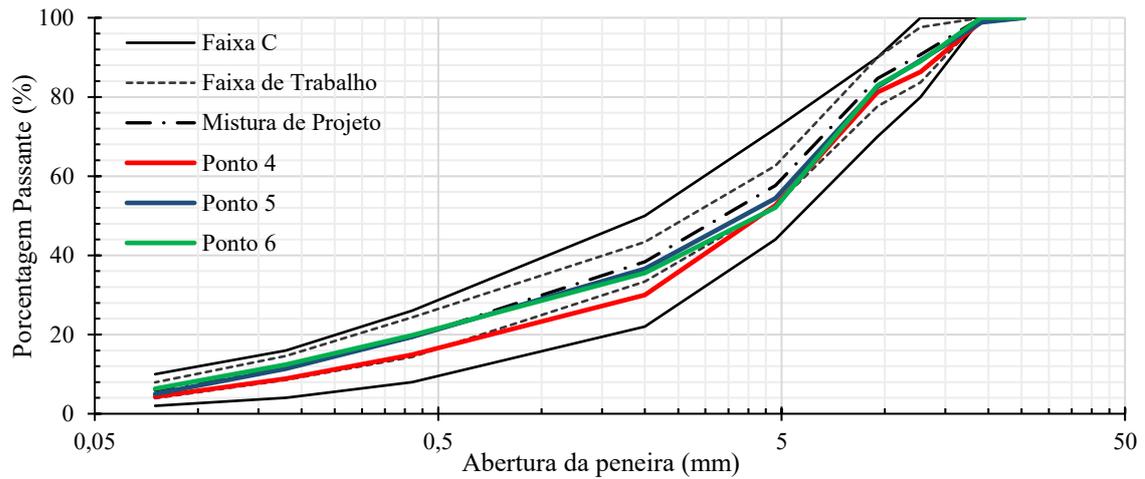
Fonte: Autor.

Figura 4.4 - Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa B: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7, 8 e 9.



(a)

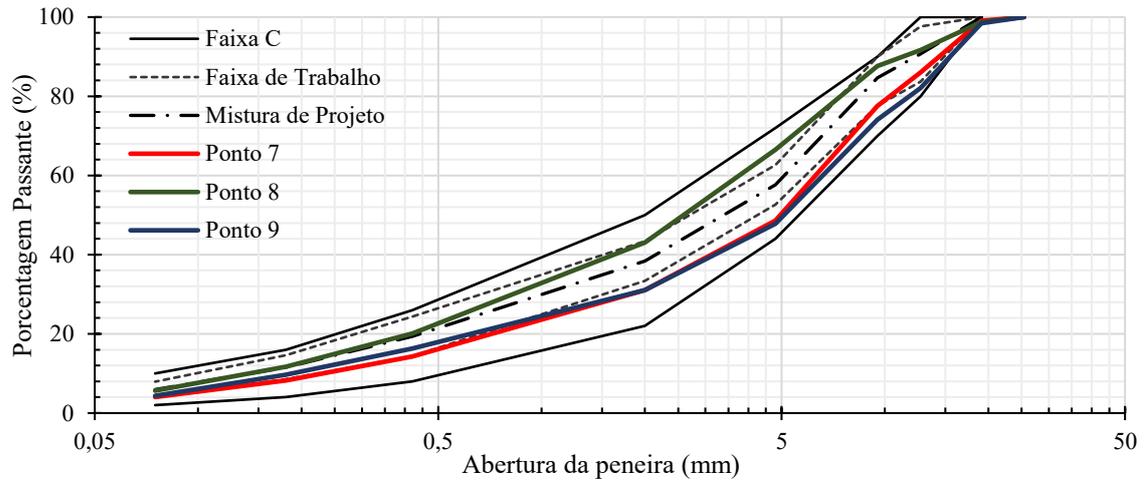
Fonte: Autor.



(b)

Fonte: Autor.

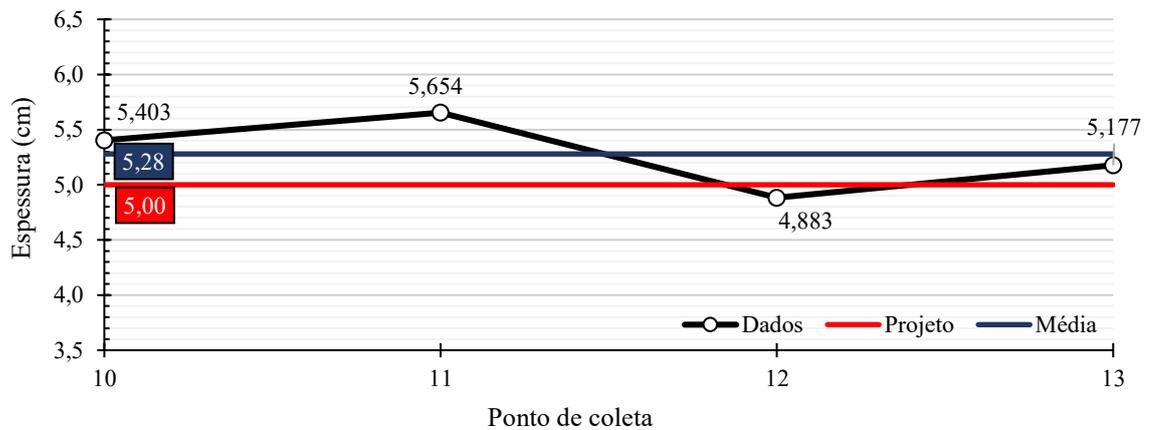
Continuação da Figura 4.4



(c)

Fonte: Autor.

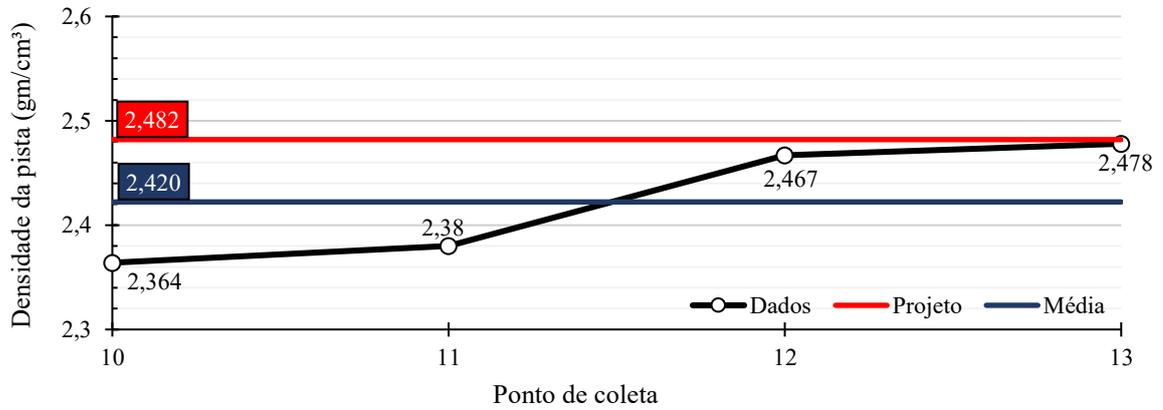
Figura 4.5 - Representação gráfica das extrações por sonda rotativa referente a empresa B: (a) Espessura da Camada; (b) Densidade em pista; (c) Volume de Vazios; (d) Grau de Compactação.



(a)

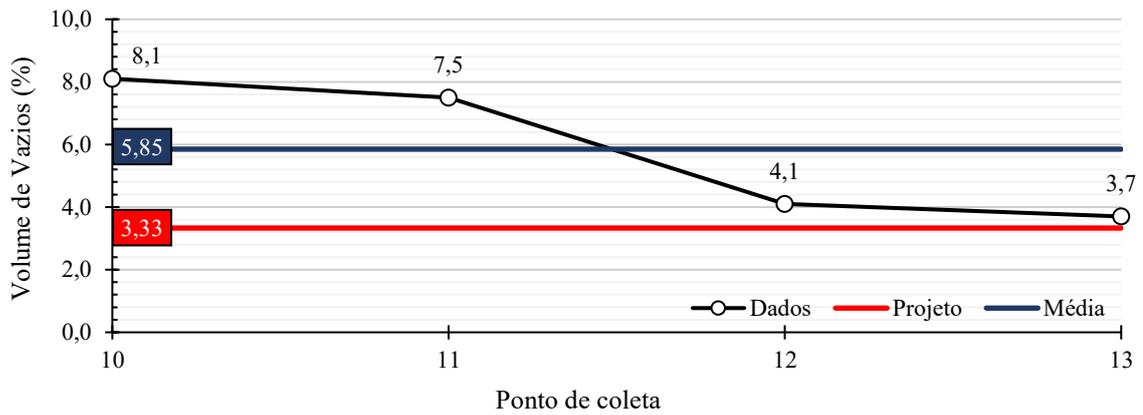
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.5



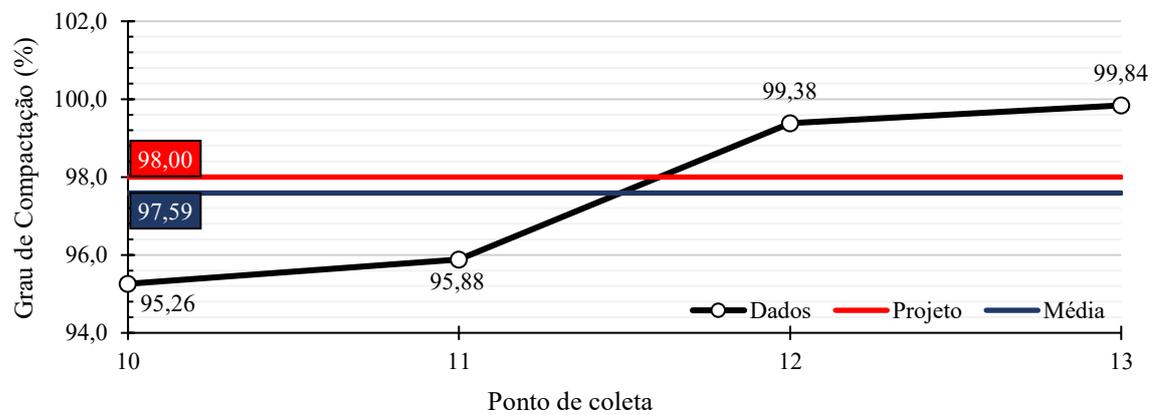
(b)

Fonte: Autor.



(c)

Fonte: Autor.



(d)

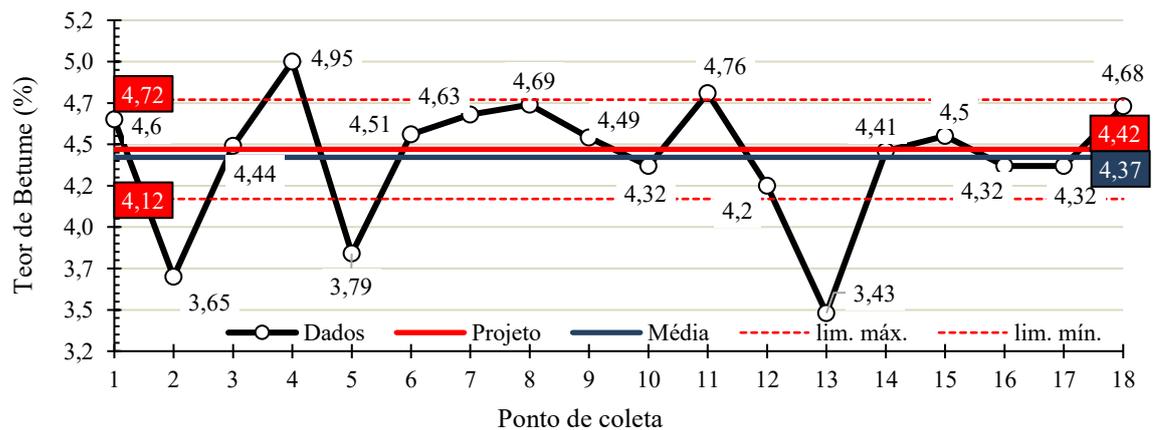
Fonte: Autor.

Tabela 4.3 - Datas das coletas de amostra da empresa C.

Ponto	Data de Coleta	Ponto	Data de Coleta
1	30/06/2021	12	24/06/2021
2	01/07/2021	13	25/06/2021
3	02/07/2021	14	13/07/2021
4	05/07/2021	15	14/07/2021
5	25/06/2021	16	14/07/2021
6	08/07/2021	17	09/07/2021
7	07/07/2021	18	09/07/2021
8	07/07/2021	19	08/10/2021
9	08/07/2021	20	08/10/2021
10	08/07/2021	21	08/10/2021
11	07/07/2021	-	-

Fonte: Autor.

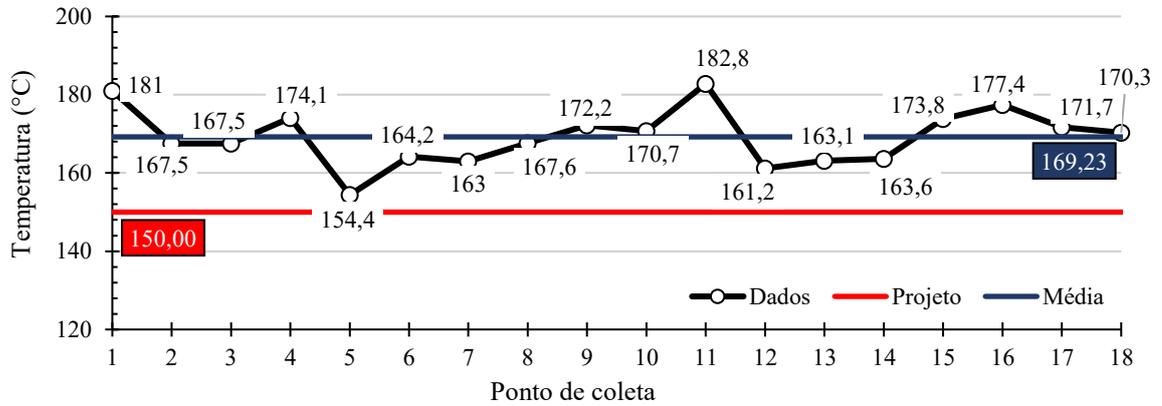
Figura 4.6 - Representação gráfica dos resultados referente a empresa C: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios.



(a)

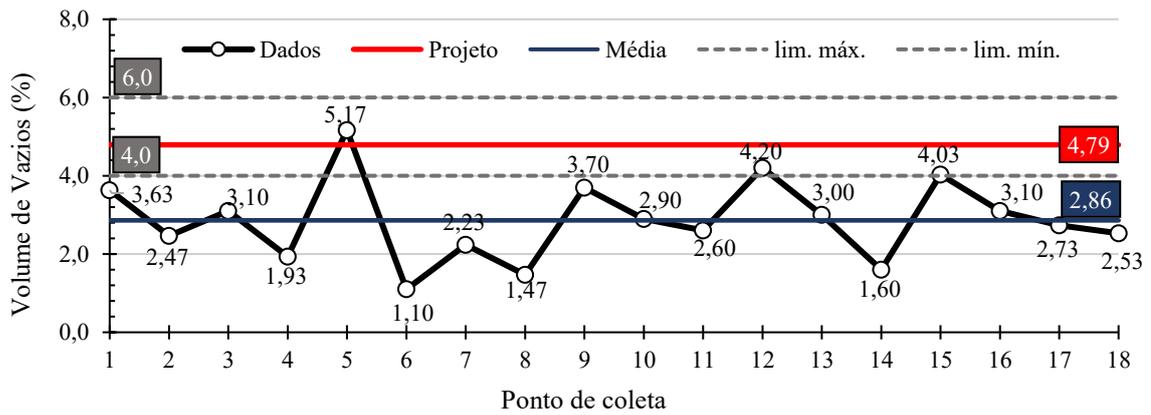
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.6



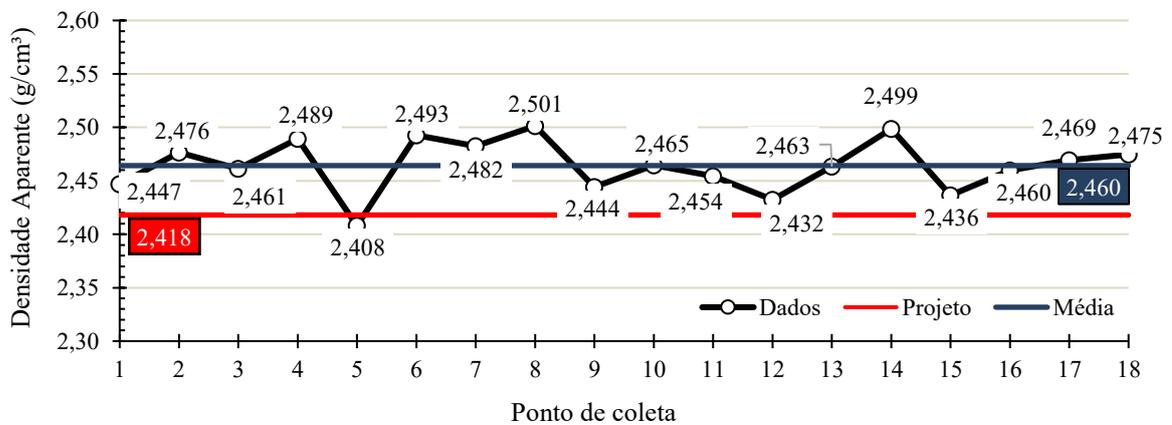
(b)

Fonte: Autor.



(c)

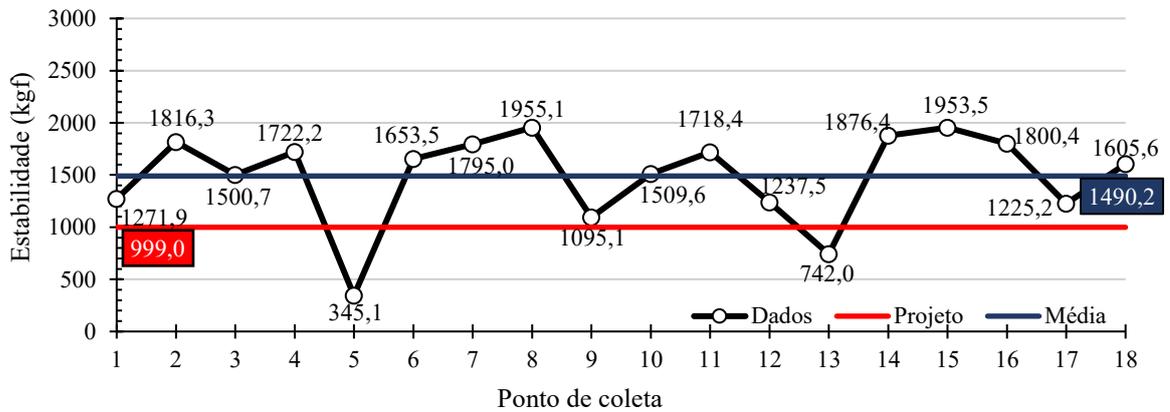
Fonte: Autor.



(d)

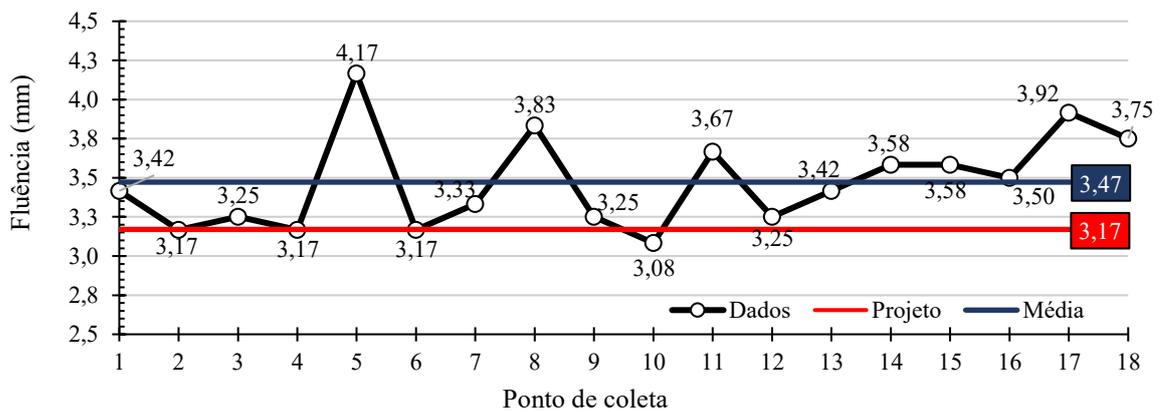
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.6



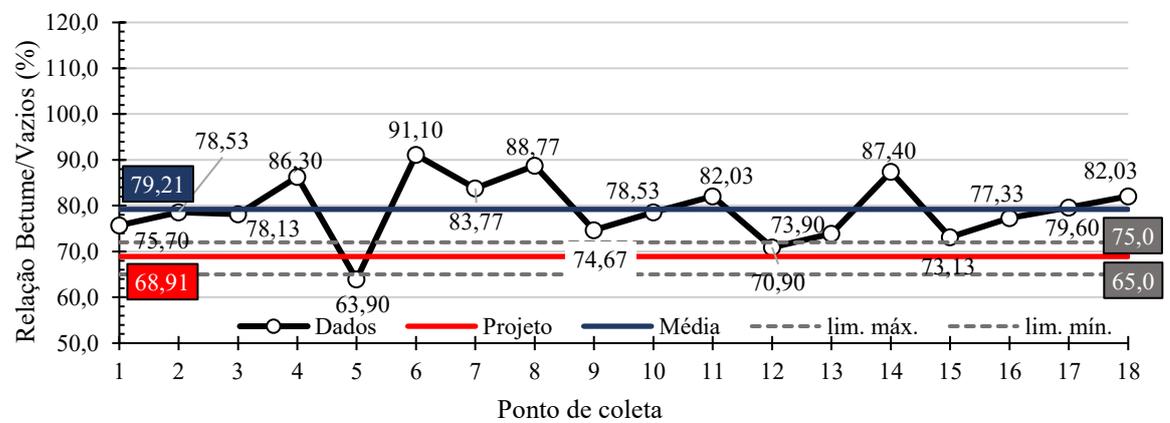
(e)

Fonte: Autor.



(f)

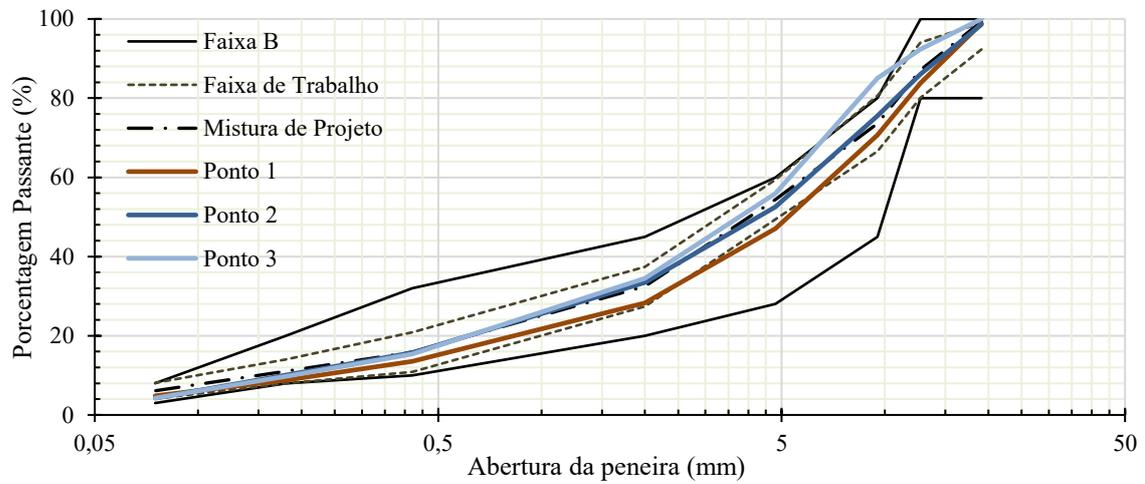
Fonte: Autor.



(g)

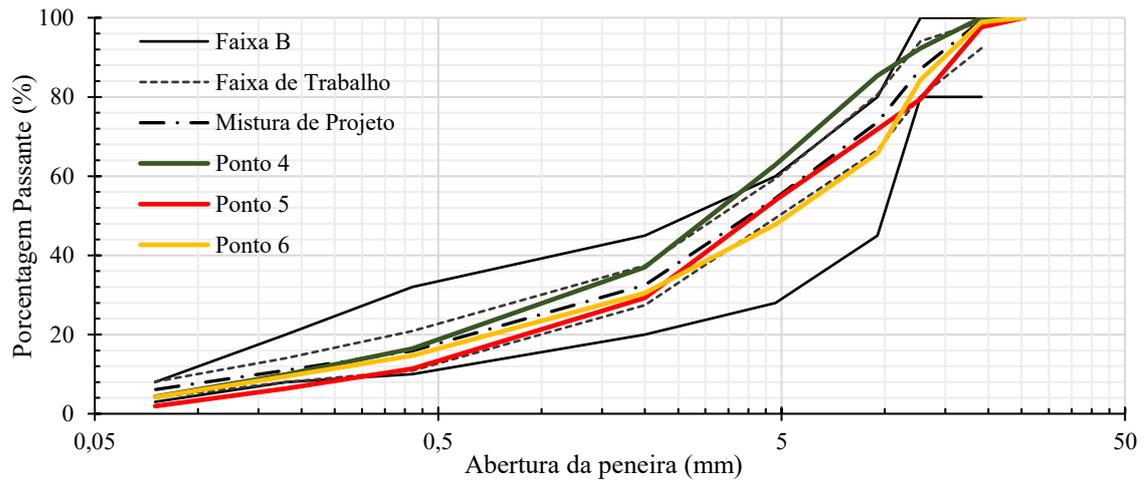
Fonte: Autor.

Figura 4.7 - Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa C: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7, 8 e 9; (d) Pontos 10, 11 e 12; (e) Pontos 13,14 e 15; (f) Pontos 16, 17 e 18.



(a)

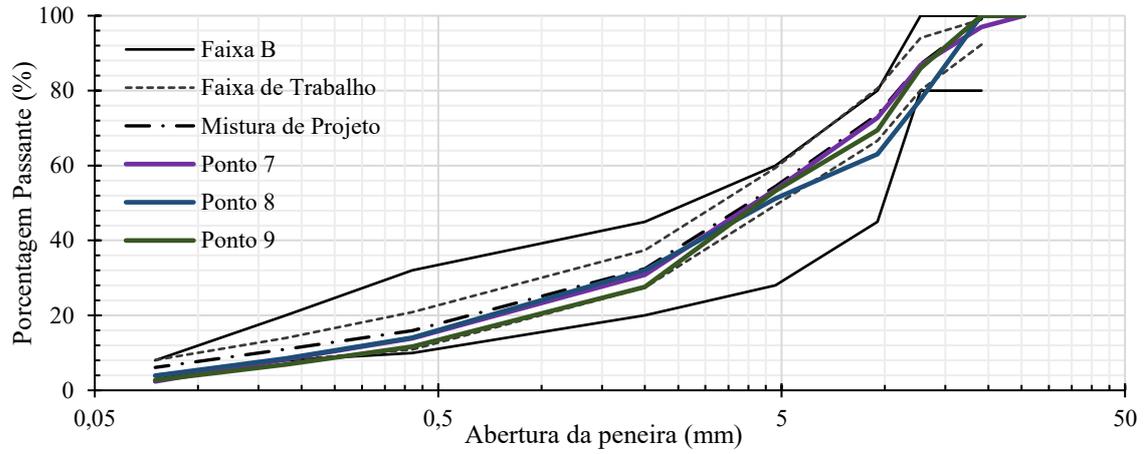
Fonte: Autor.



(b)

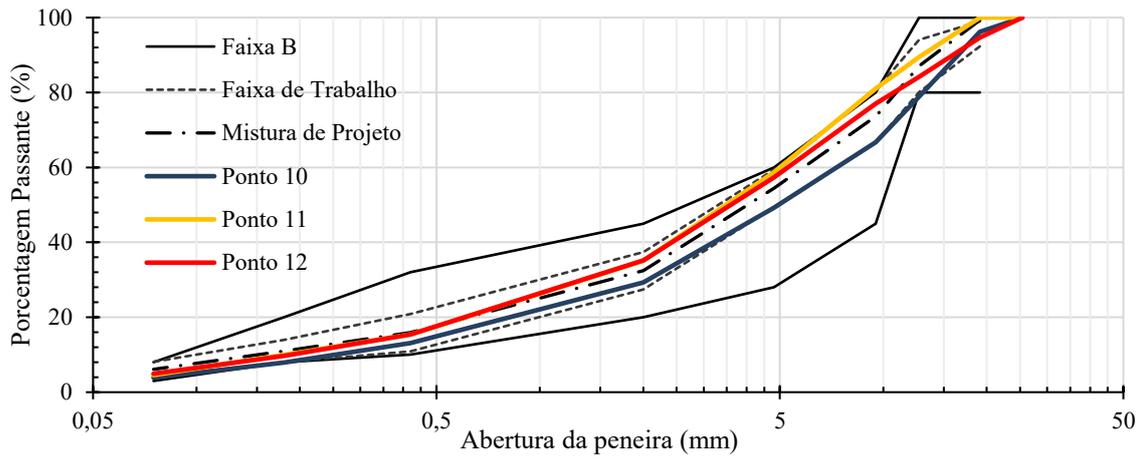
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.7



(c)

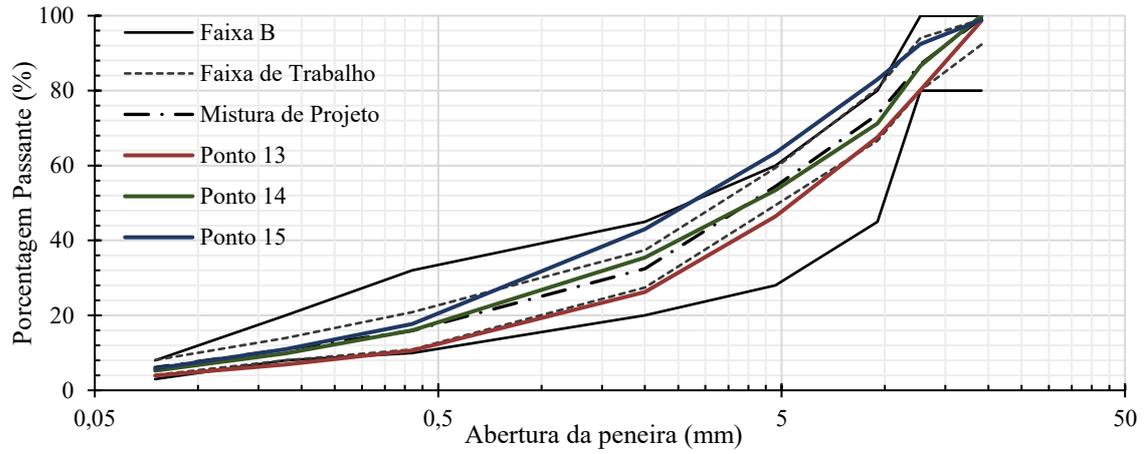
Fonte: Autor.



(d)

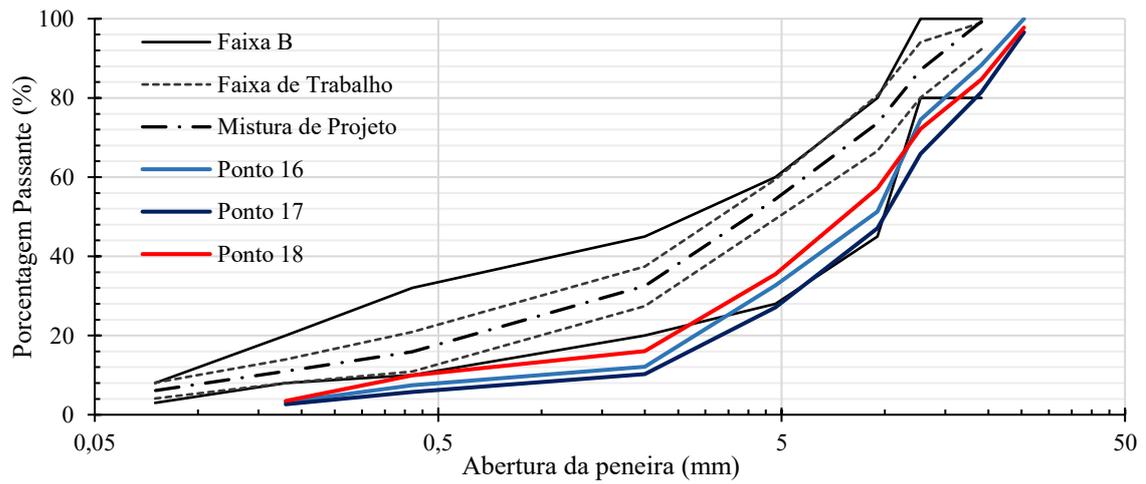
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.7



(e)

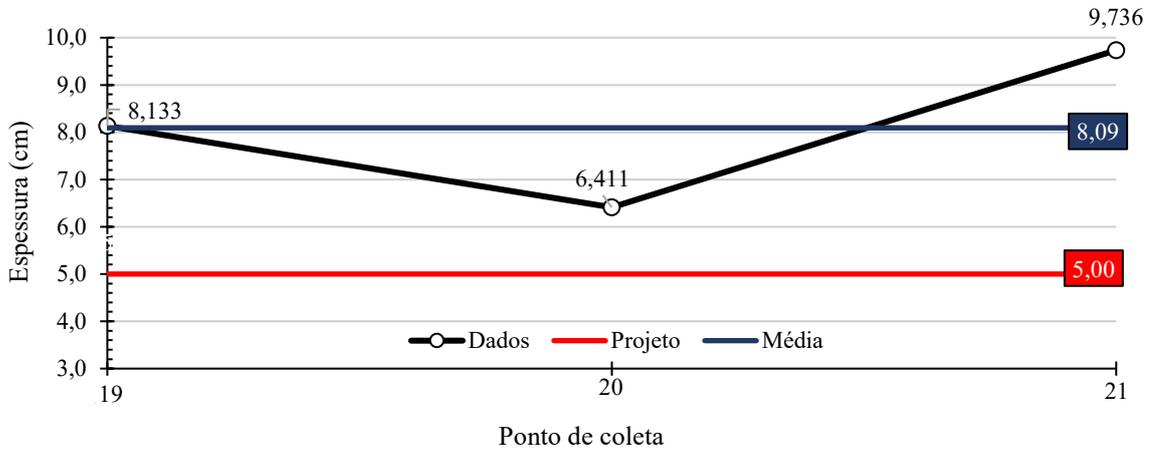
Fonte: Autor.



(f)

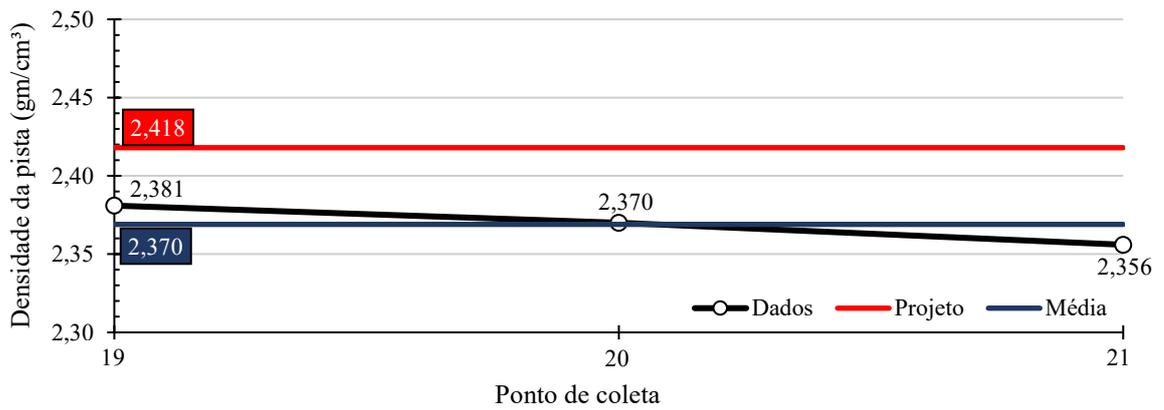
Fonte: Autor.

Figura 4.8 - Representação gráfica das extrações por sonda rotativa referente a empresa C: (a) Espessura da Camada; (b) Densidade em pista; (c) Volume de Vazios; (d) Grau de Compactação.



(a)

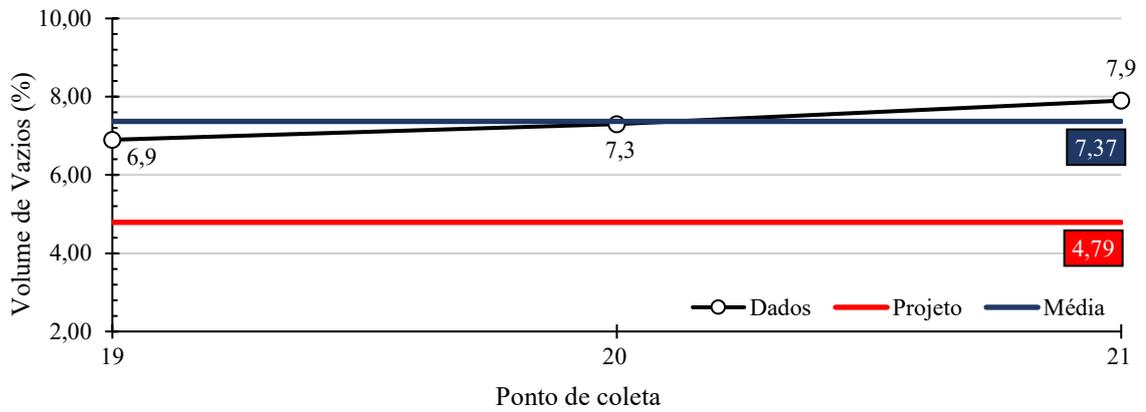
Fonte: Autor.



(b)

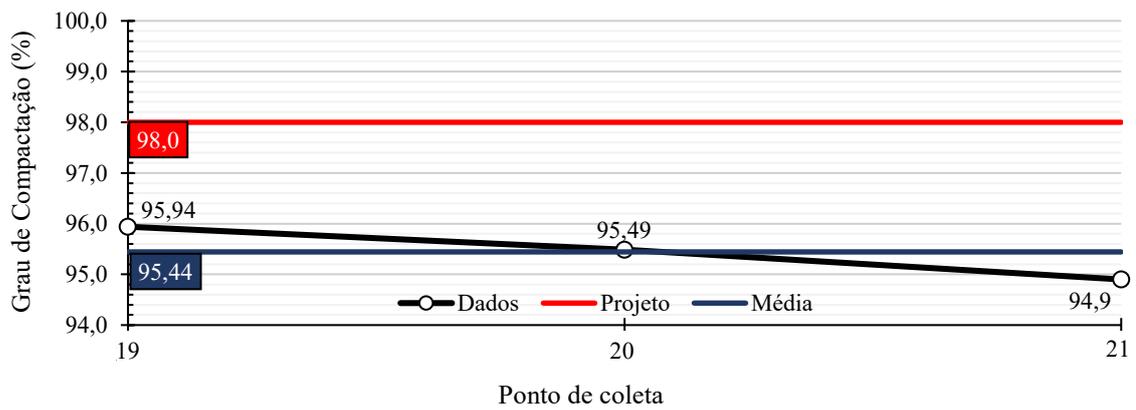
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.8



(c)

Fonte: Autor.



(d)

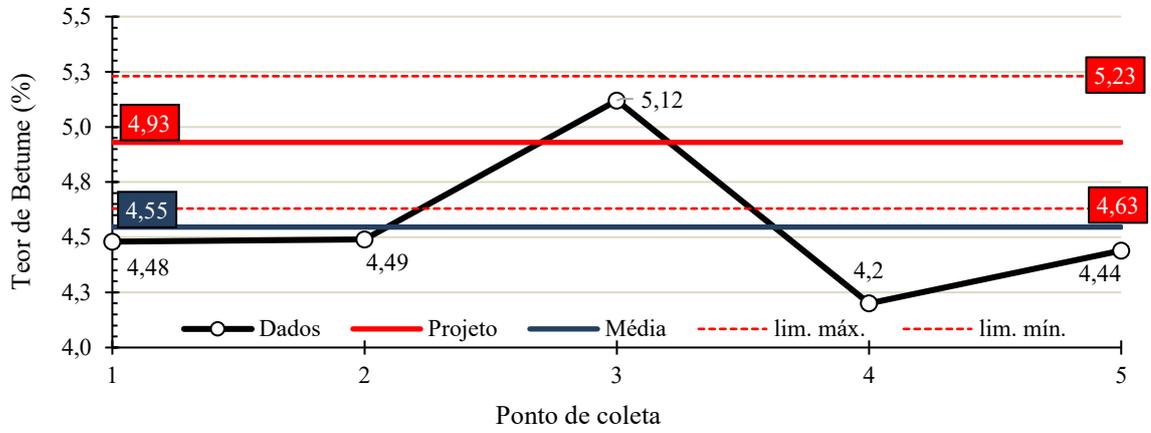
Fonte: Autor.

Tabela 4.4 - Datas das coletas de amostra da empresa D.

Ponto	Data de Coleta	Ponto	Data de Coleta
1	26/01/2022	4	14/02/2022
2	25/01/2022	5	15/02/2022
3	27/01/2022	-	-

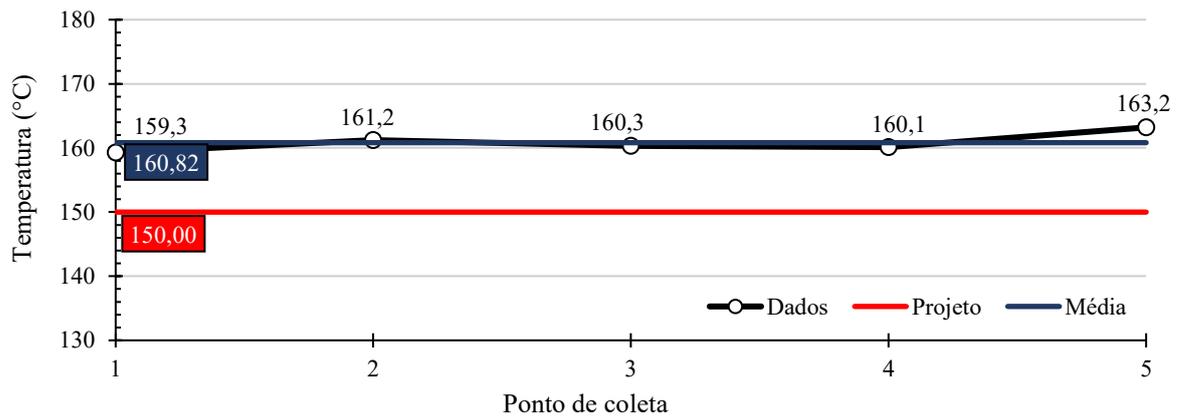
Fonte: Autor.

Figura 4.9 - Representação gráfica dos resultados referente a empresa D: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios.



(a)

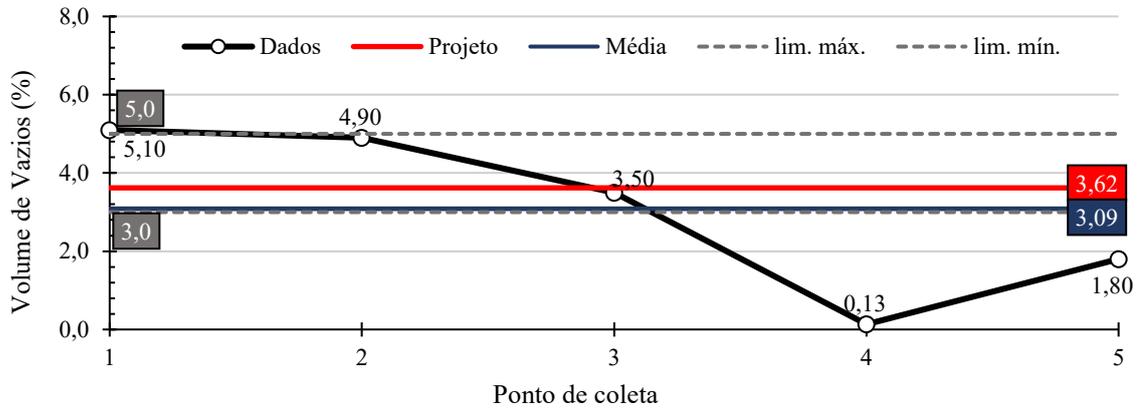
Fonte: Autor.



(b)

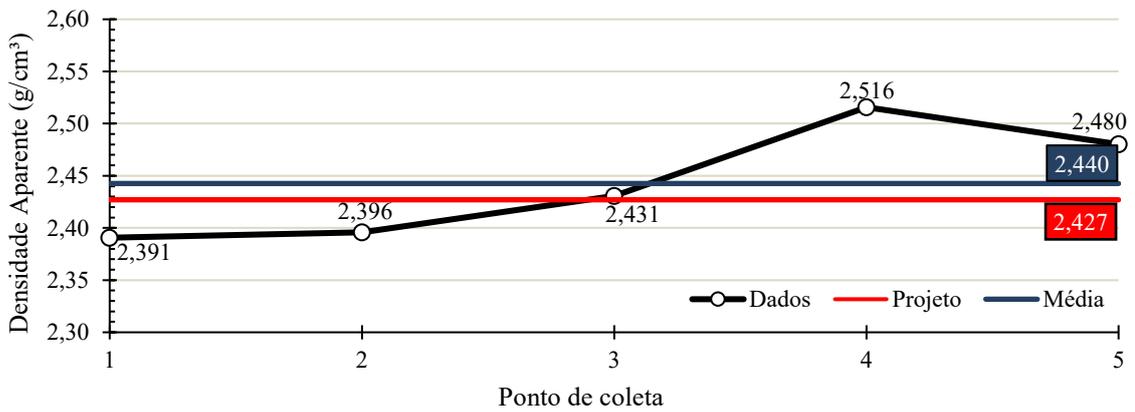
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.9



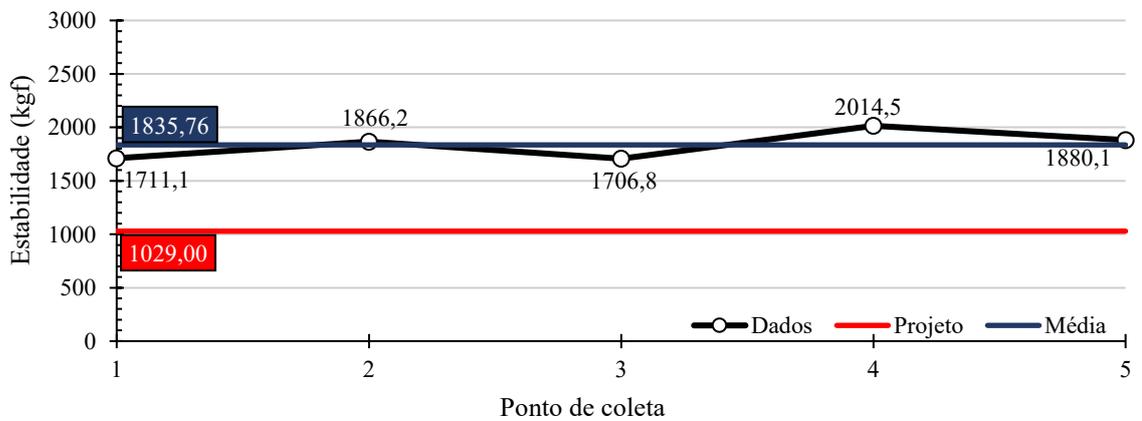
(c)

Fonte: Autor.



(d)

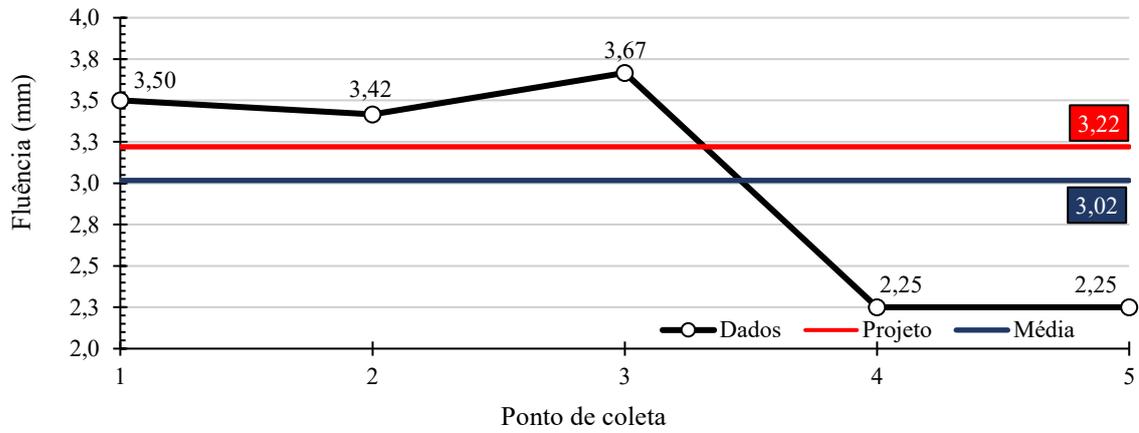
Fonte: Autor.



(e)

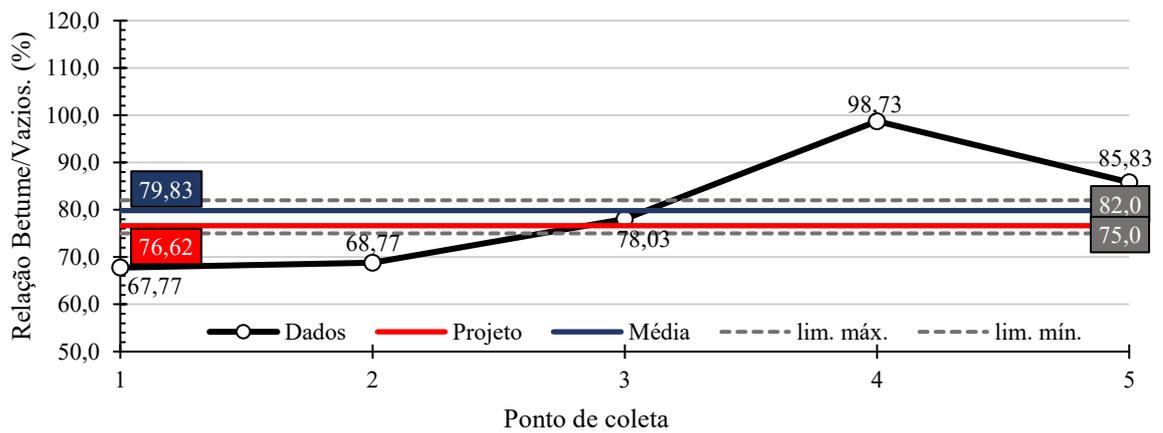
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.9



(f)

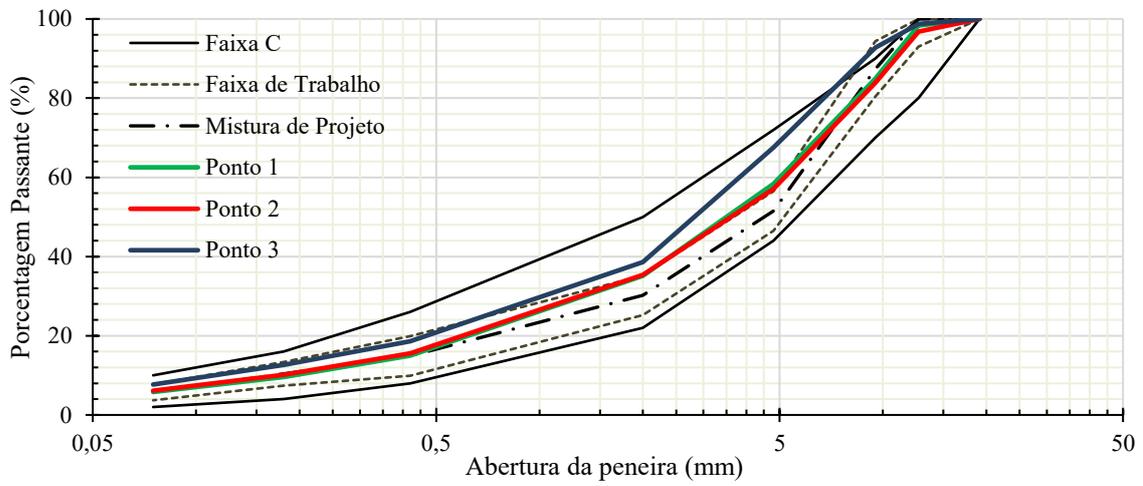
Fonte: Autor.



(g)

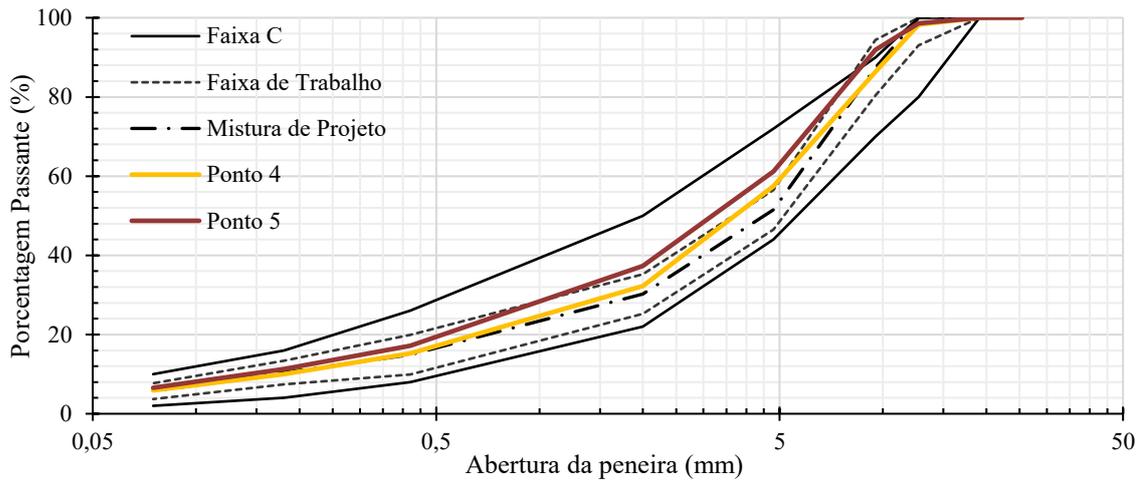
Fonte: Autor.

Figura 4.10 - Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa D: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4 e 5.



(a)

Fonte: Autor.



(b)

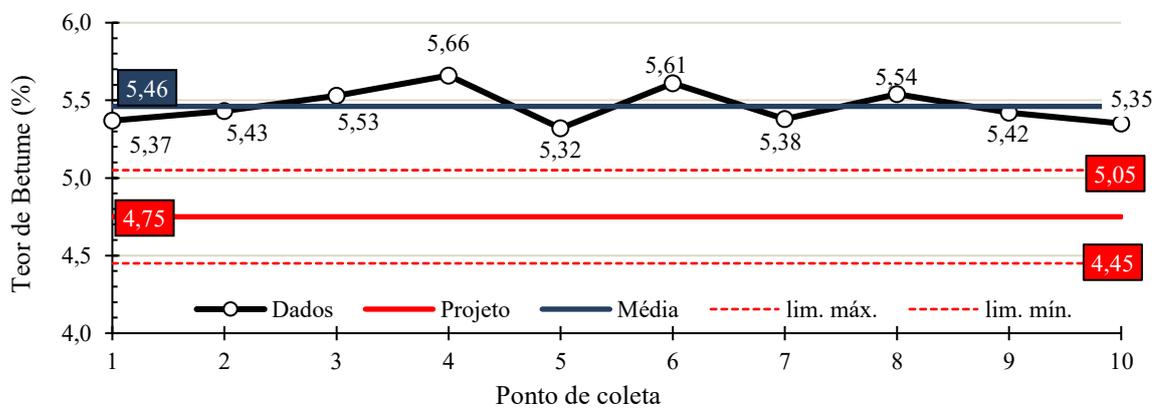
Fonte: Autor.

Tabela 4.5 - Datas das coletas de amostra da empresa E.

Ponto	Data de Coleta	Ponto	Data de Coleta
1	17/08/2021	6	18/08/2021
2	17/08/2021	7	18/08/2021
3	17/08/2021	8	23/08/2021
4	18/08/2021	9	23/08/2021
5	18/08/2021	10	23/08/2021

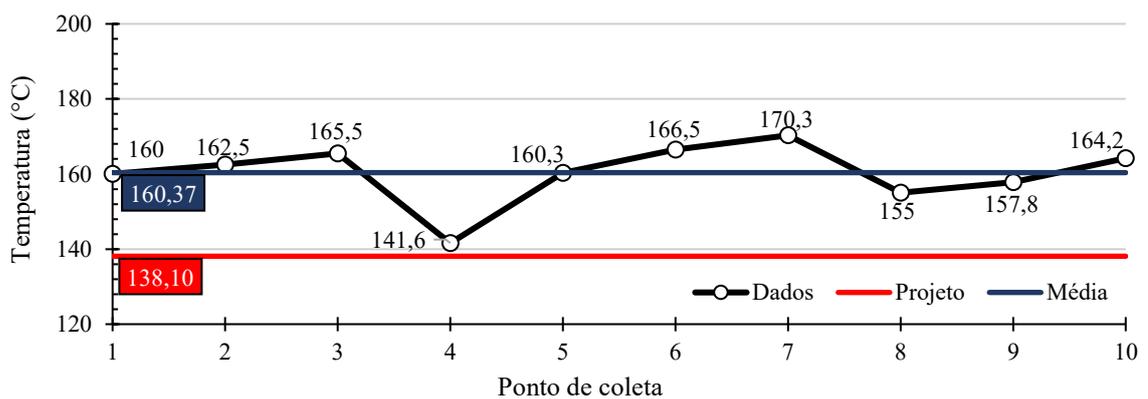
Fonte: Autor.

Figura 4.11 - Representação gráfica dos resultados referente a empresa E: (a) Teor de Betume; (b) Temperatura; (c) Volume de Vazios; (d) Densidade Aparente; (e) Estabilidade; (f) Fluência; (g) Relação Betume/Vazios.



(a)

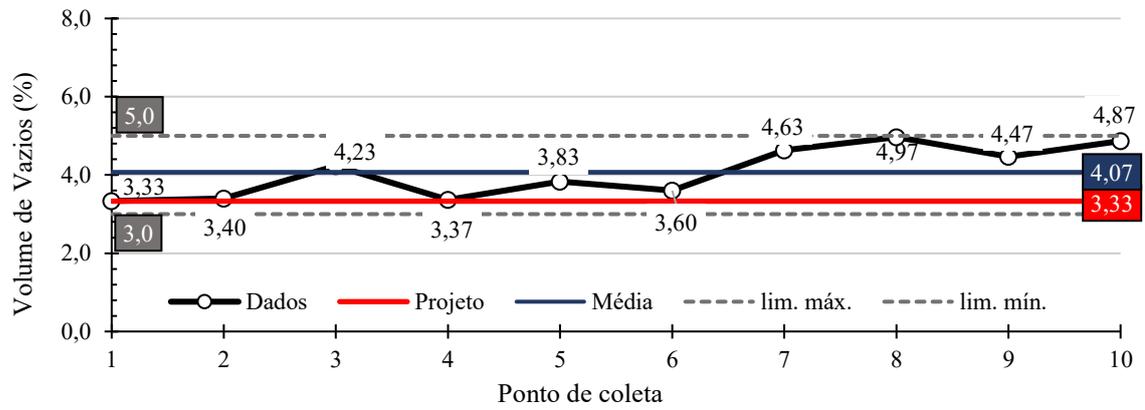
Fonte: Autor.



(b)

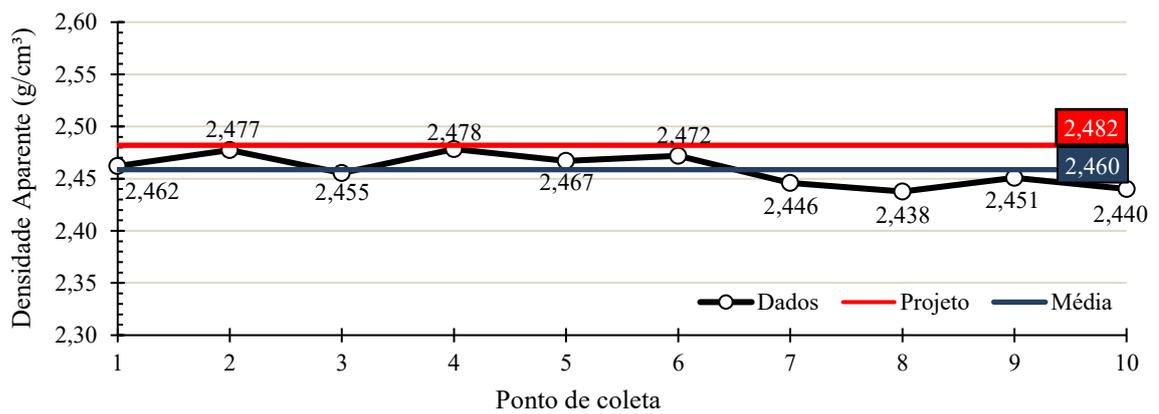
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.11



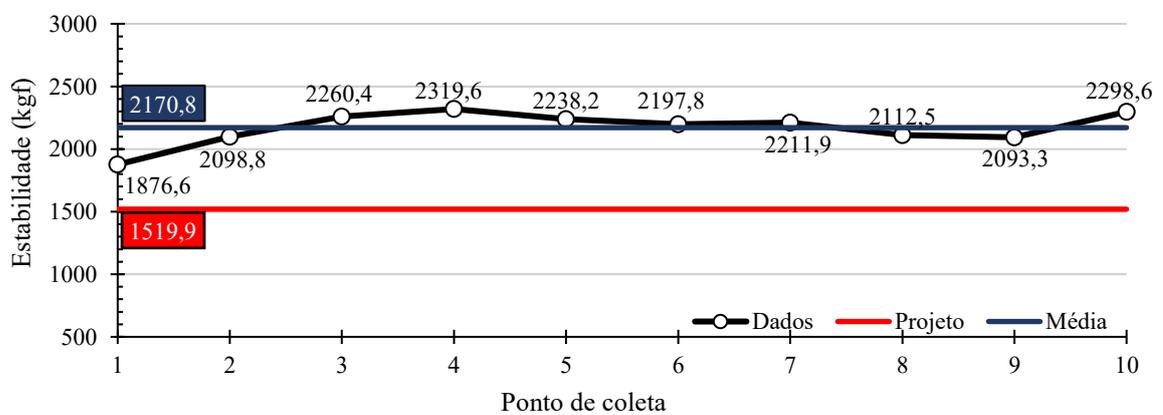
(c)

Fonte: Autor.



(d)

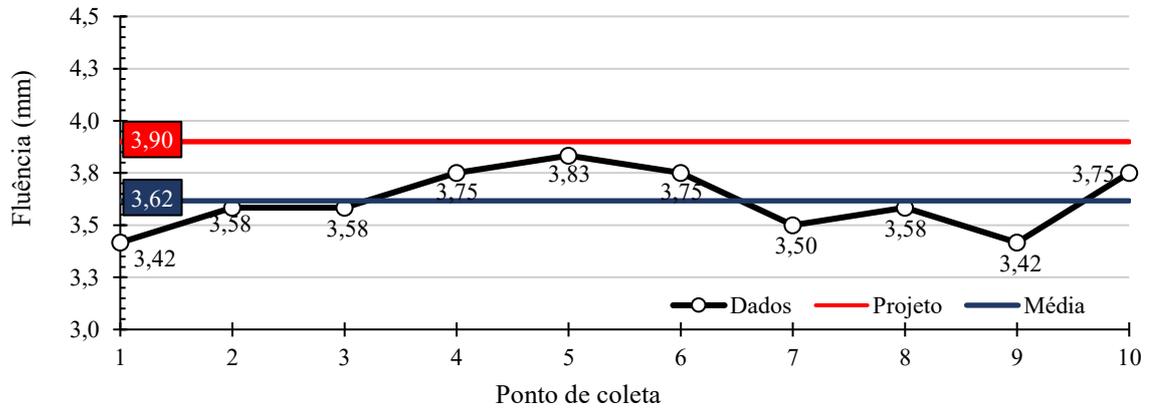
Fonte: Autor.



(e)

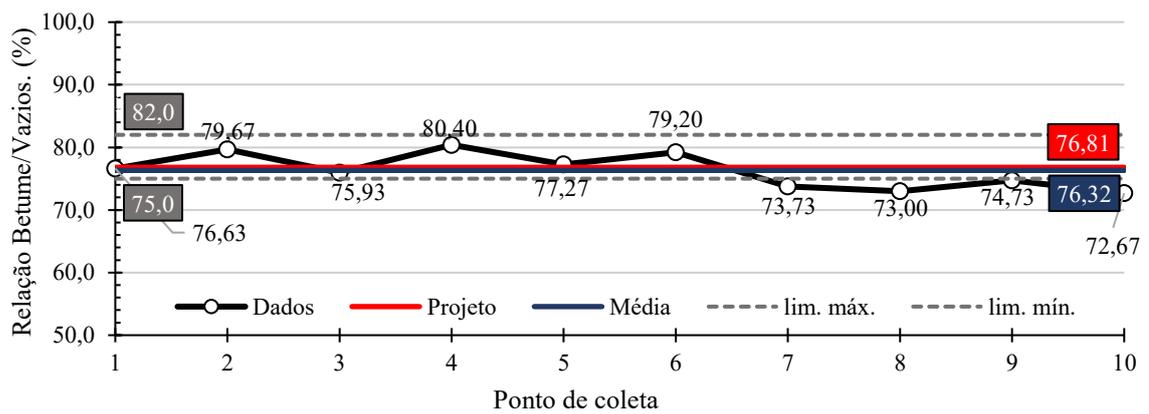
Fonte: Autor.

Continuação da Figura 4.11



(f)

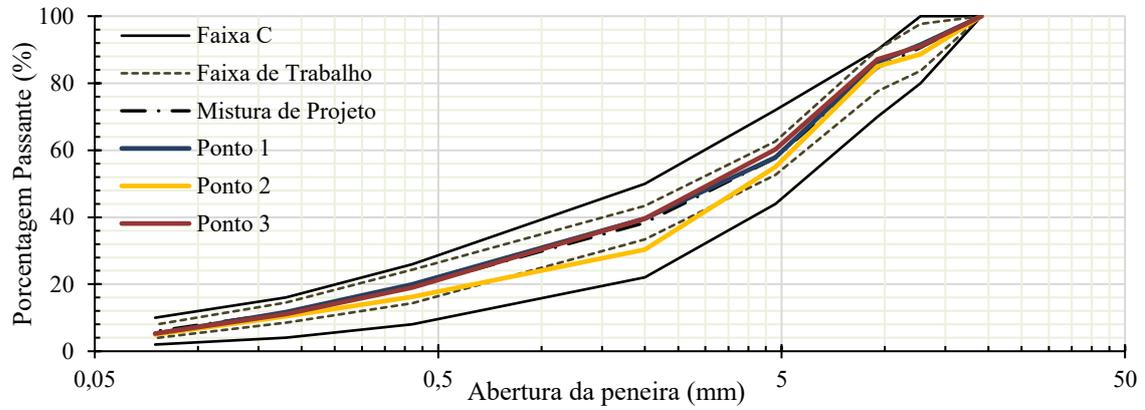
Fonte: Autor.



(g)

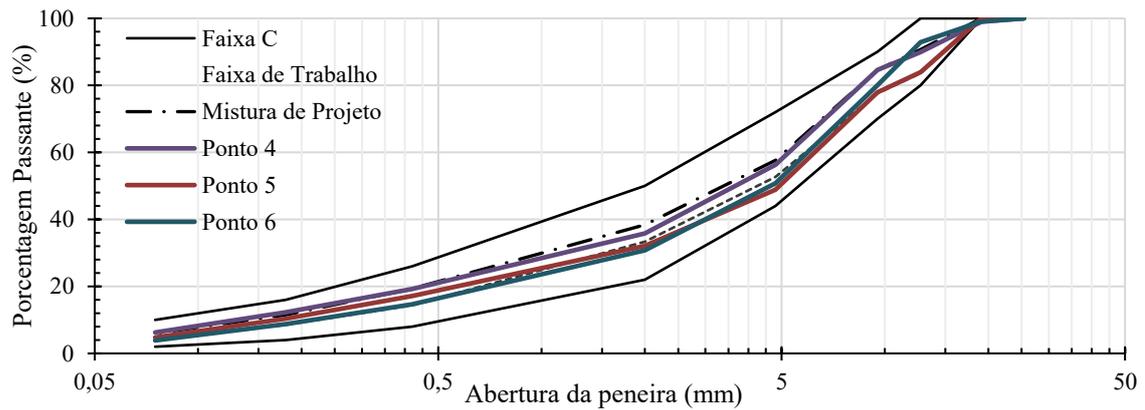
Fonte: Autor.

Figura 4.12 - Curvas granulométricas dos resultados referentes a empresa E: (a) Pontos 1, 2 e 3; (b) Pontos 4, 5 e 6; (c) Pontos 7, 8 e 9.



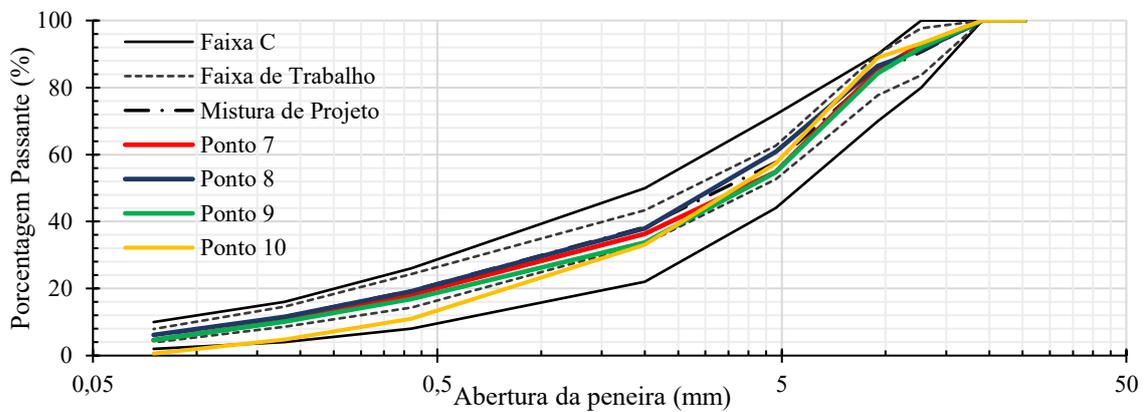
(a)

Fonte: Autor.



(b)

Fonte: Autor.



(c)

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste trabalho, buscou-se contribuir para o melhor entendimento sobre a adequabilidade de alguns serviços de pavimentação executados em vias públicas e ofertados à população de Joinville/SC, colaborando como ferramenta técnica à identificação dos problemas existentes e à consequente tomada de ações que visem melhorar a qualidade dos produtos entregues.

Desta forma, a partir dos demonstrativos relacionados às propriedades físicas e aos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas avaliadas, em comparação aos dados originais de projeto, conclui-se que os objetivos geral e específicos foram atendidos efetivamente.

Diante dos cenários apresentados, é notável a dificuldade que todas as empresas avaliadas tiveram em respeitar os parâmetros originais especificados em projeto, seja no processo produtivo nas usinas como de execução em campo, destacando-se a ausência no controle do teor de betume nas dosagens, composição granulométrica, temperatura de compactação das misturas asfálticas, espessuras das camadas e grau de compactação. É importante ressaltar que estas são consideradas premissas básicas para se ter um produto com a mínima qualidade necessária aplicada em campo, de acordo com as prerrogativas de projeto.

Vale ressaltar que a metodologia Marshall se mostra pouco representativa com a realidade em campo. Enquanto a energia de compactação em laboratório é realizada através de impactos consecutivos ao corpo de prova, contribuindo para a alteração da densidade do material ensaiado, a aplicação da energia em campo é diferente. O pavimento é submetido ao amassamento que o rolo compactador exerce sobre o mesmo, não havendo a quebra dos granulares, mas acomodação por intertravamento entre eles.

É igualmente válido observar que o tipo de ruptura adotado pela metodologia Marshall se diferencia da ocorrida em campo. A metodologia estabelece que a ruptura dos corpos de prova seja realizada através de uma carga monotônica, exercida pela compressão diametral dos mesmos, enquanto em campo, a ruptura é consequência da fadiga que o pavimento é imposto pelos esforços de flexão alternada. Diferentemente do verificado em campo, a metodologia Marshall provoca um rompimento acelerado, com tempo insuficiente para um rompimento devido à fadiga.

A pesquisa possui como limitação a aferição das condições das misturas asfálticas, somente em locais na qual a empresa teve orientações de exercer a função de fiscalização, sendo

esta restrição atribuída exclusivamente em vias presentes na licitação do serviço. Todavia, apesar de tais resultados serem condicionadas a cinco obras de pavimentação, é passível de conjecturar que as condições das demais vias públicas apresentem características similares às encontradas através deste estudo.

Para tanto, como sugestões para trabalhos futuros, é de interesse avaliar as propriedades físicas e parâmetros de dosagem nas demais vias públicas existentes no município, bem como determinar estas características considerando uma metodologia mais representativa das condições reais em campo, além do acompanhamento contínuo das vias públicas já avaliadas pelo presente trabalho de forma mais detalhada, com o intuito de propor readequações às estruturas de pavimento construídas.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo, 2007.
- BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com emprego de pó calcário**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2008.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>. Acesso em: 28 out. 2021.
- BÚRIGO, A. S. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- CENTRO DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS AMBIENTAIS E DE HIDROMETEOROLOGIA DE SANTA CATARINA. **Recordes de calor em SC**. Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/recordes-de-calor/>. Acesso em: 28 out. 2021.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT; SEST SENAT, 2019. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial>. Acesso em: 28 out. 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS **ES-031/2006**. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. 14p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031_2006_es.pdf Acesso em: 5 set. 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031/2006**. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 043/95**. Misturas betuminosa a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 053/94**. Misturas betuminosa – percentagem de betume. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 313/97**. Pavimentação - Concreto betuminoso. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 412/2019**. Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 428/2020**. Pavimentação – determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.2020.

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

GRECA ASFALTO. **Especificações técnicas**. Araucária, 2005. Disponível em: <https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/especificacoes-produtos/especificacoes-cap-greca-asfaltos.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2022.

GUERRERO, Y. A. P. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

JOINVILLE. Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável. **Cidade em Dados 2017**. Joinville: Prefeitura Municipal de Joinville, 2017. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2016/01/Joinville-Cidade-em-Dados-2017.pdf>. Acesso em: 28 out. 2021

JOINVILLE. Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável. **Cidade em Dados 2018**. Joinville: Prefeitura Municipal de Joinville, 2018. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/publicacoes/joinville-cidade-em-dados-2018/>. Acesso em: 28 out. 2021.

MALLICK, R. B.; EL-KORCHI, T. **Pavement engineering: principles and practice**. 3rd. ed. CRC Press, 2018

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

NIKOLAIDES, A. **Highway engineering: pavements, materials and control of quality**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2015.

NOVAS TÉCNICAS DE ASFALTO. **CAP 50/70**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.nta-asfaltos.com.br/cap-50-70>. Acesso em: 18 mar. 2022.

PEARSON, D. **Deterioration and maintenance of pavements**. London: ICE Publishing, 2012.

SCHWAB, K. (ed.). **The global competitiveness report 2019**. Cologny/Geneva Switzerland: World Economic Forum, 2019. Acesso em: <https://www.weforum.org/reports/how-to-end-a-decade-of-lost-productivity-growth>. Disponível em: 28 out. 2021.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2007, Vol. 1.

THOM, N. **Principles of pavement engineering**. 2nd. ed. London: ICE Publishing, 2014.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2nd. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 1975.

APÊNDICE A – IMPERFEIÇÕES OBSERVADAS NAS VIAS

Figura A.1 – Ponto 9 da empresa A.



Fonte: Autor.

Figura A.2 – Ponto 10 da empresa A.



Fonte: Autor.

Figura A.3 – Ponto 5 da empresa B.



Fonte: Autor.

Figura A.4 – Ponto 9 da empresa B.



Fonte: Autor.

Figura A.5 – Ponto 5 da empresa C



Fonte: Autor.

Figura A.6 – Ponto 11 da empresa C.



Fonte: Autor.

Figura A.7 – Ponto 3 da empresa D.



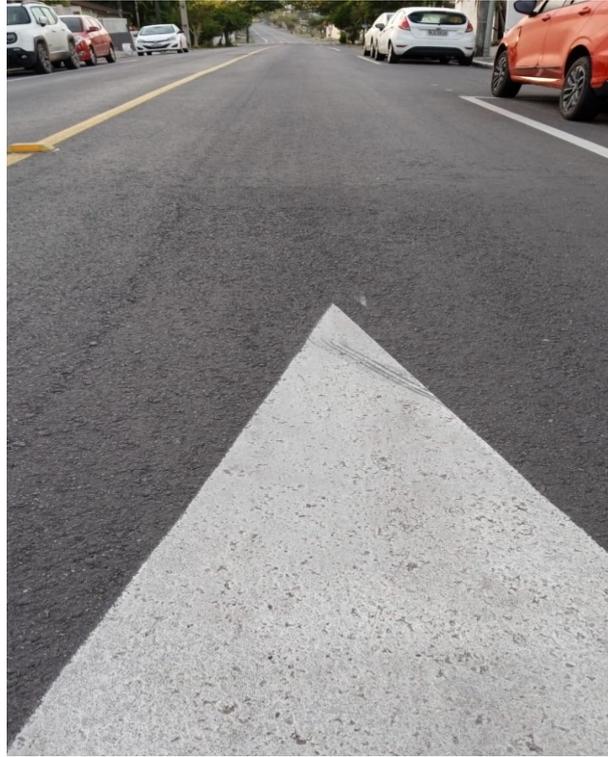
Fonte: Autor.

Figura A.8 – Ponto 5 da empresa D.



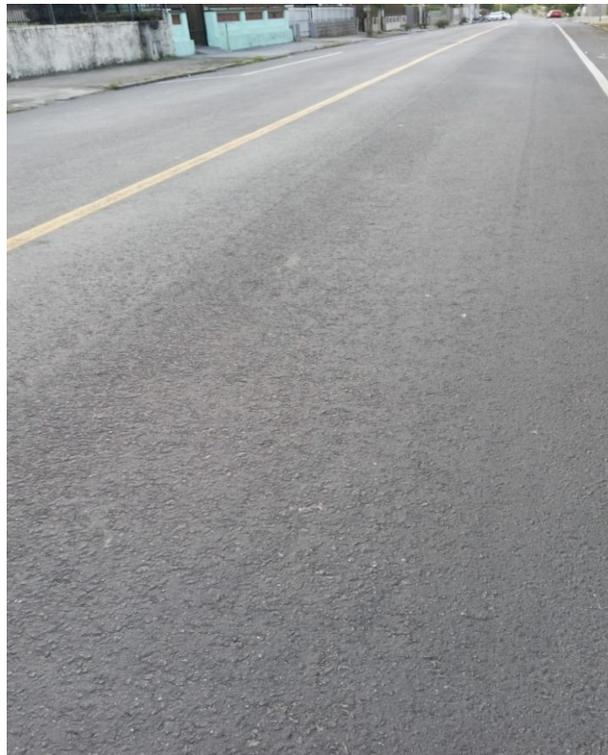
Fonte: Autor.

Figura A.9 – Ponto 2 da empresa E.



Fonte: Autor.

Figura A.10 – Ponto 3 da empresa E.



Fonte: Autor.

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO

Tabela B.1 – Resultados referentes à empresa A.

Ponto	Teor de Betume (%)	T (°C)	Volumes de Vazios (%)			Densidade Aparente (g/cm ³)			Estabilidade (kgf)			Fluência (mm)			V.A.M (%)			R.B.V (%)		
			Amostra	Média		Amostra	Média		Amostra	Média		Amostra	Média		Amostra	Média		Amostra	Média	
1	5,06	123,1	CP1	4,4	4,37	CP1	2,452	2,452	CP1	2122,6	2201,8	CP1	3,25	3,50	CP1	16,7	16,67	CP1	73,7	73,77
			CP2	4,1		CP2	2,459		CP2	2587,0		CP2	4,00		CP2	16,4		CP2	74,9	
			CP3	4,6		CP3	2,446		CP3	1895,8		CP3	3,25		CP3	16,9		CP3	72,7	
2	5,19	165,6	CP1	4,9	5,07	CP1	2,438	2,434	CP1	1968,8	1815,6	CP1	3,25	3,42	CP1	17,4	17,57	CP1	71,8	71,07
			CP2	5,1		CP2	2,434		CP2	1887,3		CP2	3,25		CP2	17,6		CP2	71	
			CP3	5,2		CP3	2,43		CP3	1590,7		CP3	3,75		CP3	17,7		CP3	70,4	
3	5,26	159,3	CP1	5	5,30	CP1	2,437	2,429	CP1	2423,9	2292,6	CP1	4,25	3,83	CP1	17,7	17,93	CP1	71,9	70,57
			CP2	5,4		CP2	2,426		CP2	2343,7		CP2	3,25		CP2	18		CP2	70,1	
			CP3	5,5		CP3	2,424		CP3	2110,3		CP3	4,00		CP3	18,1		CP3	69,7	
4	5,31	155,8	CP1	5	5,13	CP1	2,437	2,433	CP1	2468,2	2320,8	CP1	4,25	4,08	CP1	17,8	17,93	CP1	72	71,40
			CP2	5,5		CP2	2,425		CP2	2325,9		CP2	4,25		CP2	18,2		CP2	70	
			CP3	4,9		CP3	2,438		CP3	2168,3		CP3	3,75		CP3	17,8		CP3	72,2	
5	5,16	149,9	CP1	4,1	3,87	CP1	2,459	2,465	CP1	2358,0	2487,0	CP1	3,50	3,50	CP1	16,7	16,47	CP1	75,4	76,57
			CP2	3,6		CP2	2,473		CP2	2565,0		CP2	3,75		CP2	16,2		CP2	78	
			CP3	3,9		CP3	2,464		CP3	2538,1		CP3	3,25		CP3	16,5		CP3	76,3	
6	5,29	161,7	CP1	4,2	3,93	CP1	2,458	2,464	CP1	1805,5	1793,4	CP1	3,00	3,42	CP1	17	16,80	CP1	75,5	76,63
			CP2	3,9		CP2	2,464		CP2	1685,1		CP2	3,50		CP2	16,8		CP2	76,6	
			CP3	3,7		CP3	2,47		CP3	1889,6		CP3	3,75		CP3	16,6		CP3	77,8	
7	5,38	162,8	CP1	5,2	5,10	CP1	2,432	2,429	CP1	2058,1	2001,0	CP1	3,50	3,50	CP1	19,1	18,57	CP1	71,4	70,93
			CP2	4,9		CP2	2,438		CP2	1967,8		CP2	3,75		CP2	17,9		CP2	72,5	

			CP3	5,2		CP3	2,416		CP3	1977,2		CP3	3,25		CP3	18,7		CP3	68,9	
8	5,41	157,6	CP1	3,1	3,27	CP1	2,485	2,481	CP1	2563,5	2384,9	CP1	4,25	4,17	CP1	16,4	16,57	CP1	81	80,20
			CP2	3,2		CP2	2,482		CP2	2522,4		CP2	4,00		CP2	16,5		CP2	80,5	
			CP3	3,5		CP3	2,475		CP3	2068,8		CP3	4,25		CP3	16,8		CP3	79,1	
9	5,36	150,1	CP1	4,7	4,60	CP1	2,444	2,448	CP1	1839,2	1854,8	CP1	3,75	3,83	CP1	17,7	17,60	CP1	73,3	73,93
			CP2	4,6		CP2	2,448		CP2	1846,4		CP2	3,75		CP2	17,6		CP2	74	
			CP3	4,5		CP3	2,451		CP3	1878,7		CP3	4,00		CP3	17,5		CP3	74,5	
10	4,93	164,6	CP1	6,7	6,80	CP1	2,394	2,391	CP1	1669,7	1696,5	CP1	3,00	3,42	CP1	18,4	18,50	CP1	63,7	63,23
			CP2	7		CP2	2,384		CP2	1705,8		CP2	3,25		CP2	18,7		CP2	62,3	
			CP3	6,7		CP3	2,394		CP3	1714,1		CP3	4,00		CP3	18,4		CP3	63,7	
11	4,87	161,2	CP1	5,7	5,57	CP1	2,419	2,422	CP1	1894,8	2198,0	CP1	3,00	3,17	CP1	17,3	17,23	CP1	67,3	67,73
			CP2	5,6		CP2	2,421		CP2	2353,0		CP2	3,25		CP2	17,3		CP2	67,5	
			CP3	5,4		CP3	2,426		CP3	2346,3		CP3	3,25		CP3	17,1		CP3	68,4	

Fonte: Autor.

Tabela B.2 – Resultados referentes à empresa B.

Ponto	Teor de Betume (%)	T(°C)	Volumen de Vazios (%)			Densidade Aparente (g/cm ³)			Estabilidade (kgf)			Fluência (mm)			V.A.M (%)			R.B.V (%)		
			Amostra			Amostra			Amostra			Amostra			Amostra					
1	5,02	150,9	CP1	4,3	4,33	CP1	2,454	2,454	CP1	1768,9	1849,8	CP1	3,25	3,58	CP1	16,5	16,53	CP1	73,8	73,77
			CP2	4,4		CP2	2,452		CP2	1774,2		CP2	3,50		CP2	16,6		CP2	73,5	
			CP3	4,3		CP3	2,455		CP3	2006,3		CP3	4,00		CP3	16,5		CP3	74,0	
2	5,11	147,2	CP1	4,9	4,70	CP1	2,44	2,445	CP1	1773,9	1978,9	CP1	4,00	3,75	CP1	17,2	17,07	CP1	71,7	72,53
			CP2	4,6		CP2	2,447		CP2	2130,1		CP2	3,50		CP2	17,0		CP2	73,0	
			CP3	4,6		CP3	2,447		CP3	2032,7		CP3	3,75		CP3	17,0		CP3	72,9	
3	5,33	152,3	CP1	4,2	4,30	CP1	2,458	2,454	CP1	2014,8	2013,3	CP1	4,00	4,00	CP1	17,1	17,27	CP1	75,7	75,03
			CP2	4,3		CP2	2,453		CP2	2027,0		CP2	4,25		CP2	17,3		CP2	74,9	
			CP3	4,4		CP3	2,451		CP3	1998,0		CP3	3,75		CP3	17,4		CP3	74,5	
4	5,08	153,2	CP1	4,6	4,67	CP1	2,447	2,445	CP1	2312,2	2216,1	CP1	3,50	3,58	CP1	16,9	16,93	CP1	72,7	72,43
			CP2	4,5		CP2	2,449		CP2	2108,6		CP2	3,50		CP2	16,8		CP2	73,1	
			CP3	4,9		CP3	2,44		CP3	2227,5		CP3	3,75		CP3	17,1		CP3	71,5	
5	5,03	144,7	CP1	4	4,13	CP1	2,463	2,460	CP1	1781,5	1670,7	CP1	3,50	3,58	CP1	16,2	16,33	CP1	75,5	74,90
			CP2	4,1		CP2	2,461		CP2	1613,1		CP2	3,75		CP2	16,3		CP2	75,1	
			CP3	4,3		CP3	2,455		CP3	1617,4		CP3	3,50		CP3	16,5		CP3	74,1	
6	5,02	150,8	CP1	4,6	4,70	CP1	2,448	2,445	CP1	2242,6	2583,9	CP1	4,50	4,25	CP1	16,7	16,80	CP1	72,7	72,27
			CP2	4,7		CP2	2,445		CP2	2484,2		CP2	4,00		CP2	16,8		CP2	72,3	
			CP3	4,8		CP3	2,442		CP3	3024,9		CP3	4,25		CP3	16,9		CP3	71,8	
7	4,61	152,7	CP1	6,5	6,20	CP1	2,405	2,408	CP1	1709,3	1902,8	CP1	4,25	4,00	CP1	17,5	17,20	CP1	62,6	63,90
			CP2	6		CP2	2,411		CP2	1805,5		CP2	3,75		CP2	17,0		CP2	64,7	
			CP3	6,1		CP3	2,409		CP3	2193,7		CP3	4,00		CP3	17,1		CP3	64,4	
8	5,05	170,8	CP1	6,6	6,63	CP1	2,394	2,394	CP1	2179,8	1988,0	CP1	3,25	3,17	CP1	18,6	18,60	CP1	64,3	64,30
			CP2	6,6		CP2	2,395		CP2	1920,2		CP2	3,00		CP2	18,6		CP2	64,4	
			CP3	6,7		CP3	2,393		CP3	1863,9		CP3	3,25		CP3	18,6		CP3	64,2	

9	4,46	158	CP1	4,4	4,63	CP1	2,453	2,446	CP1	2755,0	2776,9	CP1	3,50	3,58	CP1	15,2	15,43	CP1	71,2	70,03
			CP2	4,7		CP2	2,444		CP2	3055,8		CP2	3,75		CP2	15,5		CP2	69,7	
			CP3	4,8		CP3	2,442		CP3	2519,9		CP3	3,50		CP3	15,6		CP3	69,2	

Fonte: Autor.

Tabela B.3 – Resultados referentes à empresa C.

Ponto	Teor de Betume (%)	T (°C)	Volumes de Vazios (%)			Densidade Aparente (g/cm ³)			Estabilidade (kgf)			Fluência (mm)			V.A.M (%)			R.B.V (%)		
			Amostra			Amostra			Amostra			Amostra			Amostra			Amostra		
1	4,6	181	CP1	3,5	3,63	CP1	2,45	2,447	CP1	1304,78	1271,9	CP1	3	3,42	CP1	14,8	14,87	CP1	76,2	75,70
			CP2	3,8		CP2	2,443		CP2	1191,89		CP2	3,5		CP2	15		CP2	74,9	
			CP3	3,6		CP3	2,448		CP3	1319,09		CP3	3,75		CP3	14,8		CP3	76	
2	3,65	167,5	CP1	2,5	2,47	CP1	2,476	2,476	CP1	1845,39	1816,3	CP1	3,25	3,17	CP1	11,5	11,53	CP1	78,4	78,53
			CP2	2,4		CP2	2,478		CP2	1864,13		CP2	3,25		CP2	11,5		CP2	79	
			CP3	2,5		CP3	2,475		CP3	1739,47		CP3	3		CP3	11,6		CP3	78,2	
3	4,44	167,5	CP1	3	3,10	CP1	2,465	2,461	CP1	1448,48	1500,7	CP1	3	3,25	CP1	13,9	14,00	CP1	79	78,13
			CP2	3,2		CP2	2,458		CP2	1407,61		CP2	3,25		CP2	14,1		CP2	77,4	
			CP3	3,1		CP3	2,461		CP3	1646,03		CP3	3,5		CP3	14		CP3	78	
4	4,95	174,1	CP1	2,1	1,93	CP1	2,486	2,489	CP1	1748,78	1722,2	CP1	3,5	3,17	CP1	14,4	14,30	CP1	85,4	86,30
			CP2	1,8		CP2	2,492		CP2	1875,29		CP2	3		CP2	14,2		CP2	87	
			CP3	1,9		CP3	2,49		CP3	1542,51		CP3	3		CP3	14,3		CP3	86,5	
5	3,79	154,4	CP1	5	5,17	CP1	2,413	2,408	CP1	489,38	345,1	CP1	4	4,17	CP1	14,1	14,30	CP1	64,8	63,90
			CP2	5,2		CP2	2,407		CP2	255,72		CP2	4,5		CP2	14,3		CP2	63,8	
			CP3	5,3		CP3	2,404		CP3	290,14		CP3	4		CP3	14,5		CP3	63,1	
6	4,51	164,2	CP1	0,9	1,10	CP1	2,496	2,493	CP1	1735,4	1653,5	CP1	3	3,17	CP1	12,2	12,33	CP1	92,4	91,10
			CP2	1,1		CP2	2,492		CP2	1596,96		CP2	3		CP2	12,3		CP2	91,3	
			CP3	1,3		CP3	2,49		CP3	1628		CP3	3,5		CP3	12,5		CP3	89,6	
7	4,63	163	CP1	2,4	2,23	CP1	2,478	2,482	CP1	1570,91	1795,0	CP1	3,5	3,33	CP1	13,9	13,73	CP1	82,8	83,77

			CP2	2,2		CP2	2,483		CP2	2026,78		CP2	3,25		CP2	13,7		CP2	83,9	
			CP3	2,1		CP3	2,486		CP3	1787,19		CP3	3,25		CP3	13,6		CP3	84,6	
8	4,69	167,6	CP1	1,5	1,47	CP1	2,501	2,501	CP1	1893,39	1955,1	CP1	4,5	3,83	CP1	13,2	13,20	CP1	88,6	88,77
			CP2	1,6		CP2	2,498		CP2	1838,92		CP2	3,75		CP2	13,3		CP2	87,8	
			CP3	1,3		CP3	2,505		CP3	2133,04		CP3	3,25		CP3	13,1		CP3	89,9	
9	4,49	172,2	CP1	3,8	3,70	CP1	2,442	2,444	CP1	1028,61	1095,1	CP1	3	3,25	CP1	14,8	14,70	CP1	74,1	74,67
			CP2	3,6		CP2	2,447		CP2	1030,1		CP2	3,5		CP2	14,6		CP2	75,2	
			CP3	3,7		CP3	2,444		CP3	1226,67		CP3	3,25		CP3	14,7		CP3	74,7	
10	4,32	170,7	CP1	3	2,90	CP1	2,462	2,465	CP1	1523,78	1509,6	CP1	3	3,08	CP1	13,7	13,60	CP1	77,9	78,53
			CP2	2,8		CP2	2,468		CP2	1393,5		CP2	3		CP2	13,5		CP2	79,3	
			CP3	2,9		CP3	2,464		CP3	1611,61		CP3	3,25		CP3	13,6		CP3	78,4	
11	4,76	182,8	CP1	2,7	2,60	CP1	2,452	2,454	CP1	1754,5	1718,4	CP1	4	3,67	CP1	14,4	14,30	CP1	81,4	82,03
			CP2	2,6		CP2	2,454		CP2	1699,69		CP2	3,5		CP2	14,3		CP2	82	
			CP3	2,5		CP3	2,457		CP3	1701		CP3	3,5		CP3	14,2		CP3	82,7	
12	4,2	161,2	CP1	4,3	4,20	CP1	2,43	2,432	CP1	1187,56	1237,5	CP1	3	3,25	CP1	14,5	14,40	CP1	70,3	70,90
			CP2	4,1		CP2	2,435		CP2	1168,15		CP2	3,75		CP2	14,3		CP2	71,5	
			CP3	4,2		CP3	2,432		CP3	1356,78		CP3	3		CP3	14,4		CP3	70,9	
13	3,43	163,1	CP1	2,9	3,00	CP1	2,466	2,463	CP1	835,61	742,0	CP1	3	3,42	CP1	11,4	11,47	CP1	74,5	73,90
			CP2	3		CP2	2,464		CP2	665,52		CP2	3,75		CP2	11,4		CP2	74,1	
			CP3	3,1		CP3	2,46		CP3	724,94		CP3	3,5		CP3	11,6		CP3	73,1	
14	4,41	163,6	CP1	1,6	1,60	CP1	2,5	2,499	CP1	2008,65	1876,4	CP1	3,5	3,58	CP1	12,6	12,63	CP1	87,7	87,40
			CP2	1,7		CP2	2,495		CP2	1759,85		CP2	3,75		CP2	12,8		CP2	86,3	
			CP3	1,5		CP3	2,501		CP3	1860,78		CP3	3,5		CP3	12,5		CP3	88,2	
15	4,5	173,8	CP1	4,2	4,03	CP1	2,432	2,436	CP1	1853,34	1953,5	CP1	3,25	3,58	CP1	15,2	15,03	CP1	72,3	73,13
			CP2	3,9		CP2	2,44		CP2	2012,85		CP2	3,75		CP2	14,9		CP2	73,9	
			CP3	4		CP3	2,437		CP3	1994,19		CP3	3,75		CP3	15		CP3	73,2	
16	4,32	177,4	CP1	3,3	3,10	CP1	2,456	2,460	CP1	1731,81	1800,4	CP1	3,75	3,50	CP1	13,9	13,77	CP1	76,5	77,33

			CP2	2,9		CP2	2,464		CP2	2104,58		CP2	3,75		CP2	13,6		CP2	78,3	
			CP3	3,1		CP3	2,459		CP3	1564,76		CP3	3		CP3	13,8		CP3	77,2	
17	4,32	171,7	CP1	2,8	2,73	CP1	2,468	2,469	CP1	1295,24	1225,2	CP1	4,25	3,92	CP1	13,5	13,43	CP1	79,2	79,60
			CP2	2,9		CP2	2,465		CP2	998,95		CP2	3,5		CP2	13,6		CP2	78,6	
			CP3	2,5		CP3	2,475		CP3	1381,51		CP3	4		CP3	13,2		CP3	81	
18	4,68	170,3	CP1	2,5	2,53	CP1	2,476	2,475	CP1	1510,84	1605,6	CP1	3,75	3,75	CP1	14,1	14,13	CP1	82,3	82,03
			CP2	2,6		CP2	2,473		CP2	1593,73		CP2	3,5		CP2	14,2		CP2	81,7	
			CP3	2,5		CP3	2,475		CP3	1712,21		CP3	4		CP3	14,1		CP3	82,1	

Fonte: Autor.

Tabela B.4 – Resultados referentes à empresa D.

Ponto	Teor de Betume (%)	T (°C)	Volumes de Vazios (%)		Densidade Aparente (g/cm³)		Estabilidade (kgf)		Fluência (mm)		V.A.M (%)		R.B.V (%)							
			Amostra		Amostra		Amostra		Amostra		Amostra		Amostra							
1	4,48	159,3	CP1	5	5,10	CP1	2,392	2,391	CP1	1508,5	1711,1	CP1	3,5	3,50	CP1	15,8	15,83	CP1	68	67,77
			CP2	5,2		CP2	2,389		CP2	1861,27		CP2	3,75		CP2	15,9		CP2	67,5	
			CP3	5,1		CP3	2,391		CP3	1763,5		CP3	3,25		CP3	15,8		CP3	67,8	
2	4,49	161,2	CP1	4,9	4,90	CP1	2,396	2,396	CP1	1928,66	1866,2	CP1	3,5	3,42	CP1	15,6	15,63	CP1	68,8	68,77
			CP2	4,8		CP2	2,398		CP2	1900,38		CP2	3,5		CP2	15,6		CP2	69,2	
			CP3	5		CP3	2,393		CP3	1769,7		CP3	3,25		CP3	15,7		CP3	68,3	
3	5,12	160,3	CP1	3,7	3,50	CP1	2,425	2,431	CP1	1702,58	1706,8	CP1	3,5	3,67	CP1	16,2	15,97	CP1	76,9	78,03
			CP2	3,5		CP2	2,432		CP2	1813,85		CP2	3,75		CP2	15,9		CP2	78,3	
			CP3	3,3		CP3	2,435		CP3	1604,1		CP3	3,75		CP3	15,8		CP3	78,9	
4	4,2	160,1	CP1	0	0,13	CP1	2,518	2,516	CP1	1796,5	2014,5	CP1	2,25	2,25	CP1	10,6	10,70	CP1	99,7	98,73
			CP2	0,2		CP2	2,514		CP2	2095,29		CP2	2		CP2	10,8		CP2	98,1	
			CP3	0,2		CP3	2,515		CP3	2151,6		CP3	2,5		CP3	10,7		CP3	98,4	
5	4,44	163,2	CP1	2	1,80	CP1	2,49	2,480	CP1	1682,9	1880,1	CP1	2,25	2,25	CP1	13	12,80	CP1	84,6	85,83
			CP2	1,8		CP2	2,473		CP2	1961,54		CP2	2		CP2	12,8		CP2	85,7	

			CP3	1,6		CP3	2,478		CP3	1996		CP3	2,5		CP3	12,6		CP3	87,2	
--	--	--	-----	-----	--	-----	-------	--	-----	------	--	-----	-----	--	-----	------	--	-----	------	--

Fonte: Autor.

Tabela B.5 – Resultados referentes à empresa E.

Ponto	Teor de Betume (%)	T (°C)	Volumen de Vazios (%)		Densidade Aparente (g/cm³)		Estabilidade (kgf)		Fluência (mm)		V.A.M (%)		R.B.V (%)							
			Amostra		Amostra		Amostra		Amostra		Amostra		Amostra							
1	5,37	160	CP1	3,8	3,33	CP1	2,466	2,462	CP1	2000,7	1876,6	CP1	3,25	3,42	CP1	16,9	17,10	CP1	77,4	76,63
			CP2	2,2		CP2	2,457		CP2	1823,86		CP2	3,75		CP2	17,3		CP2	75,7	
			CP3	4		CP3	2,463		CP3	1805,1		CP3	3,25		CP3	17,1		CP3	76,8	
2	5,43	162,5	CP1	3,5	3,40	CP1	2,476	2,477	CP1	2370,4	2098,8	CP1	3,75	3,58	CP1	16,8	16,73	CP1	79,4	79,67
			CP2	3,2		CP2	2,482		CP2	2050,78		CP2	3,5		CP2	16,6		CP2	80,6	
			CP3	3,5		CP3	2,474		CP3	1875,3		CP3	3,5		CP3	16,8		CP3	79	
3	5,53	165,5	CP1	4,1	4,23	CP1	2,459	2,455	CP1	2343,7	2260,4	CP1	3,75	3,58	CP1	17,6	17,70	CP1	76,5	75,93
			CP2	4,3		CP2	2,454		CP2	2228,74		CP2	3,5		CP2	17,7		CP2	75,8	
			CP3	4,3		CP3	2,453		CP3	2208,7		CP3	3,5		CP3	17,8		CP3	75,5	
4	5,66	141,6	CP1	3,2	3,37	CP1	2,482	2,478	CP1	2233,4	2319,6	CP1	4	3,75	CP1	17,2	17,27	CP1	81,1	80,40
			CP2	3,5		CP2	2,476		CP2	2364,85		CP2	3,5		CP2	17,3		CP2	80	
			CP3	3,4		CP3	2,477		CP3	2360,4		CP3	3,75		CP3	17,3		CP3	80,1	
5	5,32	160,3	CP1	4	3,83	CP1	2,462	2,467	CP1	2000	2238,2	CP1	4	3,83	CP1	17	16,83	CP1	76,4	77,27
			CP2	3,8		CP2	2,468		CP2	2248,82		CP2	3,75		CP2	16,8		CP2	77,4	
			CP3	3,7		CP3	2,471		CP3	2465,7		CP3	3,75		CP3	16,7		CP3	78	
6	5,61	166,5	CP1	3,7	3,60	CP1	2,47	2,472	CP1	2237,6	2197,8	CP1	3,75	3,75	CP1	17,4	17,37	CP1	78,9	79,20
			CP2	3,5		CP2	2,474		CP2	2189		CP2	3,5		CP2	17,3		CP2	79,6	
			CP3	3,6		CP3	2,472		CP3	2166,8		CP3	4		CP3	17,4		CP3	79,1	
7	5,38	170,3	CP1	4,5	4,63	CP1	2,449	2,446	CP1	2103,9	2211,9	CP1	3,25	3,50	CP1	17,5	17,67	CP1	74,3	73,73
			CP2	4,6		CP2	2,446		CP2	2197,44		CP2	3,5		CP2	17,7		CP2	73,7	
			CP3	4,8		CP3	2,443		CP3	2334,5		CP3	3,75		CP3	17,8		CP3	73,2	

8	5,54	155	CP1	5	4,97	CP1	2,437	2,438	CP1	2117,5	2112,5	CP1	3,5	3,58	CP1	18,3	18,30	CP1	72,9	73,00
			CP2	4,9		CP2	2,44		CP2	2167,26		CP2	3,25		CP2	18,2		CP2	73,4	
			CP3	5		CP3	2,436		CP3	2052,8		CP3	4		CP3	18,4		CP3	72,7	
9	5,42	157,8	CP1	4,3	4,47	CP1	2,454	2,451	CP1	1987,3	2093,3	CP1	3	3,42	CP1	17,5	17,60	CP1	75,3	74,73
			CP2	4,6		CP2	2,448		CP2	2141,87		CP2	3,25		CP2	17,7		CP2	74,2	
			CP3	4,5		CP3	2,45		CP3	2150,7		CP3	4		CP3	17,6		CP3	74,7	
10	5,35	164,2	CP1	5	4,87	CP1	2,437	2,440	CP1	2157,7	2298,6	CP1	3,5	3,75	CP1	17,9	17,80	CP1	72,1	72,67
			CP2	4,7		CP2	2,443		CP2	2460,32		CP2	3,75		CP2	17,7		CP2	73,2	
			CP3	4,9		CP3	2,44		CP3	2277,9		CP3	4		CP3	17,8		CP3	72,7	

Fonte: Autor.