

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM

JOÃO VITÓRIO DAGOSTIN

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ASFALTO FRESADO A PARTIR DA
CIRCULARIDADE DE MATERIAIS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

CRICIÚMA
2024

JOÃO VITÓRIO DAGOSTIN

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ASFALTO FRESADO A PARTIR DA
CIRCULARIDADE DE MATERIAIS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira.

CRICIÚMA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

D127v Dagostin, João Vitório.

Valorização de resíduo de asfalto fresado a partir da circularidade de materiais em pavimentos rodoviários / João Vitório Dagostin. - 2024.

189 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2024.

Orientação: Fabiano Raupp Pereira.

1. Pavimentos de asfalto. 2. Valorização do resíduo. 3. Economia circular. 4. Estradas - Manutenção e reparos. I. Título.

CDD 23. ed. 625.85

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

João Vitório Dagostin

Valorização de resíduo de asfalto fresado a partir da circularidade de materiais em pavimentos rodoviários.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 17 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SABRINA ARCARO**
Data: 17/12/2024 15:40:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Sabrina Arcaro

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Assinado por: **Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro**

Num. de Identificação: 05403140
Data: 2024.12.18 18:45:23+00'00'

Prof. Dr. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro

Instituto Politécnico de Viana do Castelo - IPVC

Assinado por: **Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo**

Num. de Identificação: 07345364
Data: 2024.12.17 23:41:53+00'00'

Prof. Dr. Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo

Universidade do Minho

Aos meus pais, com todo o meu amor e gratidão,
por serem o alicerce da minha vida, acreditarem
nos meus sonhos e me apoiarem
incondicionalmente em cada passo da jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e proteção concedidas ao longo desta jornada. Sem Sua presença em minha vida, não teria tido a perseverança necessária para concluir esta etapa tão desafiadora.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio e incentivo que sempre me ofereceram. Vocês são a base de tudo o que sou e a razão pela qual alcancei este momento. Obrigado por acreditarem nos meus sonhos e por estarem sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Dr. Fabiano, pela paciência, orientação e ensinamentos ao longo desta caminhada. Sua dedicação e confiança foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos amigos que estiveram presentes, oferecendo palavras de apoio, conselhos e companheirismo, meu mais sincero obrigado. Em especial, à Natássia, cuja ajuda foi indispensável, tanto no campo acadêmico quanto no profissional. Sua dedicação, paciência e generosidade foram essenciais para alcançarmos todos os objetivos. Sou profundamente grato por tudo o que você fez por mim e pela amizade que compartilhamos.

Aos colegas de laboratório, pela troca de conhecimentos, ideias e pela colaboração no dia a dia da pesquisa, possibilitando o compartilhamento de experiência de forma construtiva.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, seja com apoio técnico, sugestões ou palavras de incentivo, meu mais sincero agradecimento. Cada gesto fez diferença e tornou esta conquista possível.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

“A real viagem da descoberta não consiste em
buscar novas paisagens, mas em ter novos olhos.”

- Marcel Proust

RESUMO

O modal rodoviário desempenha importante papel no contexto da infraestrutura nacional. Diante da demanda significativa de materiais e recursos necessários para a execução de rodovias, bem como da necessidade de garantir a sustentabilidade da atividade em termos econômicos e ambientais, o princípio da economia circular aplicada à área de Engenharia Civil e Rodoviária, alinhado aos conceitos da Engenharia de Materiais, destaca-se em relação à possibilidade de valorização do resíduo fresado da pavimentação asfáltica (do inglês *reclaimed asphalt pavement* - RAP), como forma de atender à demanda requerida em novas camadas de revestimento. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo valorizar o resíduo de asfalto fresado, comumente descartado em regiões de bota-fora, por meio de novas camadas asfálticas, por meio da caracterização do material e verificação da influência de tamanhos de partícula do RAP durante a substituição parcial de agregados da mistura convencional, e variação do agregado miúdo em termos de origem granítica e basáltica. O estudo abordou variações de RAP na ordem de 0%, 25%, 50% e 100% em relação à massa de agregados naturais, bem como os efeitos isolados quando a substituição foi restrita à faixa de agregados graúdos e à faixa de agregados miúdos. A metodologia de dosagem adotou os preceitos do método Marshall, técnicas de caracterização, Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e os métodos de ensaio do DNIT. Os resultados apresentaram viabilidade de aplicação e atendimento aos parâmetros normativos, evidenciando uma real possibilidade de mudança paradigma na relação com o RAP. Observa-se uma economia de novos ligantes quanto maior o incremento de resíduo na mistura, sendo este mais evidente quando do uso de pó de pedra de origem basáltica nas misturas. Extrai-se dos resultados também que a valorização do RAP apenas nas parcelas de agregado miúdo proporcionaram maiores níveis de economia para novos ligantes das dosagens, além de produzir corpos de prova com maior estabilidade, inversamente proporcionais às misturas em que a valorização ocorreu restrita à faixa de agregados graúdos. Contudo, a substituição integral, sem sobra de resíduo se mostra mais vantajosa do ponto de vista da economia circular, por permitir maior nível de inclusão do RAP, além de evitar a falsa curva granulométrica proporcionada pela aglomeração dos materiais.

Palavras-chave: Pavimentação asfáltica. Valorização de resíduo. Economia circular.

ABSTRACT

The highway modal plays an important role in the context of national infrastructure. Given the significant demand for materials and resources necessary for the construction of roads, as well as the need to ensure the sustainability of the activity in economic and environmental terms, the principle of circular economy applied to the area of Civil and Highway Engineering, aligned with the concepts of Materials Engineering, stands out in relation to the possibility of valorizing the milled residue from asphalt paving - RAP, as a way to meet the demand required in new paving layers. Thus, the present study aims to valorize the milled asphalt residue, commonly discarded in landfill regions, through new asphalt layers, by characterizing the material and verifying the influence of RAP particle sizes during the partial replacement of aggregates in the conventional mixture, and variation of the fine aggregate in terms of granite and basalt origin. The study addressed RAP variations in the order of 0%, 25%, 50% and 100% in relation to the mass of natural aggregates, as well as the isolated effects when the replacement was restricted to the range of coarse aggregates and the range of fine aggregates. The dosage methodology adopted the precepts of the Marshall method, characterization techniques, technical standards of the Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT and the test methods of DNIT. The results showed feasibility of application and compliance with the normative parameters, evidencing a real possibility of a paradigm shift in the relationship with RAP. A saving of new binders is observed the greater the increase in residue in the mixture, this being more evident when using basaltic stone powder in the mixtures. The results also show that the valorization of RAP only in the fine aggregate portions provided higher levels of savings for new binders in the dosages, in addition to producing test specimens with greater stability, inversely proportional to the mixtures in which the valorization occurred restricted to the range of coarse aggregates. However, the full replacement, without residue leftover, is more advantageous from the point of view of the circular economy, as it allows a higher level of inclusion of RAP, in addition to avoiding the false granulometric curve caused by the agglomeration of materials.

Keywords: Asphalt paving. Residue valorization. Circular economy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração esquemática da estrutura típica de pavimentos rodoviários rígidos (à esquerda) em corte longitudinal e flexíveis (à direita) em corte transversal, com a indicação das diversas camadas constituintes.	17
Figura 2 – Ilustração das diferentes características de graduações granulométricas para agregados em misturas asfálticas.	33
Figura 3 – Representação esquemática do ciclo total dos materiais, relacionando a seleção dos materiais com as suas propriedades.	39
Figura 4 – Registro fotográfico de um local utilizado como ponto de bota-fora para o material fresado no processo de repavimentação de rodovia.	41
Figura 5 – Representação de possíveis cenários para a interação entre ligantes betuminosos na valorização de RAP (da esquerda para a direita): sem qualquer tipo de interação - <i>black rock</i> ; interação parcial – <i>partial blending</i> e interação total - <i>full blending</i>	45
Figura 6 – Fluxograma com o resumo do procedimento experimental adotado.	52
Figura 7 – Representação da localização dos pontos de coleta do resíduo de asfalto fresado (RAP) na malha rodoviária do Sul de Santa Catarina.	54
Figura 8 – Registro fotográfico do ponto de coleta do resíduo A (aspecto da amostra de estudo revelado no detalhe/ampliação).	54
Figura 9 – Ponto de coleta do resíduo no ponto B. Na imagem à esquerda é possível verificar o processo de fresagem em campo. Na imagem central o acúmulo de resíduo. Na imagem à direita a disposição de novo material e um detalhe do aspecto do RAP coletado.	55
Figura 10 – Peneiramento do resíduo RAP coletado no ponto A, para eliminação do material com diâmetro máximo superior a 3/4", devido ao limite da faixa C de dosagem. Na imagem o resíduo com tamanho inferior ao especificado foi exposto ao ar ambiente para eliminação da umidade higroscópica na bandeja, enquanto o resíduo com tamanho inapropriado (à direita, cerca de 12% da amostra) foi descartado.	56
Figura 11 – Ensaio de determinação da distribuição do tamanho de partícula por peneiramento das amostras de fresado coletadas no estado de campo, sob influência da parcela de ligante preexistente no resíduo.	59
Figura 12 – Ensaio para determinação do teor de betume do resíduo, sendo: (a) equipamento <i>rotarex</i> , (b) resíduo de asfalto fresado imediatamente após o	

aquecimento a 150 °C, por 1 hora, em estufa, (c) introdução do solvente de percloroetileno, (d) mistura em contato com o solvente e (e) agregados limpos após a conclusão do ensaio, com a centrifugação da mistura.	59
Figura 13 – Método normatizado realizado para a verificação de secagem à saturação da superfície seca de agregado miúdo. Na imagem (a), pela presença de umidade livre superficial, há coesão momentânea causada pelas ligações fracas. Na imagem (b), na situação saturada de superfície seca, o tronco-cônico não dispõe de água livre para manter sua estrutura e sofre o desmoronamento das paredes.	63
Figura 14 – Ensaio de determinação da penetração do ligante asfáltico. Na primeira imagem (a), é apresentado o recipiente de penetração, com forma cilíndrica e dimensões internas de 55 mm de diâmetro e 35 mm de altura, preenchido com o ligante em estado fluido, após aquecimento, seguido de posterior resfriamento; e na segunda imagem (b), ilustra-se a realização do ensaio no penetrômetro devidamente calibrado, com massa do conjunto haste-agulha.....	65
Figura 15 – Ensaio de determinação do ponto de amolecimento. Na imagem (a) o ligante aquecido até o ponto de viscosidade adequado foi vertido nos moldes, e resfriado por 24 h até adquirir estrutura rígida. Na imagem (b), após resfriada, a superfície dos moldes foi arrasada com auxílio de uma espátula aquecida, e as bordas externas do molde foram limpas com auxílio de reagente. Na imagem (c), consta o conjunto do aparelho normatizado para o ensaio, utilizando os suportes, termômetro, moldes com o ligante, guia de apoio e as bolas de aço. Na imagem (d) o aparelho é inserido dentro de um béquer com água até uma altura de aproximadamente 105 mm. Na imagem (e) o aparato foi apoiado sobre uma forma com areia e submetido ao aquecimento através de fogareiro, a uma taxa de aproximadamente 5 °C/min para a determinação da temperatura de amolecimento no exato instante em que o material asfáltico que envolve cada bola de aço toca a placa inferior do suporte.	66
Figura 16 – Ensaio de viscosidade Saybolt Furol (a), sendo a viscosidade determinada pelo tempo necessário para que o fluido, a determinada temperatura, preenchesse o frasco padronizado de 60 ml, em escoamento de fluxo contínuo e através de um orifício com dimensões padronizadas (b).	68
Figura 17 – Amostras separadas conforme dosagem para a permanência em estufa visando a produção de corpos de prova necessários aos ensaios.	77

Figura 18 – Produção dos corpos de prova. Na imagem (a) consta o corpo de prova no molde, após compactação em soquete Marshall, enquanto na imagem (b) são apresentados os corpos de prova após a desforma com uso de extrator mecânico.	77
Figura 19 – Curva do fator de correção para a estabilidade Marshall, com equação de regressão obtida a partir dos valores tabulados apresentados por Norma.	79
Figura 20 – Prensa Marshall utilizada para a realização do ensaio de estabilidade e fluência, necessário para a determinação dos parâmetros de dosagem.	79
Figura 21 – Equipamentos para a realização de ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) e tambor para desgaste por abrasão (b).	83
Figura 22 – Corpos de prova antes (a) e após (b) o ensaio de desgaste por abrasão.	83
Figura 23 – Distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado para o ponto A. No gráfico a curva preta representa a distribuição do tamanho de partícula na condição bruta - <i>black curve</i> , na presença de agregado e ligante envelhecido preexistente. Após a extração do betume, a curva de distribuição modifica-se para o comportamento apresentado pela curva azul - <i>white curve</i> . A área hachurada demonstra a variação no espectro da distribuição granulométrica resultante de aglomerações do RAP.	86
Figura 24 – Distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado para o ponto B. No gráfico a curva preta representa a distribuição do tamanho de partícula na condição bruta - <i>black curve</i> , na presença de agregado e ligante envelhecido preexistente. Após a extração do betume, a curva de distribuição modifica-se para o comportamento apresentado pela curva azul - <i>white curve</i> . A área hachurada demonstra a variação no espectro da distribuição granulométrica resultante de aglomerações do RAP.	86
Figura 25 – Comparação da distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado coletado no ponto A em relação à curva de dosagem “C” do DNIT.	88
Figura 26 – Comparação da distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado coletado no ponto B em relação à curva de dosagem “C” do DNIT.	88
Figura 27 – Distribuição do índice de forma do RAP coletado para (a) o resíduo bruto coletado no ponto A, (b) o resíduo coletado no ponto A após a extração do ligante envelhecido, (c) o resíduo bruto coletado no ponto B, (d) o resíduo coletado no ponto B após a extração do ligante envelhecido, e (e) a plotagem dos pontos individuais organizados em rol.	91
Figura 28 – Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica no RAP do ponto A.	92
Figura 29 – Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica no RAP do ponto B.	92

Figura 30 – FRX do RAP coletado no ponto A e no ponto B.	93
Figura 31 – DRX do RAP coletado no ponto A.	93
Figura 32 – DRX do RAP coletado no ponto B.	94
Figura 33 – Distribuição do índice de forma dos agregados para (a) o agregado graúdo de graduação n.º 1, (b) o agregado graúdo de graduação n.º 0, e (c) a plotagem dos pontos individuais organizados em rol.	96
Figura 34 – Distribuição granulométrica do tamanho de partícula, por peneiramento, dos diferentes agregados utilizados como insumos composicionais para os corpos de prova amostrais.	97
Figura 35 – Curva de viscosidade Saybolt Furol em função da temperatura do ligante asfáltico CAP 50/70 complementar à mistura asfáltica utilizado na dosagem dos corpos de prova.	98
Figura 36 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 01, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 0% de inclusão de RAP na mistura...	102
Figura 37 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 03, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 25% de inclusão de RAP na mistura.	103
Figura 38 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 07, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 50% de inclusão de RAP na mistura.	104
Figura 39 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 11, produzido com 100% de inclusão de RAP na mistura.	105
Figura 40 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 05, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 25% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado graúdo.	106
Figura 41 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 06, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 25% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado miúdo.	107
Figura 42 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 09, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 50% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado graúdo.	108
Figura 43 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 10, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 50% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado miúdo.	109

Figura 44 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 12, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 100% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado graúdo.	110
Figura 45 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 13, produzido com 100% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado miúdo.	111
Figura 46 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 02, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem basáltica e 0% de inclusão de RAP na mistura. .	112
Figura 47 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 04, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem basáltica e 25% de inclusão de RAP na mistura.	113
Figura 48 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 08, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem basáltica e 50% de inclusão de RAP na mistura.	114
Figura 49 – Redução da variação do teor de ligante novo requerido em relação à substituição de RAP na mistura asfáltica. Em verde os resultados considerando os corpos de prova com a utilização de pó de granito, enquanto em vermelho os resultados para utilização de pó de basalto como agregado miúdo. O nível 100% (cinza) representa a amostra moldada apenas com RAP, sem novos agregados. .	116
Figura 50 – Variação do teor de ligante novo requerido em relação à parcela de substituição de RAP na mistura asfáltica (total, agregado graúdo ou miúdo).	116
Figura 51 – Corpo de prova submetido ao ensaio de estabilidade Marshall, demonstrando o rompimento de uma amostra sem coesão adequada em que se verifica a falta de miúdos para o intertravamento da estrutura pétreia na substituição exclusiva de parte do RAP.	117
Figura 52 – Variação de estabilidade Marshall das misturas considerando o local de aplicação do RAP para um volume de vazios de 4%.	118
Figura 53 – Estabilidade por deformação dos corpos de prova na Etapa 2 para os corpos de prova produzidos com utilização de RAP e pó de granito em kgf (eixo y) por c.mm (eixo x).	120
Figura 54 – Estabilidade por deformação dos corpos de prova na Etapa 2 para os corpos de prova produzidos com utilização de RAP e pó de basalto em kgf (eixo y) por c.mm (eixo x).	120
Figura 55 – Resultados das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova ensaiados na Etapa 2. O gráfico (a) apresenta o teor de ligante novo da mistura em percentual; o gráfico (b) apresenta a informação de massa específica real, em g/cm ³ ; o gráfico (c) apresenta a estabilidade corrigida, em kgf; o gráfico (d) apresenta a	

fluência, em c.mm; o gráfico (e) apresenta o desgaste, em percentual, e o gráfico (f) a resistência à tração por compressão diametral, em kgf/cm ² , todos estes em relação ao percentual de RAP e composição da dosagem, tendo como referência o tipo de agregado miúdo - granito ou basalto.	121
Figura 56 – Microscopia ótica da região de fratura dos corpos de prova na Etapa 2.	124
Figura 57 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem granítica). Na imagem a curva resultante da mistura do Quadro 13 corresponde à linha tracejada vermelha, enquanto os limites inferiores e superiores da curva de dosagem “C” - DNIT, estão representadas por linhas pretas contínuas, indicando que a mistura se encontra dentro dos limites normativos.	137
Figura 58 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 01 (0% GR), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	138
Figura 59 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 03 (25% GR), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	140
Figura 60 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 05 (25% GR-G), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	142
Figura 61 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 06 (25% GR-M), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	144
Figura 62 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 07 (50% GR), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de	

ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	146
Figura 63 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 09 (50% GR-G), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	148
Figura 64 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 10 (50% GR-M), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	150
Figura 65 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 11 (100%), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	152
Figura 66 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 12 (100%-G), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	154
Figura 67 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 13 (100%-M), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	156
Figura 68 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem basáltica). Na imagem a curva resultante da mistura do Quadro 14 corresponde à linha tracejada vermelha, enquanto os limites inferiores e superiores da curva de dosagem “C” - DNIT, estão representadas por linhas pretas contínuas, indicando que a mistura se encontra dentro dos limites normativos.	158
Figura 69 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 02 (0% BA) seguido pelos traços	

para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	159
Figura 70 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 04 (25% BA), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	161
Figura 71 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 08 (50% BA), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.	163
Figura 72 – Dosagem com pó de granito e valorização de RAP em 0%.	165
Figura 73 – Dosagem com pó de granito e valorização de RAP em 50%.	166
Figura 74 – Dosagem com pó de basalto e valorização de RAP em 0%.	167
Figura 75 – Dosagem com pó de basalto e valorização de RAP em 50%.	168
Figura 76 – Dosagem com valorização de RAP em 100%.	169
Figura 77 – ANOVA para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	170
Figura 78 – Coeficientes para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	170
Figura 79 – Gráfico de Pareto para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	170
Figura 80 – Gráfico de normalidade para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	171
Figura 81 – Aleatoriedade do ensaio para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	171
Figura 82 – ANOVA para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	172
Figura 83 – Coeficientes para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	172

Figura 84 – Gráfico de Pareto para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	172
Figura 85 – Gráfico de normalidade para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	173
Figura 86 – Aleatoriedade do ensaio para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	173
Figura 87 – ANOVA para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	174
Figura 88 – Coeficientes para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	174
Figura 89 – Gráfico de Pareto para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	174
Figura 90 – Gráfico de normalidade para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	175
Figura 91 – Aleatoriedade do ensaio para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	175
Figura 92 – ANOVA para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	176
Figura 93 – Coeficientes para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	176
Figura 94 – Gráfico de Pareto para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	176
Figura 95 – Gráfico de normalidade para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	177
Figura 96 – Aleatoriedade do ensaio para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	177
Figura 97 – ANOVA para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	178
Figura 98 – Coeficientes para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	178
Figura 99 – Gráfico de Pareto para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.....	178
Figura 100 – Gráfico de normalidade para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	179

Figura 101 – Aleatoriedade do ensaio para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.	179
Figura 102 – ANOVA para a variável massa específica (g/cm ³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	180
Figura 103 – Coeficientes para a variável massa específica (g/cm ³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	180
Figura 104 – Gráfico de Pareto para a variável massa específica (g/cm ³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	180
Figura 105 – Gráfico de normalidade para a variável massa específica (g/cm ³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	181
Figura 106 – Aleatoriedade do ensaio para a variável massa específica (g/cm ³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	181
Figura 107 – ANOVA para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	182
Figura 108 – Coeficientes para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	182
Figura 109 – Gráfico de Pareto para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	182
Figura 110 – Gráfico de normalidade para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	183
Figura 111 – Aleatoriedade do ensaio para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	183
Figura 112 – ANOVA para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	184
Figura 113 – Coeficientes para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	184
Figura 114 – Gráfico de Pareto para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	184
Figura 115 – Gráfico de normalidade para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	185
Figura 116 – Aleatoriedade do ensaio para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	185

Figura 117 – ANOVA para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	186
Figura 118 – Coeficientes para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	186
Figura 119 – Gráfico de Pareto para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	186
Figura 120 – Gráfico de normalidade para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	187
Figura 121 – Aleatoriedade do ensaio para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	187
Figura 122 – ANOVA para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	188
Figura 123 – Coeficientes para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.	188
Figura 124 – Gráfico de Pareto para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	188
Figura 125 – Gráfico de normalidade para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	189
Figura 126 – Aleatoriedade do ensaio para a variável tração (kgf/cm ²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.....	189

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação de serviços aplicados à pavimentação rodoviária, conforme terminologia das Normas Técnicas NBR 11.170 e NBR 11.171, organizadas por camadas executivas.....	18
Quadro 2 – Relação de Normas e Instruções de Serviço, Ensaio ou Procedimento promulgadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, aplicáveis às etapas de amostragem e caracterização do resíduo fresado da camada de revestimento asfáltico - RAP, amostragem e caracterização de materiais pétreos (agregados), amostragem e caracterização do ligante asfáltico (CAP), dosagem e produção de corpos de prova, além da caracterização de misturas asfálticas, incluindo breve descrição de seu conteúdo e objetivos.	21
Quadro 3 – Parâmetros de dosagem de misturas de agregados e materiais betuminosos para aplicações em camada de rolamento e camada intermediária (ligação ou <i>binder</i>) do revestimento asfáltico com espessura elevada.	34
Quadro 4 – Matriz dos grupos de dosagem da Etapa 1, sintetizando as características de cada grupo de dosagem (variação no percentual de RAP e origem do pó de pedra utilizado como agregado miúdo natural).....	69
Quadro 5 – Resumo da distribuição de materiais e faixa granulométrica por grupo do traço de dosagem (resumo do analítico disponível no Apêndice A).	73
Quadro 6 – Matriz dos grupos de dosagem da Etapa 2, sintetizando as características de cada grupo de dosagem (variação no percentual de RAP e origem do pó de pedra utilizado como agregado miúdo natural).....	80
Quadro 7 – Resumo da distribuição de materiais e faixa granulométrica por grupo do traço de dosagem (resumo do analítico disponível no Apêndice B).	82
Quadro 8 – Resumo dos índices de distribuição granulométrica para o RAP coletado.	89
Quadro 9 – Resultados da caracterização física do resíduo fresado em relação à densidade do material.	90
Quadro 10 – Resumo das caracterizações físicas dos agregados em relação à densidade, absorção, perda e índice de forma.....	95
Quadro 11 – Resultados de caracterização do ligante, CAP 50/70, novo (ou complementar).	97

Quadro 12 – Resultados físico-mecânicos dos corpos de prova com base no teor ótimo de ligante determinado a partir da Etapa 1.....	119
Quadro 13 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem granítica).	137
Quadro 14 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem basáltica).	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Água absorvida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Agregado
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise térmica diferencial
BA	Basalto, agregado de origem basáltica
CAP	Concreto asfáltico de petróleo, ligante da mistura asfáltica
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> , índice de suporte da resistência geotécnica
CCR	Companhia de Concessões Rodoviárias
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
Dmt	Densidade máxima teórica da mistura
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração por Raio-x
EPI	Equipamento de proteção individual
ES	Especificações de serviço
FR, FRE	Resíduo de asfalto fresado da camada de pavimentação, RAP
FRX	Fluorescência por Raios-X
G	Parcela exclusiva de agregados graúdos
Gmb	Densidade relativa aparente
GR	Granito, agregado de origem granítica
HiMA	<i>Highly modified asphalt</i> , ligante altamente modificado por polímero
M	Parcela exclusiva de agregados miúdos
ME	Método de ensaio
NAT	Natural, agregado não resíduo
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
PF	Perda ao fogo
PRO	Procedimento
RAP	<i>Reclaimed asphalt pavement</i> , resíduo de asfalto fresado

RBV	Volume betume/vazios
Res.	Resistência
SBS	Polímero estireno-butadieno-estireno
SC	Santa Catarina
SSF	Segundos Saybolt Furol
TG	Termogravimetria
VAM	Volume de agregados minerais
VB	Volume de betume
Vv	Volume de vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	JUSTIFICATIVA E PROBLEMA.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.1.1	Objetivos específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	ESTRADAS E PAVIMENTAÇÃO	14
2.1.1	Hierarquia de gestão dos trechos rodoviários	15
2.1.2	Tipologia de pavimentos rodoviários	16
2.1.3	Camadas do pavimento rodoviário flexível.....	28
2.1.4	Manutenção e reabilitação de pavimentos rodoviários	35
2.1.4.1	Resíduo de asfalto fresado - RAP	41
2.1.5	Estado da arte	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	MATERIAIS.....	53
3.2	MÉTODOS.....	57
3.2.1	Caracterização dos materiais.....	57
3.2.1.1	Caracterização do resíduo de asfalto fresado	58
3.2.1.2	Caracterização dos agregados	61
3.2.1.3	Caracterização do ligante.....	64
3.2.2	Etapa 1 – Dosagem e caracterização de diferentes misturas para determinação do teor ótimo de ligante novo/complementar	68
3.2.2.1	Procedimentos e dosagem das misturas em laboratório	68
3.2.2.2	Ensaio de caracterização física nos corpos de prova experimentais	77
3.2.3	Etapa 2 – Produção e caracterização das misturas com melhor desempenho, no teor ótimo de ligante novo/complementar, para a realização de ensaios físicos adicionais.....	80
3.2.4	Tratamento estatístico dos dados coletados.....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	85
4.1.1.1	Resíduo de asfalto fresado	85
4.1.1.2	Caracterização granulométrica dos agregados	94

4.1.1.3	Caracterização do ligante.....	97
4.2	ETAPA 1 – DADOS PRELIMINARES E DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE LIGANTE NA DOSAGEM	99
4.3	ETAPA 2 – DADOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS COM O TEOR ÓTIMO DE LIGANTE.....	118
5	CONCLUSÃO.....	127
	REFERÊNCIAS	129
	APÊNDICES	136
	APÊNDICE A – TRAÇOS DOS CORPOS DE PROVA – ETAPA 1.....	137
	APÊNDICE B – TRAÇOS DOS CORPOS DE PROVA – ETAPA 2.....	165
	APÊNDICE C – RELATÓRIOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	170

1 INTRODUÇÃO

A demanda de materiais e recursos naturais nobres para uso em obras rodoviárias é significativa, assim como o desempenho dos materiais, visto que o conhecimento da resistência e da durabilidade destes são requisitos essenciais para os projetistas. No entanto, o uso desses recursos acaba gerando impactos ao meio ambiente, seja pela utilização de grandes volumes de materiais, seja pela aplicação ou uso como pavimentos rodoviários formados por misturas complexas de ligantes betuminosos e diferentes agregados minerais.

Considerando-se a necessidade de buscar formas sustentáveis para a obtenção de recursos minerais alternativos, bem como a crescente execução de obras rodoviárias, a reutilização de material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP), oriundo de revestimentos de pavimentos asfálticos deteriorados, passa a ser uma importante estratégia de redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia de modo a atender esta grande demanda de recursos minerais de fontes primárias. A valorização deste resíduo na atividade finalística de reconstrução rodoviária, empregado em novas pavimentações, torna-se uma significativa ação para avaliar e aprimorar as práticas de engenharia, em especial quanto aos Órgãos Públicos, englobando uma visão holística de economia circular aos pavimentos rodoviários.

Tendo em vista a inquietação do próprio mercado, questões de ordem ambiental e econômica, a possibilidade de valorização de resíduo fresado da pavimentação asfáltica em novas camadas de revestimento surge como uma opção viável para destinar adequadamente os resíduos do processo de manutenção e reestruturação de pavimentos, que acabam, por vezes, em volumes de bota-fora.

Neste cenário, partindo-se do pressuposto da variabilidade das camadas de revestimento asfáltico (seja por diferentes traços, materiais, intemperismo - mais avançado nas zonas superiores, desgastes, recomposições, e outros fatores), bem como o fato de que o resíduo fresado da pavimentação é composto substancialmente por um conjunto pétreo - responsável pela resistência e comportamento elástico do material, fracamente prejudicado pela ação do tempo e das condições externas - envolto por um ligante betuminoso - responsável pela deformação e comportamento viscoelástico do concreto, consideravelmente afetado pelo envelhecimento do ligante (Correa, 2020; Gaspar, 2019), em relação às propriedades destes materiais, por meio

de técnicas e processos de caracterização, torna a valorização deste resíduo de grande valia ao meio acadêmico e profissional.

A complexa caracterização do resíduo fresado de pavimentos asfálticos em relação à abordagem de valorização dar-se-á pela verificação das diferentes condições da efetiva utilização condicionada intrinsecamente pela relação entre a composição, microestrutura e as propriedades dos materiais utilizados.

Contudo, o empregado do RAP como agregado reciclado em novas misturas asfálticas, em parte ou na totalidade, que promoveria a economia de novos materiais betuminosos, pode afetar diretamente o desempenho da mistura a partir da reativação do ligante envelhecido. Ressalta-se que o tamanho de partículas do material fresado também tende a desempenhar importante papel no efeito da substituição destes materiais, pois os agregados encontram-se aglomerados e envoltos em uma película do ligante betuminoso existente, envelhecido, resultando em uma distribuição de partículas diferente daquela que se observaria em relação ao uso de agregados naturais (Gaspar, 2019).

Há, ainda, a possibilidade de que o RAP seja incorporado em novas misturas apenas como substituto de agregados graúdos, miúdos, ou ainda, substituto simultâneo de ambos os grupos. Porém, torna-se importante ressaltar, que, quando estratificado em faixas granulométricas o resíduo pode vir a permitir maior controle sobre a sua utilização, possibilitando melhor ajuste de curvas de dosagem, e com tendência de comportamentos e características mais uniformes.

Embora a literatura apresente uma vasta gama de estudos sobre o reaproveitamento do RAP, aplicações em novas camadas de revestimento asfáltico pouco abordam a influência do tamanho de partícula deste resíduo nos resultados apresentados.

Dada a heterogeneidade dos resíduos de fresagem asfáltica, a análise da influência dos diferentes tamanhos de partícula, através da verificação de substituições controladas, segregadas por faixas, e comparadas às misturas de referência, com e sem substituição, se mostra como uma opção válida para estudo em relação às implicações quanto das características e propriedades dos materiais empregados na Engenharia Civil e Rodoviária, frente à Engenharia de Materiais.

A partir desta abordagem, com o viés da possibilidade de valorização por meio da economia circular, considerando ainda que a segregação por faixas granulométricas possibilita a aplicação do resíduo com maior controle das frações do

tamanho de partícula, busca-se verificar a resposta do material em relação às diferentes condições de composição. Neste estudo, avalia-se a influência do tamanho de partícula do resíduo fresado em diferentes níveis percentuais de substituição do agregado original: referência (0%), 25%, 50% e 100%, realizando a troca controlada pelo RAP em três grupos distintos: substituição exclusiva de agregados graúdos; substituição exclusiva de agregados miúdos e substituição completa de ambas as faixas de agregados. Subsidiariamente, avalia-se o uso de agregados miúdos de duas fontes minerais distintas, fontes graníticas e/ou basálticas, bem como a sua influência em relação ao comportamento pó-líquido do conjunto asfáltico.

Ressalta-se que a adoção do nível de substituição do agregado natural em 25% foi pautada, conforme literatura, por ser considerada uma faixa usual, de fácil aplicação industrial e com bons resultados gerais (Correa, 2020; Gaspar, 2019). O nível de 50%, mais ousado, busca validar o comportamento do material com maior nível de resíduo. Os grupos de 0% (sem inclusão de RAP) e 100%, constituem-se como grupos de referência e comparação dos resultados. Da mesma forma, destaca-se que a separação dos grupos entre agregados graúdos e miúdos segue a função do material, pois, enquanto o agregado graúdo compõe a estrutura/esqueleto do material, o agregado miúdo desponta com a função de preenchimento dos vazios, conferindo travamento e coesão, bem como maior interrelação com os líquidos (ligante betuminoso) da mistura.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Apesar dos resultados promissores disponíveis na literatura a respeito da utilização de RAP em novas pavimentações, há, ainda, pouca efetividade de aplicação prática quanto à inclusão de materiais e agregados reciclados, ou valorização dos resíduos de pavimentos existentes, seja por receio quanto ao desempenho em relação à garantia contratual, ou ainda a respeito do grande número de variáveis que corroboram para a variabilidade e heterogeneidade do resíduo fresado. Ressalta-se que ausência de ações de valorização deste resíduo, há muito se encontra em desacordo aos anseios do Poder Público e com os princípios da sustentabilidade e da economia circular exigidos pelas várias áreas do conhecimento, como os diversos ramos da Engenharia.

Ressalta-se também que os resultados apresentados e discutidos nesta dissertação podem ser perfeitamente extrapolados e reaplicados, guardadas as devidas proporções, às demais obras estradais, a partir da análise de variabilidade e heterogeneidade do RAP entre diferentes trechos e malhas rodoviárias.

Assim, busca-se contribuir com a caracterização do RAP oriundo de rodovia existente na região Sul de Santa Catarina, investigando a verificação da influência dos diferentes tamanhos de partícula do resíduo fresado de pavimentação asfáltica na sua valorização. Destaca-se que, discussões quanto às práticas técnico-econômicas de economia circular e de valorização de resíduos, de abordagem real de potencialidade e de viabilidade de uso, são aplicáveis como forma de alcançar melhores práticas e destinação adequada, considerando o atual descarte do resíduo em bota-foras ao longo da malha rodoviária da região.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Valorizar o resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos - RAP, visando aplicação como agregado reciclado na camada de revestimento de pavimentos rodoviários.

1.2.1.1 Objetivos específicos

- a) Fundamentar o tema de pesquisa para o enquadramento das possíveis funções composicionais e propriedades dos materiais a serem utilizados, bem como das suas condições de processamento;
- b) Selecionar e caracterizar o resíduo de fresagem - RAP (e os demais insumos necessários: agregados graúdos, miúdos e CAP) para estabelecer a dosagem de revestimentos asfálticos;
- c) Comparar o comportamento das misturas asfálticas com diferentes níveis de substituição do RAP, e em dois grupos distintos de tamanho de partícula: agregados graúdos e miúdos, tendo como referência materiais de origem granítica e basáltica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTRADAS E PAVIMENTAÇÃO

A definição clássica de pavimento rodoviário consiste em uma estrutura ordenada de múltiplas camadas, com espessuras finitas, executadas sobre a superfície final da terraplenagem - ou subleito, destinada, de forma técnica e econômica, a resistir aos esforços impostos pelo tráfego e às condições do intemperismo, propiciando melhoria considerável nas características de rolamento, conforto, economia e segurança das estradas (Bernucci *et al.*, 2006).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 11.170, define pavimento sendo uma:

Estrutura construída sobre o leito natural ou terrapleno de uma via, constituída de uma ou várias camadas, capaz de resistir às tensões geradas pelas cargas dos veículos e pelas variações ambientais, distribuí-las minoradas no subleito, e dar condições de conforto e segurança de rolamento. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 4).

Em um país em que o modal de transporte rodoviário representa 75% do transporte/escoamento da produção nacional, contando com cerca de 1,8 milhão de quilômetros de rodovias (Estadão, 2022), a relevância e o impacto do conjunto de estradas e da qualidade da pavimentação disponível torna-se extremamente expressivo, considerando o volume de cargas e de pessoas que circulam diariamente pelos trechos rodoviários municipais, estaduais e federais, essenciais para a mobilidade, bem-estar da população e desenvolvimento da economia (Confederação Nacional do Transporte, 2022).

Ressalta-se ainda que a previsão de condições adequadas da malha rodoviária pode ser correlacionada com o direito básico dos cidadãos, presente na Constituição Federal, que, conforme “Art. 6º. **São direitos sociais** a educação, a saúde, a alimentação, o trabalho, a moradia, **o transporte**, o lazer, a segurança, a previdência social, a proteção à maternidade e à infância, a assistência aos desamparados, na forma desta Constituição” (Brasil, 1988, p. Art. 6, grifo nosso).

De toda a malha rodoviária brasileira, composta por aproximadamente 1.720.909 quilômetros de estradas, apenas 12,4% constituem-se de rodovias com algum tipo de pavimentação. Neste contexto, o baixo número de rodovias

pavimentadas afeta negativamente as condições de mobilidade, segurança e desempenho dos serviços de transportes, implicando em aumento considerável dos tempos de viagem devido aos menores limites de velocidade, além de condições de tráfego muitas vezes inadequados, requerendo atenção redobrada por parte dos motoristas. Da mesma forma, rodovias pavimentadas deterioradas também acarretam custos operacionais elevados do momento de transporte, devido ao aumento da necessidade de manutenção dos veículos que nela transitam, elevação do consumo de combustível e a propensão da ocorrência de acidentes (Confederação Nacional do Transporte, 2022).

2.1.1 Hierarquia de gestão dos trechos rodoviários

A existência de um sistema e uma infraestrutura de transporte e mobilidade integrada, de qualidade e adequada às demandas regionais é fator imprescindível para o desenvolvimento sustentável da economia de um país. Sendo um direito assegurado pela Constituição Federal, excluídos os trechos de estradas locais (de uso particular), a atribuição de implantação, manutenção e conservação da malha rodoviária recai sobre o Poder Público, seja pela ação direta ou através de parceria público-privada ou contratos de concessão comum (Confederação Nacional do Transporte, 2022).

Em âmbito federal, a responsabilidade pela manutenção, recuperação e construção de vias de transportes interurbanas federais recai sobre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, em especial quanto à Diretoria de Infraestrutura Rodoviária (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2023).

A nível estadual, cada unidade da federação conta com setores públicos ou autárquicos destinados a gerir, implantar e manter a malha rodoviária. No estado de Santa Catarina, esta atribuição recai sobre a Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade - SIE, que passou a incorporar o Departamento Estadual de Infraestrutura - DEINFRA a partir da Lei Complementar n.º 741, de 12 de junho de 2019 (Alesc, 2019).

Por fim, a nível municipal, compete a cada Prefeitura Municipal, através de sua estrutura administrativa, executar e promover a manutenção adequada do sistema de infraestrutura e mobilidade local sob sua jurisdição.

2.1.2 Tipologia de pavimentos rodoviários

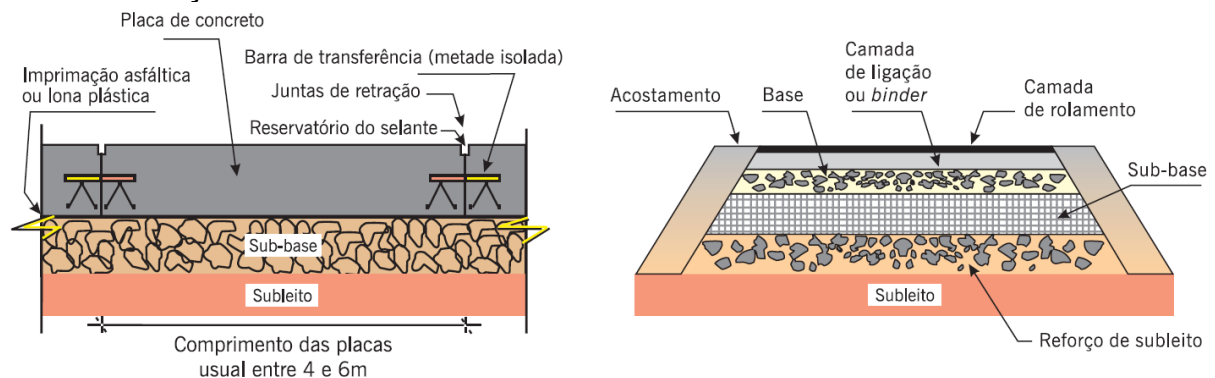
A literatura especializada classifica os pavimentos rodoviários em duas classes distintas, com base no comportamento estrutural característico: pavimentos rígidos - com pouca deformação sob a ação de cargas, usualmente executada em concreto de cimento Portland, e pavimentos flexíveis - com deformação considerável da estrutura sob a ação de cargas, usualmente executado com ligante asfáltico (Bernucci *et al.*, 2006).

Conforme definições da Associação Brasileira de Normas Técnicas, de acordo com as terminologias da NBR 11.170, o pavimento rígido consiste em um “Pavimento composto de uma camada de concreto de cimento Portland, com função de revestimento ou de base assentada diretamente sobre o subleito ou sub-base.” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 4). Já o pavimento flexível conceitua-se como um “Pavimento que consiste em uma camada de rolamento betuminosa e de base constituída de uma ou mais camadas, que se apoia sobre o leito da via, sendo que a camada de rolamento pode se adaptar às deformações da base.” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 4).

A ilustração esquemática da Figura 1 indica as principais camadas constituintes e os materiais típicos para os diferentes grupos de pavimentos. Para o pavimento rígido (à esquerda), a camada de revestimento é composta por uma placa de concreto, armada ou não - podendo ser protendida, cuja espessura e dimensionamento é função da resistência à flexão requerida e condição de suporte das camadas inferiores. Em função do fenômeno de dilatação térmica e da retração, ao longo do comprimento das placas de concreto são previstas juntas seladas e barras de transferência. Sob esta, usualmente, desenvolve-se a camada de sub-base, com o objetivo de aumentar a resistência da camada de apoio, a qual, usualmente constitui-se como o subleito devidamente compactado da camada final de terraplenagem. Para um pavimento flexível (à direita), no entanto, sob o mesmo subleito pode ser realizada uma camada de reforço, visando aumentar a resistência de apoio, uma camada de sub-base e base, geralmente de material pétreo, e sobre este último a camada de revestimento, em etapa única, ou duas camadas distintas em função da espessura total: ligação ou *binder* e rolamento. Dependendo do tráfego a qual será submetido, condições geométricas da via, materiais empregados e das condições específicas

locais, uma ou mais camadas listadas podem ser suprimidas em projeto (Bernucci *et al.*, 2006). No contexto brasileiro, menos de 2% da malha rodoviária pavimentada é composta por pavimentos rígidos, enquanto a pavimentação flexível, caracterizada principalmente pelo uso de revestimento asfáltico, é predominante. (Confederação Nacional do Transporte, 2022).

Figura 1 – Ilustração esquemática da estrutura típica de pavimentos rodoviários rígidos (à esquerda) em corte longitudinal e flexíveis (à direita) em corte transversal, com a indicação das diversas camadas constituintes.



Fonte: Bernucci (2006, p. 10).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 11.171, promulgada na década de 1990, definiu inicialmente como serviços característicos da pavimentação rodoviária (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990b) e a terminologia de cada atividade através da NBR 11.170 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a), conforme relação adaptada e apresentada no Quadro 1.

A referência às Normas Técnicas Brasileiras - NBR, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, fundamenta-se na necessidade de embasamento técnico normativo, neste caso, para a definição dos serviços relacionados à atividade de pavimentação rodoviária, possibilitando a sistematização conceitual aplicável ao tema.

Quadro 1 – Relação de serviços aplicados à pavimentação rodoviária, conforme terminologia das Normas Técnicas NBR 11.170 e NBR 11.171, organizadas por camadas executivas.

(continua)

Camada	Serviço	Terminologia
Subleito	Regularização do subleito	Conformação da superfície do subleito em perfil e seção pré-definida por projeto, com material apropriado em cortes e aterros compactados com camadas inferiores a 20 cm.
	Reforço do subleito	Camada executada sobre o subleito, com materiais de capacidade de suporte superior ao solo local, de forma a proporcionar uma redução na espessura total da base.
Sub-base e base	Brita corrida	Produto da britagem de rochas e materiais pétreos.
	Brita graduada	Mistura de materiais britados para atendimento a uma faixa granulométrica pré-estabelecida.
	Brita graduada tratada com cimento	Mistura de brita graduada com cimento Portland em teores pré-determinados.
	Concreto magro	Concreto hidráulico com baixo consumo de cimento Portland.
	Concreto rolado	Concreto de cimento Portland com baixo teor de água/cimento, consistência dura e trabalhabilidade que permita a compactação por rolos compressores.
	Empedramento Telford	Pedras assentadas e convenientemente compactadas, podendo ou não ser encunhadas com pedras de menor dimensão.
	Escória siderúrgica	Resíduo da indústria siderúrgica com possibilidade de emprego em processos de pavimentação.
	Macadame betuminoso por penetração	Camada de agregados pétreos graúdos, miúdos e ligantes betuminosos para preenchimento dos vazios e aglutinação dos agregados.
	Macadame hidráulico	Camada de agregados graúdos em que os vazios são preenchidos com agregados miúdos com o auxílio de água sob pressão.
	Pré-misturado usinado a quente ou a frio	Camada de agregados e asfalto diluído ou emulsão asfáltica dosada, sem aquecimento do agregado quando a frio, e uso de ligante betuminoso em detrimento da emulsão quando do uso a quente.
	Solo arenoso fino	Solo arenoso com partículas inferiores a 2 mm, com características geotécnicas peculiares aos solos lateríticos.
	Solo-betume	Mistura compactada de solo estabilizado com a adição de ligante betuminoso.
	Solo-brita	Mistura compactada de solo e brita em proporções específicas.

(continua)

Camada	Serviço	Terminologia
Sub-base e base	Solo-cal	Mistura compactada de solo com adição de cal e água em proporções específicas.
	Solo-cimento	Mistura compactada de solo com adição de cimento Portland e água em proporções específicas.
	Solo-cinzas volantes	Mistura compactada de solo, cinza volante e água em proporções específicas.
	Solo estabilizado com aditivos químicos	Processo de estabilização do solo com a adição de produtos químicos com o objetivo de melhorar as propriedades.
	Solo estabilizado granulometricamente	Processo de estabilização com o objetivo de enquadrar um solo ou mistura de solos a uma faixa granulométrica especificada.
	Solo melhorado com cal	Mistura compactada de solo com adição de cal e água em proporções específicas, com o objetivo de melhorar os índices físicos do solo sem preocupação com o aumento de resistência.
	Solo melhorado com cimento	Mistura compactada de solo com adição de cal e água em proporções específicas, com o objetivo de melhorar os índices físicos do solo e da capacidade de suporte.
	Concreto de cimento Portland	Mistura dosada de agregados graduados, cimento Portland, água e eventuais aditivos.
	Solo-brita tratado com cimento	Mistura compactada de solo brita e cimento Portland em proporções específicas.
Revestimento	Areia-asfalto a quente ou a frio	Mistura betuminosa entre agregados miúdos, ligante betuminoso e eventual <i>filler</i> - quando a quente utilizado asfalto de petróleo e a frio emulsão asfáltica ou asfalto diluído.
	Calçamento	Revestimento em peças pré-fabricadas ou poliédricas de concreto, cerâmicas ou rochas.
	Concreto betuminoso usinado a quente	Mistura a quente, em usina, de agregado graduado, material de enchimento e ligante betuminoso, com espalhamento e compactação na pista a quente.
	Concreto de cimento Portland	Mistura dosada de agregados graduados, cimento Portland, água e eventuais aditivos.
	Lama asfáltica	Mistura fluida de agregados miúdos, cimento Portland, emulsão asfáltica e água.
	Macadame betuminoso por penetração	Camada de agregados pétreos graúdos, miúdos e ligantes betuminosos para preenchimento dos vazios e aglutinação dos agregados.
	Pré-misturado usinado a quente ou a frio	Camada de agregados e asfalto diluído ou emulsão asfáltica dosada, sem aquecimento do agregado quando a frio, e uso de ligante betuminoso em detrimento da emulsão quando do uso a quente.

(conclusão)

Camada	Serviço	Terminologia
Revestimento	Revestimento primário	Camada de material selecionado, estabilizado e executado sobre o subleito (ou reforço do subleito) de forma a permitir condições de rolamento com características superiores à do solo local.
	Tratamento anti-pó	Revestimento de baixo custo de uma via de terra para eliminação de poeira em tempo seco e de lama em tempo chuvoso.
	Tratamento superficial por penetração simples, duplo ou triplo	Operação que consiste em espalhar ligante em estado líquido sobre uma camada de material granular, cujos vazios o ligante deve penetrar. Quando ao contrário, isto é, aplicação do agregado sobre o ligante, tem-se o tratamento superficial por penetração invertida.
Imprimação		Camada de material betuminoso, aplicada sobre uma base com o objetivo de proporcionar certa coesão na parte superior desta camada, proteger contra a penetração da água e promover a aderência da base com a camada de revestimento.
Pintura de ligação		Camada de material betuminoso aplicada sobre a base ou revestimento para promover aderência entre as camadas.

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990b; a)

Torna-se importante ressaltar que desde a promulgação das referidas Normas Técnicas, alguns dos serviços especificados caíram em desuso, enquanto outros foram aprimorados, em consonância com o avanço tecnológico e o conhecimento científico da área de engenharia, geotecnia, materiais e áreas correlatas.

Em relação às recomendações técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, o Quadro 2 fornece uma listagem dos processos de amostragem de materiais que compõem a camada de revestimento de pavimento asfáltico, além de métodos para a caracterização dos insumos e corpos de prova, em relação às principais características requeridas pela estrutura, sem a pretensão de ser exaustiva no assunto, considerando o grande número de ensaios e procedimentos aplicáveis e disponíveis ao estudo de dosagem e controle de qualidade da pavimentação.

Quadro 2 – Relação de Normas e Instruções de Serviço, Ensaio ou Procedimento promulgadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, aplicáveis às etapas de amostragem e caracterização do resíduo fresado da camada de revestimento asfáltico - RAP, amostragem e caracterização de materiais pétreos (agregados), amostragem e caracterização do ligante asfáltico (CAP), dosagem e produção de corpos de prova, além da caracterização de misturas asfálticas, incluindo breve descrição de seu conteúdo e objetivos.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
AMOSTRAGEM DE RESIDUO FRESADO DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO - RAP	
NBR 10.007 - Amostragem de resíduos sólidos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004a).	Fixa os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos.
AMOSTRAGEM DOS MATERIAIS PÉTREOS - AGREGADOS	
NBR 16.915 - Agregados - Amostragem (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021a).	Estabelece os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua coleta e redução até o armazenamento e transporte das amostras representativas de agregados para concreto, destinadas aos ensaios de laboratório e contraprova.
AMOSTRAGEM DO LIGANTE ASFÁLTICO - CAP	
NBR 14.883 - Petróleo, derivados de petróleo e biocombustíveis - Amostragem manual (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021b).	Estabelece os procedimentos e os equipamentos para obtenção manual de amostras de petróleo, derivados e biocombustíveis à temperatura e pressão ambientes a partir do ponto de amostragem até o recipiente primário. Esta Norma também inclui os procedimentos para amostragem de água livre e outros componentes pesados, associados com petróleo, derivados e biocombustíveis.
CARACTERIZAÇÃO DO RESIDUO ASFÁLTICO DA FRESAGEM - RAP	
NBR 17.054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).	Estabelece o método de ensaio para a determinação da composição granulométrica de agregados.
NORMA DNIT 412/2019 - ME - Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio (DNIT, 2019).	Descreve o procedimento de análise granulométrica para determinação da composição granulométrica por peneiramento de agregados graúdos e miúdos ou de mistura de agregados para misturas asfálticas.
NORMA DNER-ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica (DNIT, 1998a).	Prescreve o procedimento para determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos para concreto, por peneiramento. Prescreve a aparelhagem, amostragem e ensaios, definições e as condições para obtenção dos resultados.
NBR 7.809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).	Especifica o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, pelo método do paquímetro.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO ASFÁLTICO DA FRESAGEM - RAP	
NORMA DNIT 425/2020 - ME - Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio (DNIT, 2020a).	Apresenta o procedimento para determinação do índice de forma de agregados graúdos, utilizando o paquímetro. Descreve a aparelhagem, a execução e as condições para obtenção dos resultados.
NORMA DNER-ME 053/94 - Misturas betuminosas - percentagem de betume (DNIT, 1994a).	Contém um método para determinar a percentagem de betume em misturas betuminosas. Descreve a aparelhagem, os procedimentos para execução do ensaio e a fórmula para obtenção do resultado.
NBR 16.917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021c).	Estabelece o método para determinação da densidade na condição seca, na condição saturada superfície seca e da absorção de água de agregado graúdo destinado ao uso em concreto.
CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PÉTREOS - AGREGADOS	
NBR 16.974 - Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022b).	Estabelece o método de ensaio de abrasão de agregado graúdo usando a máquina de abrasão Los Angeles.
NORMA DNER-ME 035/98 - Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles” (DNIT, 1998b).	Prescreve o método para obtenção do valor da abrasão “Los Angeles” de agregado. Apresenta a aparelhagem, definições, a execução do ensaio nas graduações estabelecidas para o agregado, a carga abrasiva aplicada, e as condições para obtenção dos resultados.
NBR 7.809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).	Especifica o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, pelo método do paquímetro.
NORMA DNIT 425/2020 - ME - Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio (DNIT, 2020a).	Apresenta o procedimento para determinação do índice de forma de agregados graúdos, utilizando o paquímetro. Descreve a aparelhagem, a execução e as condições para obtenção dos resultados.
NBR 12.052 - Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992).	Prescreve o método para a determinação do equivalente de areia de solos ou agregados miúdos.
NORMA DNER-ME 054/97 - Equivalente de areia (DNIT, 1997).	Apresenta o procedimento para a determinação do equivalente de areia de solos ou de agregados miúdos. Prescreve a aparelhagem, os reagentes, as soluções usadas, a execução do ensaio e as condições para obtenção do resultado.
NBR 17.054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).	Estabelece o método de ensaio para a determinação da composição granulométrica de agregados.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PÉTREOS - AGREGADOS	
NORMA DNIT 412/2019 - ME - Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio (DNIT, 2019).	Descreve o procedimento de análise granulométrica para determinação da composição granulométrica por peneiramento de agregados graúdos e miúdos ou de mistura de agregados para misturas asfálticas.
NORMA DNER-ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica (DNIT, 1998a).	Prescreve o procedimento para determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos para concreto, por peneiramento. Prescreve a aparelhagem, amostragem e ensaios, definições e as condições para obtenção dos resultados.
NBR 16.917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021c).	Estabelece o método para determinação da densidade na condição seca, na condição saturada superfície seca e da absorção de água de agregado graúdo destinado ao uso em concreto.
NBR 16.916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021d).	Estabelece o método para determinação da densidade na condição seca, na condição saturada superfície seca e da absorção de água de agregado miúdo destinado ao uso em concreto.
NORMA DNER-ME 081/98 - Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo (DNIT, 1998c).	Apresenta os procedimentos para a determinação da densidade aparente de agregados graúdos e da absorção d'água. Apresenta definições, aparelhagem, amostragem, ensaio e os requisitos para obtenção dos resultados.
NORMA DNER-ME 084/95 - Agregado miúdo - determinação da densidade real (DNIT, 1995a).	Fixa o procedimento para a determinação da densidade real de agregado miúdo. Apresenta a aparelhagem, amostragem, ensaio, e as condições para obtenção dos resultados.
NORMA DNIT 411/2021 - ME - Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio (DNIT, 2021a).	Apresenta o procedimento para determinação da massa específica de uma quantidade de partículas de agregado miúdo (não incluindo o volume de vazios entre as partículas), da densidade relativa e da absorção do agregado miúdo. Dependendo do procedimento utilizado, a massa específica, em g/cm ³ , é expressa como real ou aparente. A densidade relativa, grandeza adimensional, também é expressa como real ou aparente. A massa específica real e a densidade relativa real são determinadas após a secagem do agregado. A massa específica aparente, a densidade relativa aparente e a absorção são determinadas após a imersão dos agregados em água, por tempo preestabelecido.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PÉTREOS - AGREGADOS	
NORMA DNIT 413/2021 - ME - Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio (DNIT, 2021b).	Apresenta o procedimento para determinação da massa específica de uma quantidade de partículas de agregado graúdo (não incluindo o volume de vazios entre as partículas), da densidade relativa e da absorção do agregado graúdo. Dependendo do procedimento utilizado, a massa específica é expressa como real ou aparente. A densidade relativa, grandeza adimensional, também é expressa como real ou aparente. A massa específica real e a densidade relativa real são determinadas após a secagem do agregado. A massa específica aparente, a densidade relativa aparente e a absorção são determinadas após a imersão do agregado em água por tempo preestabelecido.
NBR 12.584 - Agregado miúdo - Verificação da adesividade ao ligante betuminoso (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017a).	Determina a verificação da adesividade de agregado miúdo ao ligante betuminoso.
NBR 12.583 - Agregado graúdo - Verificação da adesividade ao ligante betuminoso (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017b).	Determina a verificação da adesividade de agregado graúdo ao ligante betuminoso.
NORMA DNER-ME 078/94 - Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso (DNIT, 1994b).	Contém um método para determinar a propriedade que tem o agregado [de ser aderido por material betuminoso]. Descreve a aparelhagem, os procedimentos para execução do ensaio e o critério para a obtenção do resultado.
DNER-ME 079/94 - Agregado miúdo - adesividade a ligante betuminoso (DNIT, 1994c).	Contém um método para determinar a adesividade de agregado a ligante betuminoso. É aplicado para agregado passando na peneira com 0,59 mm de abertura, devidamente preparado em laboratório para o ensaio. Descreve a aparelhagem, as soluções necessárias, os procedimentos para execução do ensaio e os critérios para obtenção do resultado.
CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO - CAP	
NBR 6.560 - Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016a).	Estabelece o método para determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos na faixa de 30 °C a 157 °C, empregando o equipamento anel e bola imerso em banho de água destilada ou potável recém-fervidas, para pontos de amolecimentos esperados entre 30 °C e 80 °C, ou óleo de silicone ou glicerina USP, para pontos de amolecimentos esperados acima de 80 °C e até 157 °C.
NORMA DNER-ME 009/98 - Petróleo e derivados - determinação da densidade - método do densímetro (DNIT, 1998d).	Estabelece o procedimento a ser usado na determinação, pelo método do densímetro, da densidade relativa de petróleo, de seus derivados, ou de misturas destes com produtos não derivados de petróleo, que sejam normalmente líquidos, e tendo uma pressão de vapor Reid de 1,8 kg ou menos. Apresenta também a aparelhagem, definições, ensaio, e as condições para obtenção dos resultados e precisão.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO - CAP	
NORMA DNER-ME 193/96 - Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica (DNIT, 1996).	Fixa o procedimento a ser adotado na determinação da densidade e da massa específica de materiais líquidos e semi-sólidos, a 25 °C ou 15,6 °C, pelo uso de picnômetro. Apresenta aparelhagem, ensaio e as condições para obtenção dos resultados e da precisão.
NBR 14.756 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade cinemática (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001).	Determina a viscosidade cinemática de cimentos asfálticos de petróleo a 135 °C para caracterizar o escoamento do material.
NBR 5.847 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade absoluta (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).	Determinação da viscosidade de cimento asfáltico por meio de viscosímetro capilar.
NORMA DNER-ME 151/94 - Asfaltos - determinação da viscosidade cinemática (DNIT, 1994d).	Estabelece a aparelhagem, os materiais, o procedimento e a obtenção de resultados necessários para a determinação da viscosidade cinemática de asfaltos.
NBR 14.950 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003).	Determina a viscosidade de materiais betuminosos com o viscosímetro Saybolt Furol.
NORMA DNER-ME 004/94 - Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada (DNIT, 1994e).	Define o procedimento a ser utilizado para a determinação da viscosidade Saybolt-Furol de materiais betuminosos a alta temperatura e estabelece valores quanto à repetibilidade e reprodutibilidade.
NORMA DNIT 155/2010-ME - Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio (DNIT, 2010a).	Estabelece o procedimento metodológico para determinação da penetração de materiais asfálticos semi-sólidos e sólidos, empregados em rodovias. Descreve a aparelhagem, os procedimentos a serem aplicados e as condições para obtenção dos resultados.
NORMA DNIT 131/2010 - ME - Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio (DNIT, 2010b).	Apresenta os procedimentos metodológicos para determinação do Ponto de Amolecimento em materiais asfálticos, pelo método do Anel e Bola. Apresenta, também, os critérios relativos à repetitividade e reprodutibilidade dos resultados.
NORMA DNIT 130/2010 - ME - Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio (DNIT, 2010c).	Apresenta os procedimentos metodológicos para determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos, utilizando o ductilômetro.
NBR 15.184 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021e).	Descreve o procedimento para determinação da viscosidade aparente de asfaltos a temperaturas compreendidas entre 38 °C e 260 °C, usando um viscosímetro rotacional, como, por exemplo, Brookfield, e um sistema de aquecimento acoplado ao controlador de temperatura para manter a temperatura de ensaio.
DOSAGEM, PREPARAÇÃO E PRODUÇÃO DE CORPOS DE PROVA	
NBR 12.891 - Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993a).	Dosagem de mistura agregado-cimento asfáltico, preparado a quente, pelo método Marshall.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
DOSAGEM, PREPARAÇÃO E PRODUÇÃO DE CORPOS DE PROVA	
NORMA DNIT 178/2018 - PRO - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento (DNIT, 2018a).	Estabelece as condições de preparação e compactação de misturas asfálticas de laboratório ou de usina visando obter corpos de prova padronizados, para avaliação das suas características volumétricas e mecânicas. Aplica-se a dois procedimentos de compactação: giratório e de impacto (Marshall). Aspectos ligados aos equipamentos principais de aplicação da energia de compactação diferem nos dois tipos de equipamentos e são definidos individualmente. Utensílios e equipamentos auxiliares e as características da preparação das amostras são iguais para os dois equipamentos.
NORMA DNER-ME 043/95 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall (DNIT, 1995b).	Apresenta os procedimentos para a determinação da estabilidade e da fluência de misturas betuminosas de cimento asfáltico ou alcatrão, a quente, para uso em pavimentação, com agregado de tamanho de 25,4 mm máximo, por meio da aparelhagem Marshall. Apresenta definições, o preparo de corpos-de-prova e os procedimentos para a obtenção dos resultados.
NORMA DNIT 447/2024 – ME - Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio (DNIT, 2024).	Estabelece a metodologia de ensaio para a determinação da estabilidade e da fluência de misturas asfálticas, para uso em pavimentação, com agregado de tamanho máximo de 25,4 mm (1”), por meio da aparelhagem Marshall. Apresenta definições e os procedimentos para a obtenção dos resultados. Cancela e substitui a Norma DNER-ME 043/95.
CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	
NORMA DNIT 135/2018 - ME - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio (DNIT, 2018a).	Estabelece o método para determinar o módulo de resiliência, o módulo instantâneo, o módulo total e o coeficiente de Poisson, de misturas asfálticas, cujos resultados são utilizados para análise mecanística do projeto de pavimentos asfálticos. Define a aparelhagem necessária e as condições operacionais para obtenção dos resultados.
NORMA DNIT 184/2018 - ME - Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio (DNIT, 2018b).	Descreve o procedimento de ensaio para a estimativa da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas na fase de projeto e de construção, a partir do ensaio uniaxial de carga repetida em corpo de prova cilíndrico, utilizando o parâmetro denominado Número de Fluxo. Este parâmetro na designação internacional denomina-se Flow Number, com a sigla FN, mantida nesta Norma.
NORMA DNER-ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cântabro (DNIT, 1999).	Apresenta o método pelo qual se determina o desgaste, por abrasão, de uma mistura betuminosa com asfalto-polímero, com emprego da máquina Los Angeles - Ensaio Cântabro.
NBR 8.352 - Misturas betuminosas - Determinação da densidade aparente. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984).	Determina a densidade aparente de misturas betuminosas em corpos de prova moldados em laboratório.

(continua)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	
NORMA DNIT 428/2022 – ME - Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio (DNIT, 2022).	Estabelece a sistemática a ser empregada na determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados de misturas asfálticas, moldados em laboratório ou extraídos da pista. Este ensaio pode ser aplicado tanto em projetos de dosagem de misturas asfálticas, quanto na avaliação e controle das misturas no campo.
NBR 15.573 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012a).	Estabelece o método para determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados de misturas asfálticas, moldados em laboratório ou extraídos de pista. Este ensaio pode ser aplicado por ocasião do projeto de dosagem das misturas asfálticas ou para a avaliação e controle delas, quando produzidas em laboratório, em usina ou aplicadas em pista.
NORMA DNIT 427/2020 - ME - Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio (DNIT, 2020b).	Apresenta o procedimento para a determinação da densidade relativa máxima medida (<i>G_{mm}</i>) e da massa específica máxima medida (<i>ME_{mm}</i>) de misturas asfálticas não compactadas, utilizando o método Rice. A densidade relativa máxima medida (<i>G_{mm}</i>), substitui a densidade máxima teórica (DMT) tradicionalmente calculada pela média ponderada das densidades dos componentes da mistura asfáltica, sendo igual ou menor do que DMT, dependendo da absorção dos agregados. O valor encontrado é utilizado na determinação de parâmetros de dosagem e no controle das misturas asfálticas produzidas em usina, em laboratório ou extraídas em campo.
NBR 15.619 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016b).	Estabelece o método para determinação em laboratório da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica de misturas asfálticas não compactadas. Este ensaio pode ser aplicado por ocasião do projeto de dosagem das misturas asfálticas, para a avaliação e controle das misturas asfálticas que estão sendo produzidas em usina, laboratório ou ainda extraídas de campo.
NBR 16.018 - Misturas asfálticas - Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012b).	Determina o módulo de resiliência, módulo de carregamento e coeficiente de Poisson para misturas asfálticas através de compressão diametral.
NBR 15.087 - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012c).	Determina a resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas.
NORMA DNIT 136/2018 - ME - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio (DNIT, 2018c).	Estabelece os procedimentos metodológicos para determinar a resistência à tração indireta por compressão diametral de misturas asfálticas.

(conclusão)

NORMATIVA OU INSTRUÇÃO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	
NORMA DNIT 031/2006 - ES - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço (DNIT, 2006a).	Define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento flexível de estradas de rodagem, pela confecção de mistura asfáltica a quente em usina apropriada utilizando ligante asfáltico, agregados e material de enchimento (filler). Estabelece os requisitos concernentes aos materiais, equipamentos, execução e controle de qualidade dos materiais empregados, além das condições de conformidade e não-conformidade e de medição dos serviços.

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Assim, a consulta aos documentos supracitados, disponíveis para acesso através do portal do DNIT e através do CREA/SC no caso das Normas Técnicas da ABNT, se traduzem de suma importância para o balizamento dos procedimentos laboratoriais de ensaio das amostras em relação aos parâmetros de relevância para o estudo, devidamente identificados na metodologia de trabalho.

2.1.3 Camadas do pavimento rodoviário flexível

A nível físico, pode-se considerar o concreto asfáltico como “[...] um material contínuo, homogêneo e isotrópico, e seu comportamento é influenciado por três fatores, em nível macroscópico: temperatura, amplitude das deformações, e ao número de ciclos de carga solicitados.” (Correa, 2020, p. 23).

A camada de revestimento de um pavimento tem por objetivo suportar as cargas provenientes do tráfego, proteger as camadas subjacentes transmitindo os esforços de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, transmitir boas condições de rolamento, resistir à ação abrasiva do tráfego e do intemperismo, além de melhorar as condições de rolamento em quesitos de conforto e segurança (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a; Bernucci *et al.*, 2006). Esta camada, em pavimentos flexíveis de rodovias é usualmente executada com a utilização de materiais betuminosos. Quimicamente, materiais betuminosos são misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono (CS₂), com propriedades de aglutinação (Pinto e Pinto, 2019).

De acordo com a NBR 7.208, o betume consiste em:

Material cimentício de consistência sólida, semi-sólida ou viscosa, que pode ocorrer na natureza ou ser obtido por processo industrial, composto principalmente de hidrocarbonetos de alto peso molecular, completamente solúvel em bissulfeto de carbono, dos quais asfaltos e alcatrões são típicos. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990c, p. 1–2).

De acordo com a mesma normativa, o alcatrão é definido como um produto betuminoso de cor entre preto e pardo escuro, obtido pela destilação destrutiva da hulha, enquanto o asfalto é conceituado como um material cimentício, no mesmo perfil de cor, que ocorre na natureza ou que é obtido no processamento do petróleo, amolecendo gradualmente com o incremento da temperatura (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990c).

Historicamente, o início da aplicação de asfalto na construção de estradas remonta há mais de 3.500 anos a.C., como material utilizado pelos Egípcios para proporcionar a ligação entre blocos de pedra. Atualmente o asfalto utilizado em rodovias, dentre as fontes possíveis, é comumente obtido a partir do refino de petróleo, como resíduo do processo de destilação: originando o cimento asfáltico de petróleo - CAP (Pinto e Pinto, 2019).

O cimento asfáltico necessita de aquecimento para atingir a consistência adequada para o envolvimento dos agregados, daí o termo concreto betuminoso usinado a quente. Possui adequada flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis. Usualmente são classificados pelo ensaio de penetração ou pela viscosidade (Pinto e Pinto, 2019).

Reologicamente, o ligante asfáltico utilizado na camada de revestimento asfáltico, na situação de campo, tende a um comportamento viscoelástico do material. Quando submetido a elevadas temperaturas, apresenta um comportamento viscoso, enquanto em baixas temperaturas, comporta-se como um sólido quase elástico. A velocidade de carregamento também é um fator que influencia no comportamento para o ligante: quando as cargas são aplicadas rapidamente, tem-se uma resposta quase elástica, enquanto em carregamentos lentos, tende-se a uma resposta viscosa do material (Delavy, 2021).

Com o objetivo de promover melhorias nas respostas mecânicas e reológicas da camada de revestimento do pavimento de concreto asfáltico, conforme a NBR 7.208, o asfalto pode ser modificado através da “[...] adição de determinadas

substâncias, como, por exemplo, polímeros, ao cimento asfáltico de petróleo”. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990c, p. 1), sendo usual a utilização de polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno) para esta finalidade. Quimicamente, estes polímeros derivam suas propriedades de força e elasticidade em especial por conta da reticulação física das moléculas em uma rede tridimensional. “Os blocos terminais de poliestireno conferem resistência ao polímero enquanto os blocos intermediários de matriz de borracha de polibutadieno dão ao material sua elasticidade excepcional” (Octaviano, 2022, p. 13). A eficácia das ligações cruzadas oriunda da reticulação diminui rapidamente acima da temperatura de transição do poliestireno (110°C), sendo restaurados durante o resfriamento e proporcionando melhores propriedades de resistência e elasticidade à massa asfáltica (Octaviano, 2022).

O uso de cimento asfáltico de petróleo modificado é normatizado pelo DNIT, conforme Norma 129/2011, a qual relaciona as características requeridas para que seja alcançada a máxima eficiência (DNIT, 2011). Importante citar que nem todo asfalto pode ser modificado por polímeros, pois deve haver uma compatibilidade entre os elementos constituintes. Sendo assim, torna-se relevante ao modificar um ligante asfáltico, avaliar a estabilidade quanto à eventual separação de fases, em condições estáticas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004b).

No estado de Santa Catarina, o primeiro trecho de rodovia a utilizar a tecnologia de ligante asfáltico altamente modificado por polímero - HiMA, SBS 60/85-E, compreendeu um trecho de 52 km da Rodovia SC-114, localizada entre os municípios de Paineiras e São Joaquim, apresentando desempenho muito satisfatório após longo período de utilização (Delavy, 2021).

Analogamente, o agregado pétreo pode ser considerado como o “esqueleto” da estrutura de um pavimento em quesitos de resistência e transmissão de cargas rodantes na superfície do revestimento, enquanto o ligante asfáltico é responsável por cimentar as partículas de agregado, mantendo-as nas posições adequadas (Pinto e Pinto, 2019). A origem e a forma do agregado tornam-se responsáveis por muitas características da camada do pavimento, sendo recomendadas pelas Normas e Instruções de Serviço faixas granulométricas específicas para uso na pavimentação rodoviária.

Há ainda outras formas de execução do revestimento betuminoso além da mistura a quente, seja por mistura a frio ou ainda por métodos de penetração direta (a exemplo do macadame betuminoso) e penetração direta ou indireta (situação do

tratamento superficial simples, duplo e triplo). Enquanto misturas a quente são mais duráveis e resistentes, em contrapartida requerem instalações e equipamentos complexos para a fabricação e espalhamento, impedindo a estocagem, e consequentemente encarecendo o custo total associado (Pinto e Pinto, 2019).

A camada de base do pavimento, sub-base e reforço de subleito (rever, Figura 1), por sua vez, tem por objetivo resistir e distribuir os esforços verticais do tráfego. Em regra geral, a subdivisão das camadas tem por objetivo otimizar o processo executivo, em virtude da espessura requerida, em que as camadas mais elevadas são executadas com materiais de características com melhor qualidade que as camadas inferiores, otimizando custos. De acordo com a NBR 11.170, conceitualmente, a base é a “Camada destinada a resistir aos esforços oriundos dos veículos, distribuindo-os às camadas subjacentes, e sobre a qual se constrói o revestimento.” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 1), enquanto a sub-base é a “Camada complementar, subjacente à base, que serve como transição entre esta e o subleito, com a finalidade de reduzir a espessura da base.” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 5).

Em regra geral, as camadas da pavimentação flexível usualmente fazem uso de materiais pétreos, genericamente denominado como agregados, que devem satisfazer requisitos mínimos de graduação granulométrica, valores mínimos de CBR e expansão, conforme delimitado pela especificação técnica. Em relação ao tamanho dos agregados, tem-se como gráudo aquele retido na peneira de 2,0 mm (#10); como miúdo aquele passante pela peneira de 2,0 mm e retido na peneira de 0,075 mm (#200); além do material de enchimento, ou filler, aquele passante em ao menos 65% na peneira de 0,075 mm (#200) (Pinto e Pinto, 2019).

As características relevantes dos agregados em serviços de pavimentação consistem em granulometria, forma, absorção de água, resistência ao choque e ao desgaste, durabilidade, limpeza, adesividade e densidade. A granulometria assegura a estabilidade por atrito entre o tamanho das partículas, desde a mais gráuda à mais fina. A forma, geralmente cúbica, também auxilia na estabilidade. A absorção de água está associada à porosidade e durabilidade. A resistência ao choque e desgaste é relação das condições de aplicação do material, em relação à ação do tráfego e ao movimento recíproco das diversas partículas na camada do pavimento. A durabilidade está relacionada à resistência ao intemperismo, enquanto a adesividade está

relacionada à agregação à película betuminosa, quando em uso nas camadas de revestimento (Pinto e Pinto, 2019).

Em termos de origem, são empregados usualmente agregados de origem granítica ou basáltica, dependendo da disponibilidade de matéria prima local. O basalto constitui-se de rocha ígnea, apresentando usualmente alta resistência mecânica (Chaves *et al.*, 2021). Araujo, (2006), cita ainda que a interação química entre o agregado e o ligante betuminoso relaciona-se intimamente com a resistência mecânica do pavimento, sendo que agregados constituídos por minerais que apresentam alumínio na composição, como gnaiss e basalto, usualmente apresentam melhor interação química entre estes materiais. O granito, por sua vez, composto principalmente por quartzo, feldspato e mica também apresenta alta resistência, no entanto mais suscetível ao desgaste.

A adesão do ligante aos materiais pétreos envolve o desenvolvimento de interações eletrostáticas que dependem fundamentalmente da natureza química do conjunto CAP/agregados, uma vez que o CAP é formado por compostos apolares (hidrocarbonetos), enquanto a superfície dos agregados é de natureza polar. A compatibilidade entre os materiais torna-se crucial para garantir um adequado cobrimento do filme de CAP sobre os materiais pétreos, de forma a inibir a ação deslocadora da água, podendo-se fazer valer de aditivos melhoradores de adesividade (Correa, 2020).

Quanto ao aspecto granulométrico dos agregados, este influencia diretamente o teor de ligante da mistura e a macrotextura superficial da camada de revestimento. Curvas granulométricas de graduação densa e bem graduada tendem a preencher bem os vazios, apresentando excelente resistência ao cisalhamento; nesta faixa granulométrica o ligante tende à ordem de 4 a 6% para a obtenção de um volume de vazios entre 3 e 4%. Curvas granulométricas de graduação descontínua tendem a apresentar volume de vazios alto, requerendo um teor de ligante maior, na ordem de 5% a 6%. Curvas granulométricas de graduação aberta, também denominados como permeáveis, possuem elevado volume de vazios, justamente por não disporem de agregados miúdos para o travamento das vacâncias (Ceratti, Bernucci e Soares, 2015; Querino e Carvalho, 2020). A Figura 2 ilustra os três tipos característicos de distribuições granulométricas em misturas asfálticas.

Figura 2 – Ilustração das diferentes características de graduações granulométricas para agregados em misturas asfálticas.



Fonte: (Querino e Carvalho, 2020, p. 4).

A presença de água ou umidade pode afetar a interação agregado-ligante na adesividade da mistura, e ainda, quando do pavimento acabado, a água desempenha negativo papel ao penetrar no interior dos poros da mistura asfáltica, alterando o equilíbrio das forças existentes, podendo atuar de diferentes maneiras:

[...] agindo sobre a película do ligante asfáltico que recobre a superfície do agregado, ao ponto da resistência coesiva do revestimento se deteriorar pela presença da água na interface granular-ligante; ou, através da difusão da película de ligante asfáltico sob a forma de emulsão inversa, por meio da formação de gotículas de água no interior da película do ligante, diminuindo a coesão do ligante asfáltico e resultando no enfraquecimento da resistência coesiva do agregado. (Correa, 2020, p. 31).

A Norma Técnica Brasileira NBR 12.948, responsável por fixar as condições exigíveis para os materiais a serem utilizados na execução das camadas de concreto betuminoso usinado a quente define como condições específicas que o agregado graúdo deve apresentar uma perda por abrasão Los Angeles inferior a 40%, índice de forma inferior ou igual a 2, perda por sulfato de sódio inferior a 12% em cinco ciclos e boa adesividade ao ligante betuminoso; em relação ao agregado miúdo, é exigido que o equivalente de areia seja igual ou superior a 55%, também com boa adesividade; ao material de enchimento (*filler*), requer-se que haja uma porcentagem mínima de 65%, em massa, de material passando na peneira de 0,075 mm, e 100%, em massa, passando na peneira de 0,60 mm; em relação aos materiais betuminosos são citados os diversos cimentos asfálticos de acordo com a faixa de penetração e viscosidade. Quanto à composição da mistura são sugeridas três faixas granulométricas: A, B e C, além de parâmetros de dosagem, conforme Quadro 3 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993b).

Quadro 3 – Parâmetros de dosagem de misturas de agregados e materiais betuminosos para aplicações em camada de rolamento e camada intermediária (ligação ou *binder*) do revestimento asfáltico com espessura elevada.

Parâmetros / Aplicação	Camada de rolamento	Camada intermediária (<i>binder</i>)
Porcentagem de vazios (%)	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios (%)	75 a 82	65 a 72
Estabilidade mínima (kgf) para 75 golpes	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática (MPa)	0,65	0,65
Fluência (1/10 mm)	20 - 46	20- 46

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993b, p. 3) e DNIT (2018d, p. 5).

A Norma DNIT 95/2006, no entanto, complementa como classificação dos cimentos asfálticos de petróleo, conforme procedência, o CAP 30/45, CAP 50/70 (comercialmente mais difundido), CAP 85/100 e CAP 150/200, por exemplo (DNIT, 2006b). Os critérios de dimensionamento, especificação, aferição e controle são delimitados pelas especificações de serviço em quesito de materiais e procedimentos, podendo sofrer pequenas variações entre os órgãos contratantes. No tempo atual a Norma DNIT 31/2006, que fixa a sistemática para execução de camada do pavimento flexível e estabelece os requisitos quanto aos materiais, equipamentos, execução e controle de qualidade, encontra-se em processo de revisão e atualização.

“O projeto de uma mistura asfáltica consiste inicialmente em determinar a porcentagem dos diversos agregados minerais utilizados e a porcentagem de ligante asfáltico.” (Ceratti, Bernucci e Soares, 2015, p. 75). Neste processo, faz-se crucial o atendimento aos requisitos técnicos e normativos, parâmetros volumétricos, estabilidade e durabilidade da mistura (Ceratti, Bernucci e Soares, 2015).

O processo de execução da camada de revestimento por concreto betuminoso usinado a quente, conforme NBR 12.949, é subdividido em quatro etapas. Inicialmente ocorre o preparo da mistura, usualmente em usina adequada e equipada. Durante o preparo da mistura os agregados são reunidos em frações de forma a se adequar à faixa granulométrica exigida pela contratante. Os agregados são aquecidos a uma temperatura de ao menos 10 °C acima do cimento asfáltico e misturado ao ligante, que também é convenientemente aquecido até adquirir uma viscosidade

absoluta de 10,2 Pa.s e 0,3 Pa.s (em faixa de temperatura entre 107 °C a 177 °C). Corretivos de adesividade podem ser adicionadas à mistura para corrigir a adesividade entre o ligante e o agregado. Na segunda etapa, após a mistura, ocorre o transporte do concreto asfáltico, que deve deixar a usina a uma temperatura mínima de 105 °C, usualmente em caminhões basculantes cobertos com lona. Na terceira etapa ocorre o espalhamento e compressão. Requer-se que a superfície do pavimento esteja devidamente seca, imprimada, regularizada e consolidada com o projeto, bem como a temperatura ambiente esteja superior a 10 °C e o tempo não-chuvoso. Caso a imprimação realizada tenha ultrapassado o período de sete dias, uma pintura de ligação deverá ser realizada. O espalhamento da mistura de concreto asfáltico ocorre por meio de máquinas acabadoras, em uma ou mais camadas, com espessura compatível com o equipamento e projeto. Findado o espalhamento, tão logo a mistura suporte o peso próprio do rolo, com viscosidade absoluta próxima de 0,3 Pa.s, a temperatura não inferior a 80 °C, é realizada a compactação, que é finalizada pelo rolo liso de duas rodas em tandem. Via de regra a compactação é sempre iniciada pelos bordos da camada, longitudinalmente, e avança em direção ao eixo da pista. Havendo uma superelevação, inicia-se do ponto com a declividade mais baixa para a mais alta. Para garantir a adequada compactação, cada passada de rolo deve englobar ao menos metade da largura já comprimida, prolongando-se até que se atinja a compactação especificada por projeto, com velocidade entre 3,5 km/h e 5,0 km/h, sem que sejam realizadas mudanças de direção, inversões bruscas de marcha ou estacionamento do equipamento sobre o concreto asfáltico recém rolado. De forma a evitar a aderência das rodas dos compressores com a mistura, estas devem ser umedecidas com água e untadas com óleo vegetal. Por fim, a última etapa consiste na abertura ao trânsito, quando a mistura atingir a temperatura ambiente, acompanhado do processo de inspeção dos serviços (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993c).

2.1.4 Manutenção e reabilitação de pavimentos rodoviários

O pavimento asfáltico, assim como qualquer outra obra de engenharia, é dimensionado para suportar um ciclo de solicitações ao longo de sua vida útil, requerendo processos de manutenção preventiva e corretiva para promover a readequação das condições de tráfego. “Durante seu ciclo de utilização, o pavimento

migra de uma condição ótima até alcançar uma condição ruim ou péssima, caso não ocorra algum tipo de intervenção.” (Confederação Nacional do Transporte, 2022, p. 47). Com o passar do tempo, e o envelhecimento da camada de revestimento, há uma redução na ductilidade, reduzindo a capacidade de deformação da camada de revestimento flexível. O endurecimento do material betuminoso ao longo do tempo é devido à oxidação - reação do oxigênio do ar com o ligante, volatilização - evaporação dos constituintes voláteis em função da temperatura, polimerização - formação de uma grande molécula pela combinação de moléculas pequenas e tixotropia - explicando o aumento da consistência de um CAP nos locais que não ocorrem as solicitações do pavimento pelo tráfego. O endurecimento do ligante, é uma das causas da ocorrência de trinca prematura na superfície do revestimento asfáltico, associado à temperatura de refino, de recebimento, aplicação e da suscetibilidade térmica do ligante (Pinto e Pinto, 2019). O fenômeno de envelhecimento influencia a composição química do ligante presente no RAP, o que resulta em mudanças físicas. O incremento de asfaltenos em relação à fração malteno tende a aumentar a rigidez e reduzir a viscosidade (Tarsi, Tataranni e Sangiorgi, 2020).

Alguns defeitos que podem surgir em revestimentos asfálticos consistem em desgaste e desagregação, exsudação da camada ligante, ondulações e corrugações, trincas, afundamentos, buracos (panelas) entre outros defeitos patológicos (Bernucci *et al.*, 2006; Confederação Nacional do Transporte, 2022; Pinto e Pinto, 2019).

Nestes casos, na manutenção rodoviária ou ainda em reconstrução do pavimento, visando manter as vias em condições aceitáveis de trafegabilidade, a camada de revestimento acaba sendo fresada em procedimentos de manutenção ou restauração, que gera, conseqüentemente, uma grande quantidade de resíduos, identificado pela sigla RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* (Araujo Jr., 2019). Por definição a conservação do pavimento consiste em “Operações visando a manter as características originais do pavimento.” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 2), enquanto a conservação preventiva, de caráter periódico, tem por objetivo evitar o surgimento ou agravamento de defeitos em um pavimento, e a manutenção corretiva constitui-se de um recurso para recuperação de defeitos característicos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a).

Conforme os pavimentos flexíveis asfálticos são submetidos a processos de manutenção do tipo recomposição da camada superficial, ou ainda, reconstrução

estrutural, a camada asfáltica de contato com o tráfego pode ser extraída por meio do processo de fresagem, possibilitando a remoção mecânica de espessuras pré-determinadas do revestimento, sem que haja escarificação completa da camada. De acordo com Battisti (2019, p. 14), “Uma técnica de restauração de pavimentos, bastante utilizada no Brasil, é a fresagem, que consiste em cortar uma ou mais camadas do pavimento asfáltico rodoviário. Desta forma, são descartados em botaforas ou utilizados como uma espécie de cascalho em estradas vicinais.” (Pinto, 2010, p. 12), ou ainda, de forma complementar compreendido como, “O processo de restauração de um pavimento flexível (aqueles com revestimento asfáltico) possui como etapa preliminar a fresagem dessa estrutura. Nessa operação retira-se parte do revestimento antigo e então se executa a manutenção exigida pela via.” (Pinto, 2010, p. 12).

Para Moschetta e Mello (2021, p. 5), “A reutilização do material proveniente da pavimentação asfáltica, se tornou uma opção viável para a reabilitação de vias, por ser um método mais barato que a execução convencional, mais rápido e também com menor impacto ambiental.”. E ainda, à p. 7, informam que “A reciclagem de pavimentos consiste na reutilização, após reprocesso, dos materiais existentes em um pavimento deteriorado. Esse processo visa diminuir o consumo de materiais virgens, reduzindo a exploração de materiais pétreos.” Desta forma, percebe-se o alinhamento da valorização do resíduo com o princípio da economia circular.

Araujo Junior (2019, p. 6) ressalta e reforça que “[...] o reaproveitamento do material fresado é um tema importante a ser estudado, pois, além de conter propriedades que podem proporcionar um aumento de resistência nas camadas de pavimento, pode reduzir os custos de execução gerando menores impactos ao meio ambiente, uma vez que o material a ser descartado será reutilizado. Para, além disso, não é necessário extrair os materiais das jazidas, bem como a não necessidade de áreas para depósitos.”

Callister Junior e Rethwisch (2021, p. 693), em relação à possibilidade de reuso de materiais reciclados em relação às matérias-primas originais, nos diferentes processos de aplicação, discorrem que:

Foi estimado que em todo o mundo cerca de 15 bilhões de toneladas de matérias-primas são extraídas da terra a cada ano; algumas dessas matérias-primas são renováveis, enquanto outras não. Com o passar do tempo, está se tornando mais evidente que a Terra é virtualmente um sistema fechado em relação aos seus materiais constituintes e que seus recursos são finitos.

Além disso, à medida que nossas sociedades amadurecem e as populações crescem, os recursos disponíveis tornam-se mais escassos, e maior atenção deve ser dada a uma utilização mais efetiva desses recursos em relação ao ciclo dos materiais.

É necessário suprir energia a cada estágio do ciclo; nos Estados Unidos, estimou-se que aproximadamente metade da energia consumida pelas indústrias manufatureiras seja gasta para produzir e fabricar materiais. A energia é um recurso que, em certo grau, possui um suprimento limitado, e medidas devem ser tomadas para conservá-la e utilizá-la de forma mais eficiente na produção, aplicação e descarte dos materiais.

Por fim, existem interações e impactos sobre o meio ambiente natural durante todos os estágios do ciclo dos materiais. As condições da atmosfera terrestre, da água e do solo dependem em grande parte do cuidado com o qual percorremos o ciclo dos materiais. Há certos danos ecológicos e deteriorações da paisagem que resultam indubitavelmente da extração das matérias-primas. Podem ser gerados poluentes que são liberados para o ar e para a água durante o estágio de síntese e processamento; além disso, quaisquer produtos químicos tóxicos que sejam produzidos precisam ser gerenciados ou descartados. [...]

A reciclagem de produtos usados, em vez do seu descarte como resíduo, é um procedimento desejável por diversas razões. Em primeiro lugar, o uso de materiais reciclados reduz a necessidade de extração de matérias-primas do planeta e, dessa forma, há conservação de recursos naturais e eliminação de quaisquer impactos ecológicos associados à fase de extração. Em segundo lugar, as necessidades de energia para o refino e o processamento de materiais reciclados são, normalmente, menores que as dos seus equivalentes naturais. [...] (Callister Jr. e Rethwisch, 2021, p. 693).

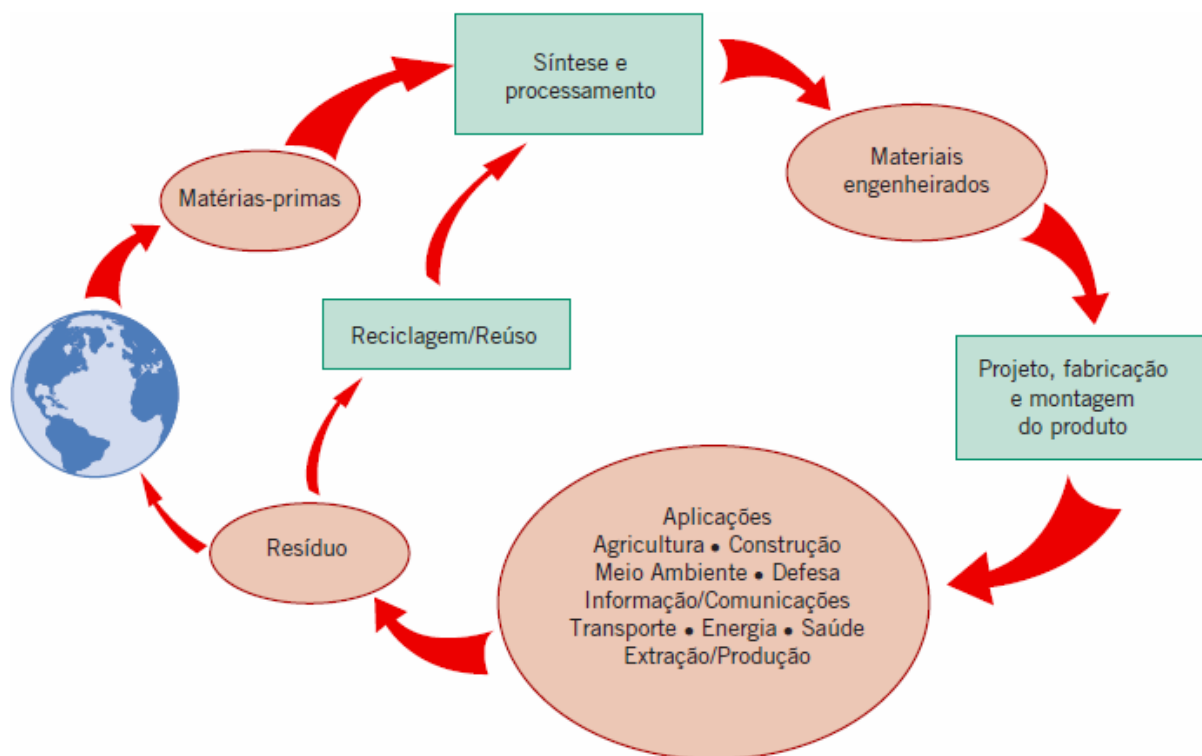
De acordo com Weetman (2019), a economia circular visa uma abordagem holística em que ao invés da tradicional “economia linear de consumo”, cujo processo consiste basicamente em “extrair, produzir e descartar”, possa ser incluso uma abordagem de trabalho em que os recursos finais, outrora como potencial descarte, passem a ser reincorporados em processos produtivos, evitando assim a perda de energia, recursos e materiais.

A economia circular é muito mais ambiciosa do que a reciclagem de materiais, ou “zero lixo para os aterros sanitários”. Ela amplia a cadeia de valor para abranger todo o ciclo de vida do produto, do início ao fim, incluindo todos os estágios de fornecimento, fabricação, distribuição e vendas. Pode envolver o *redesign* do produto, o uso de diferentes matérias-primas, a criação de novos subprodutos e coprodutos e a recuperação do valor das antigas sobras dos materiais usados no produto e no processo. Pode significar venda de serviços em vez de venda de produtos, ou novas maneiras de renovar, reparar ou remanufaturar o produto para revenda. De tudo isso resulta novo jargão de negócios para descrever essas “inovações disruptivas”. (Weetman, 2019, p. 33).

Considerando o ciclo total dos materiais, desde quando extraídos do seu ambiente natural, processados e aplicados nas finalidades adequadas, os resíduos

de materiais - após findada a vida útil do produto, podem ser reempregados através da reciclagem ou reuso em novos processos, corroborando para uma visão holística do ciclo de vida global. Esta metodologia, muito similar a uma cadeia circular, proporciona meios para que a linearidade original “do berço ao túmulo” dos materiais de construção possa, de forma alternativa, ser readequada, permitindo que resíduos sejam reincorporados a um novo ciclo de vida, contribuindo para o uso econômico e sustentável do meio. A Figura 3 ilustra a representação esquemática do ciclo total dos materiais. Traçando um paralelo à realidade da pavimentação, o processo de reciclagem e reuso do resíduo extraído, após valorização, seja em vias de uso clássico ou através de inovações associadas, como da possibilidade de recicladoras de pavimentos, despontam como uma perspectiva plausível ao cenário local, sendo a solução já utilizado em diversas regiões do mundo.

Figura 3 – Representação esquemática do ciclo total dos materiais, relacionando a seleção dos materiais com as suas propriedades.



Fonte: Callister Junior e Rethwisch (2021, p. 692).

A possibilidade de reciclagem do pavimento fresado, através da reutilização de material oriundo de revestimentos deteriorados da pavimentação é economicamente vantajosa e ambientalmente favorável, contribuindo para um ciclo

de vida com menos impacto ambiental. Em alguns países, como nos Estados Unidos, o RAP possui uma das maiores taxas de reciclagem, em que cerca de 99% das misturas de asfalto recuperadas de antigos pavimentos foram valorizadas em novos revestimentos. Na Europa, em países como a Bélgica, o percentual atinge a totalidade, reutilizando 100% do material disponível para novas pavimentações (Correa, 2020).

Em se tratando dos equipamentos de reciclagem *in loco*, diferente das fresadoras comuns, as recicladoras reaproveitam o material existente na própria via para reaplicá-lo em uma única passada. Esse equipamento tritura e mistura o asfalto antigo com materiais de adição (como emulsões ou cimento). A principal diferença entre uma recicladora de asfalto e uma fresadora comum é que a fresadora apenas retira a camada desgastada de asfalto, cortando e removendo o material, sem reciclar ou reaproveitá-lo. Já a recicladora realiza a mistura e a estabilização do material *in loco*, permitindo a reutilização imediata do pavimento. Isso torna o processo de reciclagem mais rápido e eficiente, além de reduzir o desperdício de recursos, tempo de operação e os custos com transporte e disposição de resíduos (Wirtgen Group, 2024).

Callister Jr. e Rethwisch (2021, p. 691) lembram que “Uma consciência das questões ambientais e sociais é importante para o engenheiro, uma vez que as demandas em relação aos recursos naturais do planeta estão aumentando a cada dia.” E contribuem ainda, com a relevância da seleção de materiais nos processos produtivos:

Muitos desses critérios de seleção estão relacionados com as propriedades dos materiais ou com uma combinação de propriedades — mecânicas, elétricas, térmicas, de corrosão, e assim por diante; o desempenho de um dado componente depende das propriedades do material a partir do qual ele foi fabricado. A capacidade de processamento ou a facilidade de fabricação de um componente também podem ter um papel importante no processo de seleção. (Callister Jr. e Rethwisch, 2021, p. 692).

Diante do exposto, o processo de manutenção ou reconstrução rodoviária que envolva a geração de resíduo fresado do pavimento asfáltico - RAP constitui-se de alternativa para a aplicação dos princípios da economia circular, de forma a valorizar o material residual e reincorporá-lo ao processo executivo de novos pavimentos.

2.1.4.1 Resíduo de asfalto fresado - RAP

A literatura técnica usualmente emprega a sigla RAP, do inglês - *Reclaimed Asphalt Pavement*, para referenciar-se ao material fresado da camada de revestimento da pavimentação asfáltica composto por agregados, ligante betuminoso e eventualmente material de enchimento - *filler* (Pereira, 2023).

O RAP da camada de revestimento surge nas etapas de manutenção e restauração de pavimentos asfálticos cuja capacidade de suporte sofreu avançado estado de danificação, principalmente por fadiga e deformação permanente, em que através da técnica de fresagem ocorre o corte controlado, em espessura pré-determinada da camada de revestimento, produzindo o resíduo do processo (Correa, 2020).

Na Figura 4 ilustra-se o volume de resíduo da fresagem realizada em obra reestruturante de um trecho rodoviário localizada entre os municípios de Grão Pará e Braço do Norte. Na situação, sem destino adequado e sem previsão atual de reutilização do resíduo prevista, o material acaba sendo descartado em regiões de bota-fora, sem que a potencialidade do resíduo seja devidamente aproveitada. Sobre este, ressalta-se que o volume de material removido do pavimento em manutenção, cujo acúmulo aconteceu em questão de minutos, evidencia a alta capacidade de produção do RAP que pode ser reciclado na execução de novos pavimentos.

Figura 4 – Registro fotográfico de um local utilizado como ponto de bota-fora para o material fresado no processo de repavimentação de rodovia.



Fonte: Arquivo da Autor (2023).

Percebe-se, no entanto, a ausência de um banco de dados, a nível nacional, que possa registrar e divulgar a produção de material fresado no Brasil, uma vez que as informações acabam sendo quantificadas apenas por Órgãos Públicos, para medições, e concessionárias de rodovias, para uso interno, dificultando a estimativa de dados real. A título de comparação, somente nos trechos concessionados pela Companhia de Concessões Rodoviárias - CCR, em 2021, foram geradas mais de 1.100.000 toneladas de asfalto fresado (Lima e Oliveira, 2023).

Conforme Art. 3º da resolução CONAMA 307, o resíduo do asfalto fresado - RAP pode ser enquadrado como resíduo de Classe A, podendo ser reaproveitado na própria obra ou encaminhado a usinas de reciclagem de agregados (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002). Em relação à classificação da NBR 10.004, o resíduo de asfalto fresado pode ser enquadrado na classe II-B, sendo inertes quando "[...] submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente [...], não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor [...]" (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004c, p. 5). No entanto, quando aquecido, requer-se cuidado devido à liberação de gases relacionados ao ligante asfáltico envelhecido.

O material fresado pode ser reaproveitado, de acordo com a literatura técnica, em diversas finalidades, a citar a incorporação em camadas de base, sub-base e para novos revestimentos asfálticos, sendo uma alternativa sustentável para promover a redução do consumo de energia, de materiais naturais, e contribuir com a redução do impacto no ciclo de vida dos materiais destinados à pavimentação rodoviária (Correa, 2020).

Os custos associados aos materiais tendem a diminuir com o aumento do teor de RAP na mistura, podendo chegar a uma economia de 50% a 70% em relação a uma mistura convencional sem a incorporação de material fresado, dependendo da tecnologia utilizada e de fatores logísticos-geográficos (Gaspar, 2019).

Dada a ampla malha rodoviária pavimentada, que em algum momento ao término de sua vida útil precisará ser submetida a processos de manutenção e reabilitação, a utilização de material fresado torna-se uma potencial alternativa de circularidade de materiais associada à revestimentos asfálticos, que muitas vezes acaba sem destino útil específico, findando em um grande volume de bota-fora, sem que o potencial do resíduo seja apreciado e devidamente utilizado.

O processo de reutilização da camada asfáltica fresada promove benefícios econômicos, com reaproveitamento da camada nobre do revestimento (brita e asfalto), ambiental - reduzindo a necessidade de exploração de novos recursos naturais, operacional - em termos de transporte, custos e tempo de restauração, além de técnica - permitindo correções e melhorias de parâmetros de desempenho funcionais no trecho de rodagem (Pereira, 2023).

Como limitante do RAP em misturas asfálticas, ressalta-se a variabilidade do material a nível de agregado e ligante, afinal a composição granulométrica, teores de betume, nível de intemperismo e demais características do material podem sofrer grandes alterações entre diferentes trechos rodoviários. Cita-se ainda a capacidade de produção e inserção do material em usinas de mistura, em que percentuais de incorporação de até 25% o aquecimento do RAP é realizado pela transferência de calor do contato com o agregado virgem, enquanto para percentuais maiores requer-se adaptações na estrutura da usina, através de processo de produção diferente do usual, pois acima deste percentual torna-se requerido que o RAP seja aquecido diretamente, mas sem que o ligante asfáltico presente nele seja incendiado ou oxidado pelo calor, alterando as propriedades do ligante RAP. Ademais, outro critério importante a se considerar pauta-se nas condições do ligante RAP, em quesitos de propriedades, ativação e interação com outros materiais, uma vez que durante a vida útil o material sofreu efeitos do tráfego, envelhecimento, oxidação, e diversas alterações químicas, como a perda dos voláteis e a aglomeração dos asfaltenos, resultando em um ligante com maior rigidez, e podendo requerer a inclusão de agentes rejuvenescedores para reestabelecer os mecanismos de interação entre o ligante asfáltico RAP e o novo ligante (Correa, 2020; Gaspar, 2019).

“O aumento do teor de RAP [em novas misturas] também se torna mais difícil quando as características granulométricas e as propriedades do ligante asfáltico contido nele são significativamente diferentes da mistura final desejada.” (Gaspar, 2019, p. 28). Desta forma, percentuais de utilização de até 50% de RAP permitem a correção de curvas granulométricas e do ligante, de forma a permitir adequadas operacionalizações do processo.

A literatura técnica aponta como boas práticas na obtenção e gerenciamento do material fresado destinado à novas pavimentações que a fresagem ocorra de forma controlada, em profundidade e velocidade adequada para permitir a flexibilização da granulometria inicial do insumo; que o manuseio e a estocagem seja

realizado de forma a evitar contaminação, através de caminhões e locais de armazenamento limpos, livres de sujeira, vegetação e outros materiais externos; que da estocagem mantenha-se um bom manejo e organização das pilhas de estocagem, para garantir um graduação mais consistente. O teor de ligante presente no RAP não precisa ser totalmente substituído por um ligante virgem, podendo ser ativado através de agente rejuvenescedor e evitando danos por teores acima ou abaixo do projetado (Correa, 2020).

Na interação entre os ligantes no processo de reciclagem do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), é possível identificar três cenários distintos que podem descrever a forma como ocorre a mistura entre o ligante envelhecido preexistente no RAP e os ligantes adicionais da dosagem, conforme ilustrado na Figura 5. O primeiro cenário, da interação total, ou *full blending*, consiste na possibilidade de que os dois ligantes, o ligante do RAP e novo ligante se misturem completamente, resultando em uma homogeneização plena dos materiais betuminosos, permitindo a economia de novos materiais associada à sustentabilidade do processo, restringindo seu uso apenas às complementações necessárias para sanar as diferenças de projeto. A situação oposta, sem qualquer tipo de interação entre os ligantes é denominada como *black rock*, e na prática considera o ligante existente do RAP como parte do agregado, em que a dosagem dependerá única e exclusivamente dos ligantes virgens a serem incorporados na mistura, ignorando a possibilidade que o ligante residual do RAP seja mobilizado ou ativado. Esta técnica, além de impedir a economia de novos ligantes, apresenta certo risco, pois o ligante pode se mobilizar e resultar em um excesso na mistura, sendo, portanto, o mais distante da realidade verificada e evitada na prática. A interação parcial, ou *partial blending* é o cenário que melhor caracteriza o que é verificado na realidade, de acordo com a literatura. Neste cenário as misturas interagem de forma parcial, combinando as características do *full blending* e *black rock* a depender dos mecanismos de ativação do ligante (redução da viscosidade para permitir a interação com o ligante virgem), tempo e temperatura. Esse cenário reflete com maior precisão o que acontece na prática, pois reconhece que parte do ligante antigo pode ser reutilizado na mistura, enquanto outra parcela permanece inerte, funcionando como parte do agregado. Dessa forma, o *partial blending* equilibra a necessidade de novos ligantes com o aproveitamento do betume residual, otimizando a reciclagem do RAP (Gaspar, 2019).

Figura 5 – Representação de possíveis cenários para a interação entre ligantes betuminosos na valorização de RAP (da esquerda para a direita): sem qualquer tipo de interação - *black rock*; interação parcial – *partial blending* e interação total - *full blending*.



Fonte: (Gaspar, 2019, p. 33).

Ressalta-se, neste contexto, que “O processo de extração [do ligante asfáltico no RAP] consiste na remoção do ligante asfáltico presente na mistura, de forma a se obter os agregados da mistura completamente limpos.” (Gaspar, 2019, p. 38). Como resultado, torna-se possível quantificar o teor de ligante e determinar a curva granulométrica da mistura (Gaspar, 2019). Nas misturas com RAP, quando da adição de ligantes virgens, é usualmente esperado que o ligante envelhecido obtenha uma variação na viscosidade inicial, recuperando propriedades e misturando-se à nova dosagem, podendo ser otimizado com agentes rejuvenescedores (Tarsi, Tataranni e Sangiorgi, 2020).

A reciclagem de pavimento não se traduz em item recente, uma vez que desde a década de 1990, com a promulgação da NBR 11.170, já se fazia presente a referência à reciclagem de pavimento, como “Operação que permite o reestabelecimento total ou parcial da serventia de um pavimento, mediante reutilização, total ou parcial, dos materiais presentes pelo reprocessamento e redosagem.” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990a, p. 4). No referencial teórico de Pereira (2023), há indicação, inclusive, de processos com a reciclagem de revestimentos asfálticos sendo empregados no Brasil desde a década de 80, com o advento da utilização das fresadoras de asfalto no país, promovendo vantagens como “[...] conservação de matéria-prima, ligantes asfálticos e de energia, assim como a preservação ambiental e, ainda, a reabilitação das condições geométricas presentes, além da diminuição dos custos com implantação.” (Pereira, 2023, p. 25). Correa (2020), apresenta em sua pesquisa histórico de reutilização do resíduo de camadas

asfálticas com data ainda mais antiga, a citar a reciclagem das vias urbanas removidas com marteletes e transportadas até as usinas para reaplicação em Rio de Janeiro, em meados da década de 1960.

Ressalta-se ainda que o DNIT, por meio da Resolução n.º 14, de 8 de julho de 2021, o órgão dispôs que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação das obras viárias no âmbito federal deverão incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento, a ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2021). O marco, portanto, será balizador para que os demais órgãos da Administração Pública venham ao encontro deste princípio sustentável, apesar da apreensão de muitos fiscais de contrato e empreiteiras quanto desta prática, justamente por conta da variabilidade entre as propriedades dos materiais fresados e ausência de métodos consolidados para aplicação de altos teores de RAP, bem como a possível falta de garantia no desempenho de misturas recicladas, dada a heterogeneidade característica.

2.1.5 Estado da arte

A vasta literatura publicada destaca uma coleção de estudos significativos no âmbito da utilização do resíduo fresado da camada asfáltica na construção de novos pavimentos. Sem pretensão de ser exaustivo, apresentamos na sequência alguns dos estudos mais pertinentes sobre o tema em destaque.

Interessante publicação acadêmica consiste no *review* de Tarsi, Tataranni e Sangiorgi, (2020), referente aos desafios do uso de RAP em novas misturas de pavimento. De acordo com os autores, a valorização do resíduo em novos revestimentos da pavimentação é apropriada nas primeiras sessões de reciclagem do material. Em futuras consecutivas fresagens, considerando as condições de envelhecimento e desgaste avançado dos elementos, passa a se considerar a adoção destes através da valorização de camadas menos nobres, como aplicação em bases e sub-bases, aplicação bem explorada pela literatura. O artigo aponta que ainda nos tempos atuais há uma errônea percepção sobre a inclusão do RAP em novas misturas, incluindo preocupações negativas e falta de confiança dos setores na aplicação, principalmente quando em altos teores, acima de 15-30%. Entre os pontos

de controle do RAP nesta finalidade, a qualidade e a homogeneidade do resíduo é um fator crítico. A dimensão e variabilidade do tamanho das partículas devido às características do pavimento original, profundidade da camada, da fresagem e do material; a quantidade de partículas finas, com maior percentual de ligante envelhecido e maior tendência a reter umidade, devido à maior área superficial; a eventual mistura de RAP provindo de diferentes fontes, corroboram para a heterogeneidade do resíduo, bem como o inadequado armazenamento que pode causar contaminação com materiais estranhos e segregação dos diferentes tamanhos de partícula. Quanto às limitações da planta da usina de asfalto, os autores contribuem com o fato de que o RAP não pode ser incorporado no processo produtivo da mesma forma que um agregado virgem. Devido à presença do ligante envelhecido, quando aquecido a altas temperaturas, o RAP libera fumaça e compostos ambientalmente não adequados, requerendo o sobreaquecimento dos agregados virgens, de forma que ao misturá-lo com o RAP aconteça a transferência de calor necessária para equalizar ambas as temperaturas até a estabelecida como temperatura de trabalho adequada de mistura. Este método limita a incorporação de RAP em até 25-35%, situação em que para percentuais maiores, torna-se necessário uma fonte auxiliar de calor e altos investimentos para a adaptação da planta. Os autores apontam, também, que a ausência de uma dosagem específica para a valorização de RAP, uma vez que as misturas devem atender aos mesmos critérios e especificações esperadas para aquelas realizadas com agregados virgens, é um desafio do setor. O grau de reativação do ligante envelhecido presente no RAP, presença ou não de agentes rejuvenescedores, são parâmetros relevantes a serem considerados no processo de dosagem das misturas. Os pesquisadores destacam que com o incremento do RAP nas misturas há uma maior tendência de rigidez (consequente redução de resistência à fadiga e maior probabilidade de trincas - primordial razão a respeito da falta de confiança e relutância de aplicação prática); em contrapartida, quando bem dosado e misturado em relação ao ligante envelhecido, as misturas tendem a ser menos susceptíveis à ação da água e aos efeitos das deformações permanentes. Sobre a consideração do RAP na condição *black rock*, o estudo aponta que este modelo pode resultar em misturas mais propensas a fissuras e danos por umidade, enquanto o maior percentual de ligante possa contribuir para uma maior deformação plástica do concreto asfáltico.

No estudo de Antunes, Neves e Freire, (2021), sobre a performance do RAP em misturas de rodagem, a partir da perspectiva da economia circular, os pesquisadores apontam que o resíduo tem propriedade para ser valorizado em aplicações similares à original, sem reduzir sua utilidade a camadas menos nobres, isto é, tem seu uso plenamente adequado a novas camadas da pavimentação asfáltica. O artigo reforça que a reciclagem de RAP não é novidade, no entanto, ainda persiste uma falta de confiança nesse tipo de solução pelas autoridades rodoviárias para a aplicação prática, principalmente em altos percentuais de utilização. O estudo avaliou a incorporação de RAP em percentuais de 75% com agente rejuvenescedor, resultando em propriedades satisfatórias quando em comparação com a mistura de referência.

O estudo de Carizzio Monteiro, Souza Silva e Ribeiro de Rezende, (2023), teve por objetivo verificar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com elevada incorporação de RAP (33%, 45% e 100%), tomando-se como referência misturas recicladas e convencionais. Ao analisar os resultados, os pesquisadores concluíram que o comportamento mecânico das misturas compostas com RAP foram similares ou superiores à referência, enquanto o *flow number* sofreu redução com o aumento do teor de ligante. Devido destaque é realizado ao fato que a variabilidade do RAP, considerando sua composição, intemperismo e características da fresagem, naturalmente vão incidir em diferentes resultados, com misturas de características únicas.

K. Lakshmi Roja e Mogawer, (2021), indicaram, através de estudo com percentuais de RAP incorporados às novas misturas asfálticas nas proporções entre 15% e 35%, que o percentual recomendado de até 20%, dadas as condições específicas daquele material em análise, apresentou os melhores resultados.

Singh, Ransinchung e Kumar, (2017), cita como modo de reuso do RAP a reciclagem a quente (em usina ou local), reciclagem a frio local ou ainda, reciclagem profunda, com a recuperação de revestimento e base. De acordo com o *review*, percentuais de RAP acima de 25% na mistura já podem ser considerados como alta incorporação. O artigo cita como principais limitações no incremento de RAP em novas misturas o fator de envelhecimento do ligante preexistente (aumentando a rigidez e viscosidade, reduzindo a ductilidade); nível de mistura e difusão entre o ligante preexiste e o ligante complementar (podendo afetar diretamente os resultados em termos de fadiga) que pode ser contornado com o fracionamento do RAP em

tamanhos menores, aumento do tempo de mistura, principalmente a quente e aumento da temperatura de mistura e compactação; além das características intrínsecas de cada RAP coletado, tendendo a um material heterogêneo. A literatura apontou que economicamente, tendo em vista os custos de operação e planta da usina, teores de incremento do RAP entre 24 a 35% podem ser considerados válidos.

De acordo com a publicação de Enieb et al., (2021), a sustentabilidade associada aos benefícios econômicos e ambientais para misturas de revestimento asfáltico apresenta vantagens consideráveis quando da inclusão de RAP em novas dosagens. Conforme o estudo, para adições até 30% de resíduo asfáltico fresado, foram observados resultados adequados para as características de uso. Acima deste percentual, o módulo de resiliência tende a reduzir, podendo ser contornado com a presença de aditivos e rejuvenescedores. De forma complementar, o estudo de Huang, Bird e Heidrich, (2009) apresenta um modelo de avaliação do ciclo de vida de pavimentos asfálticos, com ênfase na reciclagem e reuso de materiais asfálticos, como forma de promover a redução de impactos ambientais, otimizar uso de energia e recursos, correlacionando as diversas variáveis a serem consideradas no processo operacional e as diferentes formas de aplicação dos materiais.

Interessante artigo de Meng et al., (2023), avaliou os efeitos da temperatura de pré-aquecimento na ativação de ligantes envelhecidos do RAP. O estudo avaliou a variação de temperatura, entre 110 °C e 190 °C em amostras compostas 100% de resíduo fresado. Os resultados indicaram que o aumento da temperatura apresentou um efeito significativo na ativação dos ligantes envelhecidos existentes no resíduo, apresentando adequada significância acima de 180°C e decrescendo significativamente quando abaixo de 120 °C. No estudo de Costa e Castorena, (2024), por exemplo, foi possível identificar que a reativação do ligante envelhecido alcança quase que a totalidade entre 140 °C e 155 °C. Em complemento, o estudo de Liu et al., (2024), indicou que conforme o tempo de mistura entre o RAP e os agregados aquecidos aumenta, o equilíbrio térmico passa por dois estágios. No primeiro momento há uma transferência de calor intensiva, pela diferença significativa diferença de temperatura entre o RAP e os novos agregados, seguido por um estágio de equilíbrio térmico lento após cessado o processo de mistura para homogeneização.

Conforme estudo de Yang et al., (2021), referente à mensuração de aglomeração de partículas e quebra de agregados no RAP, a operação de fresagem do pavimento produz de 0,1% a 1,8% de *filler* e de 0,2% a 8,7% de agregados finos

em relação à composição original, convergindo com a informação apontada por outros autores, em relação à maior quantidade de finos obtidos através deste processo de extração do RAP. A composição do RAP, pela característica de concreto asfáltico, consiste em um aglomerado de partículas, agregados, unidos por um ligante envelhecido, e, portanto, é comum que durante a operação de fresagem as partículas com maior tamanho possam sofrer fratura, ou ainda, serem triturados em pedaços menores (quebra de agregados), modificando a curva granulométrica e os teores de dosagem. A velocidade de operação do equipamento e a profundidade da camada apresentaram influência significativa nos resultados, evidenciando, novamente, a vasta gama de variáveis que tornam o RAP um resíduo tão heterogêneo.

No estudo de Singh, Ransinchung e Kumar, (2017), versado sobre técnica de processamento para aprimorar propriedades do RAP, através de beneficiamento por AB&AT (abrasão e atrito), demonstraram possibilidade de melhoria nas características mecânicas do agregado em termos de resistência à compressão, flexão e cisalhamento no conjunto pela geometria. A pesquisa demonstrou que com a técnica, com eliminação de camadas contaminadas externas, há também uma melhora na adesividade do elemento.

Kuchiishi et al., (2017) observaram um ganho de resistência com o aumento do teor de finos e uma variação pouco significativa na rigidez de revestimentos asfálticos produzidos com a inclusão de RAP, reforçando que a granulometria do resíduo incorporado deve ser controlada para garantir resultados confiáveis e minimizar eventuais dispersões, em que a ausência de procedimentos específicos relacionados à garantia da homogeneidade do material é um fator importante que dificulta a sua caracterização.

No estudo de Bastos, Frota e Soares, (2023), em relação ao efeito da fração fina do RAP na resistência mecânica e na rigidez de misturas asfálticas recicladas a quente, os pesquisadores avaliaram a dosagem de três misturas, na proporção de 0%, 15% e 30% do ligante presente no RAP em substituição à massa total de ligante. Os resultados indicaram que a adição de fresado aumentou a rigidez somente no percentual de 30%, enquanto a resistência a tração aumentou com o aumento do teor de fresado.

De forma a contornar a variabilidade do RAP em relação à origem da fresagem, provindo de diferentes malhas rodoviárias, o estudo de Gao et al., (2021), propõe o agrupamento de resíduo com base na similaridade de características dos

materiais, com base na graduação do tamanho de partículas, tipologia de agregados e características do aglomerante preexistente na amostra. O estudo conclui identificando que a variabilidade deste resíduo ainda é uma forte barreira na aplicação prática de uso em massa.

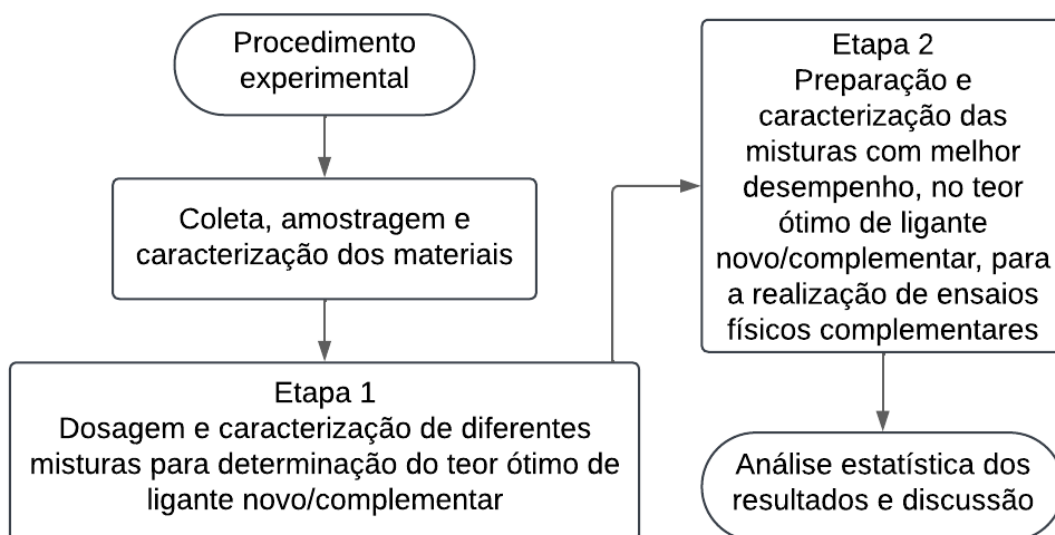
O estudo de Pasetto et al., (2021), de forma complementar, ao analisar a performance de possíveis agentes rejuvenescedores ao RAP concluíram que o processo possibilita a reabilitação de propriedades reológicas do material, proporcionando, inclusive melhores resultados em comparação ao ligante novo da mistura, em quesitos de rigidez, viscoelasticidade, fadiga e deformação permanente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa consiste na verificação de resultados quanto à influência da proporção e do tamanho de partícula do resíduo de asfalto fresado - RAP em novas misturas asfálticas, em diferentes proporções, visando a circularidade de materiais, em comparação às demais condições de valorização.

A imagem da Figura 6 sintetiza através de um fluxograma as principais etapas do procedimento experimental aplicado, os quais serão adequadamente discutidos e apresentados ao longo da metodologia.

Figura 6 – Fluxograma com o resumo do procedimento experimental adotado.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Como critério balizador para realização dos ensaios e caracterizações, foram tomadas como referência as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, através das Normas Técnicas Brasileiras - NBRs, Especificações de Serviço - ES e Métodos de Ensaio - ME do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, conforme apresentado no Quadro 2 da revisão de literatura, com exceção das caracterizações químicas, que seguem as boas práticas do ramo da Engenharia de Materiais.

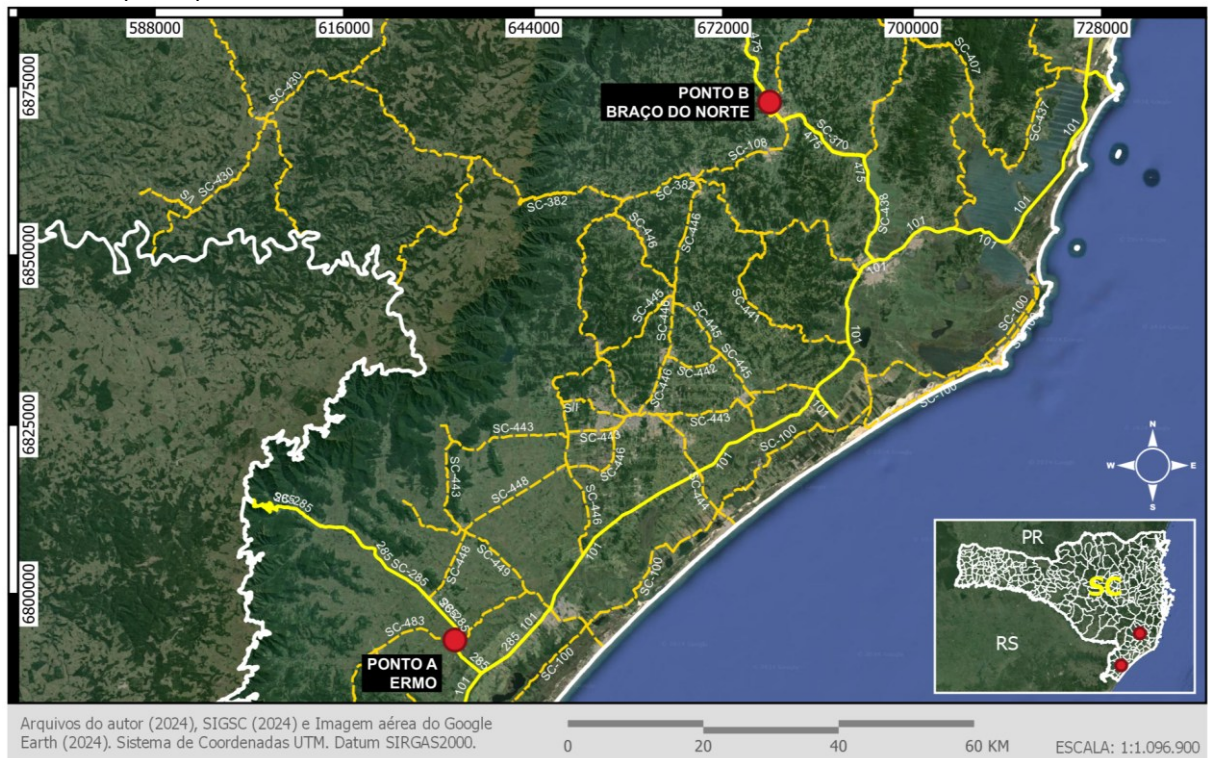
3.1 MATERIAIS

Considerando a composição da camada de revestimento da pavimentação asfáltica flexível, a dosagem associada e os parâmetros da pesquisa, os seguintes materiais se fizeram necessários: resíduo da fresagem da pavimentação - RAP, ligante asfáltico - CAP 50/70, agregado graúdo de origem basáltica (mesmo material do RAP coletado), e agregado miúdo - pó de pedra, neste caso de origem granítica e basáltica, para verificação da variação de influência nos resultados.

O resíduo de fresagem da pavimentação - RAP, foi obtido a partir da camada de revestimento de um trecho da malha rodoviária local em processo de manutenção. Neste tipo de obra, a camada de rolamento teve parte da espessura removida com auxílio de uma fresadora mecânica, e o resíduo destinado para áreas de bota-fora. Considerando que o material fresado tende, fortemente, a apresentar características diferentes entre uma região de coleta e outra, em virtude da composição (traço), métodos construtivos, tempo de intemperismo, condições locais e eventuais manutenções ao longo da vida útil, neste estudo as amostras foram coletadas em dois locais geograficamente distintos, de forma a demonstrar a variabilidade deste resíduo. Todavia, evidenciada a variação entre as diferentes fontes do resíduo, adotou-se o RAP do ponto de coleta A para a realização das dosagens e ensaios, considerando a representatividade e necessidade de controle dos parâmetros de pesquisa. A Figura 7 ilustra em um mapa temático a representação geográfica dos pontos de coleta do RAP, equidistantes em relação ao município de Criciúma/SC, considerando a disponibilidade do material à época da pesquisa.

O ponto de coleta A, refere-se à região do Ermo, no Extremo Sul Catarinense. Durante a visita à pilha de resíduo, foi possível observar que as partículas de maior dimensão tendem a se conformar na base, enquanto os finos tendem a se apresentar de maneira mais superficial, no topo. O processo de coleta seguiu as recomendações da NBR 10.007, referente à amostragem de resíduos sólidos, tomando-se amostras de três seções (topo, meio e base do monte de resíduo), através de quatro alíquotas equidistantes com auxílio de uma pá manual.

Figura 7 – Representação da localização dos pontos de coleta do resíduo de asfalto fresado (RAP) na malha rodoviária do Sul de Santa Catarina.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 8 – Registro fotográfico do ponto de coleta do resíduo A (aspecto da amostra de estudo revelado no detalhe/ampliação).



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

O ponto B foi realizado na região entre Braço do Norte, sentido Grão-Pará. O processo de coleta seguiu os mesmos parâmetros apresentados para o ponto A. O objetivo desta coleta consiste unicamente em indicar e comparar a variabilidade entre

diferentes resíduos de fresagem da camada asfáltica. Nesta oportunidade, foi possível verificar diferentes locais de bota-fora para o material fresado residual da obra, evidenciando a imprevisão em relação ao material e às suas potencialidades quando de certas atividades de manutenção e conservação rodoviária. Foi verificado, em contrapartida, que houve um adequado condicionamento dos materiais, em que estes não foram misturados com materiais estranhos, cuidado que poderia vir a prejudicar a futura valorização do elemento.

Figura 9 – Ponto de coleta do resíduo no ponto B. Na imagem à esquerda é possível verificar o processo de fresagem em campo. Na imagem central o acúmulo de resíduo. Na imagem à direita a disposição de novo material e um detalhe do aspecto do RAP coletado.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Em ambas as coletas foi possível verificar o alto volume de produção do resíduo. Mesmo em pequenos trechos fresados o volume de material observado era expressivo, na ordem de $0,10 \text{ m}^3/\text{m}$ de extensão.

A Figura 10 demonstra o material fresado coletado no ponto A após o peneiramento na malha 3/4", limite da faixa granulométrica estabelecida para a curva de dosagem C padrão DNIT. Observa-se que do material coletado após a fresagem, apenas 12% do conjunto apresentou grânulos com diâmetro superior ao limite estabelecido à malha de peneiramento, grupo que para utilização poderia necessitar de processo adicional de britagem, para redução do diâmetro equivalente.

Figura 10 – Peneiramento do resíduo RAP coletado no ponto A, para eliminação do material com diâmetro máximo superior a 3/4", devido ao limite da faixa C de dosagem. Na imagem o resíduo com tamanho inferior ao especificado foi exposto ao ar ambiente para eliminação da umidade higroscópica na bandeja, enquanto o resíduo com tamanho inapropriado (à direita, cerca de 12% da amostra) foi descartado.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Os insumos pétreos para a produção dos corpos de prova de dosagem consistiram em britas de rocha basáltica, selecionada em função de ser o mesmo material já constituinte dos resíduos fresados coletados. Houve a necessidade de aquisição de três faixas granulométricas distintas para compor a curva recomendada pelo DNIT (curva C): brita n.º 1, brita n.º 0 e pó de pedra, sendo este último atuando como agregado miúdo da composição. Quanto ao pó de pedra, foram consideradas alternativas com a utilização de origem basáltica e granítica, para verificação da influência na mistura, além da variação do RAP. A coleta foi realizada em uma empresa de materiais de construção local, seguindo as recomendações da NBR 16.915, referente à amostragem de agregados. As amostras coletadas foram tomadas em diferentes pontos do lote, visando representar todas as possíveis variações do material, tanto quanto às suas naturezas, características e condições, resguardando a adequada representatividade do insumo. Para evitar a segregação da parte pulverulenta, a amostragem dos agregados foi realizada com estes na condição úmida. Considerando que os agregados estavam estocados em pilhas, a coleta, assim como para o resíduo, foi tomada em três partes: topo, meio e base da pilha, tanto em sua superfície, quanto em seu interior.

De forma a eliminar a umidade higroscópica, todos os materiais pétreos foram submetidos à estufa (110 °C) até a massa constante, com exceção do resíduo de material fresado, que foi seco à temperatura ambiente para não promover

modificações na fração de ligante envelhecido, que seria afetada pela temperatura da estufa.

O fornecimento do ligante asfáltico, CAP 50/70, ocorreu através de uma usina de asfalto local. A amostragem seguiu a recomendação da NBR 14.883, referente à amostragem manual diretamente em tanque de reservação. Para o processo foi utilizado um recipiente metálico, de volume 18 litros, provido de tampa para impedir contaminação e perda de propriedades do elemento.

Após a coleta, todos os materiais foram encaminhados ao Laboratório de Engenharia Civil da UNESC, para o desenvolvimento das atividades experimentais. Todos os materiais sólidos foram amostrados por meio do processo de homogeneização e reduzidos por quarteamento, de forma que o material resultante apresentasse características semelhantes e propriedades representativas em todos os seus pontos. O quarteamento foi realizado de forma manual, através da separação e tomadas de pontos diametralmente opostos até o volume necessário.

3.2 MÉTODOS

Em relação aos equipamentos necessários para o desenvolvimento experimental, foram utilizados: conjunto de peneiras série ABNT, *rotarex*, estufa, balança, soprador, vidraria, compactador e prensa Marshall, banho térmico, tambor de desgaste, viscosímetro, termômetro, dispositivo para Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica - ATD/TG, além de microscopia ótica.

Ressalta-se que as caracterizações de DRX e FRX foram realizadas em laboratórios externos.

3.2.1 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais e insumos consiste em importante processo do desenvolvimento experimental, possibilitando uma compreensão mais abrangente das características e propriedades dos materiais utilizados no estudo. Além de obtenção de parâmetros, a etapa de caracterização é essencial para avaliar o desempenho dos materiais e analisar a influência destes no comportamento final da mistura.

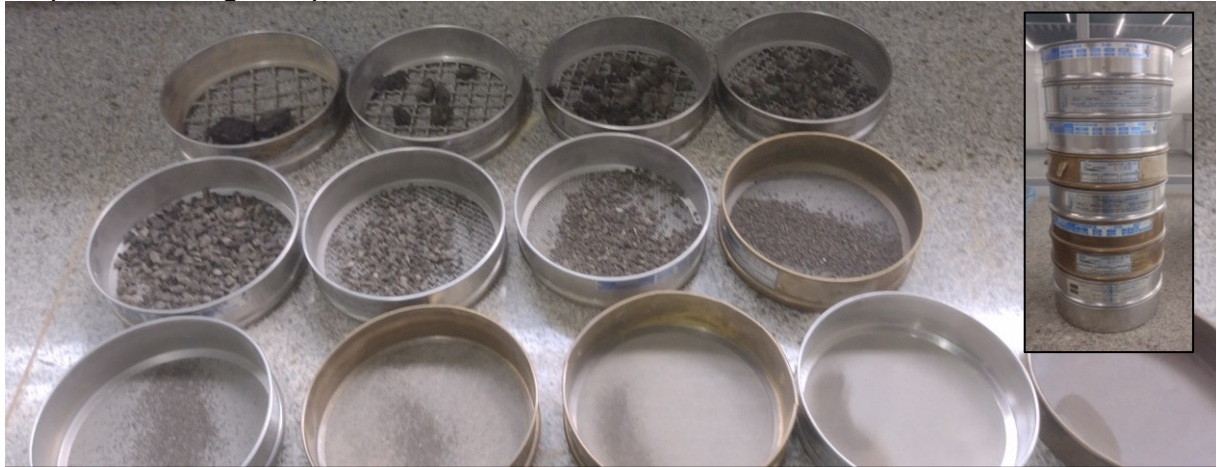
3.2.1.1 Caracterização do resíduo de asfalto fresado

A caracterização do resíduo de asfalto fresado foi iniciada pelo ensaio de granulometria, com o objetivo de analisar a distribuição do tamanho de partícula do material granular. Considerando a interação entre ligante envelhecido e agregado, bem como a heterogeneidade das fases, o ensaio foi realizado em dois momentos. Primeiramente determinou-se a granulometria do RAP no estado de campo, isto é, do agregado envolto em asfalto betuminoso; esta condição bruta é usualmente denominada como *black curve* pela literatura, conforme Gaspar (2019), como referência à presença do ligante envelhecido. Posteriormente, por meio do mesmo conjunto amostral, realizou-se uma nova granulometria após a extração de todo o ligante preexistente na mistura, possibilitando a verificação da distribuição única dos agregados naturais; esta condição é usualmente denominada como *white curve*, como referência aos agregados livres da presença de qualquer aglomerante.

O ensaio de granulometria foi realizado para o resíduo coletado no ponto A e no ponto B (ver Figura 7), e seguiu como referência balizadora a NBR 17.054 e os métodos de ensaio ME 412 e ME 83 do DNIT. Para o procedimento, foram utilizadas peneiras da série ABNT nas malhas 1" (25,4 mm), 3/4" (19,0 mm), 1/2" (12,7 mm), 3/8" (9,51 mm), 1/4" (6,35 mm), 4 (4,76 mm), 8 (2,38 mm), 16 (1,19 mm), 30 (0,595 mm), 50 (0,297 mm), 100 (0,149 mm) e 200 (0,074 mm). A agitação ocorreu de forma manual para possibilitar a inspeção do peneiramento, seguido por posterior pesagem do material retido em cada faixa granulométrica. A imagem da Figura 11 ilustra o procedimento de análise granulométrica realizada.

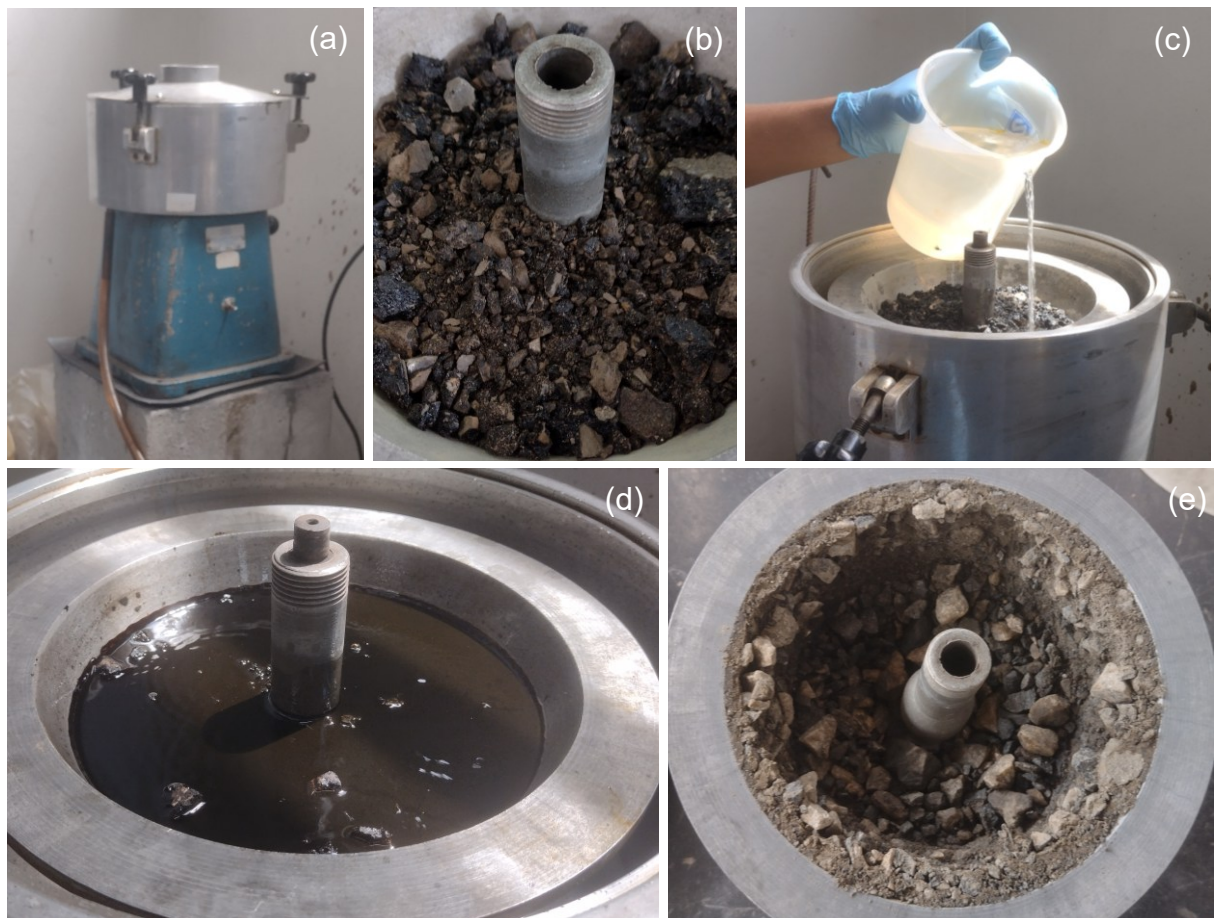
De forma a determinar a quantidade e percentual de ligante betuminoso envelhecido presente no resíduo de asfalto fresado, a amostra de RAP foi submetida, após aquecimento em 150 °C por 1 hora, ao equipamento *rotarex*. Este equipamento funciona como um extrator por ação de centrifugação. O procedimento seguiu como referência balizadora o método de ensaio ME 53 do DNIT. Mesmo após o aquecimento do ligante houve pouca mobilização da fase, razão pela qual foi necessário a solubilização através do uso de solvente percloroetileno (tetracloroetileno, $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$). A imagem da Figura 12 ilustra o procedimento de ensaio, realizado para o resíduo coletado no ponto A e no ponto B, para a determinação do teor de ligante preexistente no RAP coletado.

Figura 11 – Ensaio de determinação da distribuição do tamanho de partícula por peneiramento das amostras de fresado coletadas no estado de campo, sob influência da parcela de ligante preexistente no resíduo.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 12 – Ensaio para determinação do teor de betume do resíduo, sendo: (a) equipamento *rotarex*, (b) resíduo de asfalto fresado imediatamente após o aquecimento a 150 °C, por 1 hora, em estufa, (c) introdução do solvente de percloroetileno, (d) mistura em contato com o solvente e (e) agregados limpos após a conclusão do ensaio, com a centrifugação da mistura.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

A diferença percentual entre a massa do resíduo (agregado e betume) e a massa após a realização do ensaio, seca à massa constante (agregado limpo) resulta na identificação total de ligante mobilizado e extraído da amostra. A determinação do teor de ligante disponível no RAP é fundamental para a avaliação dos parâmetros de dosagem e análise do material coletado.

O ligante extraído no ensaio não pôde ser analisado reologicamente, uma vez que suas propriedades foram comprometidas pelo processo de extração com uso de solventes durante a determinação do teor de betume.

Quanto à determinação de índices físicos dos resíduos, a caracterização foi pautada na massa unitária (relação entre a massa total de um material e o volume que ele ocupa, incluindo todos os espaços vazios - poros, internos e externos), além da massa específica real (desconsiderando os poros permeáveis) e aparente (considerando os poros permeáveis e impermeáveis). Para a determinação da massa unitária adotou-se um recipiente cilíndrico de volume conhecido, cujo conteúdo foi preenchido com o material fresado, na condição solta, sem compactação, e pesado em três diferentes réplicas para compor a média amostral. A relação massa/volume nesta condição exprime a massa unitária, responsável por transformações de massa em volume quando em situações de campo.

Para a determinação do índice de forma, adotou-se como referência balizadora a NBR 7.809 e método de ensaio ME 425 do DNIT, sendo realizada pelo método do paquímetro para os grupos de resíduos com dimensão máxima característica maior que 9,5mm (passante na peneira 1/2" - 12,7 mm, máximo tamanho da curva de dosagem, e retidos na peneira 3/8" - 9,5 mm). Para o método foram tomadas medidas do comprimento (maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão) e espessura (menor distância possível entre planos paralelos entre si, em qualquer direção do grão) para 200 amostras. O índice de forma foi definido pela média da razão entre o comprimento e a espessura dos grãos. Foram desprezadas frações passantes na peneira de malha 9,5 mm e aquelas cuja porcentagens, retidas individualmente em massa, fossem iguais ou menores que 5%.

A densidade do material foi determinada mediante método do picnômetro, com amostra seca à umidade higroscópica, através das relações de massa do frasco com resíduo, e massa do frasco, com resíduo e água, para um volume conhecido. No método utiliza-se um frasco picnômetro, recipiente de vidro de volume conhecido, equipado com uma tampa perfurada para permitir a saída do excesso de líquido e

garantir precisão na medição do volume. O material é inserido no picnômetro com um líquido de densidade conhecida, água destilada, e a diferença de massa entre o picnômetro com e sem o sólido permite calcular o volume deslocado pelo sólido, determinando assim sua densidade. O método é amplamente utilizado devido à sua precisão e simplicidade.

Quanto à caracterização mineralógica, química e térmica, se procedeu com a realização de DRX - Difração de Raios-X, para identificar e quantificar as fases cristalinas na amostra, FRX - Fluorescência de Raios-X, para determinar a composição elementar e ATD/TG – Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica, para avaliar as transformações do resíduo quando submetido às variações de temperatura. As amostras destinadas a estes ensaios foram preparadas através da redução em almofariz e peneiramento na malha #325 para DRX e malha #200 para o FRX e ATD/TG, devidamente homogeneizadas. Quanto à metodologia da espectrometria de Fluorescência de Raios-X, foi utilizado o equipamento espectrômetro Epsilon 3XLE Panalytical, com pastilha fundida. Para a ADT/TG foi considerada uma atmosfera de Nitrogênio, na faixa de 35 °C a 1000 °C, de modo a verificar o comportamento do resíduo com a variação da temperatura, visto que este é processado com o devido aquecimento; para o cadinho de referência foi utilizado em Alumina (Al_2O_3). Para o DRX buscou-se as fases cristalinas entre o padrão 3-70° 2 θ em passo de 0,05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,6 mm no detector, através do método do pó, situação em que na amostra em pó o material desagregado em almofariz é depositado em um porta amostra específico, preservando a desorientação das partículas, onde todos os minerais ou estruturas cristalinas são analisados e identificados através da medida das distâncias interplanares (valores de “ d ”) e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas. Para esta última, o DRX foi realizado um difratômetro de raios X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

3.2.1.2 Caracterização dos agregados

Os agregados, insumos composicionais para a preparação de corpos de prova necessários para a análise de resultados físicos, foram caracterizados

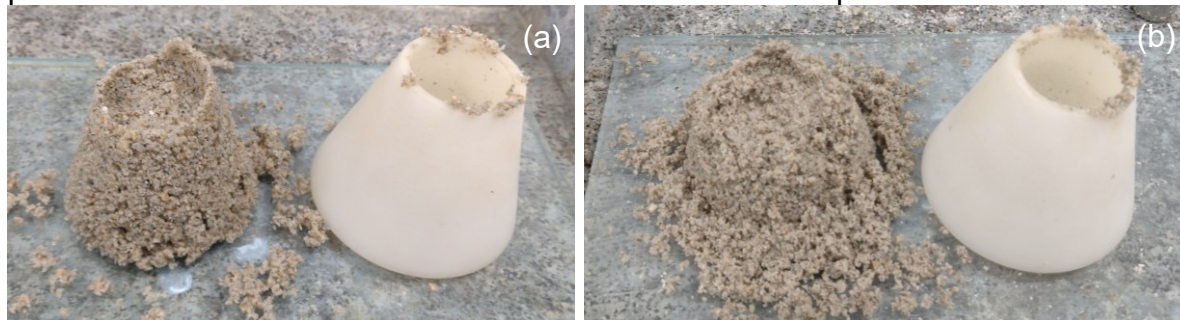
primariamente através de índices físicos e curva granulométrica da distribuição do tamanho de partícula.

Para a determinação da massa unitária, razão entre a massa e o volume considerando todos os vazios da amostra, adotou-se um recipiente cilíndrico de volume conhecido, cujo conteúdo foi preenchido com os agregados, na condição solta, sem compactação, e pesado em três diferentes réplicas para compor a média amostral. A relação massa/volume nesta condição exprime a massa unitária, responsável por transformações de massa em volume quando em situações de campo.

Para o grupo de agregados graúdos, a caracterização física seguiu as recomendações da NBR 16.917 e métodos de ensaio ME 81 e ME 413 do DNIT. Para o ensaio, foram tomadas duas amostras retidas na peneira n.º 4 (4,75mm), lavadas em água corrente para eliminação do pó e mantidas imersas em água por 24 horas. Após este período os agregados tiveram a água livre eliminada com auxílio de um pano absorvente e pesados para obtenção da massa na condição saturada de superfície seca, seguida de pesagem hidrostática. Registradas as massas, as amostras foram submetidas à estufa (110 °C) por 24 horas para determinação da massa seca. Os resultados foram calculados conforme equações normativas das relações entre os parâmetros obtidos no ensaio.

Para o grupo de agregados miúdos, a caracterização física seguiu as recomendações da NBR 16.916 e métodos de ensaio ME 84 e ME 411 do DNIT. Para o ensaio, realizado em duplicata, o pó de pedra foi lavado na peneira n.º 200, e mantido submerso em água por 24 horas. Após este período, a água foi retirada com auxílio de peneiramento e submetido à ação de uma corrente de ar, através de um soprador, sendo revolvida constantemente para assegurar uma secagem uniforme até o ponto de saturado com superfície seca. Para a verificação do ponto adequado, utilizou-se um molde tronco-cônico, no qual a perda de formato da amostra moldada após ser suavemente golpeada 25 vezes, indica a perda da água livre superficial e da coesão momentânea gerada pelas ligações intermoleculares das forças de Van der Waals. A imagem da Figura 13 ilustra a amostra com umidade livre e, ao lado, após atingir a condição saturada de superfície seca, em que houve o desmoronamento parcial quando da retirada do molde. A caracterização foi realizada para o pó de pedra de origem granítica e de origem basáltica.

Figura 13 – Método normatizado realizado para a verificação de secagem à saturação da superfície seca de agregado miúdo. Na imagem (a), pela presença de umidade livre superficial, há coesão momentânea causada pelas ligações fracas. Na imagem (b), na situação saturada de superfície seca, o tronco-cônico não dispõe de água livre para manter sua estrutura e sofre o desmoronamento das paredes.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Da amostra preparada para a caracterização física do agregado miúdo, tomou-se 500 g para pesagem do conjunto com o frasco padronizado. Após, este foi preenchido com água e registrado novamente a massa total. A mesma amostra foi submetido à estufa até atingir massa constante para determinação do peso seco. Os resultados foram calculados conforme equações normativas das relações entre os parâmetros obtidos no ensaio com base no procedimento do picnômetro.

Quanto ao índice de forma, adotou-se como referência balizadora a NBR 7.809 e método de ensaio ME 425 do DNIT, sendo realizada pelo método do paquímetro para os agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5mm (passante na peneira 1/2" - 12,7 mm, máximo tamanho da curva de dosagem, e retidos na peneira 3/8" - 9,5mm). Para o método foram tomadas medidas do comprimento (maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão) e espessura (menor distância possível entre planos paralelos entre si, em qualquer direção do grão) para 200 amostras. O índice de forma foi definido pela média da razão entre o comprimento e a espessura dos grãos. Para a realização do ensaio as amostras foram secas em estufa até atingir massa constante. Foram desprezadas frações passantes na peneira de malha 9,5 mm e aquelas cuja porcentagens, retidas individualmente em massa, fossem iguais ou menores que 5%.

Para a determinação da curva granulométrica, os materiais foram previamente submetidos à secagem em estufa, por 24 horas, até a massa constante. O ensaio foi realizado tendo como referência a NBR 17.054 e os métodos de ensaio ME 412 e ME 83 do DNIT. Para o procedimento, foram utilizadas peneiras da série ABNT nas malhas 3/4" (19,0 mm), 1/2" (12,7 mm), 3/8" (9,51 mm), 4 (4,76 mm), 10

(2,00 mm), 40 (0,42 mm), 80 (0,177 mm) e 200 (0,074 mm). A agitação ocorreu de forma manual para possibilitar a inspeção do peneiramento, seguido por posterior pesagem do material retido em cada faixa granulométrica.

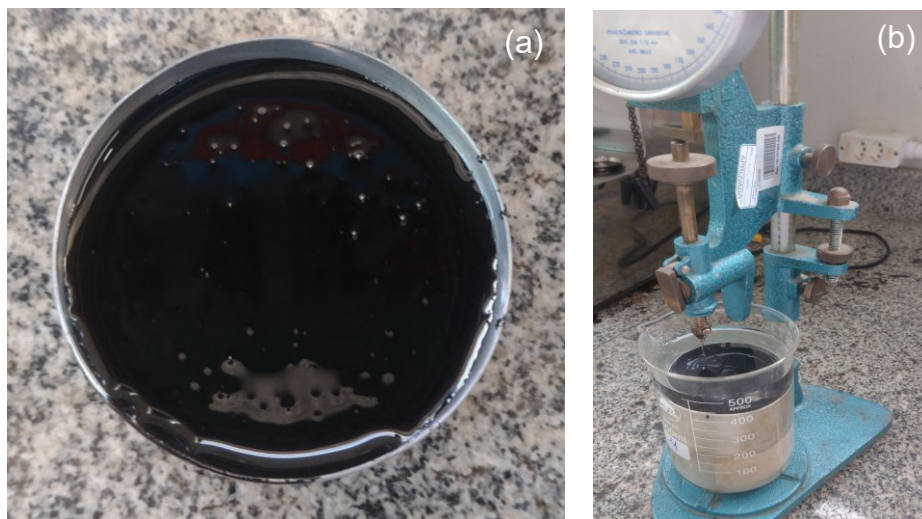
Não se verificou a necessidade de caracterização química dos agregados naturais, visto que quanto à mineralogia não se diferenciara expressivamente do padrão observado da literatura, além do que se trata de insumos subsidiários.

3.2.1.3 Caracterização do ligante

O ligante asfáltico (CAP - cimento asfáltico de petróleo) utilizado no estudo foi caracterizado principalmente pela penetração, ponto de amolecimento e reologia quanto à viscosidade.

Para a determinação de penetração no Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP, parâmetro que corresponde à profundidade em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições controladas de carga, tempo e temperatura, seguiram-se as recomendações estabelecidas pelo método de ensaio ME 155 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT e pela norma NBR 6.576 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, conforme ilustrado na Figura 14. Esse ensaio tem como objetivo principal avaliar a consistência do ligante asfáltico, sendo um indicador fundamental para classificar e especificar o material. Na primeira imagem (a), é apresentado o recipiente de penetração, com forma cilíndrica, com dimensões internas de 55 mm de diâmetro e 35 mm de altura, preenchido com o ligante em estado fluido, após aquecimento, seguido de posterior resfriamento; e na segunda imagem (b), ilustra-se a realização do ensaio no penetrômetro devidamente calibrado, com massa do conjunto haste-agulha em $50 \pm 0,05$ g. No ensaio, o tempo de carga foi adotado em 5 segundos, após o posicionamento de agulha imediatamente acima da superfície, sem exercer pressão adicional. Foram tomados resultados de três pontos distintos da amostra para compor o resultado médio de caracterização.

Figura 14 – Ensaio de determinação da penetração do ligante asfáltico. Na primeira imagem (a), é apresentado o recipiente de penetração, com forma cilíndrica e dimensões internas de 55 mm de diâmetro e 35 mm de altura, preenchido com o ligante em estado fluido, após aquecimento, seguido de posterior resfriamento; e na segunda imagem (b), ilustra-se a realização do ensaio no penetrômetro devidamente calibrado, com massa do conjunto haste-agulha.

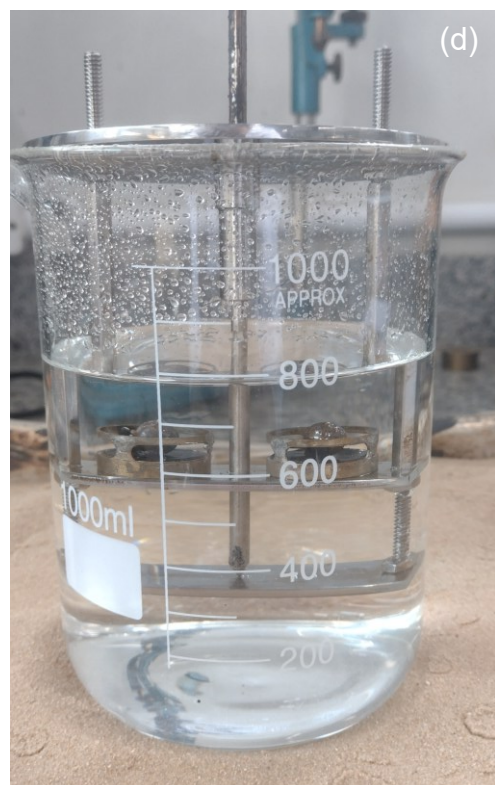


Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Para a determinação do ponto de amolecimento, através do método anel e bola, foram adotadas as recomendações do método de ensaio 131 do DNIT e NBR 6.560. Para a realização do ensaio, conforme Figura 15, o ligante aquecido até o ponto de viscosidade adequado foi vertido nos moldes, e resfriado por 24 horas até adquirir estrutura rígida. Para evitar que o ligante aderisse à base de suporte, esta foi preparada com auxílio de parafina líquida. Após resfriada, a superfície dos moldes foi arrasada com auxílio de uma espátula aquecida (a), e as bordas externas do molde foram limpas com auxílio de reagente percloroetileno (b). O conjunto do aparelho normatizado foi montado, utilizando os suportes, termômetro, moldes com o ligante, guia de apoio e as bolas de aço (c) e inserido dentro de um béquer com água até uma altura de aproximadamente 105 mm (d). O aparato foi apoiado sobre uma forma com areia e submetido ao aquecimento através de fogareiro, a uma taxa de aproximadamente 5 °C/min. A temperatura de amolecimento foi determinada para o exato instante em que o material asfáltico que envolve cada bola de aço tocou a placa inferior do suporte (e). Sendo o ensaio em duplicata, em ambas as amostras o evento ocorreu em simultâneo, sendo o lapso de tempo e temperatura, irrisório.

Figura 15 – Ensaio de determinação do ponto de amolecimento. Na imagem (a) o ligante aquecido até o ponto de viscosidade adequado foi vertido nos moldes, e resfriado por 24 h até adquirir estrutura rígida. Na imagem (b), após resfriada, a superfície dos moldes foi arrasada com auxílio de uma espátula aquecida, e as bordas externas do molde foram limpas com auxílio de reagente. Na imagem (c), consta o conjunto do aparelho normatizado para o ensaio, utilizando os suportes, termômetro, moldes com o ligante, guia de apoio e as bolas de aço. Na imagem (d) o aparelho é inserido dentro de um béquer com água até uma altura de aproximadamente 105 mm. Na imagem (e) o aparato foi apoiado sobre uma forma com areia e submetido ao aquecimento através de fogareiro, a uma taxa de aproximadamente 5 °C/min para a determinação da temperatura de amolecimento no exato instante em que o material asfáltico que envolve cada bola de aço toca a placa inferior do suporte.

(continua)



(conclusão)

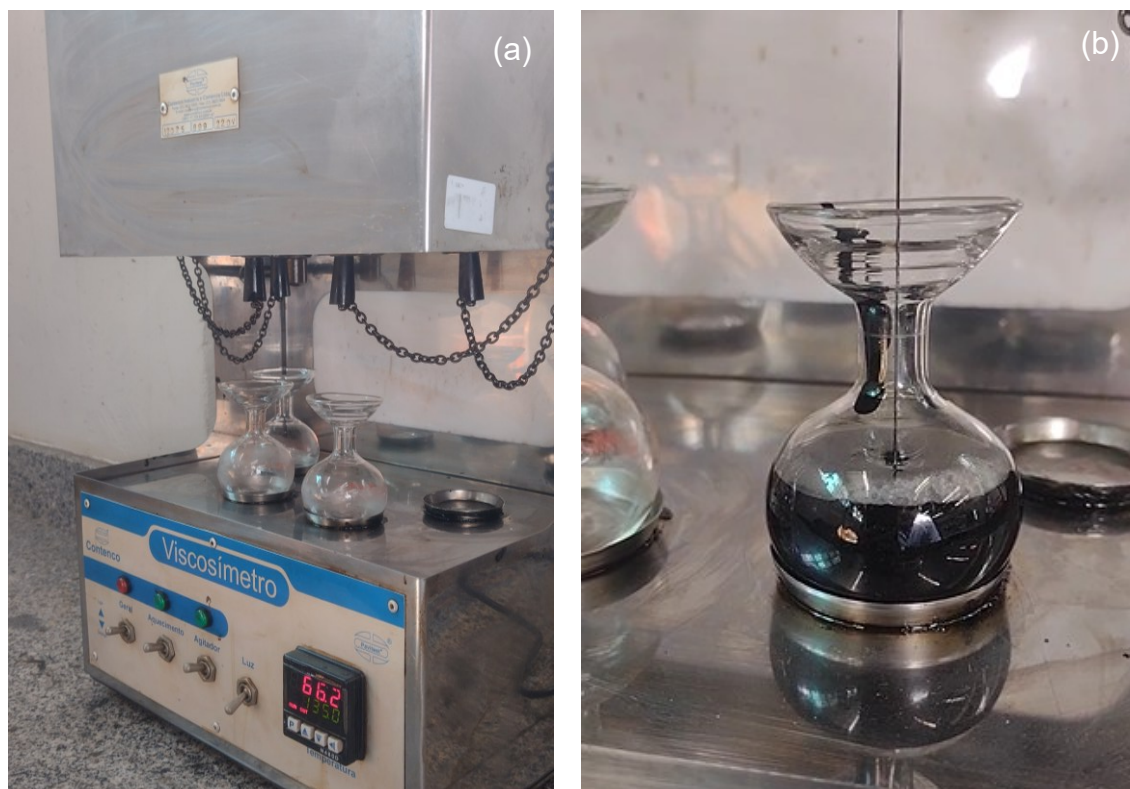


Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Reologicamente, as propriedades de viscosidade em relação à variação de temperatura, com o objetivo de determinar as faixas ótimas de usinagem (moldagem) e compactação de corpos de prova de concreto betuminoso usinado a quente, foram determinadas por meio do ensaio de viscosidade Saybolt Furol (acrônimo de *Fuel and road oils*). O procedimento seguiu como referência balizadora a NBR 14.950 e o método de ensaio 004 do DNIT, sendo a viscosidade determinada pelo tempo necessário para que o fluido, a determinada temperatura, preenchesse o frasco padronizado de 60 ml, em escoamento de fluxo contínuo e através de um orifício com dimensões padronizadas.

Através do viscosímetro disponível, a amostra de ligante previamente aquecida acima do ponto de amolecimento foi vertida no frasco receptor do equipamento, conforme Figura 16 (a). Este foi programado para três temperaturas distintas: 135 °C, 155 °C e 175 °C, de forma a permitir adequada caracterização na faixa de temperatura provável da usinagem e compactação. Após atingir a temperatura definida, o fluido foi mantido em homogeneização por um minuto até atingir a constância da temperatura. A partir deste instante a rolha foi removida do orifício e procedeu-se com a aferição do tempo necessário para que o ligante preenchesse 60ml (conforme marcação), do frasco padronizado, sendo esta variável diretamente correlacionada com a viscosidade do material (b).

Figura 16 – Ensaio de viscosidade Saybolt Furol (a), sendo a viscosidade determinada pelo tempo necessário para que o fluido, a determinada temperatura, preenchesse o frasco padronizado de 60 ml, em escoamento de fluxo contínuo e através de um orifício com dimensões padronizadas (b).



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Empiricamente, conforme correlações disponíveis em Normas, em especial quanto a ASTM D2161, é possível transformar os resultados obtidos no ensaio de viscosimetria Saybolt Furol - SSF - segundos Saybolt Furol, para valores equivalentes de viscosidade cinemática.

A correlação do comportamento reológico obtida pelo equipamento foi suficiente para caracterizar o ligante novo da mistura, não sendo, portanto, necessário realizar ensaios de reometria rotacional.

3.2.2 Etapa 1 – Dosagem e caracterização de diferentes misturas para determinação do teor ótimo de ligante novo/complementar

3.2.2.1 Procedimentos e dosagem das misturas em laboratório

Conforme fluxograma do procedimento experimental (ver Figura 6), a inclusão de RAP nas misturas, cujos componentes foram devidamente caracterizados,

foram definidas em 13 grupos de dosagem - Etapa 1 (ver matriz do Quadro 4). Para alguns destes foram incorporados RAP apenas na parcela de agregados miúdos, para outros, na parcela de agregados graúdos, e nos demais, para ambas as divisões. Ainda, foram consideradas a influência do tipo de agregado miúdo natural: quando proveniente de rocha granítica e rocha basáltica. Para cada grupo foram preparados 6 corpos de prova experimentais em laboratório, sendo 2 corpos de prova para cada variação de ligante complementar (nível inferior, intermediário e superior).

O objetivo desta etapa foi delimitar para cada grupo (ou alternativa) o teor ideal de ligante novo (ou complementar) na mistura, pois com o aquecimento, parte do ligante envelhecido do RAP tende a ser funcionalmente reativado.

Desta forma, foi possível avaliar propriedades e resultados da dosagem tendo em vista a variação do RAP nas misturas e na parcela de valorização: quando segregado exclusivamente na parcela de agregado miúdo, exclusivamente na parcela de agregado graúdo e em ambos os tamanhos simultaneamente.

Alguns grupos de dosagem foram definidos como grupos de controle, ou referência, situação em que os resultados foram comparados às demais substituições para verificação das variações obtidas no procedimento.

Quadro 4 – Matriz dos grupos de dosagem da Etapa 1, sintetizando as características de cada grupo de dosagem (variação no percentual de RAP e origem do pó de pedra utilizado como agregado miúdo natural).

(continua)

Grupo	Identidade	Percentual de aplicação do RAP na mistura por faixa de agregado		Agregado miúdo (pó de pedra) utilizado na mistura		Descrição
		Agreg. graúdo	Agreg. miúdo	Granito	Basalto	
01	0% GR	0%	0%	✓	X	Grupo de controle. Corpos de prova dosados com materiais novos, sem valorização de resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.

(continua)

Grupo	Identidade	Percentual de aplicação do RAP na mistura por faixa de agregado		Agregado miúdo (pó de pedra) utilizado na mistura		Descrição
		Agreg. graúdo	Agreg. miúdo	Granito	Basalto	
02	0% BA	0%	0%	X	✓	Grupo de controle. Corpos de prova dosados com materiais novos, sem valorização de resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem basáltica.
03	25% GR	25%	25%	✓	X	Grupo com a utilização de 25% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
04	25% BA	25%	25%	X	✓	Grupo com a utilização de 25% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem basáltica.
05	25% GR G	25%	0%	✓	X	Grupo com a substituição de 25% dos agregados graúdos como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
06	25% GR M	0%	25%	✓	X	Grupo com a substituição de 25% dos agregados miúdos como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
07	50% GR	50%	50%	✓	X	Grupo com a utilização de 50% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
08	50% BA	50%	50%	X	✓	Grupo com a utilização de 50% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem basáltica.
09	50% GR G	50%	0%	✓	X	Grupo com a substituição de 50% dos agregados graúdos como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.

(conclusão)

Grupo	Identidade	Percentual de aplicação do RAP na mistura por faixa de agregado		Agregado miúdo (pó de pedra) utilizado na mistura		Descrição
		Agreg. graúdo	Agreg. miúdo	Granito	Basalto	
10	50% GR M	0%	50%	✓	X	Grupo com a substituição de 50% dos agregados miúdos como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
11	100%	100%	100%	X	X	Grupo com a utilização de 100% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica.
12	100% G	100%	0%	✓	X	Grupo com a substituição de 100% dos agregados graúdos como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
13	100% M	0%	100%	X	X	Grupo com a substituição de 100% dos agregados miúdos como resíduo fresado da pavimentação asfáltica.

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Conforme matriz do Quadro 4, é possível observar que para a hipótese de uso de pó de pedra de origem basáltica foram considerados traços com valorização de 0%, 25% e 50% de RAP. Para a hipótese de uso de pó de pedra de origem granítica, foram considerados traços com valorização nos mesmos teores, além de traços em com valorização de forma restrita na parcela de agregados graúdos ou miúdos, individualmente, e na totalidade (100%). Considerando que os resultados da substituição por parcelas isoladas não refletiram valores satisfatórios, o procedimento não foi replicado para a hipótese de uso de pó de pedra com origem basáltica, reduzindo o número de corpos de prova em laboratório.

Para os grupos com a substituição da fração de agregados, considerou-se o método de ensaio ME 412 do DNIT, que define como agregado graúdo da pavimentação aqueles agregados passantes na malha n.º 3 e retidos na peneira n.º 4 (4,75 mm), sendo este o limite definido entre a separação do grupo agregados graúdos e miúdos neste procedimento experimental.

Para cada grupo, considerando uma curva de distribuição de agregados tipo “C”, padrão DNIT, foi necessário determinar o teor ótimo de ligante novo (ou complementar ao preexistente no RAP). Para cada alternativa foi considerado três variações de ligante novo na mistura: um fator inferior (~ 3% em massa), um fator médio (~ 5%) e um fator superior (~ 7%), de modo a possibilitar a elaboração de gráficos que descrevam o comportamento da mistura nas faixas especificadas, conforme fichas de resultados apresentados no capítulo seguinte.

Na situação em que havia a disponibilidade de fresado na mistura considerou-se a hipótese que 80% do ligante envelhecido poderia ser reativado, com base na literatura, e do teor total de ligante novo estimado, sendo este suprimido do teor total de ligante da dosagem. Para cada variação foram preparados dois corpos de prova para a obtenção dos índices físicos de caracterização e determinação do conjunto estabilidade-fluência através da metodologia Marshall, parâmetros para a determinação do teor ótimo de ligante nas misturas. Esta determinação possui relevância no sentido de que parte do ligante envelhecido, nas misturas com a utilização de fresado, tende a ser reativado. A adoção da metodologia Marshall (simulação através de golpes) em relação à metodologia Superpave (através de giros) foi adotada pela ampla utilização, bem como pela disponibilidade de equipamentos em laboratório.

Os gráficos apresentados no Quadro 5 oferecem uma representação visual detalhada dos traços e grupos de dosagem analisados, permitindo uma melhor compreensão das características dos materiais empregados no estudo. Os traços foram definidos com base na caracterização dos insumos composicionais, considerando parâmetros técnicos fundamentais para a formulação da mistura. A distribuição granulométrica dos agregados desempenhou um papel crucial nesse processo. Conforme detalhado no Apêndice A, os dados analíticos utilizados para estabelecer os traços foram definidos com base na caracterização inicial dos materiais, com ênfase na distribuição do tamanho de partícula, que possibilitou avaliar a adequação dos materiais e sua compatibilidade dentro da mistura projetada. A apresentação gráfica das misturas, conforme demonstrada, permite uma análise comparativa entre os diferentes grupos de dosagem, facilitando a identificação de tendências e variações na composição das misturas.

Quadro 5 – Resumo da distribuição de materiais e faixa granulométrica por grupo do traço de dosagem (resumo do analítico disponível no Apêndice A).

(continua)

Grupo	ID	Distribuição percentual dos materiais, conforme variação do teor de ligante complementar	Distribuição percentual dos agregados, conforme variação do teor de ligante complementar																																																
01	0% GR	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agregados</td><td>48,50%</td><td>47,50%</td><td>46,50%</td></tr> <tr> <td>Pó de granito</td><td>48,50%</td><td>47,50%</td><td>46,50%</td></tr> <tr> <td>Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>3,00%</td><td>5,00%</td><td>7,00%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	Agregados	48,50%	47,50%	46,50%	Pó de granito	48,50%	47,50%	46,50%	Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	RAP	0,00%	0,00%	0,00%	Ligante	3,00%	5,00%	7,00%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AG-NAT</td><td>46,33%</td><td>45,38%</td><td>44,42%</td></tr> <tr> <td>AG-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>AM-NAT</td><td>50,67%</td><td>49,63%</td><td>48,58%</td></tr> <tr> <td>AM-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>3,00%</td><td>5,00%</td><td>7,00%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	AG-NAT	46,33%	45,38%	44,42%	AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	AM-NAT	50,67%	49,63%	48,58%	AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	Ligante	3,00%	5,00%	7,00%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
Agregados	48,50%	47,50%	46,50%																																																
Pó de granito	48,50%	47,50%	46,50%																																																
Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																																
RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Ligante	3,00%	5,00%	7,00%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
AG-NAT	46,33%	45,38%	44,42%																																																
AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
AM-NAT	50,67%	49,63%	48,58%																																																
AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Ligante	3,00%	5,00%	7,00%																																																
02	0% BA	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agregados</td><td>48,50%</td><td>47,50%</td><td>46,50%</td></tr> <tr> <td>Pó de granito</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Pó de basalto</td><td>48,50%</td><td>47,50%</td><td>46,50%</td></tr> <tr> <td>RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>3,00%</td><td>5,00%</td><td>7,00%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	Agregados	48,50%	47,50%	46,50%	Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%	Pó de basalto	48,50%	47,50%	46,50%	RAP	0,00%	0,00%	0,00%	Ligante	3,00%	5,00%	7,00%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AG-NAT</td><td>45,44%</td><td>44,50%</td><td>43,56%</td></tr> <tr> <td>AG-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>AM-NAT</td><td>51,56%</td><td>50,50%</td><td>49,44%</td></tr> <tr> <td>AM-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>3,00%</td><td>5,00%</td><td>7,00%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	AG-NAT	45,44%	44,50%	43,56%	AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	AM-NAT	51,56%	50,50%	49,44%	AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	Ligante	3,00%	5,00%	7,00%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
Agregados	48,50%	47,50%	46,50%																																																
Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Pó de basalto	48,50%	47,50%	46,50%																																																
RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Ligante	3,00%	5,00%	7,00%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
AG-NAT	45,44%	44,50%	43,56%																																																
AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
AM-NAT	51,56%	50,50%	49,44%																																																
AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Ligante	3,00%	5,00%	7,00%																																																
03	25% GR	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agregados</td><td>36,79%</td><td>36,04%</td><td>35,29%</td></tr> <tr> <td>Pó de granito</td><td>36,79%</td><td>36,04%</td><td>35,29%</td></tr> <tr> <td>Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>RAP</td><td>24,52%</td><td>24,02%</td><td>23,52%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>1,90%</td><td>3,90%</td><td>5,90%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	Agregados	36,79%	36,04%	35,29%	Pó de granito	36,79%	36,04%	35,29%	Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	RAP	24,52%	24,02%	23,52%	Ligante	1,90%	3,90%	5,90%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AG-NAT</td><td>35,14%</td><td>34,43%</td><td>33,71%</td></tr> <tr> <td>AG-RAP</td><td>13,88%</td><td>13,60%</td><td>13,31%</td></tr> <tr> <td>AM-NAT</td><td>38,43%</td><td>37,65%</td><td>36,87%</td></tr> <tr> <td>AM-RAP</td><td>10,65%</td><td>10,43%</td><td>10,21%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>1,90%</td><td>3,90%</td><td>5,90%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	AG-NAT	35,14%	34,43%	33,71%	AG-RAP	13,88%	13,60%	13,31%	AM-NAT	38,43%	37,65%	36,87%	AM-RAP	10,65%	10,43%	10,21%	Ligante	1,90%	3,90%	5,90%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
Agregados	36,79%	36,04%	35,29%																																																
Pó de granito	36,79%	36,04%	35,29%																																																
Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																																
RAP	24,52%	24,02%	23,52%																																																
Ligante	1,90%	3,90%	5,90%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
AG-NAT	35,14%	34,43%	33,71%																																																
AG-RAP	13,88%	13,60%	13,31%																																																
AM-NAT	38,43%	37,65%	36,87%																																																
AM-RAP	10,65%	10,43%	10,21%																																																
Ligante	1,90%	3,90%	5,90%																																																
04	25% BA	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agregados</td><td>36,79%</td><td>36,04%</td><td>35,29%</td></tr> <tr> <td>Pó de granito</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Pó de basalto</td><td>36,79%</td><td>36,04%</td><td>35,29%</td></tr> <tr> <td>RAP</td><td>24,52%</td><td>24,02%</td><td>23,52%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>1,90%</td><td>3,90%</td><td>5,90%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	Agregados	36,79%	36,04%	35,29%	Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%	Pó de basalto	36,79%	36,04%	35,29%	RAP	24,52%	24,02%	23,52%	Ligante	1,90%	3,90%	5,90%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AG-NAT</td><td>34,46%</td><td>33,76%</td><td>33,06%</td></tr> <tr> <td>AG-RAP</td><td>13,88%</td><td>13,60%</td><td>13,31%</td></tr> <tr> <td>AM-NAT</td><td>39,11%</td><td>38,31%</td><td>37,52%</td></tr> <tr> <td>AM-RAP</td><td>10,65%</td><td>10,43%</td><td>10,21%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>1,90%</td><td>3,90%</td><td>5,90%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	AG-NAT	34,46%	33,76%	33,06%	AG-RAP	13,88%	13,60%	13,31%	AM-NAT	39,11%	38,31%	37,52%	AM-RAP	10,65%	10,43%	10,21%	Ligante	1,90%	3,90%	5,90%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
Agregados	36,79%	36,04%	35,29%																																																
Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Pó de basalto	36,79%	36,04%	35,29%																																																
RAP	24,52%	24,02%	23,52%																																																
Ligante	1,90%	3,90%	5,90%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
AG-NAT	34,46%	33,76%	33,06%																																																
AG-RAP	13,88%	13,60%	13,31%																																																
AM-NAT	39,11%	38,31%	37,52%																																																
AM-RAP	10,65%	10,43%	10,21%																																																
Ligante	1,90%	3,90%	5,90%																																																

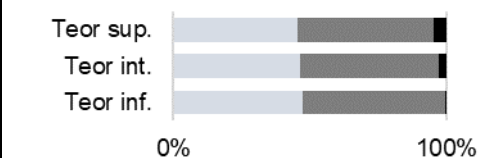
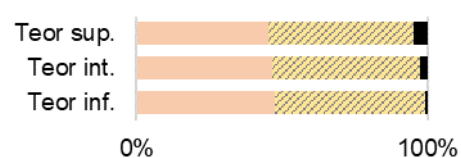
(continuação)

Grupo	ID	Distribuição percentual dos materiais, conforme variação do teor de ligante complementar	Distribuição percentual dos agregados, conforme variação do teor de ligante complementar																																																
05	25% GR G	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ Agregados</td><td>37,34%</td><td>36,58%</td><td>35,81%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>48,54%</td><td>47,54%</td><td>46,55%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>11,64%</td><td>11,41%</td><td>11,17%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>2,48%</td><td>4,48%</td><td>6,48%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ Agregados	37,34%	36,58%	35,81%	■ Pó de granito	48,54%	47,54%	46,55%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	11,64%	11,41%	11,17%	■ Ligante	2,48%	4,48%	6,48%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>34,94%</td><td>34,22%</td><td>33,50%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>11,65%</td><td>11,41%</td><td>11,17%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>50,94%</td><td>49,90%</td><td>48,85%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>2,48%</td><td>4,48%</td><td>6,48%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ AG-NAT	34,94%	34,22%	33,50%	■ AG-RAP	11,65%	11,41%	11,17%	■ AM-NAT	50,94%	49,90%	48,85%	■ AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	■ Ligante	2,48%	4,48%	6,48%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ Agregados	37,34%	36,58%	35,81%																																																
■ Pó de granito	48,54%	47,54%	46,55%																																																
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																																
■ RAP	11,64%	11,41%	11,17%																																																
■ Ligante	2,48%	4,48%	6,48%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ AG-NAT	34,94%	34,22%	33,50%																																																
■ AG-RAP	11,65%	11,41%	11,17%																																																
■ AM-NAT	50,94%	49,90%	48,85%																																																
■ AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
■ Ligante	2,48%	4,48%	6,48%																																																
06	25% GR M	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ Agregados</td><td>48,02%</td><td>47,03%</td><td>46,05%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>36,82%</td><td>36,06%</td><td>35,31%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>12,74%</td><td>12,48%</td><td>12,22%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>2,43%</td><td>4,43%</td><td>6,43%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ Agregados	48,02%	47,03%	46,05%	■ Pó de granito	36,82%	36,06%	35,31%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	12,74%	12,48%	12,22%	■ Ligante	2,43%	4,43%	6,43%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>46,60%</td><td>45,65%</td><td>44,69%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>38,23%</td><td>37,44%</td><td>36,66%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>12,74%</td><td>12,48%</td><td>12,22%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>2,43%</td><td>4,43%</td><td>6,43%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ AG-NAT	46,60%	45,65%	44,69%	■ AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	■ AM-NAT	38,23%	37,44%	36,66%	■ AM-RAP	12,74%	12,48%	12,22%	■ Ligante	2,43%	4,43%	6,43%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ Agregados	48,02%	47,03%	46,05%																																																
■ Pó de granito	36,82%	36,06%	35,31%																																																
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																																
■ RAP	12,74%	12,48%	12,22%																																																
■ Ligante	2,43%	4,43%	6,43%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ AG-NAT	46,60%	45,65%	44,69%																																																
■ AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
■ AM-NAT	38,23%	37,44%	36,66%																																																
■ AM-RAP	12,74%	12,48%	12,22%																																																
■ Ligante	2,43%	4,43%	6,43%																																																
07	50% GR	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ Agregados</td><td>24,80%</td><td>24,30%</td><td>23,80%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>24,80%</td><td>24,30%</td><td>23,80%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>49,60%</td><td>48,60%</td><td>47,60%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,80%</td><td>2,80%</td><td>4,80%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ Agregados	24,80%	24,30%	23,80%	■ Pó de granito	24,80%	24,30%	23,80%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	49,60%	48,60%	47,60%	■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>23,69%</td><td>23,21%</td><td>22,73%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>28,07%</td><td>27,50%</td><td>26,94%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>25,91%</td><td>25,39%</td><td>24,86%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>21,53%</td><td>21,10%</td><td>20,66%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,80%</td><td>2,80%</td><td>4,80%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ AG-NAT	23,69%	23,21%	22,73%	■ AG-RAP	28,07%	27,50%	26,94%	■ AM-NAT	25,91%	25,39%	24,86%	■ AM-RAP	21,53%	21,10%	20,66%	■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ Agregados	24,80%	24,30%	23,80%																																																
■ Pó de granito	24,80%	24,30%	23,80%																																																
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																																
■ RAP	49,60%	48,60%	47,60%																																																
■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ AG-NAT	23,69%	23,21%	22,73%																																																
■ AG-RAP	28,07%	27,50%	26,94%																																																
■ AM-NAT	25,91%	25,39%	24,86%																																																
■ AM-RAP	21,53%	21,10%	20,66%																																																
■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%																																																
08	50% BA	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ Agregados</td><td>24,80%</td><td>24,30%</td><td>23,80%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>24,80%</td><td>24,30%</td><td>23,80%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>49,60%</td><td>48,60%</td><td>47,60%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,80%</td><td>2,80%</td><td>4,80%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ Agregados	24,80%	24,30%	23,80%	■ Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%	■ Pó de basalto	24,80%	24,30%	23,80%	■ RAP	49,60%	48,60%	47,60%	■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td></td><td>Teor inf.</td><td>Teor int.</td><td>Teor sup.</td></tr> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>23,23%</td><td>22,76%</td><td>22,30%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>28,07%</td><td>27,50%</td><td>26,94%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>26,37%</td><td>25,83%</td><td>25,30%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>21,53%</td><td>21,10%</td><td>20,66%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,80%</td><td>2,80%</td><td>4,80%</td></tr> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	■ AG-NAT	23,23%	22,76%	22,30%	■ AG-RAP	28,07%	27,50%	26,94%	■ AM-NAT	26,37%	25,83%	25,30%	■ AM-RAP	21,53%	21,10%	20,66%	■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ Agregados	24,80%	24,30%	23,80%																																																
■ Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%																																																
■ Pó de basalto	24,80%	24,30%	23,80%																																																
■ RAP	49,60%	48,60%	47,60%																																																
■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
■ AG-NAT	23,23%	22,76%	22,30%																																																
■ AG-RAP	28,07%	27,50%	26,94%																																																
■ AM-NAT	26,37%	25,83%	25,30%																																																
■ AM-RAP	21,53%	21,10%	20,66%																																																
■ Ligante	0,80%	2,80%	4,80%																																																

(continuação)

Grupo	ID	Distribuição percentual dos materiais, conforme variação do teor de ligante complementar	Distribuição percentual dos agregados, conforme variação do teor de ligante complementar																																								
09	50% GR G	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ Agregados</td><td>Teor inf. 26,06%</td><td>Teor int. 25,53%</td><td>Teor sup. 25,00%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>48,57%</td><td>47,58%</td><td>46,59%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>23,42%</td><td>22,94%</td><td>22,46%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>1,95%</td><td>3,95%</td><td>5,95%</td></tr> </table>	■ Agregados	Teor inf. 26,06%	Teor int. 25,53%	Teor sup. 25,00%	■ Pó de granito	48,57%	47,58%	46,59%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	23,42%	22,94%	22,46%	■ Ligante	1,95%	3,95%	5,95%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>Teor inf. 23,42%</td><td>Teor int. 22,94%</td><td>Teor sup. 22,46%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>23,42%</td><td>22,94%</td><td>22,46%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>51,22%</td><td>50,17%</td><td>49,13%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>1,95%</td><td>3,95%</td><td>5,95%</td></tr> </table>	■ AG-NAT	Teor inf. 23,42%	Teor int. 22,94%	Teor sup. 22,46%	■ AG-RAP	23,42%	22,94%	22,46%	■ AM-NAT	51,22%	50,17%	49,13%	■ AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	■ Ligante	1,95%	3,95%	5,95%
■ Agregados	Teor inf. 26,06%	Teor int. 25,53%	Teor sup. 25,00%																																								
■ Pó de granito	48,57%	47,58%	46,59%																																								
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ RAP	23,42%	22,94%	22,46%																																								
■ Ligante	1,95%	3,95%	5,95%																																								
■ AG-NAT	Teor inf. 23,42%	Teor int. 22,94%	Teor sup. 22,46%																																								
■ AG-RAP	23,42%	22,94%	22,46%																																								
■ AM-NAT	51,22%	50,17%	49,13%																																								
■ AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ Ligante	1,95%	3,95%	5,95%																																								
10	50% GR M	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ Agregados</td><td>Teor inf. 47,52%</td><td>Teor int. 46,56%</td><td>Teor sup. 45,59%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>24,99%</td><td>24,48%</td><td>23,97%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>25,63%</td><td>25,11%</td><td>24,59%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>1,85%</td><td>3,85%</td><td>5,85%</td></tr> </table>	■ Agregados	Teor inf. 47,52%	Teor int. 46,56%	Teor sup. 45,59%	■ Pó de granito	24,99%	24,48%	23,97%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	25,63%	25,11%	24,59%	■ Ligante	1,85%	3,85%	5,85%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>Teor inf. 46,88%</td><td>Teor int. 45,92%</td><td>Teor sup. 44,97%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>25,63%</td><td>25,11%</td><td>24,59%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>25,63%</td><td>25,11%</td><td>24,59%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>1,85%</td><td>3,85%</td><td>5,85%</td></tr> </table>	■ AG-NAT	Teor inf. 46,88%	Teor int. 45,92%	Teor sup. 44,97%	■ AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	■ AM-NAT	25,63%	25,11%	24,59%	■ AM-RAP	25,63%	25,11%	24,59%	■ Ligante	1,85%	3,85%	5,85%
■ Agregados	Teor inf. 47,52%	Teor int. 46,56%	Teor sup. 45,59%																																								
■ Pó de granito	24,99%	24,48%	23,97%																																								
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ RAP	25,63%	25,11%	24,59%																																								
■ Ligante	1,85%	3,85%	5,85%																																								
■ AG-NAT	Teor inf. 46,88%	Teor int. 45,92%	Teor sup. 44,97%																																								
■ AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ AM-NAT	25,63%	25,11%	24,59%																																								
■ AM-RAP	25,63%	25,11%	24,59%																																								
■ Ligante	1,85%	3,85%	5,85%																																								
11	100%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ Agregados</td><td>Teor inf. 0,00%</td><td>Teor int. 0,00%</td><td>Teor sup. 0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>100,00%</td><td>99,39%</td><td>97,39%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,00%</td><td>0,61%</td><td>2,61%</td></tr> </table>	■ Agregados	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%	■ Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	100,00%	99,39%	97,39%	■ Ligante	0,00%	0,61%	2,61%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>Teor inf. 0,00%</td><td>Teor int. 0,00%</td><td>Teor sup. 0,00%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>56,59%</td><td>56,25%</td><td>55,11%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>43,41%</td><td>43,15%</td><td>42,28%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,00%</td><td>0,61%</td><td>2,61%</td></tr> </table>	■ AG-NAT	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%	■ AG-RAP	56,59%	56,25%	55,11%	■ AM-NAT	0,00%	0,00%	0,00%	■ AM-RAP	43,41%	43,15%	42,28%	■ Ligante	0,00%	0,61%	2,61%
■ Agregados	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%																																								
■ Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ RAP	100,00%	99,39%	97,39%																																								
■ Ligante	0,00%	0,61%	2,61%																																								
■ AG-NAT	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%																																								
■ AG-RAP	56,59%	56,25%	55,11%																																								
■ AM-NAT	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ AM-RAP	43,41%	43,15%	42,28%																																								
■ Ligante	0,00%	0,61%	2,61%																																								
12	100% G	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ Agregados</td><td>Teor inf. 0,00%</td><td>Teor int. 0,00%</td><td>Teor sup. 0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de granito</td><td>51,77%</td><td>50,72%</td><td>49,68%</td></tr> <tr> <td>■ Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ RAP</td><td>47,33%</td><td>46,38%</td><td>45,42%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,90%</td><td>2,90%</td><td>4,90%</td></tr> </table>	■ Agregados	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%	■ Pó de granito	51,77%	50,72%	49,68%	■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	■ RAP	47,33%	46,38%	45,42%	■ Ligante	0,90%	2,90%	4,90%	Teor sup. Teor int. Teor inf. 0% 100% <table> <tr> <td>■ AG-NAT</td><td>Teor inf. 0,00%</td><td>Teor int. 0,00%</td><td>Teor sup. 0,00%</td></tr> <tr> <td>■ AG-RAP</td><td>47,33%</td><td>46,38%</td><td>45,42%</td></tr> <tr> <td>■ AM-NAT</td><td>51,77%</td><td>50,72%</td><td>49,68%</td></tr> <tr> <td>■ AM-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>■ Ligante</td><td>0,90%</td><td>2,90%</td><td>4,90%</td></tr> </table>	■ AG-NAT	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%	■ AG-RAP	47,33%	46,38%	45,42%	■ AM-NAT	51,77%	50,72%	49,68%	■ AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	■ Ligante	0,90%	2,90%	4,90%
■ Agregados	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%																																								
■ Pó de granito	51,77%	50,72%	49,68%																																								
■ Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ RAP	47,33%	46,38%	45,42%																																								
■ Ligante	0,90%	2,90%	4,90%																																								
■ AG-NAT	Teor inf. 0,00%	Teor int. 0,00%	Teor sup. 0,00%																																								
■ AG-RAP	47,33%	46,38%	45,42%																																								
■ AM-NAT	51,77%	50,72%	49,68%																																								
■ AM-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																								
■ Ligante	0,90%	2,90%	4,90%																																								

(conclusão)

Grupo	ID	Distribuição percentual dos materiais, conforme variação do teor de ligante complementar	Distribuição percentual dos agregados, conforme variação do teor de ligante complementar																																																
13	100% M	 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agregados</td><td>47,43%</td><td>46,47%</td><td>45,52%</td></tr> <tr> <td>Pó de granito</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>Pó de basalto</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>RAP</td><td>51,87%</td><td>50,82%</td><td>49,78%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>0,71%</td><td>2,71%</td><td>4,71%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	Agregados	47,43%	46,47%	45,52%	Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%	Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%	RAP	51,87%	50,82%	49,78%	Ligante	0,71%	2,71%	4,71%	 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>Teor inf.</th><th>Teor int.</th><th>Teor sup.</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AG-NAT</td><td>47,43%</td><td>46,47%</td><td>45,52%</td></tr> <tr> <td>AG-RAP</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>AM-NAT</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td><td>0,00%</td></tr> <tr> <td>AM-RAP</td><td>51,87%</td><td>50,82%</td><td>49,78%</td></tr> <tr> <td>Ligante</td><td>0,71%</td><td>2,71%</td><td>4,71%</td></tr> </tbody> </table>		Teor inf.	Teor int.	Teor sup.	AG-NAT	47,43%	46,47%	45,52%	AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%	AM-NAT	0,00%	0,00%	0,00%	AM-RAP	51,87%	50,82%	49,78%	Ligante	0,71%	2,71%	4,71%
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
Agregados	47,43%	46,47%	45,52%																																																
Pó de granito	0,00%	0,00%	0,00%																																																
Pó de basalto	0,00%	0,00%	0,00%																																																
RAP	51,87%	50,82%	49,78%																																																
Ligante	0,71%	2,71%	4,71%																																																
	Teor inf.	Teor int.	Teor sup.																																																
AG-NAT	47,43%	46,47%	45,52%																																																
AG-RAP	0,00%	0,00%	0,00%																																																
AM-NAT	0,00%	0,00%	0,00%																																																
AM-RAP	51,87%	50,82%	49,78%																																																
Ligante	0,71%	2,71%	4,71%																																																

Nota: AG = Agregado graúdo. AM = agregado miúdo. NAT = natural. RAP = resíduo fresado.
 Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Com base nos traços descritos para cada grupo e para cada teor, em laboratório, conforme gráficos do Quadro 5 e Apêndice A, os materiais pétreos e o fresado foram separados e pesados nas granulometrias adequadas, para certificar-se de que o corpo de prova produzido para cada mistura seria representativo em relação aos materiais utilizados. Seguiu-se como referência a Norma DNIT 178/2018 PRO para a preparação dos corpos de prova utilizando o compactador Marshall.

Após a pesagem e separação dos materiais, estes foram acondicionados em um recipiente e submetido à estufa em temperatura 10 °C superior à temperatura de usinagem do ligante (145 °C). A imagem da Figura 17 ilustra a separação e pesagem dos materiais para a produção de corpos de prova. As temperaturas de trabalhabilidade do ligante foram definidas conforme ensaio de viscosidade Saybolt Furol, conforme previamente aduzido.

Após a constância de temperatura, os materiais pétreos foram unidos ao ligante, também aquecido, em quantidade determinada, e homogeneizados por cerca de 60 segundos. Ressalta-se que durante todo o procedimento foi necessário a utilização de EPI em relação ao trabalho em temperatura, bem como aos gases liberados pelo aquecimento do ligante asfáltico. Os materiais foram dosados para um corpo de prova de aproximadamente 1200 g. Após, com os moldes de 100 mm de diâmetro também aquecidos na estufa, e a utilização de um filtro de papel na base e no topo (para evitar a adesão do corpo de prova ao molde), a mistura, na temperatura de compactação, foi submetida à compactação Marshall, mecânica, com 75 golpes

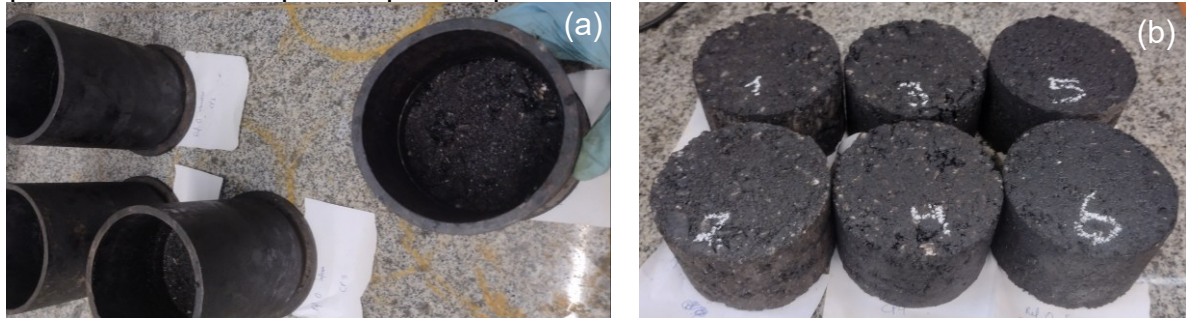
por face a um soquete de 4.540 +/- 1 g, que cai em queda livre a uma altura de 457,2 +/- 1,5 mm. As imagens da Figura 18 ilustram o processo de fabricação dos corpos de prova.

Figura 17 – Amostras separadas conforme dosagem para a permanência em estufa visando a produção de corpos de prova necessários aos ensaios.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 18 – Produção dos corpos de prova. Na imagem (a) consta o corpo de prova no molde, após compactação em soquete Marshall, enquanto na imagem (b) são apresentados os corpos de prova após a desforma com uso de extrator mecânico.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Após a compactação, os corpos de prova foram mantidos no molde por um período de 24 h, para esfriar e evitar danos. A desmoldagem ocorreu através de um extrator de corpo de prova mecânico, necessitando ter as paredes externas do molde levemente aquecidas para garantir a desforma.

3.2.2.2 Ensaios de caracterização física nos corpos de prova experimentais

A partir dos corpos de prova preparados, após a desmoldagem, foram registradas as dimensões com auxílio de um paquímetro: diâmetro e altura dos corpos de prova, e tomado a média das quatro medidas diametralmente opostas. A massa seca, a massa submersa (por 3 minutos) e a massa saturada de superfície seca também foram anotadas para os cálculos volumétricos necessários.

Em relação à densidade máxima teórica da mistura (D_{mt}), esta foi calculada experimentalmente com base na densidade dos materiais, em detrimento à G_{mm} ensaiada pelo método Rice. Para tal a Equação 01 foi utilizada:

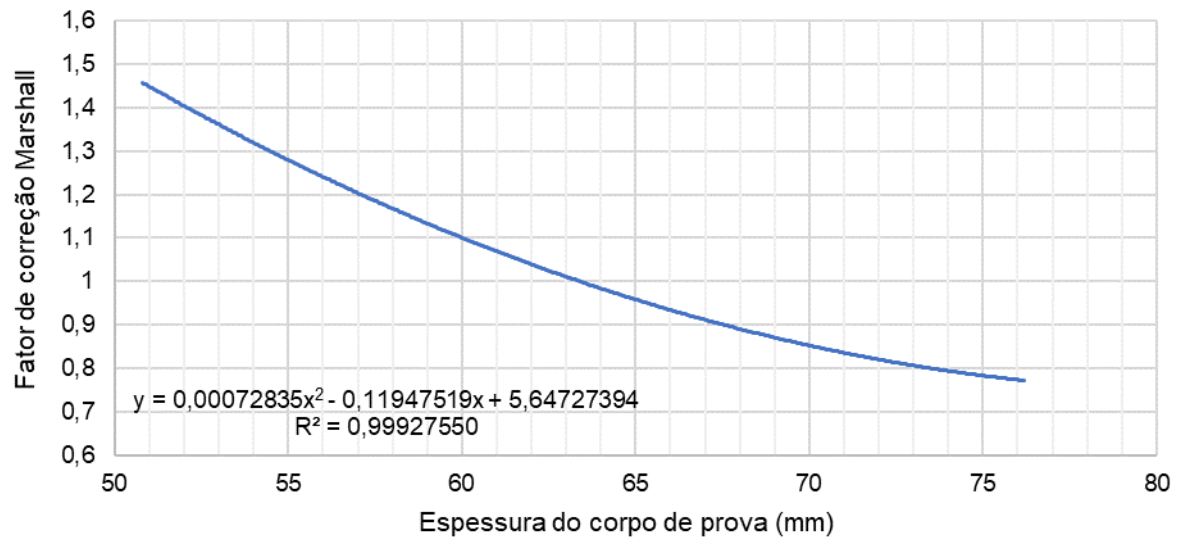
$$D_{mt} = \frac{100}{\frac{\%G1}{dG1} + \frac{\%G0}{dG0} + \frac{\%P}{dP} + \frac{\%F}{dF} + \frac{\%L}{dL}} \quad (\text{Equação 01})$$

Sendo, D_{mt} = densidade máxima teórica da mistura; %G1 = percentual de brita 1 na mistura; $dG1$ = densidade efetiva da brita 1; %G0 = percentual de brita 0 na mistura; $dG0$ = densidade efetiva da brita 0; %P = percentual de pó de pedra na mistura; dP = densidade efetiva do pó de pedra; %F = percentual de fresado na mistura; dF = densidade efetiva do fresado; %L = percentual de ligante na mistura; dL = densidade efetiva do ligante.

Os parâmetros volumétricos, como densidade relativa aparente (G_{mb}), percentual de água absorvida (%A), massa específica aparente, volume de vazios (V_v), volume de betume (VB), volume de agregados minerais (VAM) e relação betume/vazios (RBV) foram calculados com referência à Norma DNIT 428/2022 - ME através das equações normatizadas, tomando-se em conta a massa seca, massa hidrostática e massa com superfície seca.

A estabilidade (resistência a compressão radial máxima apresentada pelo corpo de prova previamente aquecido em banho a 60 °C por 30 minutos) e fluência (deformação total do corpo de prova, desde a carga nula até a carga máxima) foram determinadas com base na Norma DNIT 447/2024 - ME, tendo o valor de estabilidade corrigido conforme altura do corpo de prova, de acordo com o gráfico da Figura 19. Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa Marshall disponível em laboratório.

Figura 19 – Curva do fator de correção para a estabilidade Marshall, com equação de regressão obtida a partir dos valores tabulados apresentados por Norma.



Fonte: Adaptado de DNIT (2024).

A imagem da Figura 20 ilustra o desenvolvimento do ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall operado em laboratório.

Figura 20 – Prensa Marshall utilizada para a realização do ensaio de estabilidade e fluência, necessário para a determinação dos parâmetros de dosagem.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

A partir dos resultados, os gráficos de dosagem e as fichas apresentadas na seção de resultados apresentam os parâmetros para a determinação dos teores ótimos de ligante novo/complementar para cada grupo de mistura, tendo em vista os critérios determinados pela Norma DNIT 31/2006 - ES - Especificação de serviço.

3.2.3 Etapa 2 – Produção e caracterização das misturas com melhor desempenho, no teor ótimo de ligante novo/complementar, para a realização de ensaios físicos adicionais

Após a determinação do teor ótimo de ligante novo nas misturas, identificado na Etapa 1, para a Etapa 2 (conforme fluxo experimental, ver Figura 6) foram moldados os corpos de prova com as quantidades ideais da mistura, de modo a caracterizar as demais propriedades físicas relevantes exigidas por Norma, restrito aos grupos que apresentaram melhor desempenho global (e corpo de prova adotado como referência).

Para esta etapa, considerando que a segregação por tamanho de agregado não apresentou resultado satisfatório em relação à substituição global do RAP nas misturas, em virtude da falsa granulometria da *black curve*, disponível quando da separação de materiais, foram considerados apenas 5 grupos, conforme Quadro 6: 0% de RAP com pó de granito, 0% de RAP com pó de basalto, 50% de RAP com pó de granito, 50% de RAP com pó de basalto e 100% de RAP. Para cada grupo foram produzidos 8 corpos de prova. As dosagens estão disponíveis no Apêndice B.

Quadro 6 – Matriz dos grupos de dosagem da Etapa 2, sintetizando as características de cada grupo de dosagem (variação no percentual de RAP e origem do pó de pedra utilizado como agregado miúdo natural).

(continua)

Grupo	Identidade	Percentual de aplicação do RAP na mistura por faixa de agregado		Agregado miúdo (pó de pedra) utilizado na mistura		Descrição
		Agreg. graúdo	Agreg. miúdo	Granito	Basalto	
01	0% GR	0%	0%	✓	✗	Grupo de controle. Corpos de prova dosados com materiais novos, sem valorização de resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.

(conclusão)

Grupo	Identidade	Percentual de aplicação do RAP na mistura por faixa de agregado		Agregado miúdo (pó de pedra) utilizado na mistura		Descrição
		Agreg. graúdo	Agreg. miúdo	Granito	Basalto	
02	0% BA	0%	0%	X	✓	Grupo de controle. Corpos de prova dosados com materiais novos, sem valorização de resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem basáltica.
07	50% GR	50%	50%	✓	X	Grupo com a utilização de 50% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem granítica.
08	50% BA	50%	50%	X	✓	Grupo com a utilização de 50% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica. Utilização de pó de pedra de origem basáltica.
11	100%	100%	100%	X	X	Grupo com a utilização de 100% dos agregados como resíduo fresado da pavimentação asfáltica.

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Os gráficos apresentados no Quadro 7 oferecem uma representação visual detalhada dos traços dos grupos de dosagem analisados, permitindo uma compreensão mais clara da distribuição dos materiais empregados na formulação das misturas. Esses traços foram definidos com base na caracterização criteriosa dos insumos composicionais, levando em consideração parâmetros fundamentais para garantir a adequação técnica e a homogeneidade dos materiais utilizados. Conforme descrito no Apêndice B, o processo de definição das dosagens foi embasado em uma análise do tamanho de partícula de modo minucioso, na qual foram avaliadas as proporções dos diferentes teores constituintes da mistura. Essa abordagem é essencial para assegurar a compatibilidade entre os materiais e otimizar o desempenho dos corpos de prova durante a realização dos ensaios físicos. A distribuição granulométrica influencia diretamente características como a densidade, a resistência mecânica e a durabilidade do material, sendo, portanto, um fator determinante na formulação das amostras.

Quadro 7 – Resumo da distribuição de materiais e faixa granulométrica por grupo do traço de dosagem (resumo do analítico disponível no Apêndice B).

Grupo	ID	Distribuição percentual dos materiais	Distribuição percentual dos agregados
01	0% GR	Amostra 0% 100% Amostra - Agregados 47,50% - Pó de granito 47,50% - Pó de basalto 0,00% - RAP 0,00% - Ligante 5,00%	Amostra 0% 100% Amostra - AG-NAT 45,38% - AG-RAP 0,00% - AM-NAT 49,63% - AM-RAP 0,00% - Ligante 5,00%
02	0% BA	Amostra 0% 100% Amostra - Agregados 47,85% - Pó de granito 0,00% - Pó de basalto 47,85% - RAP 0,00% - Ligante 4,30%	Amostra 0% 100% Amostra - AG-NAT 44,83% - AG-RAP 0,00% - AM-NAT 50,87% - AM-RAP 0,00% - Ligante 4,30%
07	50% GR	Amostra 0% 100% Amostra - Agregados 24,23% - Pó de granito 24,23% - Pó de basalto 0,00% - RAP 48,45% - Ligante 3,10%	Amostra 0% 100% Amostra - AG-NAT 23,14% - AG-RAP 27,42% - AM-NAT 25,31% - AM-RAP 21,03% - Ligante 3,10%
08	50% BA	Amostra 0% 100% Amostra - Agregados 24,30% - Pó de granito 0,00% - Pó de basalto 24,30% - RAP 48,60% - Ligante 2,80%	Amostra 0% 100% Amostra - AG-NAT 22,77% - AG-RAP 27,50% - AM-NAT 25,84% - AM-RAP 21,10% - Ligante 2,80%
11	100%	Amostra 0% 100% Amostra - Agregados 0,00% - Pó de granito 0,00% - Pó de basalto 0,00% - RAP 98,15% - Ligante 1,85%	Amostra 0% 100% Amostra - AG-NAT 0,00% - AG-RAP 55,54% - AM-NAT 0,00% - AM-RAP 42,61% - Ligante 1,85%

Nota: AG = Agregado graúdo. AM = agregado miúdo. NAT = natural. RAP = resíduo fresado.
 Fonte: Elaboração do Autor (2024).

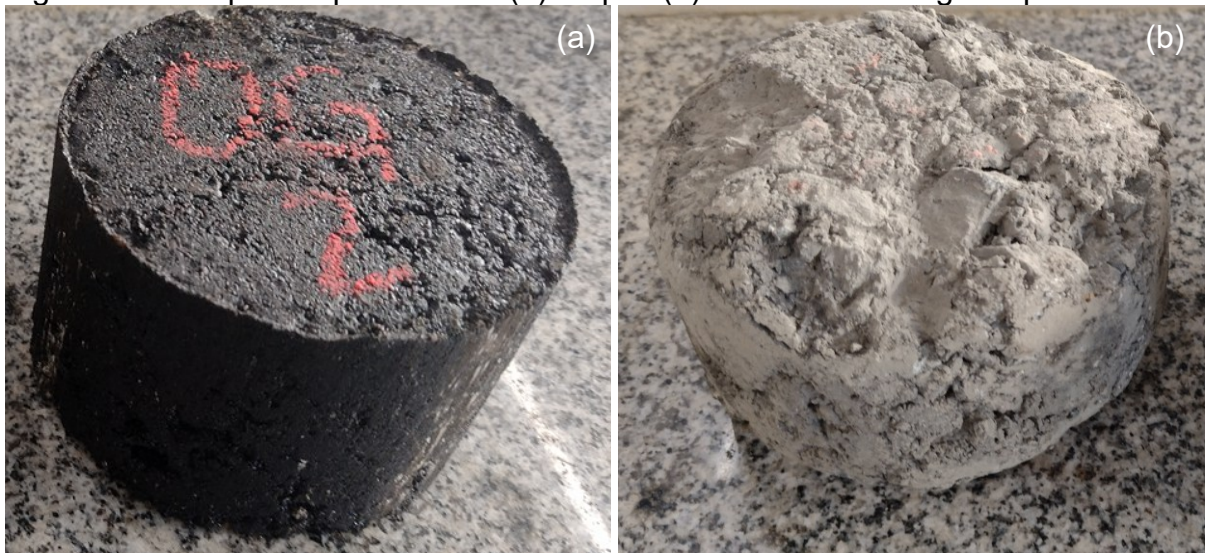
Além dos métodos já descritos para a obtenção dos índices físicos (DNIT 428/ME), estabilidade e fluência Marshall (DNIT 447/ME), os corpos de prova foram submetidos também ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136/ME) e desgaste por abrasão (DNIT 383/ME), conforme Figura 21.

Figura 21 – Equipamentos para a realização de ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) e tambor para desgaste por abrasão (b).



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 22 – Corpos de prova antes (a) e após (b) o ensaio de desgaste por abrasão.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Para o ensaio de desgaste por abrasão, o corpo de prova, com réplica, teve sua massa inicial aferida e submetido, individualmente, ao tambor da máquina *Los Angeles*, previamente limpo e sem carga abrasiva por 300 revoluções, por cerca de 10,2 minutos à temperatura ambiente. Após o número completo de revoluções, o

resquício da amostra foi limpo e sua massa remanescente anotada. A diferença proporcional entre as massas caracteriza o desgaste por abrasão.

O ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, conforme DNIT 136/ME, utilizou a prensa mecânica disponível no laboratório, ajustado os pratos na geratriz do corpo de prova, com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente. A carga vertical de compressão foi aplicada progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, equivalente a 4800 c.mm/min, até o rompimento do plano diametral. O resultado foi calculado com auxílio de equação normatizada, que considera a carga máxima, o diâmetro e a altura do corpo de prova submetido ao ensaio.

Complementarmente os corpos de prova, após rompimento, foram submetidos à microscopia ótica para observação da interface entre agregados e ligante betuminoso.

3.2.4 Tratamento estatístico dos dados coletados

Após a realização dos procedimentos experimentais os dados coletados foram tratados estatisticamente com auxílio dos Softwares Excel e Statistica, em relação à análise de variância, para posterior apresentação e discussão dos resultados.

Para tal, estes foram plotados em gráficos, correlacionando as variáveis, por meio de curvas de tendência para a análise do comportamento do material. Sempre que relevante, a equação de regressão e o coeficiente de determinação foram apresentados junto a estes elementos gráficos. Quanto à ANOVA, com base na disponibilidade de réplicas e número de graus de liberdade, adotou-se um modelo linear, considerando a mistura em três elementos: percentual de fresado, percentual de ligante novo/complementar e demais agregados da composição, devidamente segregado entre os resultados para àquelas misturas que adotaram pó de pedra de origem granítica, daquelas que utilizaram pó de pedra de origem basáltica para compor a parcela de agregados miúdos da dosagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos, estruturados com base nos procedimentos experimentais realizados, juntamente com uma discussão voltada a valorização do resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos - RAP como agregado reciclado na camada de revestimento de pavimentos rodoviários.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

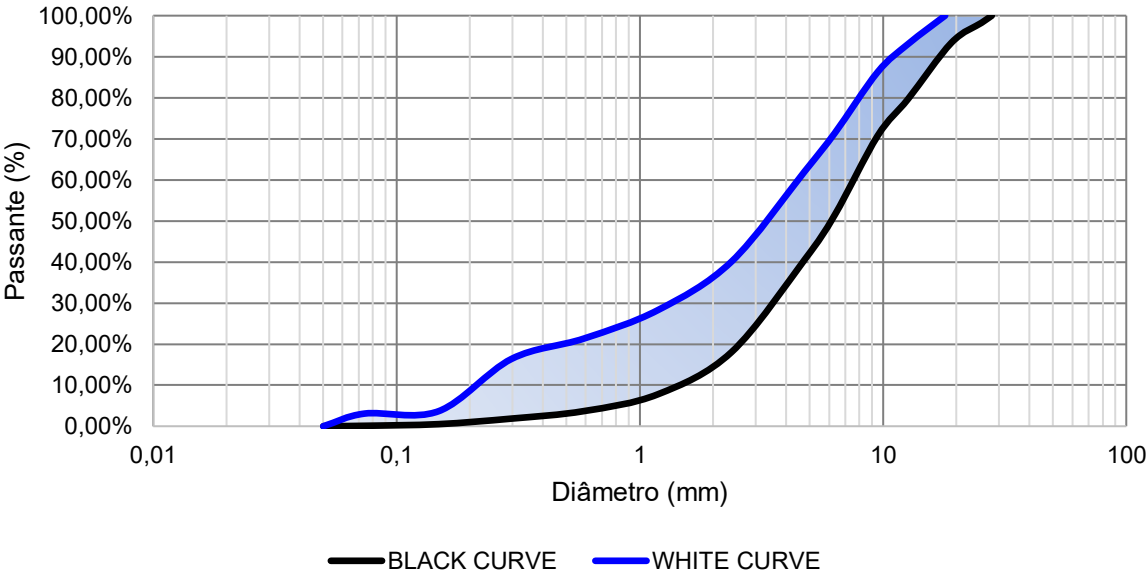
De acordo com os materiais e métodos aludidos, os seguintes resultados relevantes foram obtidos quanto à caracterização dos materiais e insumos submetidos à posterior dosagem de corpos de prova.

4.1.1.1 Resíduo de asfalto fresado

Por meio do ensaio de determinação da distribuição do tamanho de partícula por peneiramento, obteve-se a *black curve* (denominação padronizada da distribuição granulométrica, do tamanho de partícula, quando o RAP é considerado na sua totalidade, inclusive na presença dos aglomerados formados pela presença do ligante envelhecido preexistente no resíduo) e *white curve* (denominação padronizada da distribuição granulométrica, do tamanho de partícula, quando o RAP é considerado sem qualquer remanescente do ligante envelhecido, isto é, apenas considera-se os agregados da mistura após a devida extração do betume) em relação ao material.

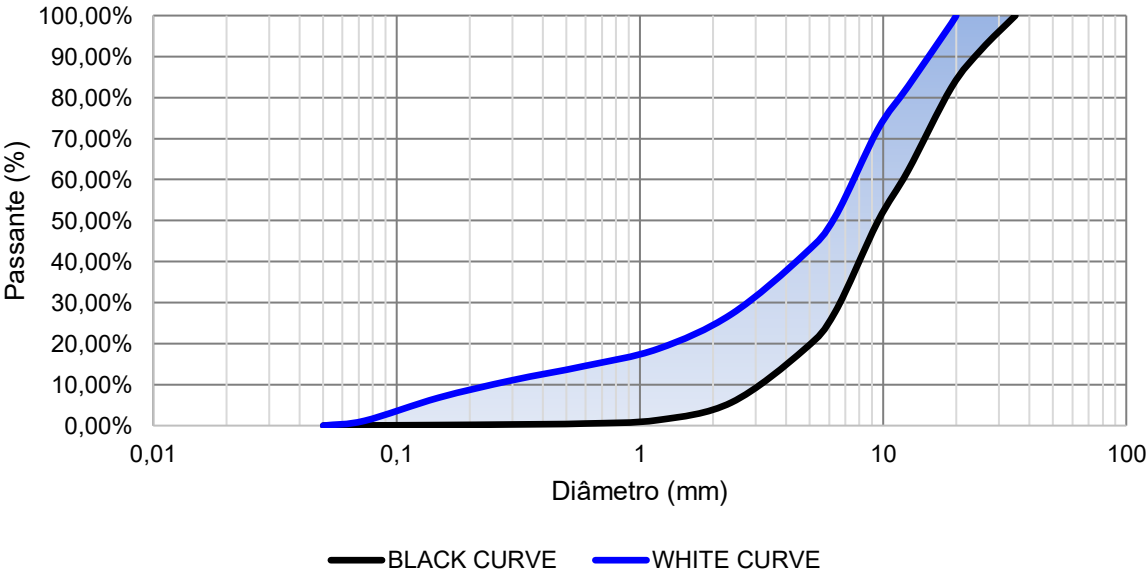
Os gráficos da Figura 23 demonstram os resultados de distribuição granulométrica encontrados através do ensaio de peneiramento, método amplamente utilizado para avaliar a composição dos materiais granulares, permitindo a quantificação da distribuição dos diferentes tamanhos de partículas presentes no conjunto material, realizado para a amostra coletada no ponto A, e a Figura 24 apresenta os resultados obtidos para a amostra coletada no ponto B.

Figura 23 – Distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado para o ponto A. No gráfico a curva preta representa a distribuição do tamanho de partícula na condição bruta - *black curve*, na presença de agregado e ligante envelhecido preexistente. Após a extração do betume, a curva de distribuição modifica-se para o comportamento apresentado pela curva azul - *white curve*. A área hachurada demonstra a variação no espectro da distribuição granulométrica resultante de aglomerações do RAP.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 24 – Distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado para o ponto B. No gráfico a curva preta representa a distribuição do tamanho de partícula na condição bruta - *black curve*, na presença de agregado e ligante envelhecido preexistente. Após a extração do betume, a curva de distribuição modifica-se para o comportamento apresentado pela curva azul - *white curve*. A área hachurada demonstra a variação no espectro da distribuição granulométrica resultante de aglomerações do RAP.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

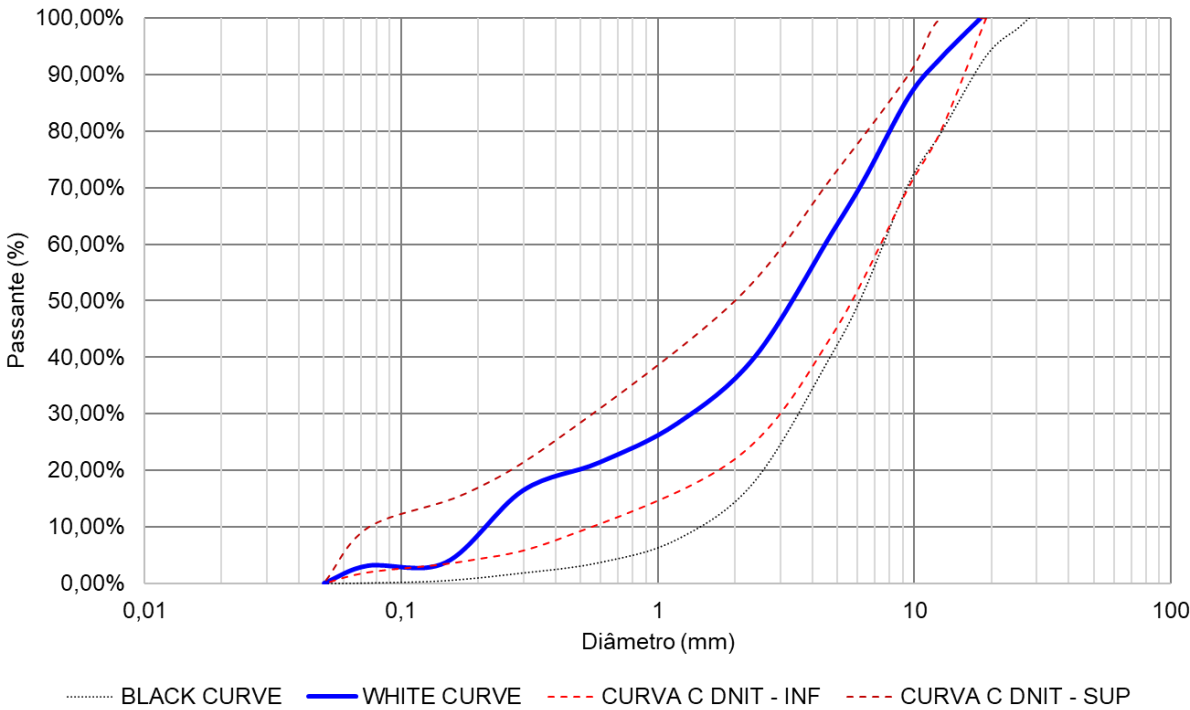
Como resultado, percebe-se que há uma maior presença de ligante nas faixas de menor granulometria, em ambas as amostras, justamente por relação da maior área superficial disponível no volume de agregados de menor dimensão, em conformidade com o *review* de Tarsi, Tataranni e Sangiorgi, (2020). É de fácil identificação que após a extração do betume preexistente houve uma mudança significativa na graduação dos agregados. A área hachurada representa a variação no tamanho de partículas causada pela ação do ligante e suas respectivas aglomerações.

Para o resíduo coletado no ponto A, a *black curve* apresenta um coeficiente de graduação de 1,13, enquanto que, após a extração do ligante, este valor sobe para 1,98, se tornando mais distribuída. Para o resíduo coletado no ponto B, por sua vez, a *black curve* apresenta um coeficiente de graduação de 1,12, enquanto que, após a extração do ligante, este valor sobe para 4,50, havendo uma concentração maior de finos. Assim, denota-se que no material fresado o ligante tem um efeito maior em aglomerar as partículas de menor dimensão, devendo esta propriedade ser considerada no dimensionamento de misturas. O ressalto na *white curve* do ponto A é justificado pela presença de *filler* na mistura, com diâmetro inferior à malha 200, material não identificado no ponto B.

Quando comparado os resultados às especificações técnicas, em relação à curva C de dosagem padrão DNIT, de acordo com os gráficos da Figura 25 e Figura 26, percebe-se que os agregados utilizados em ambas as misturas originais do pavimento encontram-se dentro dos limites inferiores e superiores estabelecidos. No entanto, se considerado os efeitos do ligante no fresado, a granulometria bruta do resíduo estaria fora da faixa de especificações, requerendo ajustes de dosagem.

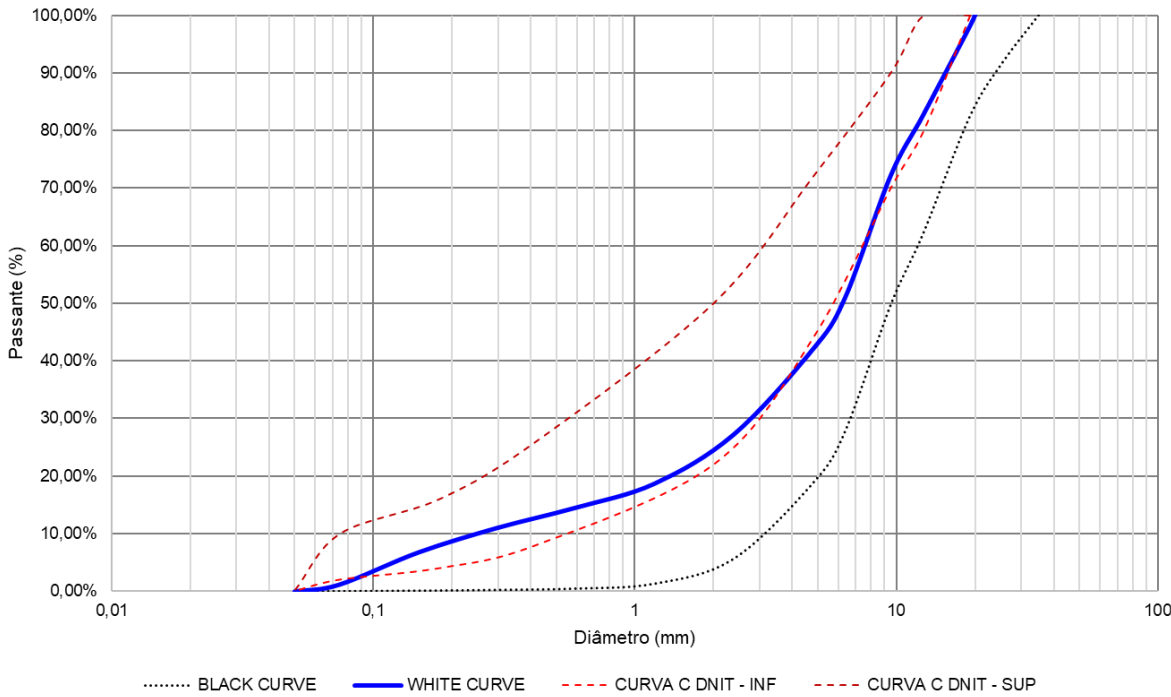
Para o RAP coletado no ponto A, o diâmetro máximo característico do agregado foi identificado como 12,70 mm (19,10 mm considerando a ação do ligante), enquanto em relação ao ponto B, este foi identificado como 18,00 mm (27,00 mm considerando a ação do ligante). O Quadro 8 apresenta um resumo dos índices relativos às distribuições granulométricas.

Figura 25 – Comparação da distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado coletado no ponto A em relação à curva de dosagem “C” do DNIT.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 26 – Comparação da distribuição granulométrica do resíduo de asfalto fresado coletado no ponto B em relação à curva de dosagem “C” do DNIT.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Quadro 8 – Resumo dos índices de distribuição granulométrica para o RAP coletado.

Índices	Ponto A		Ponto B	
	<i>black curve</i>	<i>white curve</i>	<i>black curve</i>	<i>white curve</i>
Diâmetro efetivo (mm)	19,10 mm	12,70 mm	27,00 mm	18,00 mm
Coefficiente de uniformidade	5,06	20,45	3,90	32,00
Coefficiente de curvatura	1,13	1,98	1,12	4,50

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

O diâmetro efetivo (ou diâmetro máximo) informado corresponde ao diâmetro equivalente àquele em que o material é passante em 95% da massa. O coeficiente de uniformidade adotado é uma razão entre o diâmetro na qual 60% do material é passante, sobre o diâmetro na qual apenas 10% do material é passante; valores menores que 5 são considerados uniformes, 5 a 15 mediantemente uniformes e acima de 15, desuniformes quanto à distribuição. O coeficiente de curvatura mede a graduação com base nos diâmetros em que 30%, 60% e 10% do material é passante. Valores entre 1 e 3 indicam boa graduação, enquanto resultados maiores indicam materiais de má graduação, com curva mais aberta.

Em relação ao percentual de betume envelhecido, preexistente nas amostras, identificou-se que no ponto A o teor corresponde a 5,49%, enquanto que no ponto B o valor encontrado foi de apenas 3,90%. Tanto por quesitos de granulometria, quanto por percentual de betume, é evidente a variabilidade e heterogeneidade deste resíduo.

Em relação aos índices físicos, quanto às massas específicas dos resíduos coletados, os resultados estão expressos no Quadro 9. A massa unitária possui dependência em relação à densidade da mistura, tamanho, geometria e vazios dos agregados, além do grau de encaixe entre as partículas. Quanto ao índice de forma, o resíduo de asfalto fresado coletado no Ponto A apresentou um coeficiente de 2,163, estando entre a definição cúbica e lamelar, e apresentando uma textura com certa rugosidade. Após a eliminação do ligante envelhecido, o índice sofreu uma redução para 1,888, evidenciando o efeito de aglomeração das partículas e formação, em parte, lamelar do resíduo a partir do processo de fresagem. O resíduo do ponto B, por sua vez, apresentou um coeficiente de 1,955, apresentando uma distribuição mais

cúbica, e apresentando uma textura com ainda mais rugosidade em relação ao material do ponto A. Após a eliminação do ligante envelhecido, o índice sofreu um aumento para 2,074, evidenciado que no processo da fresagem utilizado neste local, o resíduo foi gerado com características mais cúbicas. Os gráficos da Figura 27 ilustram a distribuição do índice de forma das amostras verificadas, verificando-se uma expressiva variação do índice de forma entre o RAP na condição bruta (aglomerado em função do ligante preexistente) e o índice de forma dos agregados livres de qualquer aglomerante, corroborando com a verificação obtida através do ensaio de determinação do tamanho de partícula por peneiramento (granulometria).

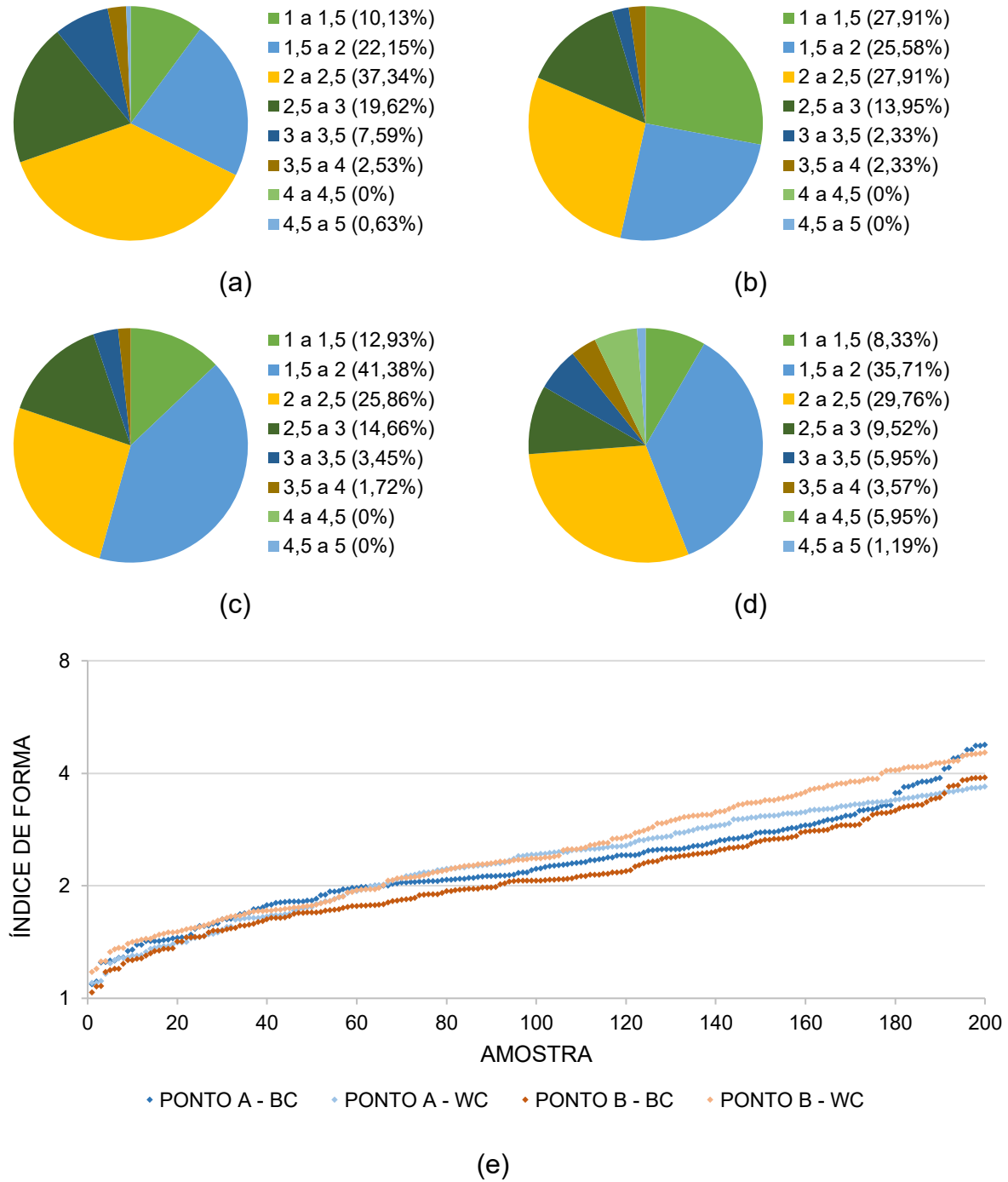
Quadro 9 – Resultados da caracterização física do resíduo fresado em relação à densidade do material.

Índice Físico	Ponto A	Ponto B
Massa unitária (g/cm ³)	1,30 g/cm ³	1,27 g/cm ³
Massa específica (g/cm ³)	2,53 g/cm ³	2,38 g/cm ³

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Em relação à caracterização térmica, os gráficos da Figura 28 e Figura 29 apresentam os resultados dos ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica. Em relação à TG, conforme Figura 28, para a amostra do ponto A, há uma perda de massa expressiva entre 300 e 525 °C, sendo atenuado até 725 °C, ponto em que se verifica a perda da amostra total de aproximadamente 18,93%, caracterizando, conjuntamente com evento exotérmico da ATD a 525 °C, a decomposição e perda de materiais voláteis e orgânicos (parcela do ligante preexistente, por exemplo). A variação na curvatura, dado os dois momentos de perda de massa indica a presença de dois minerais distintos na composição do resíduo. Para a amostra coletada no ponto B, por sua vez, em relação à TG, conforme Figura 29, há uma perda de massa expressiva entre 275 e 525 °C, o qual atenua-se até 600 °C, ponto em que se verifica a perda da amostra total de aproximadamente 17,51%. Verifica-se neste caso a decomposição e perda de materiais voláteis e orgânicos, também caracterizado pela curva ATD, indicando que a liberação de calor ocorreu por volta de 500 °C.

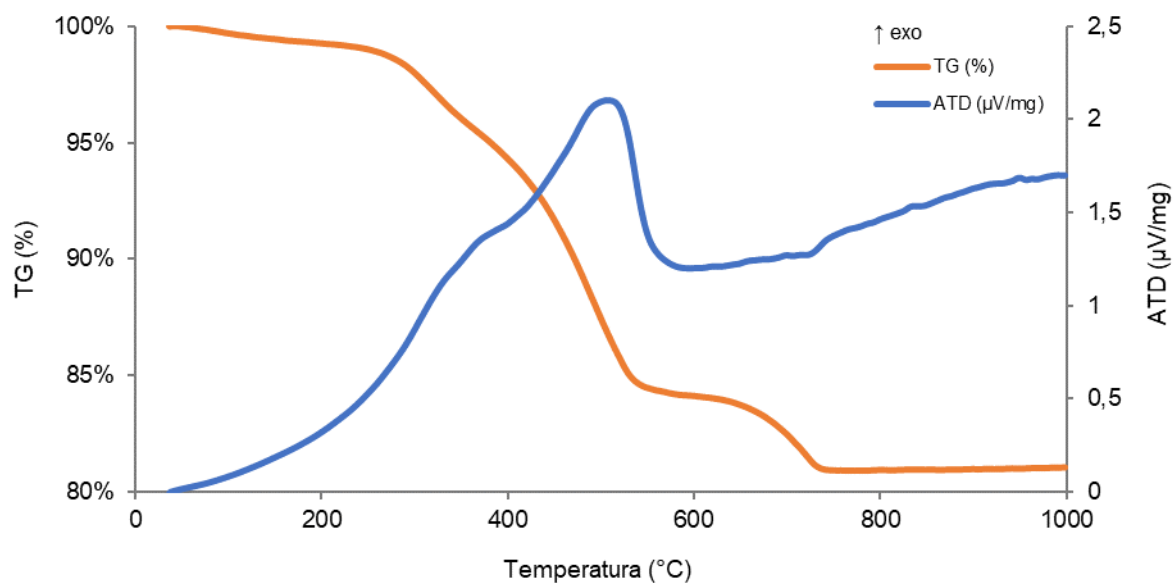
Figura 27 – Distribuição do índice de forma do RAP coletado para (a) o resíduo bruto coletado no ponto A, (b) o resíduo coletado no ponto A após a extração do ligante envelhecido, (c) o resíduo bruto coletado no ponto B, (d) o resíduo coletado no ponto B após a extração do ligante envelhecido, e (e) a plotagem dos pontos individuais organizados em rol.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

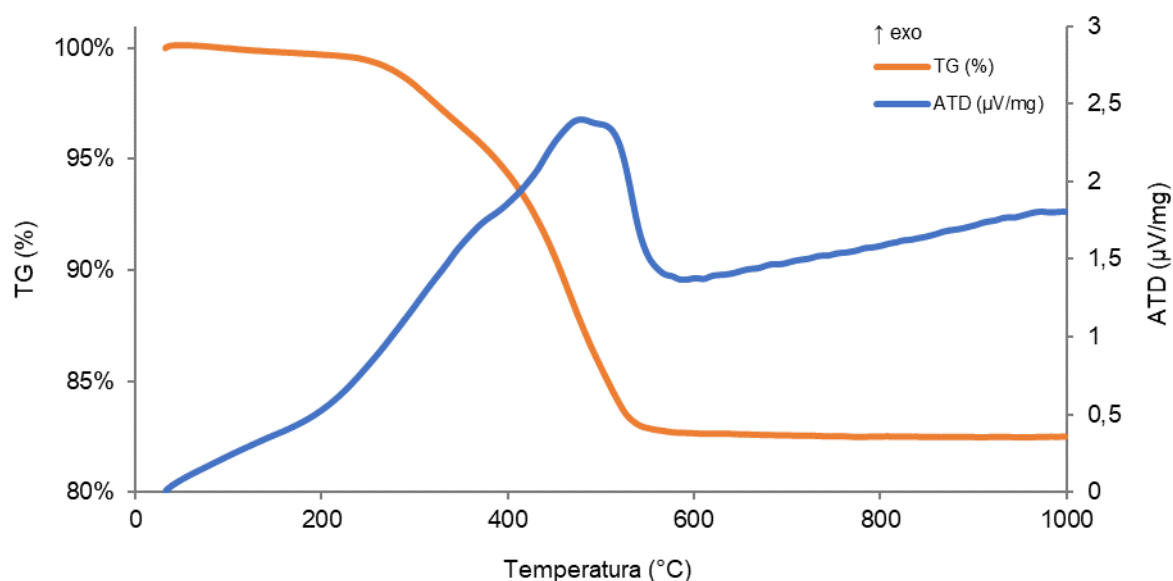
Legenda: BC: partículas do resíduo fresado com ligante envelhecido, situação bruta de campo.
WC: agregados do resíduo fresado após extração do ligante preexistente.

Figura 28 – Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica no RAP do ponto A.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 29 – Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica no RAP do ponto B.

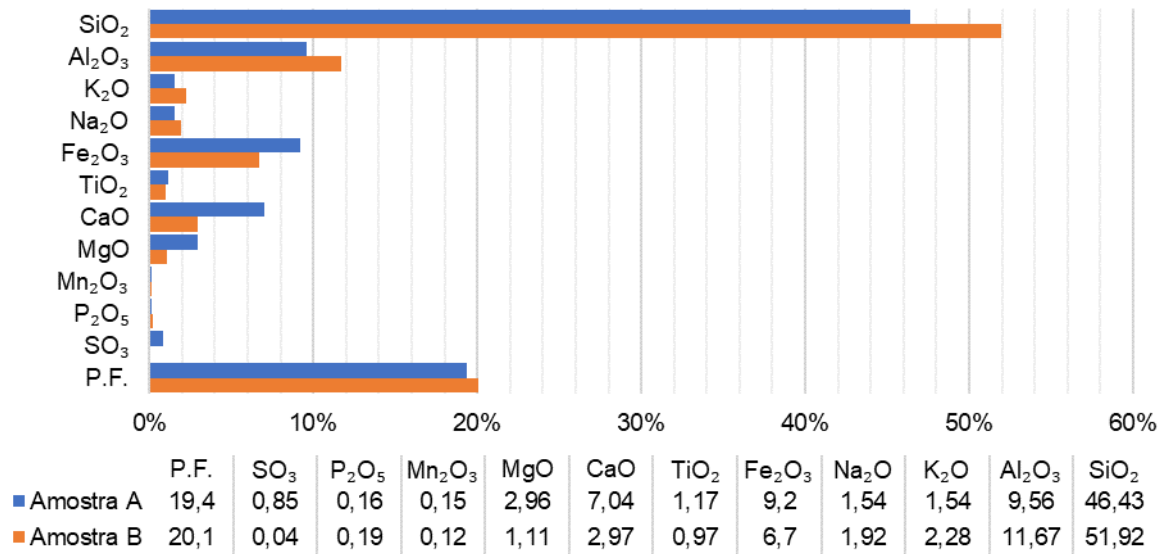


Fonte: Elaboração do Autor (2024).

A partir da caracterização térmica dos diferentes amostras, torna-se possível identificar uma relativa variação entre os diferentes locais coleta do RAP. Essas diferenças indicam heterogeneidade dos resíduos de fresagem.

No gráfico da Figura 30, observa-se os resultados da caracterização química das amostras realizadas por Fluorescência de Raios-X (FRX).

Figura 30 – FRX do RAP coletado no ponto A e no ponto B.

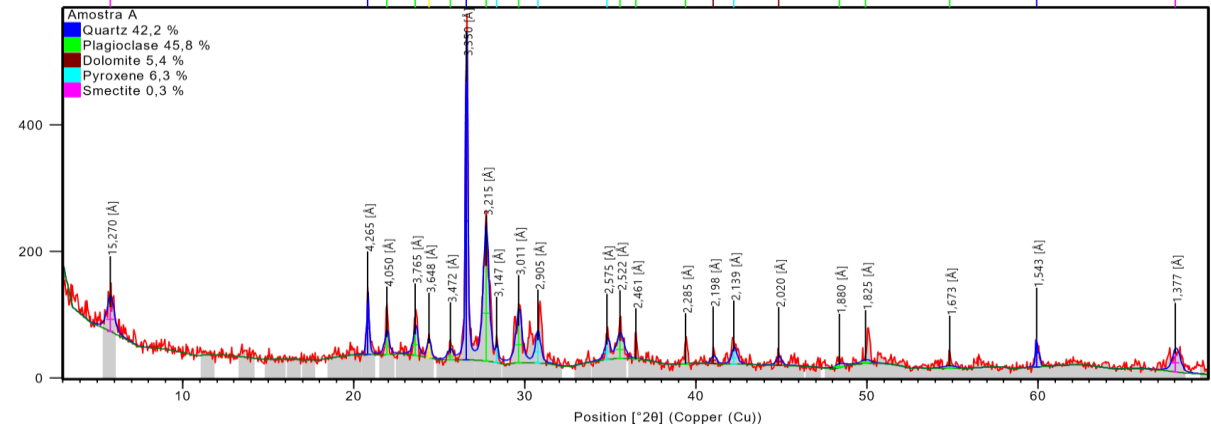


P.F. = Perda ao fogo.
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Torna-se possível identificar que mais de 50% do resíduo é composto por sílica e alumínio, proveniente dos agregados da mistura e que ocorreu cerca de 20% de perda ao fogo, conforme também caracterizados pelos ensaios térmicos.

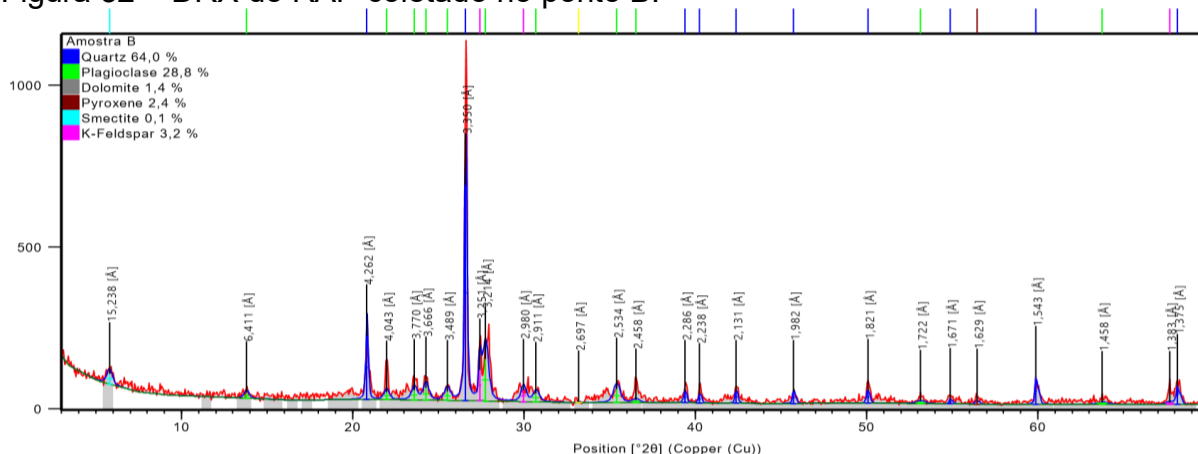
Em relação aos resultados da caracterização por DRX, os difratogramas das Figura 31 e Figura 32 demonstram a caracterização obtida, corroborando para com a caracterização realizada por FRX. Quanto ao resíduo coletado no ponto A, se observa cerca de 42,2% de Quartzo (SiO₂), 45,8% de Plagioclásio (grupo feldspato), 5,4% de Dolomita (CaMg(CO₃)₂), 6,3% de Piroxênio (grupo silicato) e 0,3% de Esmeclita (grupo argilomineral), além de fases amorfas que foram desconsideradas no método semiquantitativo realizada pelo laboratório.

Figura 31 – DRX do RAP coletado no ponto A.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 32 – DRX do RAP coletado no ponto B.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Quanto ao resíduo coletado no ponto B, se observa cerca de 64,0% de Quartzo (SiO_2), 28,8% de Plagioclásio (grupo feldspato), 1,4% de Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), 2,4% de Piroxênio (grupo silicato), 0,1% de Esmedtita (grupo argilomineral), e 3,2% de K-feldspatos, além de fases amorfas.

4.1.1.2 Caracterização granulométrica dos agregados

Em relação aos índices físicos, quanto às massas unitárias, específicas reais e aparentes, absorção e outras caracterizações dos agregados utilizados como insumos composicionais do processo, os resultados estão expressos sistematicamente no Quadro 10.

Quanto aos resultados observa-se a variação de massa específica de alguns materiais tendo em vista as diferentes fontes de origem, bem como a elevada absorção de água do material pó de granito, sendo uma das explicações do maior consumo de ligante asfáltico para as misturas que consideraram esta solução na dosagem. A maior absorção deve-se tanto à maior área superficial, quanto ao maior volume de poros abertos nas partículas do material.

O gráfico da Figura 33 ilustra a distribuição do índice de forma dos agregados, conforme resultados do ensaio realizado.

Quadro 10 – Resumo das caracterizações físicas dos agregados em relação à densidade, absorção, perda e índice de forma.

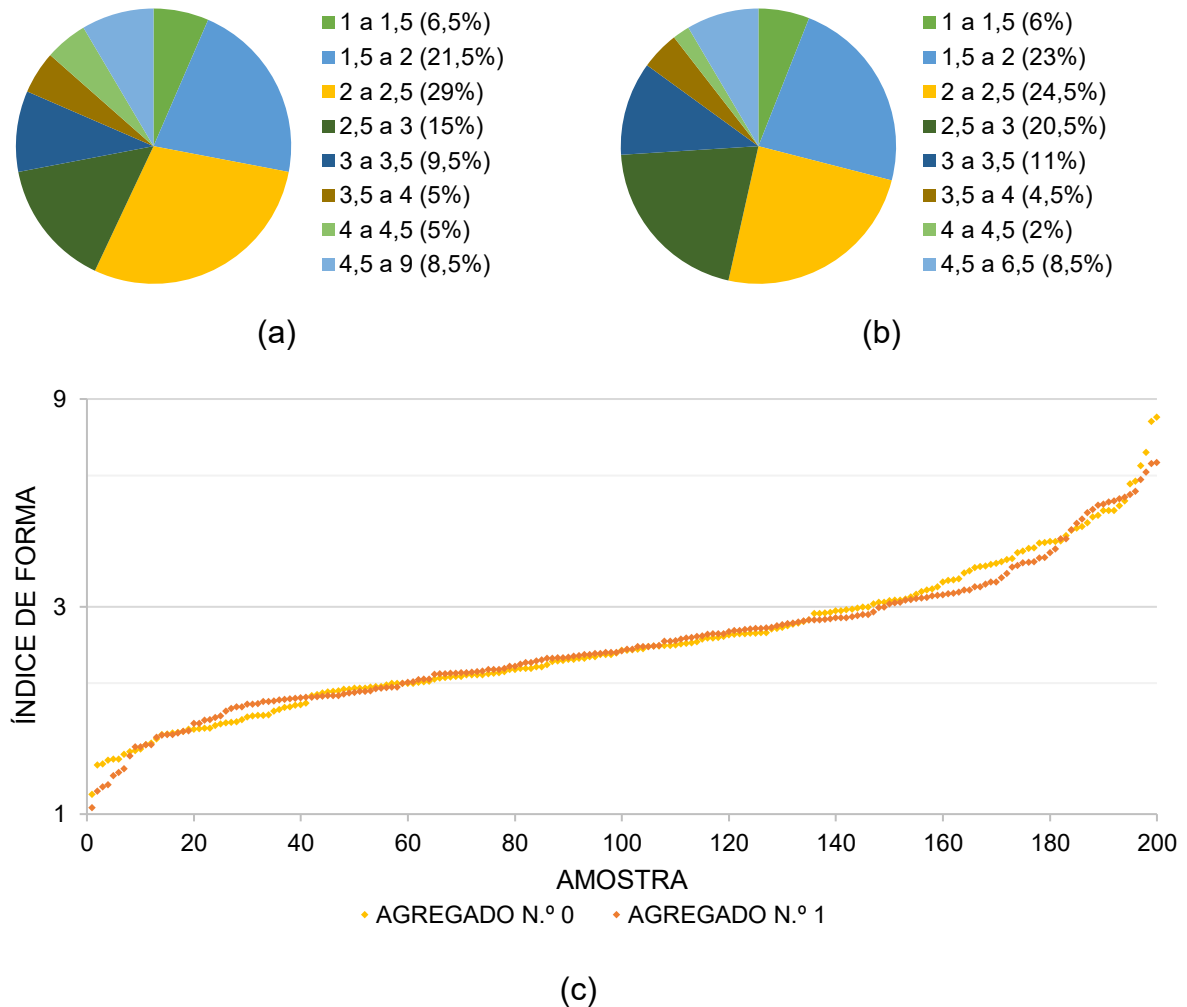
Índice Físico	Brita n.º 1 Basalto	Brita n.º 0 Basalto	Pó de Granito	Pó de Basalto
Massa unitária (g/cm³)	1,54 g/cm³	1,53 g/cm³	1,56 g/cm³	1,68 g/cm³
Massa específica na condição seca (g/cm³)	2,91 g/cm³	2,87 g/cm³	2,32 g/cm³	2,85 g/cm³
Massa específica na condição saturada de superfície seca (g/cm³)	2,94 g/cm³	2,92 g/cm³	2,72 g/cm³	2,95 g/cm³
Massa específica efetiva (g/cm³)	2,92 g/cm³	2,90 g/cm³		
Absorção de água (%)	0,93%	1,51%	10,02%	3,03%
Perda de amostra durante a lavagem, umidade higroscópica ou impurezas (%)	1,97%	5,34%		
Índice de Forma (adimensional)	2,401	2,410		

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Conforme Figura 33, os gráficos demonstram o percentual da amostra conforme faixas de índice de forma para (a) o agregado graúdo de graduação n.º 1, (b) o agregado graúdo de graduação n.º 0, e (c) a plotagem dos pontos individuais organizados em rol.

A absorção de água, representa o aumento da massa dos agregados devido ao preenchimento dos poros permeáveis com água, podendo ser verificado mais expressivo no agregado com menores dimensões, em função da maior área superficial exposta a poros abertos. Em relação à diferença de densidades, a massa específica na condição seca reflete o quociente entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo poros permeáveis e impermeáveis, mas excluindo os vazios entre partículas; a massa específica na condição saturada de superfície seca, por sua vez, revela o mesmo quociente, mas em relação à condição saturada de superfície seca, situação em que os poros permeáveis estão preenchidos com água, sem que haja umidade superficial livre (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021c).

Figura 33 – Distribuição do índice de forma dos agregados para (a) o agregado graúdo de graduação n.º 1, (b) o agregado graúdo de graduação n.º 0, e (c) a plotagem dos pontos individuais organizados em rol.

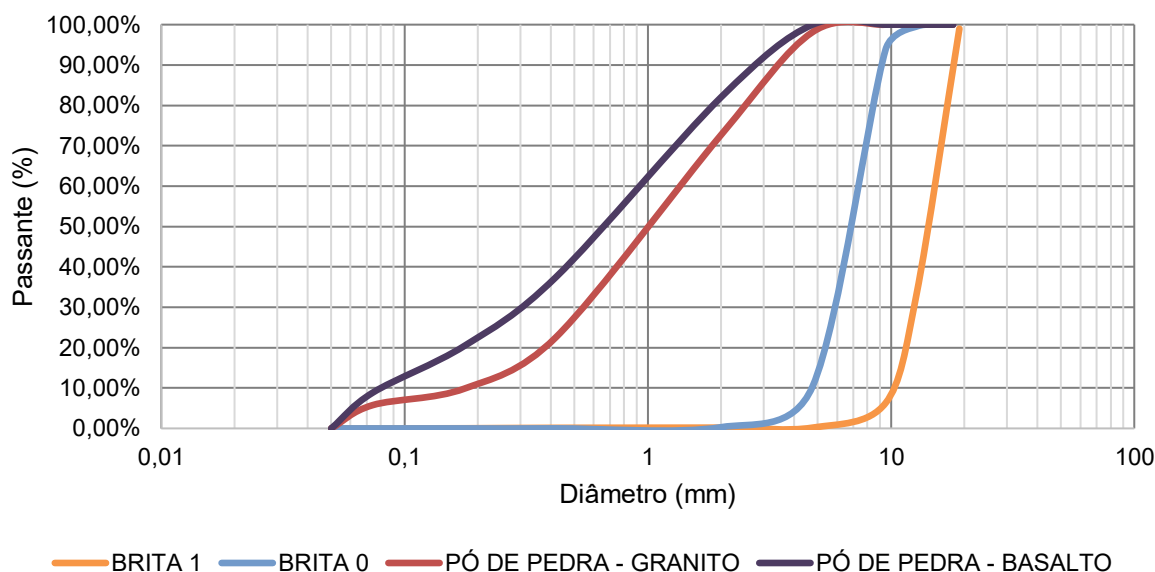


Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Em relação à distribuição granulométrica dos agregados, a curva representativa de cada faixa está indicada na imagem da Figura 34.

A partir da mistura dos materiais, com base nas curvas granulométricas apresentadas, em proporções adequadas, estes podem promover o intertravamento adequado das partículas necessárias ao “esqueleto” de um pavimento, possibilitando adequada transferência de cargas. As curvas de mistura foram apresentadas através do Apêndice A.

Figura 34 – Distribuição granulométrica do tamanho de partícula, por peneiramento, dos diferentes agregados utilizados como insumos composicionais para os corpos de prova amostrais.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

4.1.1.3 Caracterização do ligante

Os resultados de caracterização do ligante asfáltico, conforme metodologia descrita pelos ensaios normatizados, estão apresentados no Quadro 11, incluindo a comparação com os limites de referência. Quanto à temperatura no ensaio de ponto de amolecimento, destaca-se que a graduação do termômetro disponível, a cada 2 °C, permite inferir que o resultado pode estar dentro do limite aceitável pelas especificações, tendo sido realizada a interpolação para a obtenção da medida.

Quadro 11 – Resultados de caracterização do ligante, CAP 50/70, novo (ou complementar).

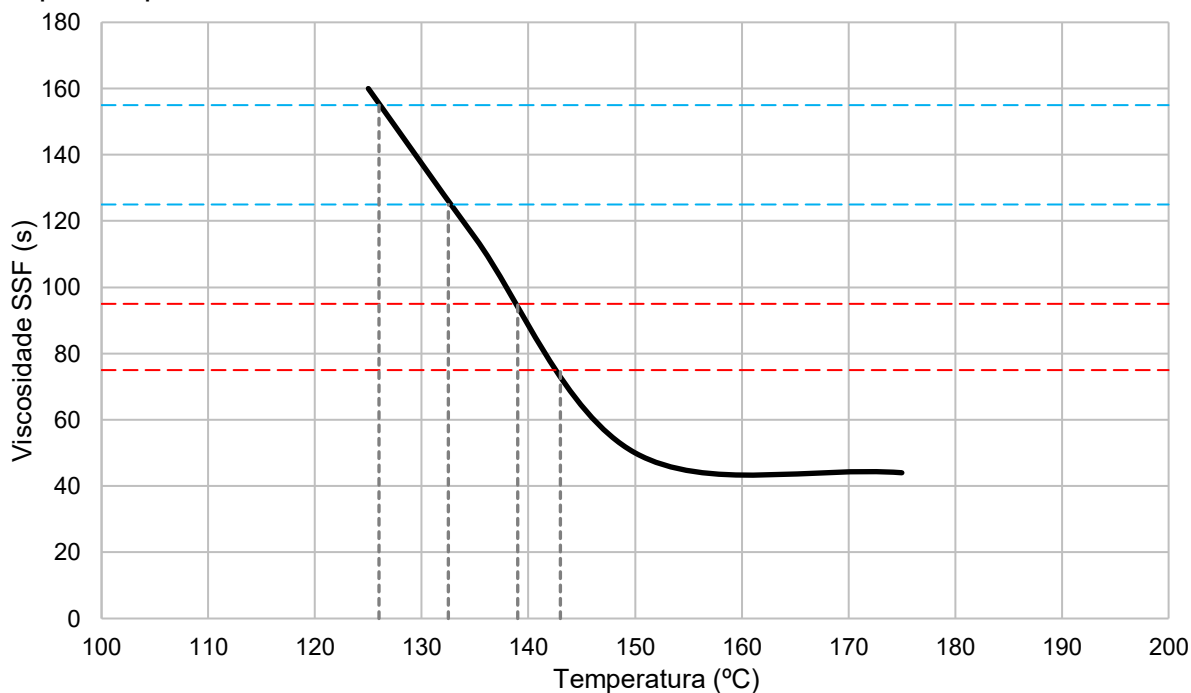
Índice Físico	Ensaio	Limites	Norma
Penetração (0,01mm)	68	50 a 70	NBR 6576 DNIT 155-ME
Ponto de amolecimento (°C)	46	≥ 46	NBR 6560 DNIT 131-ME
Índice de suscetibilidade térmica (adm.)	-1,5	-1,5 a 0,7	DNIT 95-ME
Viscosidade (155°C)	50 SSF (10,65 mm²/s)		NBR 14.950

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Em relação ao índice de suscetibilidade térmica apresentado, este parâmetro demonstrou a sensibilidade do CAP às variações de temperatura, calculado em função dos resultados da temperatura do ponto de amolecimento e penetração. Valores superiores a 0,7 indicam CAPs oxidados, enquanto valores inferiores a -1,5 relacionam-se a CAPs sensíveis a elevadas temperaturas, caso aplicável ao material em tela.

Quanto aos aspectos reológicos, os resultados de viscosidade Saybolt Furol estão representados sistematicamente no gráfico da Figura 35. Conforme os resultados experimentais, a viscosidade Saybolt Furol (SSF - segundos Saybolt Furol) a 135 °C corresponde a 115 SSF (24,56 mm²/s), a 155 °C equivale a 50 SSF (10,65 mm²/s) e a 175 °C representa 44 SSF (9,36 mm²/s). A conversão entre a viscosidade Saybolt Furol e a viscosidade cinemática foi realizada conforme parâmetros da ASTM D2161. A partir da média dos pontos coletados a curva de regressão foi utilizada para determinar as faixas ótimas de trabalho, tanto para a moldagem, quanto compactação dos corpos de prova amostrais. No gráfico, a linha tracejada vermelha indica os limites de usinagem, enquanto a linha tracejada azul indica os limites de compactação.

Figura 35 – Curva de viscosidade Saybolt Furol em função da temperatura do ligante asfáltico CAP 50/70 complementar à mistura asfáltica utilizado na dosagem dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Conforme destacado, a partir da curva de pontos realizada, pode-se inferir que as temperaturas ideais para a usinagem, isto é, moldagem dos corpos de prova pode ser alcançada na faixa entre 139 °C e 143 °C (linha vermelha tracejada), enquanto a faixa de compactação ótima está compreendida entre 126 °C e 132,5 °C (linha azul tracejada).

4.2 ETAPA 1 – DADOS PRELIMINARES E DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE LIGANTE NA DOSAGEM

De forma a melhor organizar os dados referente às dosagens preliminares, realizadas a partir da variação do ligante asfáltico novo nas diferentes alternativas de mistura, com diferentes percentuais de RAP e pós de pedra, foram plotados e registrados fotograficamente os resultados na forma de “fichas”.

No cabeçalho de cada ficha consta o código identificador da mistura de dosagem, bem como o indicativo do teor de ligante (novo) ótimo da mistura. Isto somente é possível ao traçar a linha de tendência entre pontos amostrais com diferentes teores de ligante. Na sequência são apresentados os registros fotográficos da prova e contraprova de cada teor analisado no circuito.

Logo em seguida, são apresentados os gráficos de dimensionamento de misturas asfálticas. Os pontos individuais foram plotados como um pequeno “x” preto, enquanto a linha de tendência segue uma linha contínua azul. A linha vertical tracejada vermelha indica a posição do ponto ótimo, enquanto as linhas pontilhadas horizontais indicam os limites inferiores e superiores de Norma, quando existente.

O primeiro gráfico corresponde à densidade máxima teórica (Dmt) em relação ao teor de ligante. Seu comportamento praticamente linear, com pouca curvatura, indica claramente que com o aumento do teor de ligante na mistura asfáltica há uma redução da densidade esperada na situação de total compacidade. Este comportamento é comum em todas as variações de inclusão do RAP, tanto no agregado graúdo, como no agregado miúdo.

O segundo gráfico corresponde à densidade real aparente (Gmb) em relação ao teor de ligante. De seu comportamento côncavo para baixo, é possível inferir que há um ponto ótimo, onde se dá a maior compactação a um teor ótimo de ligante (ou próximo deste). Caso particular ocorre na mistura com 25% do agregado graúdo substituído por RAP, na condição de utilização de pó de pedra como agregado

miúdo, e na mistura com 100% de fresado, situação em que a curva tende à um trecho linear no intervalo de ligante testado.

O terceiro e quarto gráfico, correspondem, respectivamente, ao volume de vazios (limite normativo entre 3,0% e 5,0%) e o volume de agregado mineral (limite normativo mínimo de 15,0%), ambos por teor de ligante. Ambos apresentam um comportamento côncavo para cima. Caso particular ocorre na mistura com 25% do agregado graúdo substituído por RAP, na condição de utilização de pó de pedra como agregado miúdo, e na mistura com 100% de fresado, situação em que a curva tende à um trecho linear no intervalo de ligante testado.

O quinto e o sexto gráfico correspondem à relação betume/vazios (RBV - com limite normativo entre 75,0% e 82,0%) e a estabilidade Marshall por teor de ligante, respectivamente. Ambos os comportamentos apresentam certa concavidade para baixo, atingindo um pico na resistência de estabilidade. Caso particular aconteceu na estabilidade para a mistura de 50% de RAP, na condição de utilização de pó de granito como agregado miúdo, em que a concavidade tendeu para cima em função da dispersão no resultado da prova e contraprova no teor de 0,8%. O mesmo efeito pode ser observado na mistura com 100% de RAP como agregado graúdo e utilização de pó de granito como agregado graúdo.

O sétimo gráfico apresenta a plotagem da fluência Marshall (estabilidade x deformação) para as variações do ligante. É nítido a influência do aumento de ligante na composição, situação em que a resistência reduz e a deformabilidade aumenta.

Por fim, o oitavo gráfico apresenta a sobreposição entre a curva do volume de vazios e relação betume/vazios em relação ao teor de ligante. Como um comportamento natural, as duas curvas cruzam entre si em um nível de ligante, independente do eixo das ordenadas, formando uma espécie de “X”. Entre este cruzamento e os limites inferiores e superiores normativos, pode ser traçado uma reta intermediária, que indica com precisão adequada o teor ótimo de ligante da mistura.

Conforme pode ser observado nas fichas da Figura 36, Figura 37 e Figura 38, que tratam respectivamente das misturas com adoção de pó de granito, mas com uso de RAP na proporção de 0%, 25% e 50%, todas as alternativas apresentaram características que atendem aos requisitos normativos, havendo viabilidade para utilização prática.

Nas fichas da Figura 40, Figura 42 e Figura 44 são apresentados os resultados das misturas com adoção de pó de granito em que há uso de RAP na

proporção de 25%, 50% e 100% apenas na parcela de agregado graúdo. Todas as alternativas apresentaram características mínimas que atendem aos requisitos normativos, havendo viabilidade para utilização prática. No teor de 100% de fresado como agregado graúdo o intervalo de experimentação acabou não abrangendo o potencial teor ideal, no entanto, extrapolando-se os resultados, há uma tendência de atendimento próximo de 5,2% do ligante novo na mistura.

Nas fichas da Figura 41, Figura 43 e Figura 45 são apresentados os resultados das misturas com adoção de pó de granito em que há uso de RAP na proporção de 25%, 50% e 100% apenas na parcela de agregado miúdo. Apesar de alguns critérios estarem no limite, em tese os parâmetros normativos estão sendo atendidos, com exceção do teor de 100% de fresado como substituto total de agregado miúdo. Ocorre que se verifica falta de intertravamento dos agregados nestas misturas, em especial dos finos, isso pois, com a falsa granulometria indicada pela *black curve*, único parâmetro disponível no momento da segregação das granulometrias, na prática acaba tendo-se um descolamento descontrolado da curva prevista de dosagem. Este fenômeno é menor quando da substituição apenas dos agregados graúdos, isto pois, a área superficial é menor e os conjuntos aglomerados também.

Nas fichas da Figura 46, Figura 47 e Figura 48, respectivamente, são apresentados os resultados das misturas com adoção de pó de basalto, mas com uso de RAP na proporção de 0%, 25% e 50%. Assim como às misturas com uso de pó de granito, todas as alternativas apresentaram características que atendem aos requisitos normativos, havendo viabilidade para utilização prática.

Não foram realizados estudos para a utilização de RAP nas parcelas isoladas de agregado miúdo e/ou graúdo com uso de pó de basalto como complemento da fração miúda de dosagem em função dos resultados ordinários já verificados naqueles com utilização de pó de granito, bem como pela maior utilização de ligante novo requerido à essas misturas, não apresentando maior viabilidade.

Por fim, na ficha da Figura 39, que trata da mistura realizada 100% com resíduo fresado, indica, como previsto, o atendimento a todos os parâmetros normativos para a mistura de concreto asfáltico.

Figura 36 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 01, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 0% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 0% - REF.0

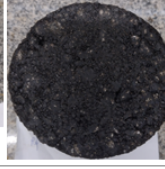
Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

5,00%

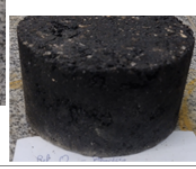
Registros fotográficos dos corpos de prova amostrais analisados



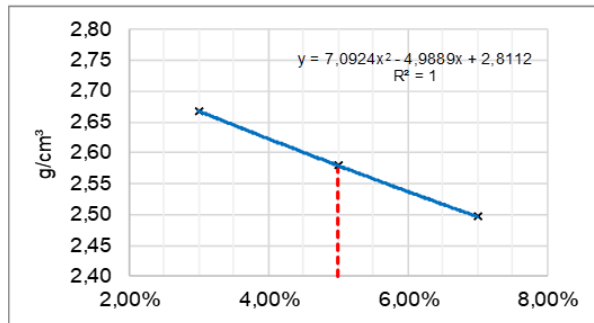
Teor de ligante (novo) $\cong$ 3%



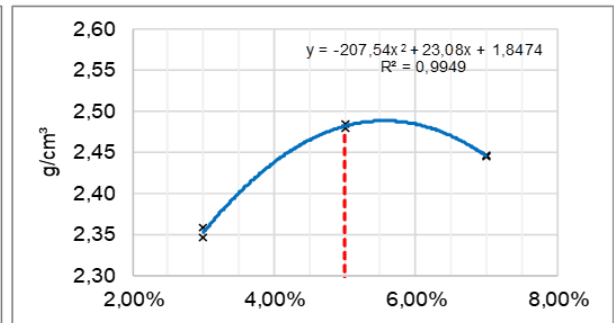
Teor de ligante (novo) $\cong$ 5%



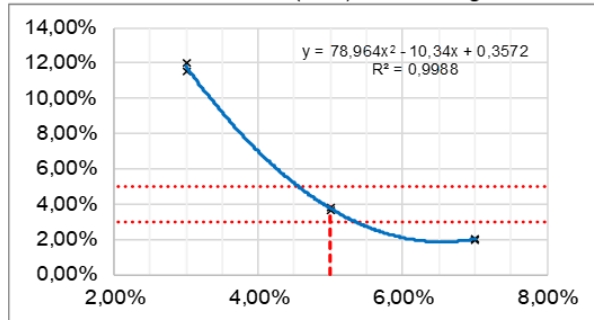
Teor de ligante (novo) $\cong$ 7%



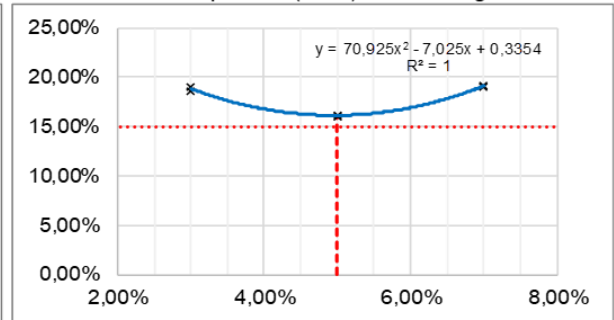
Dens. máx. teórica (Dmt) x Teor de ligante



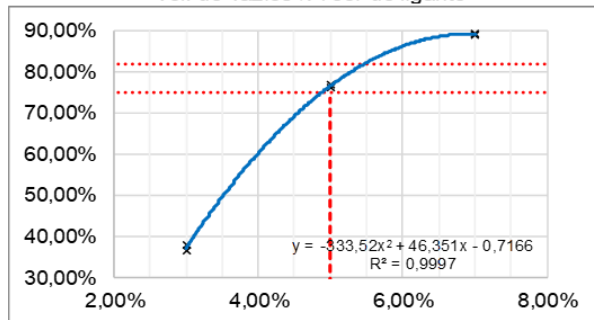
Dens. rel. aparente (Gmb) x Teor de ligante



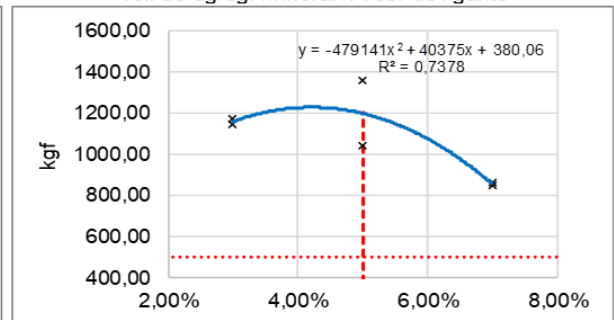
Vol. de vazios x Teor de ligante



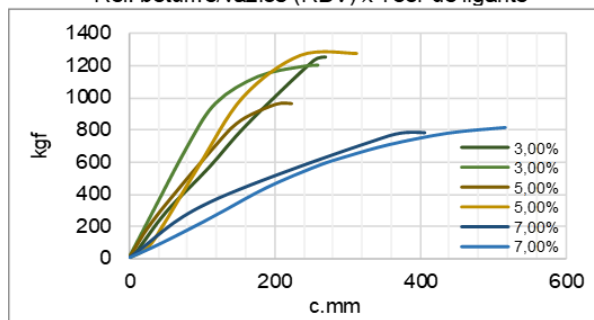
Vol. de agreg. mineral x Teor de ligante



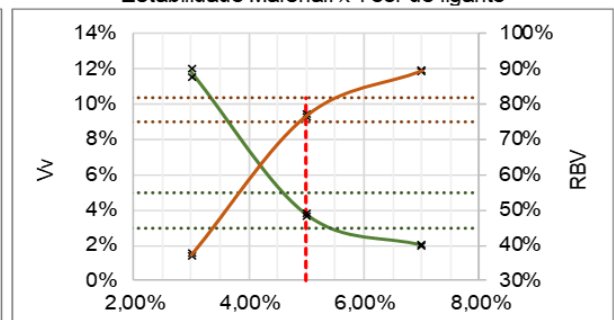
Rel. betume/vazios (RBV) x Teor de ligante



Estabilidade Marshall x Teor de ligante



Fluência Marshall (Estabilidade x Deformação)



Vol. de vazios e RBV x Teor de ligante

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 37 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 03, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 25% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 25% - REF.1

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

4,70%

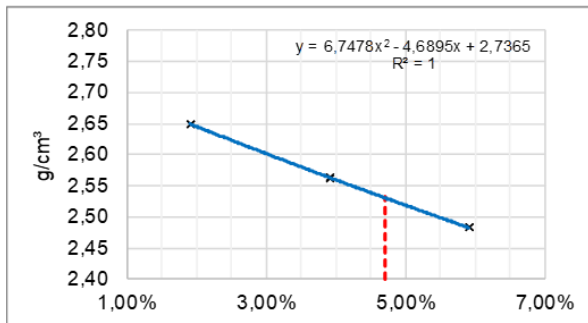
Registros fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



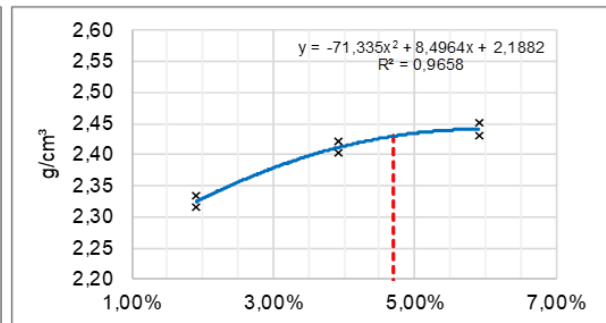
Teor de ligante (novo) $\cong$ 1,9%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 3,9%

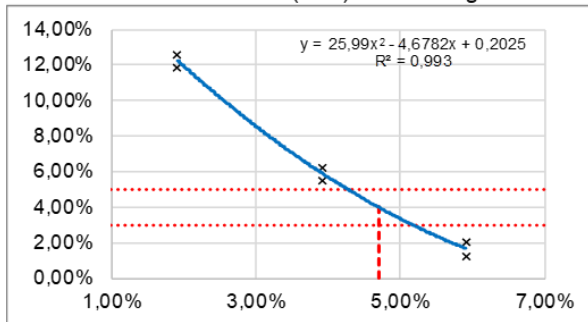
Teor de ligante (novo) $\cong$ 5,9%



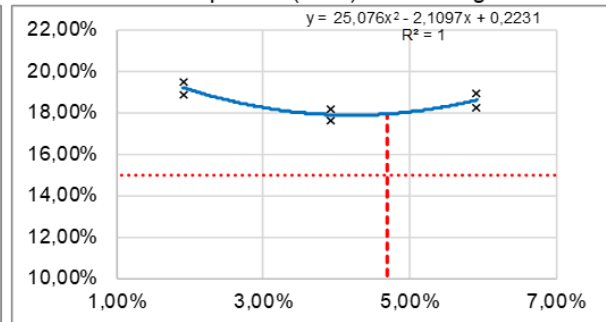
Dens. máx. teórica (Dmt) x Teor de ligante



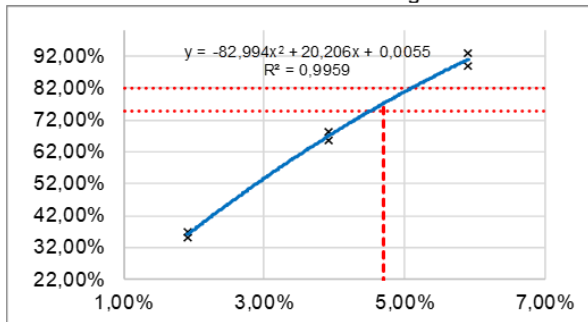
Dens. rel. aparente (Gmb) x Teor de ligante



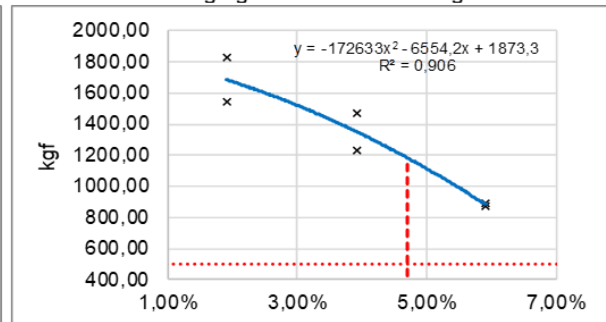
Vol. de vazios x Teor de ligante



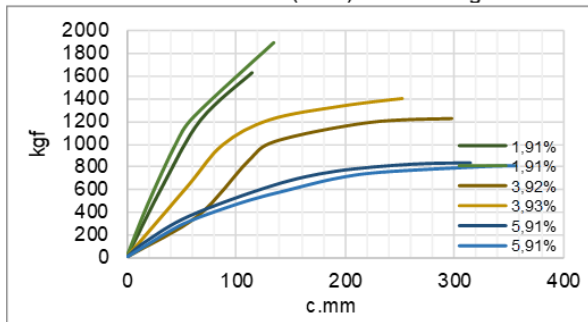
Vol. de agreg. mineral x Teor de ligante



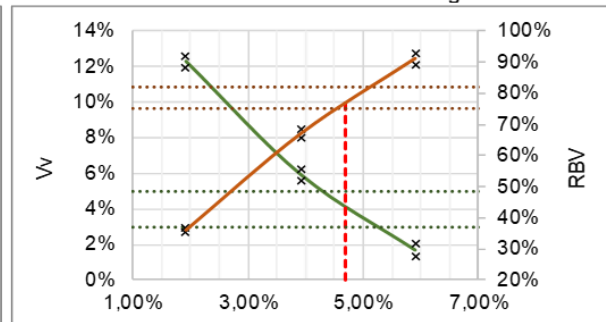
Rel. betume/vazios (RBV) x Teor de ligante



Estabilidade Marshall x Teor de ligante



Fluência Marshall (Estabilidade x Deformação)



Vol. de vazios e RBV x Teor de ligante

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 38 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 07, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 50% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 50% - REF. 2

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

3,10%

Registros fotográficos dos corpos de prova amostrais analisados



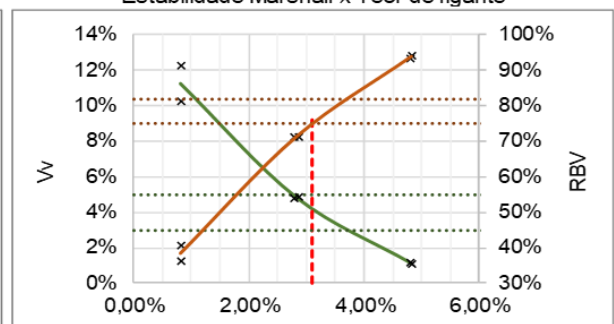
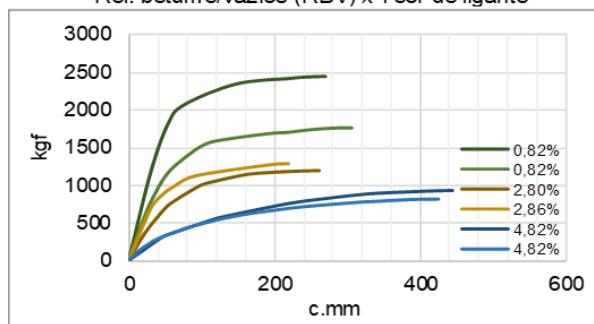
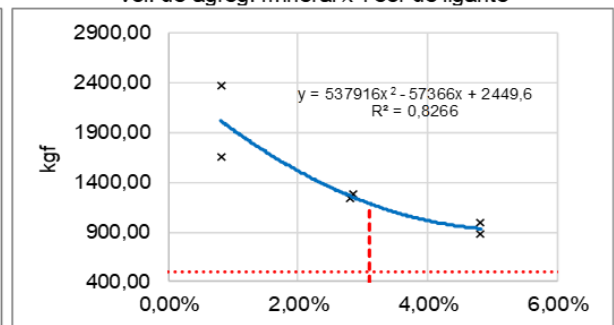
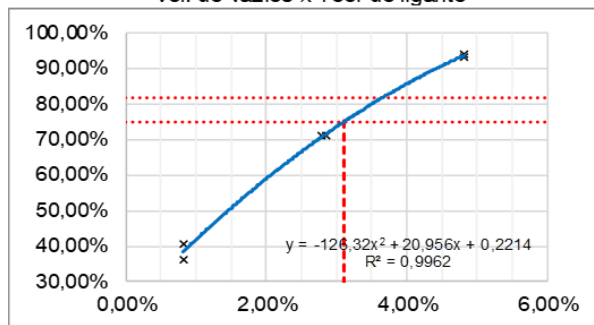
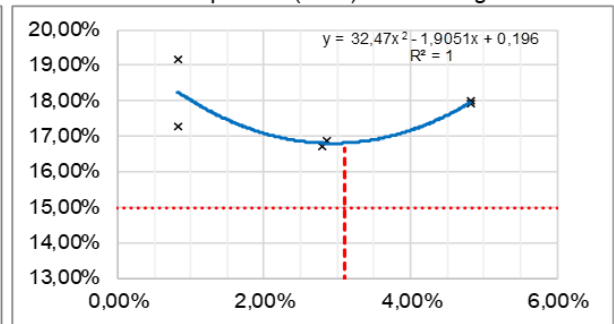
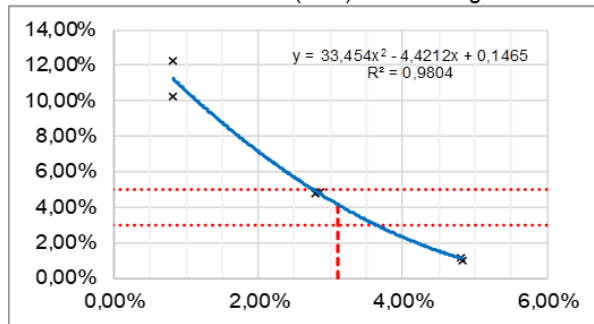
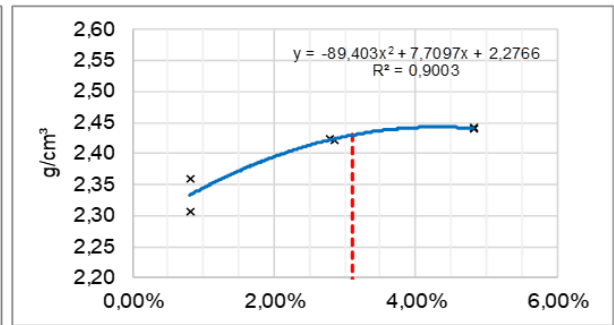
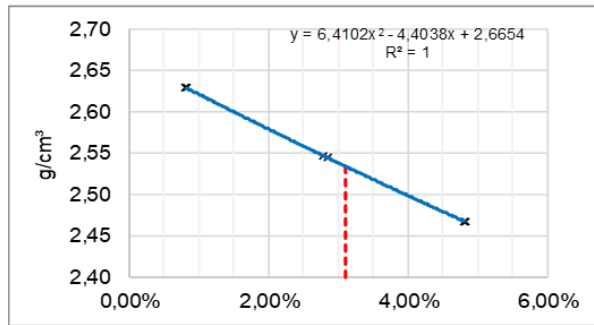
Teor de ligante (novo) $\cong$ 0,8%



Teor de ligante (novo) $\cong$ 2,8%



Teor de ligante (novo) $\cong$ 4,8%



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 39 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 11, produzido com 100% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 100% - REF. 3

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

1,85%

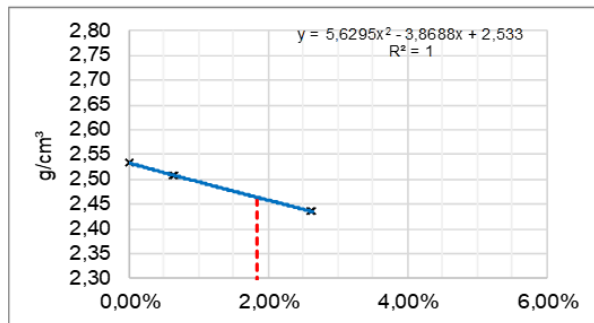
Registros fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



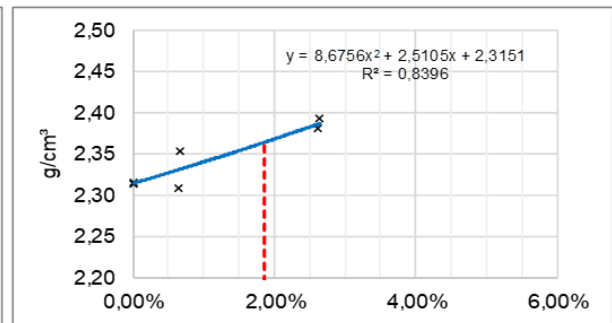
Teor de ligante (novo) $\cong$ 0%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 0,61%

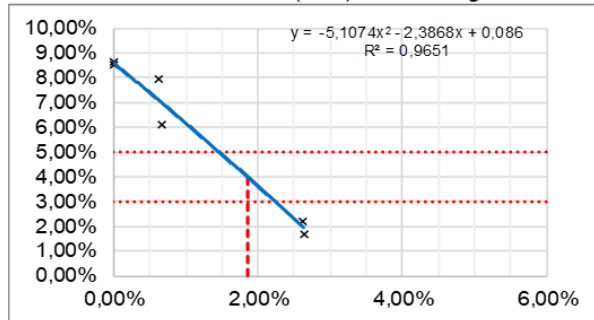
Teor de ligante (novo) $\cong$ 2,61%



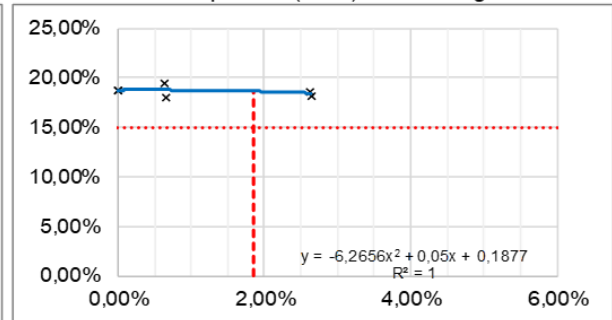
Dens. máx. teórica (Dmt) x Teor de ligante



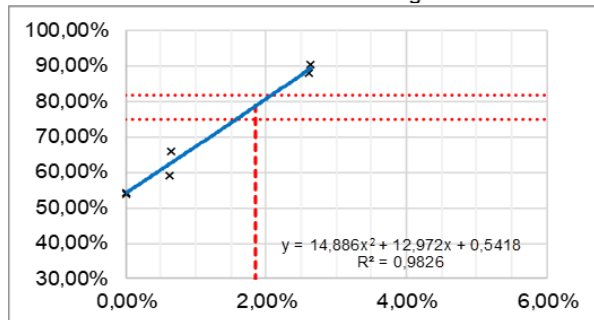
Dens. rel. aparente (Gmb) x Teor de ligante



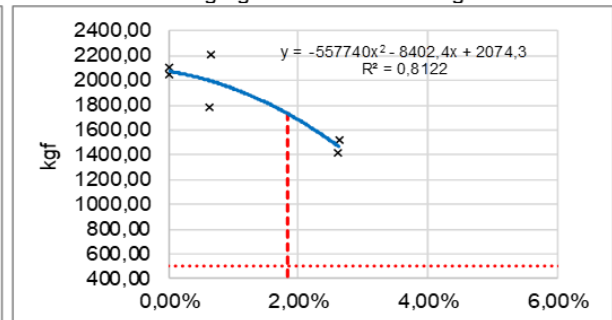
Vol. de vazios x Teor de ligante



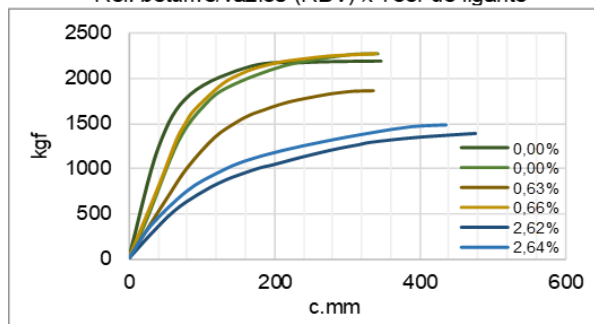
Vol. de agreg. mineral x Teor de ligante



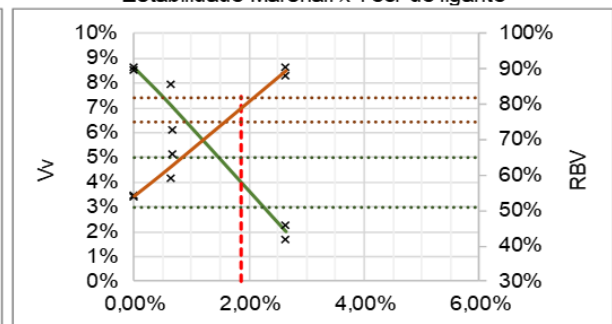
Rel. betume/vazios (RBV) x Teor de ligante



Estabilidade Marshall x Teor de ligante



Fluência Marshall (Estabilidade x Deformação)



Vol. de vazios e RBV x Teor de ligante

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 40 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 05, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 25% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado graúdo.

MISTURA - 25% - G

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

6,00%

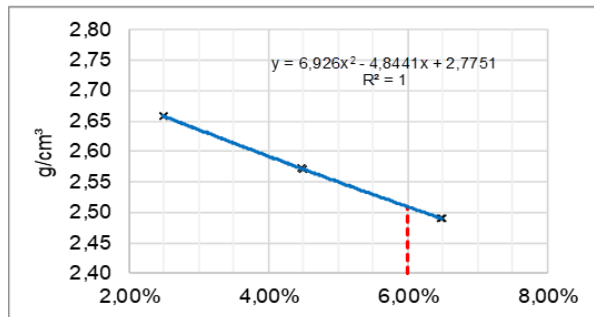
Registos fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



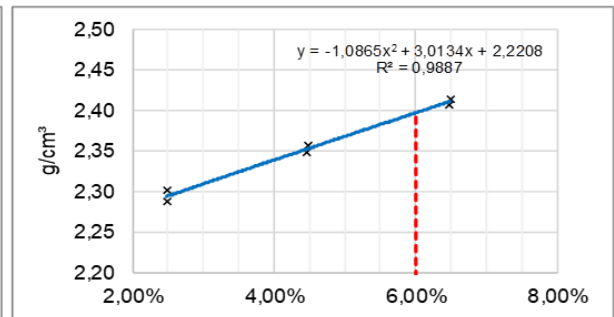
Teor de ligante (novo) $\cong$ 2,48%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 4,48%

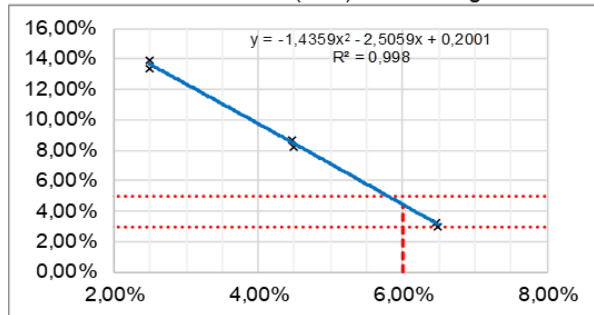
Teor de ligante (novo) $\cong$ 6,48%



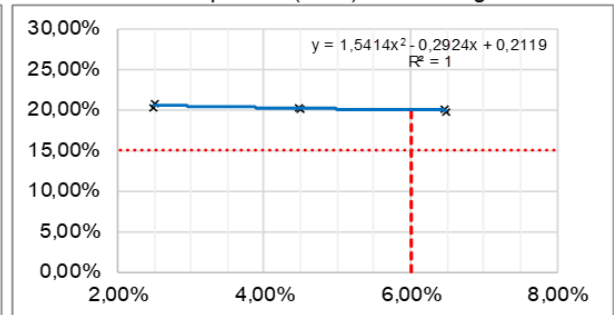
Dens. máx. teórica (Dmt) x Teor de ligante



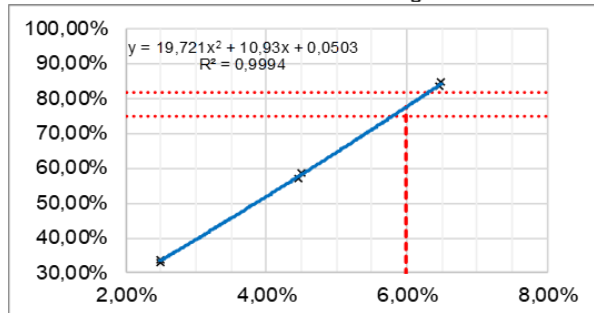
Dens. rel. aparente (Gmb) x Teor de ligante



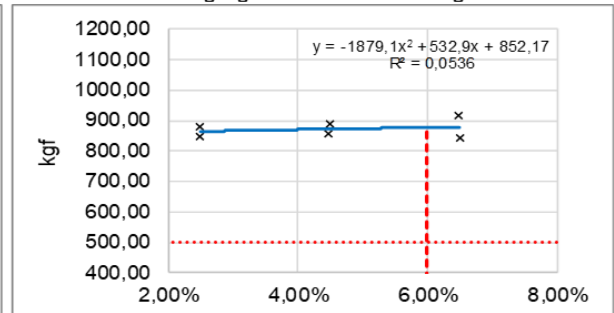
Vol. de vazios x Teor de ligante



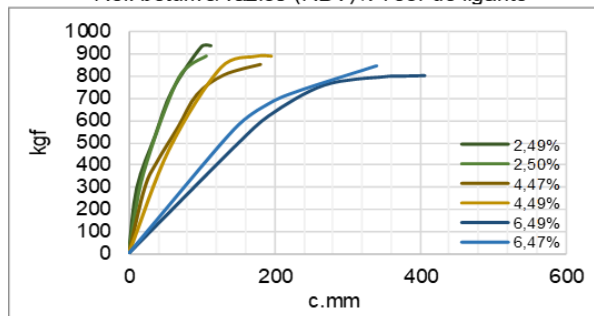
Vol. de agreg. mineral x Teor de ligante



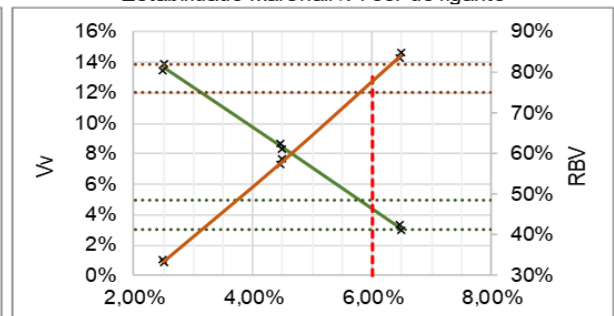
Rel. betume/vazios (RBV) x Teor de ligante



Estabilidade Marshall x Teor de ligante



Fluência Marshall (Estabilidade x Deformação)



Vol. de vazios e RBV x Teor de ligante

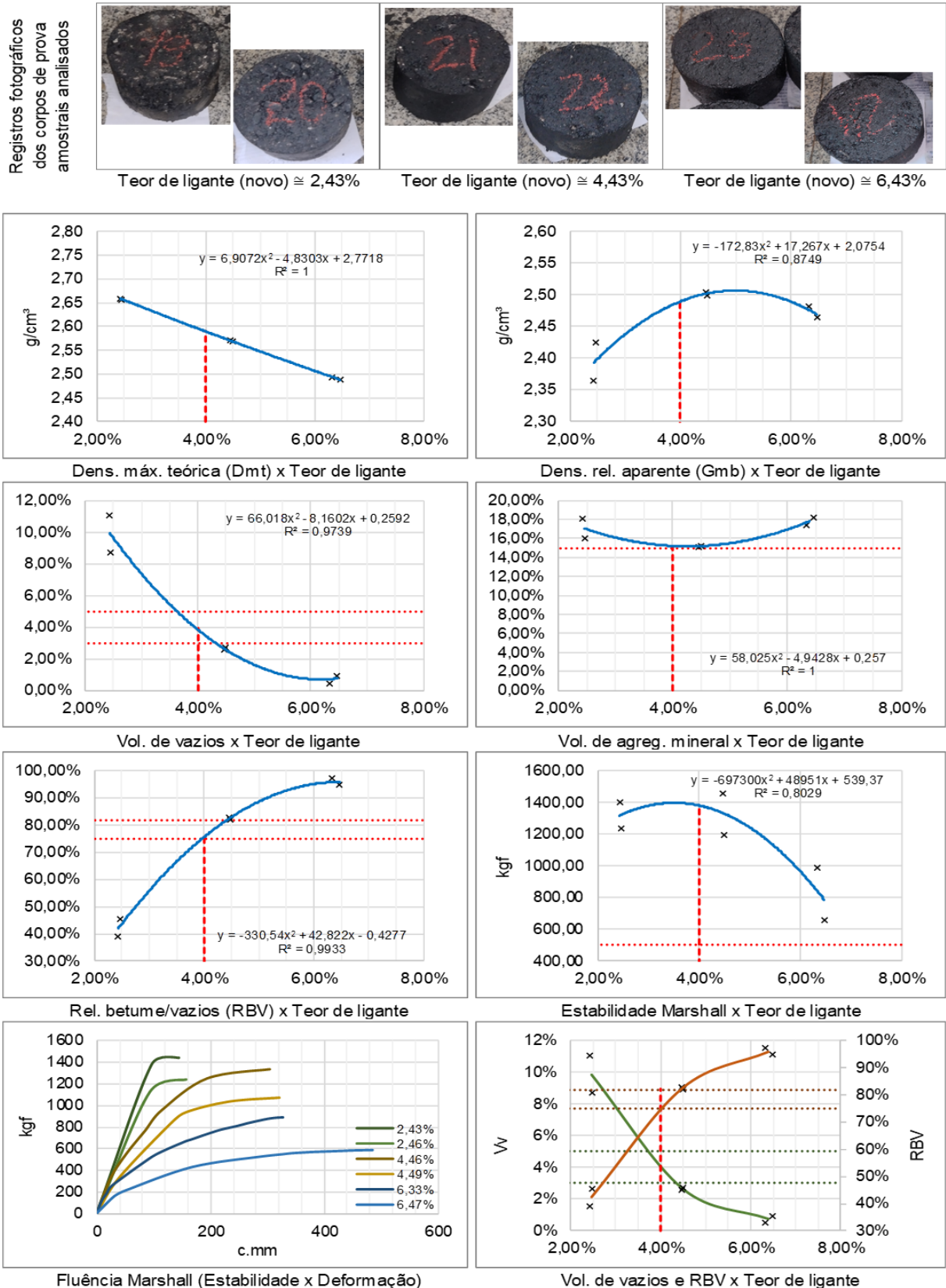
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 41 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 06, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 25% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado miúdo.

MISTURA - 25% - M

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

4,00%



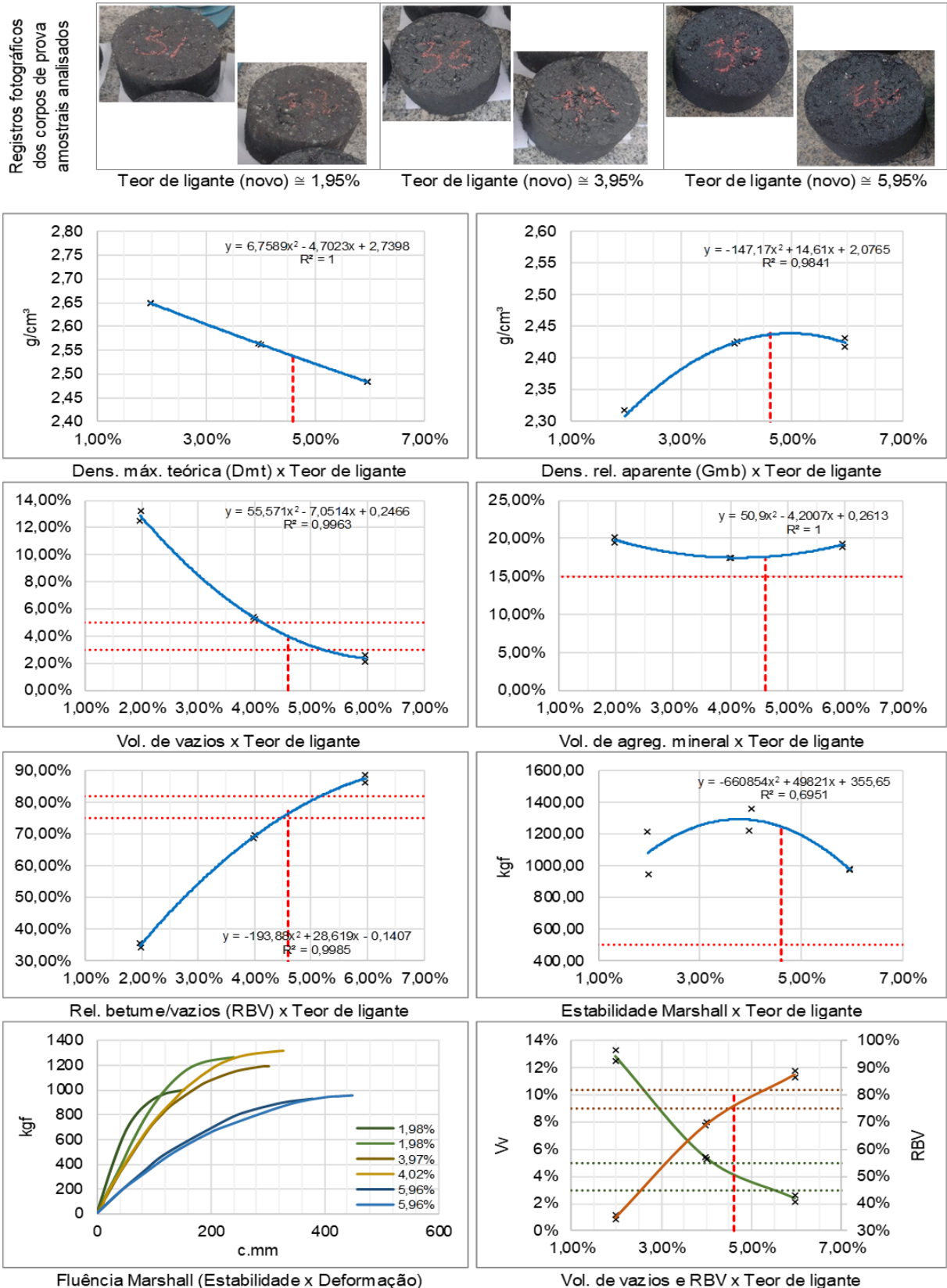
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 42 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 09, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 50% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado graúdo.

MISTURA - 50% - G

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

4,60%



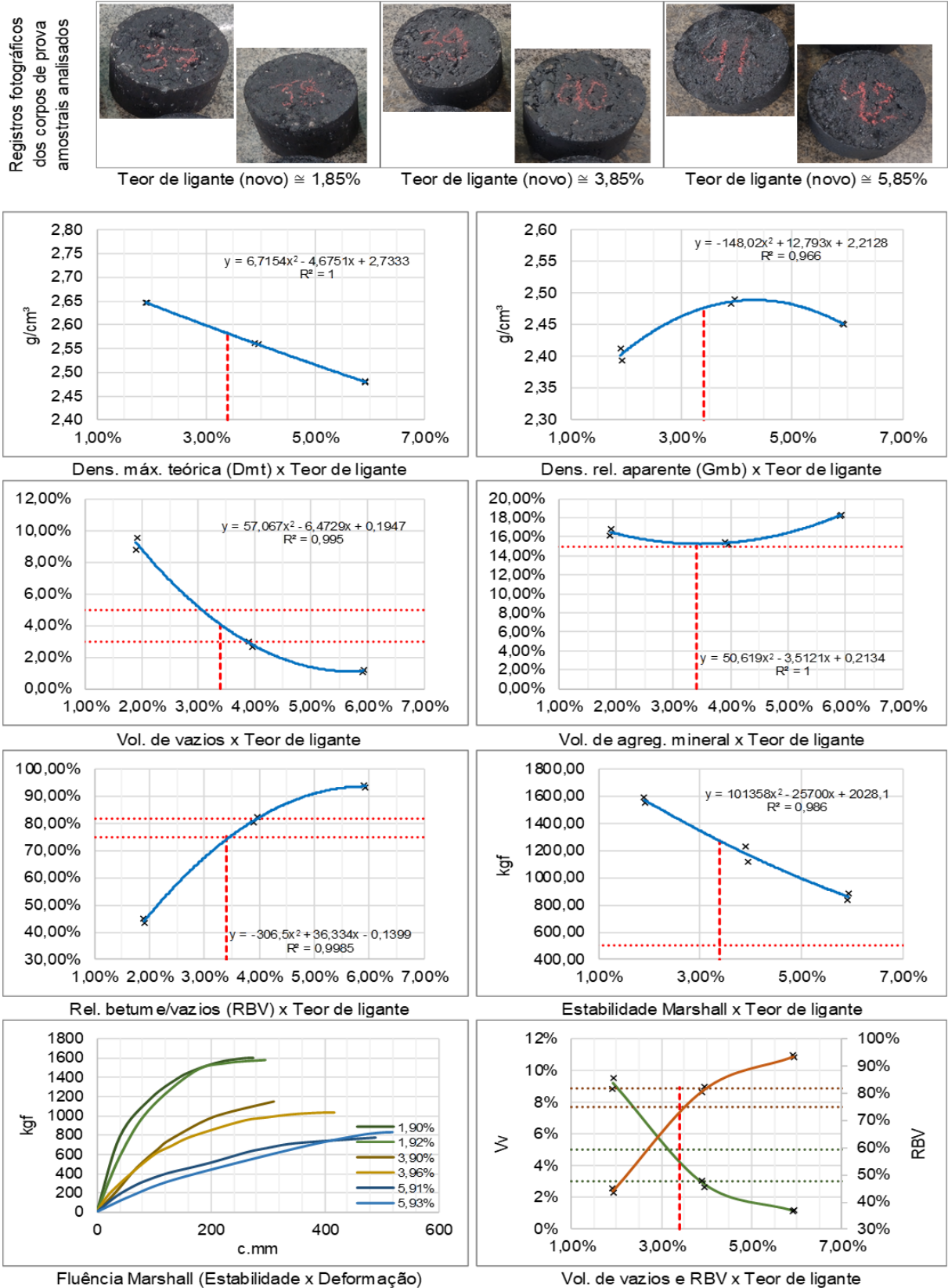
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 43 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 10, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 50% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado miúdo.

MISTURA - 50% - M

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

3,40%



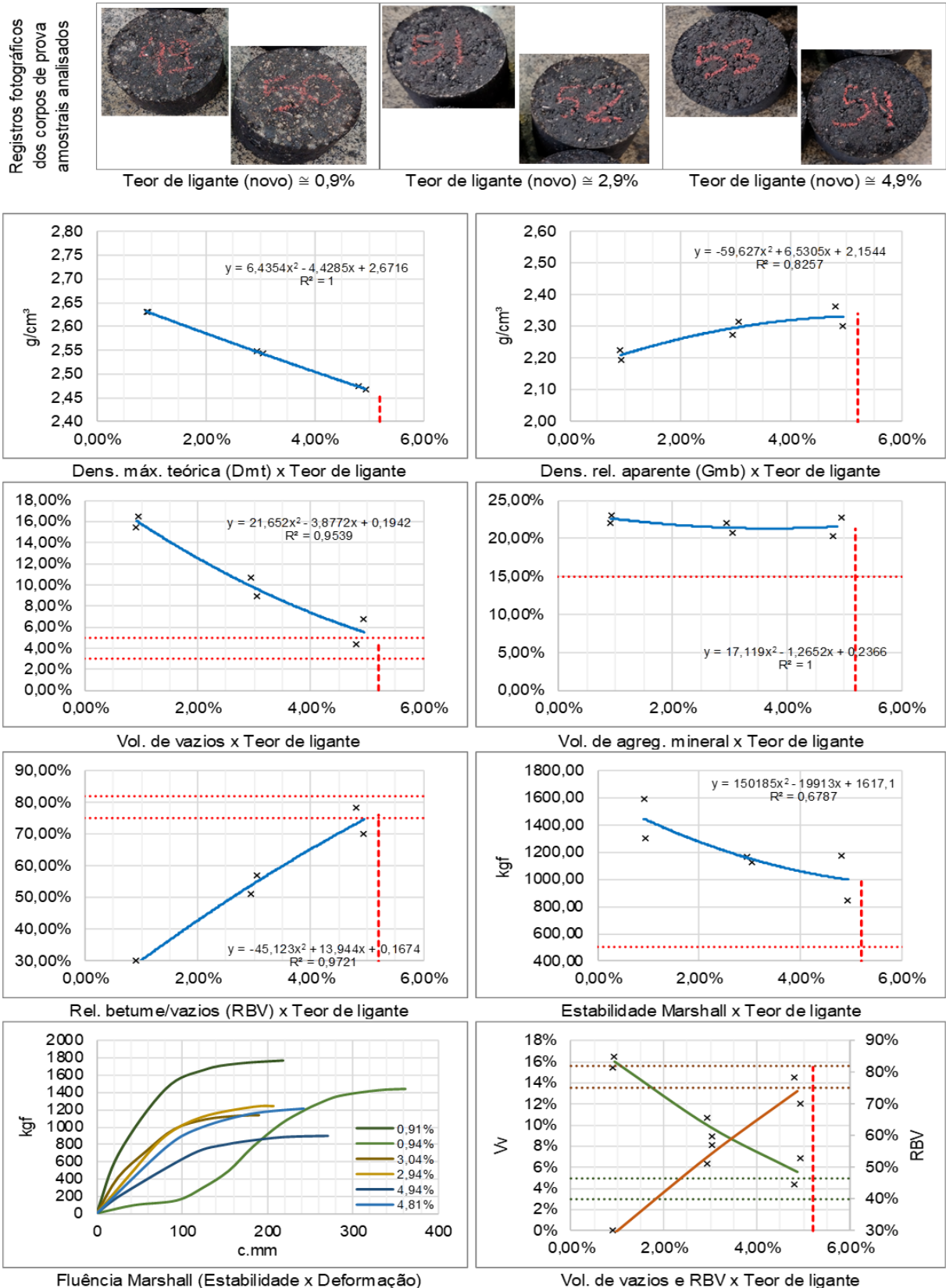
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 44 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 12, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem granítica e 100% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado graúdo.

MISTURA - 100% - G

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

5,20%



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 45 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 13, produzido com 100% de inclusão de RAP na mistura exclusivamente na parcela de agregado miúdo.

MISTURA - 100% - M

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

1,80%

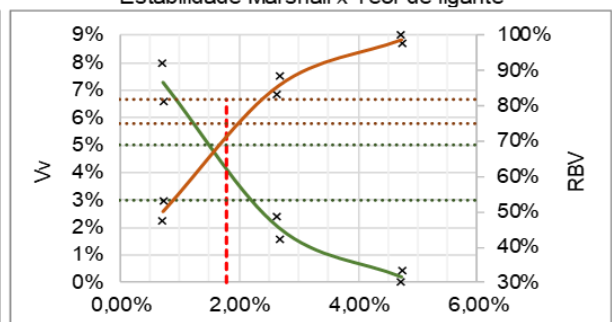
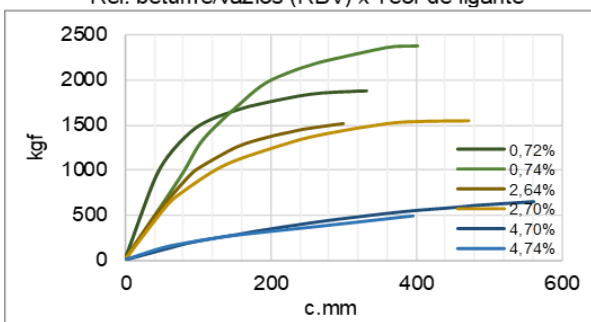
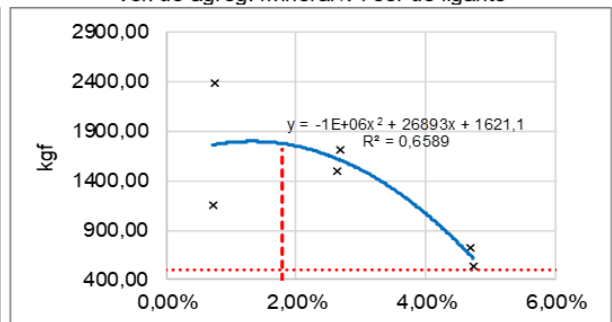
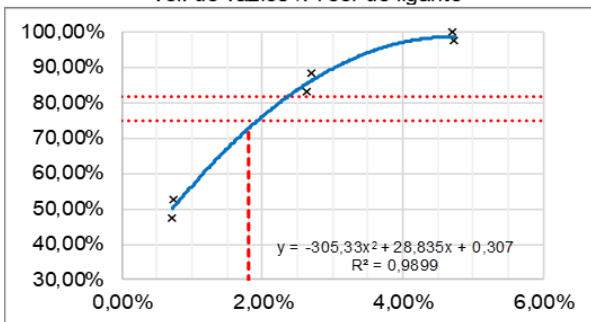
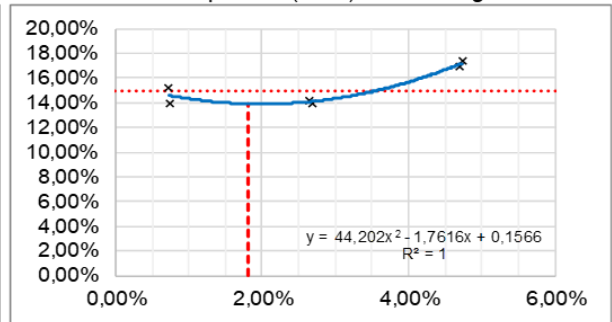
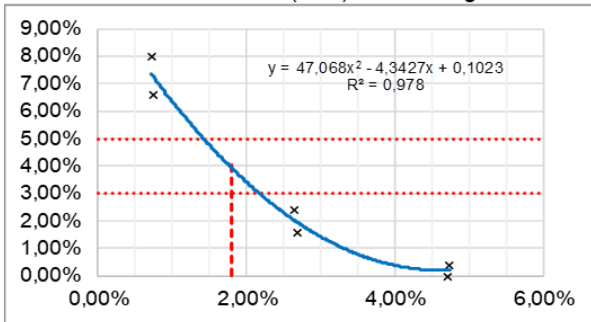
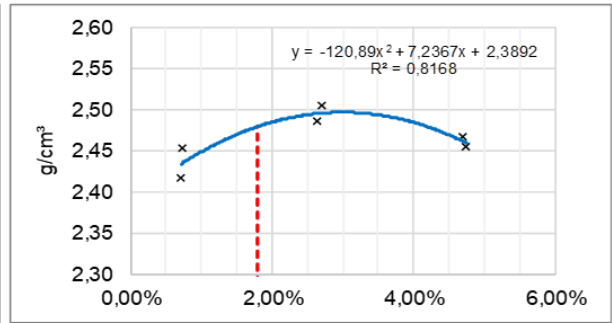
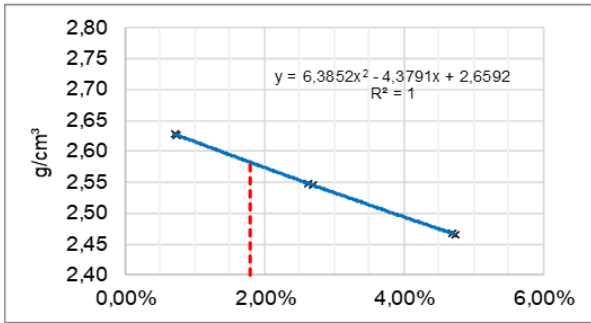
Registros fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



Teor de ligante (novo) $\cong$ 0,71%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 2,71%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 4,71%



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 46 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 02, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem basáltica e 0% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 0% - REF.0

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

4,30%

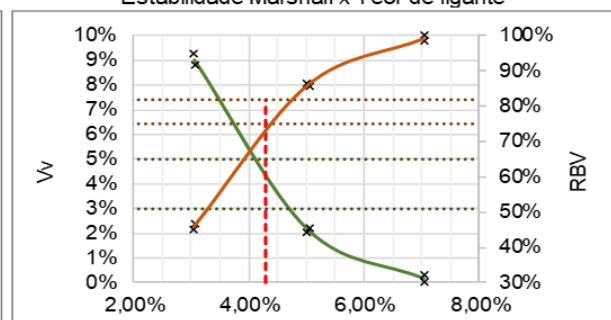
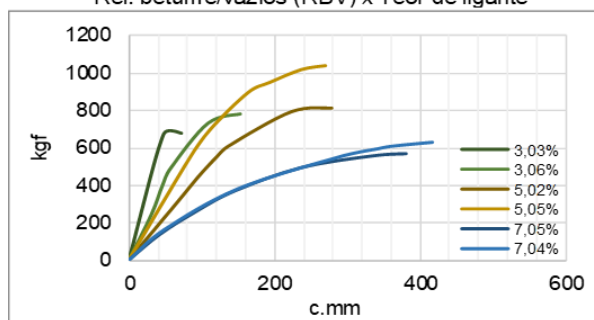
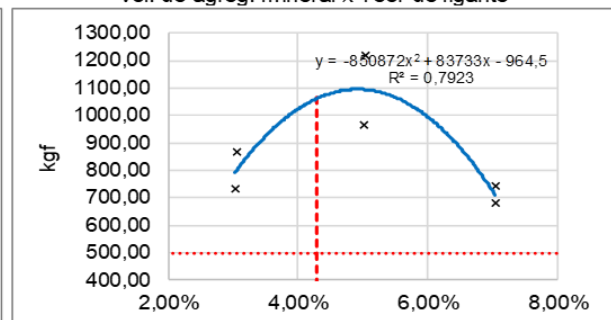
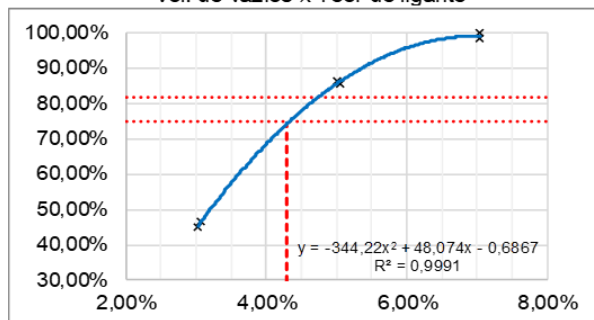
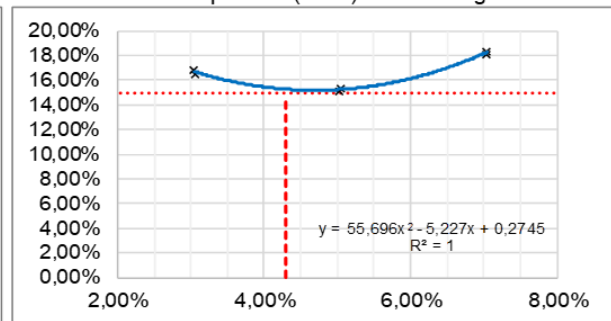
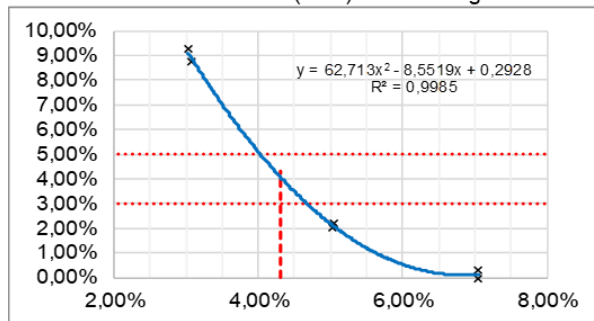
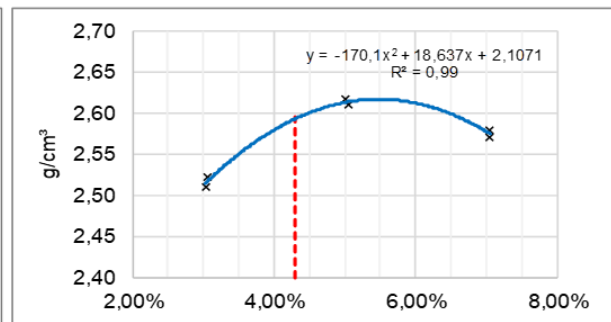
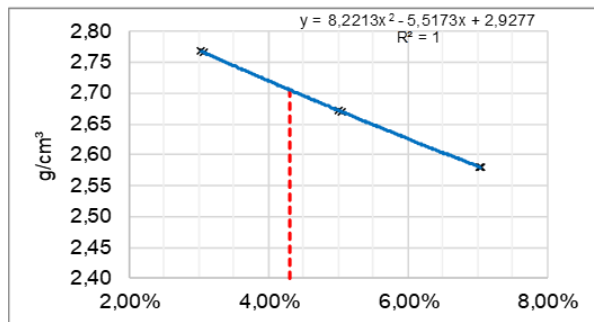
Registros fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



Teor de ligante (novo) $\cong$ 3%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 5%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 7%



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 47 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 04, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem basáltica e 25% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 25% - REF.1

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

3,50%

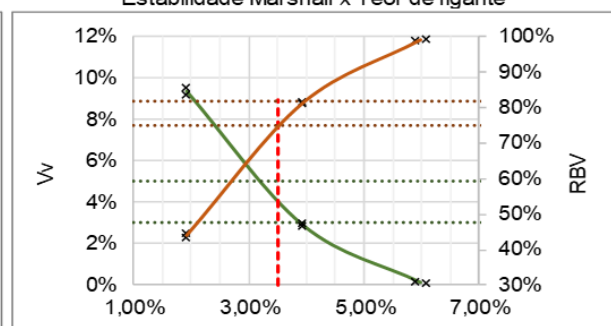
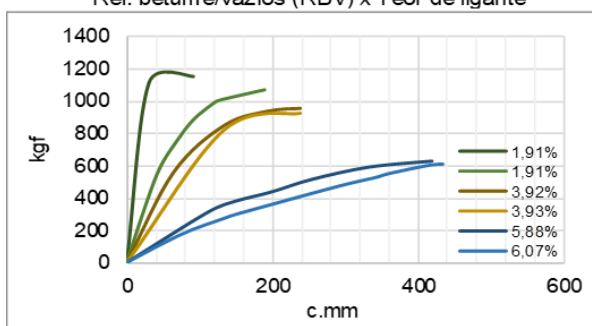
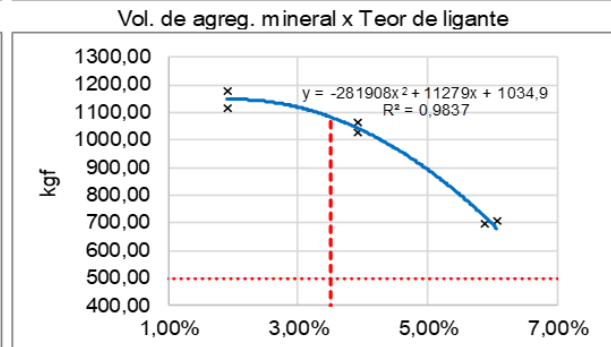
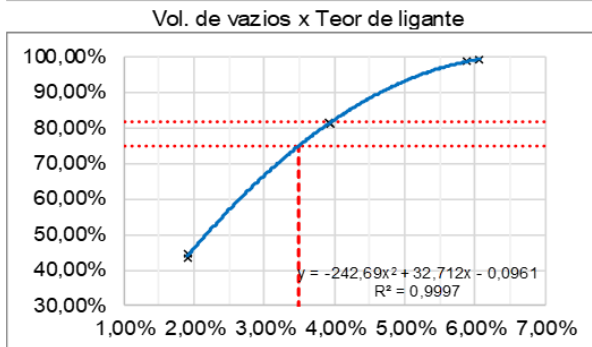
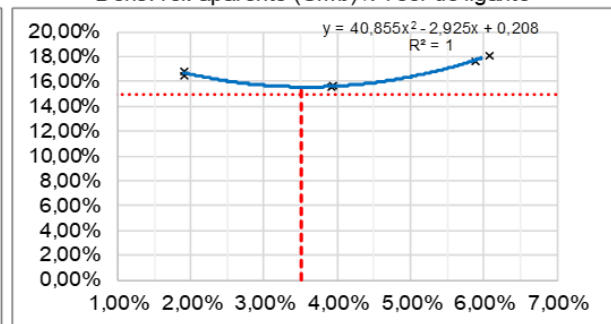
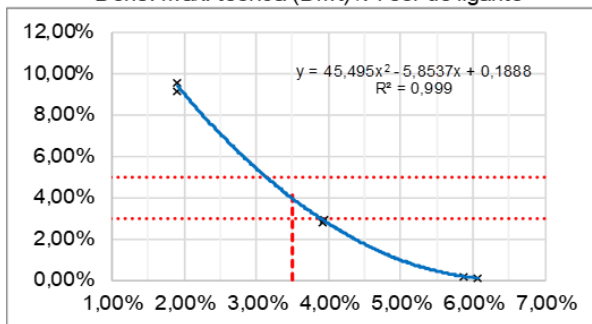
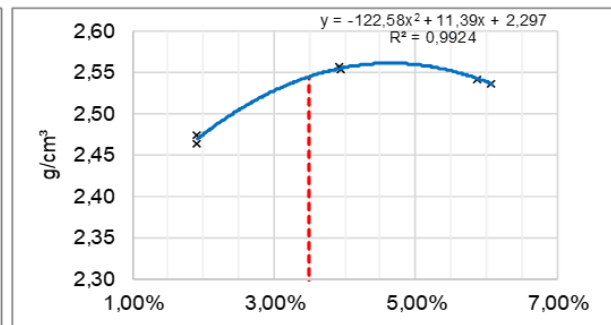
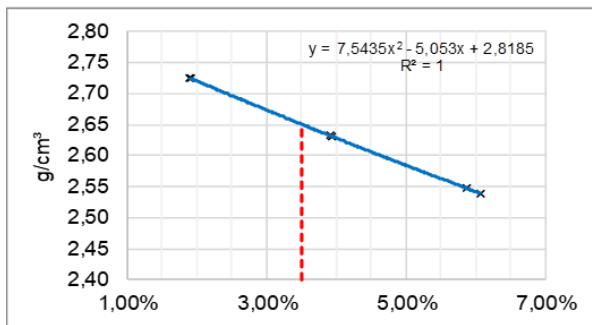
Registros fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



Teor de ligante (novo) $\cong$ 1,9%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 3,9%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 5,9%



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 48 – Ficha de resultado da dosagem do Grupo 08, produzido com agregado miúdo de pó de pedra de origem basáltica e 50% de inclusão de RAP na mistura.

MISTURA - 50% - REF. 2

Teor de ligante (novo) ótimo da mistura:

2,80%

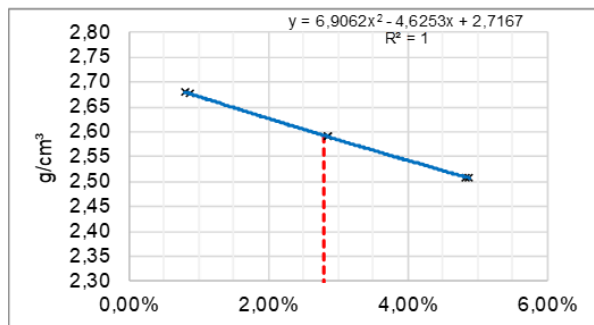
Registros fotográficos
dos corpos de prova
amostrais analisados



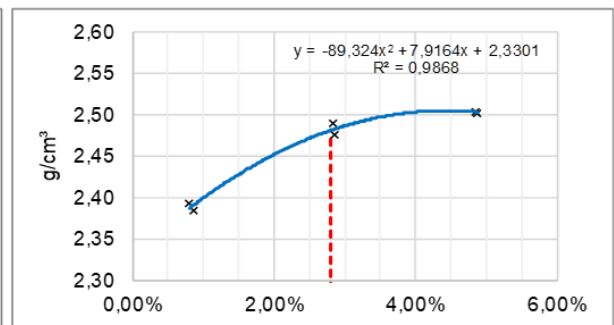
Teor de ligante (novo) $\cong$ 0,8%

Teor de ligante (novo) $\cong$ 2,8%

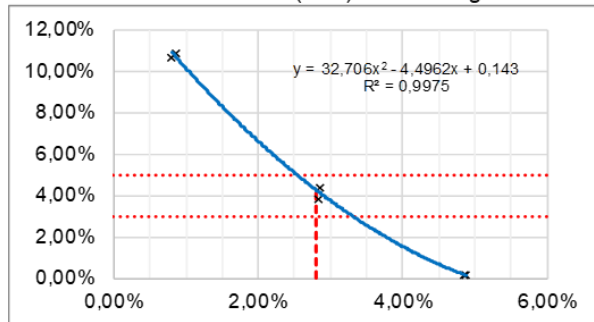
Teor de ligante (novo) $\cong$ 4,8%



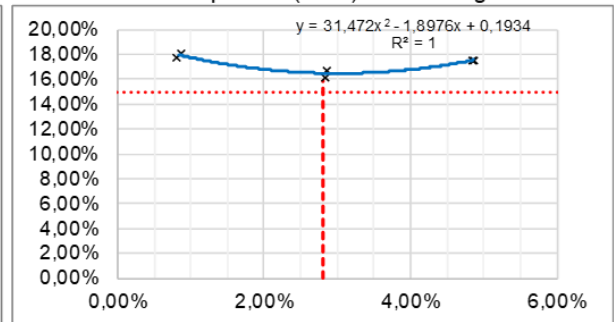
Dens. máx. teórica (Dmt) x Teor de ligante



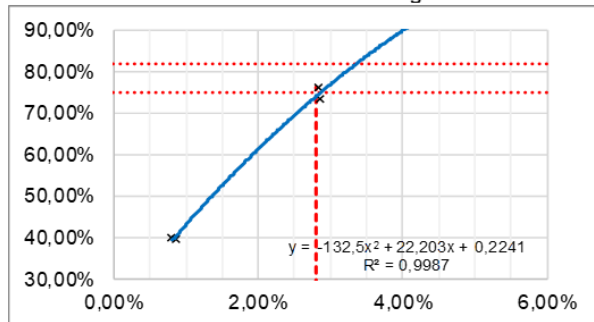
Dens. rel. aparente (Gmb) x Teor de ligante



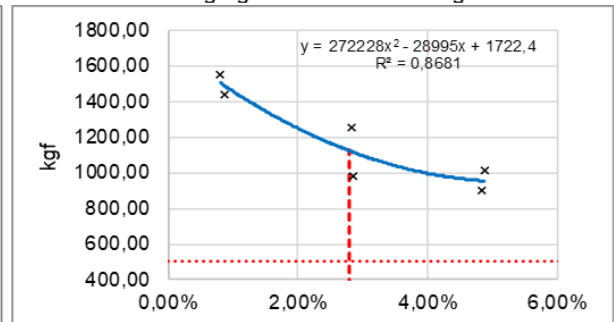
Vol. de vazios x Teor de ligante



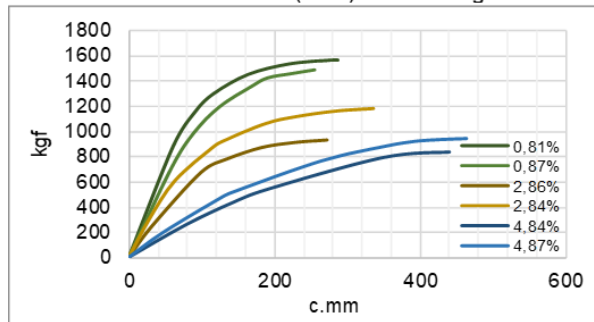
Vol. de agreg. mineral x Teor de ligante



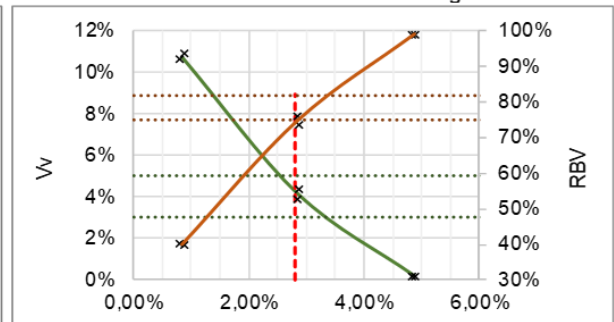
Rel. betume/vazios (RBV) x Teor de ligante



Estabilidade Marshall x Teor de ligante



Fluência Marshall (Estabilidade x Deformação)



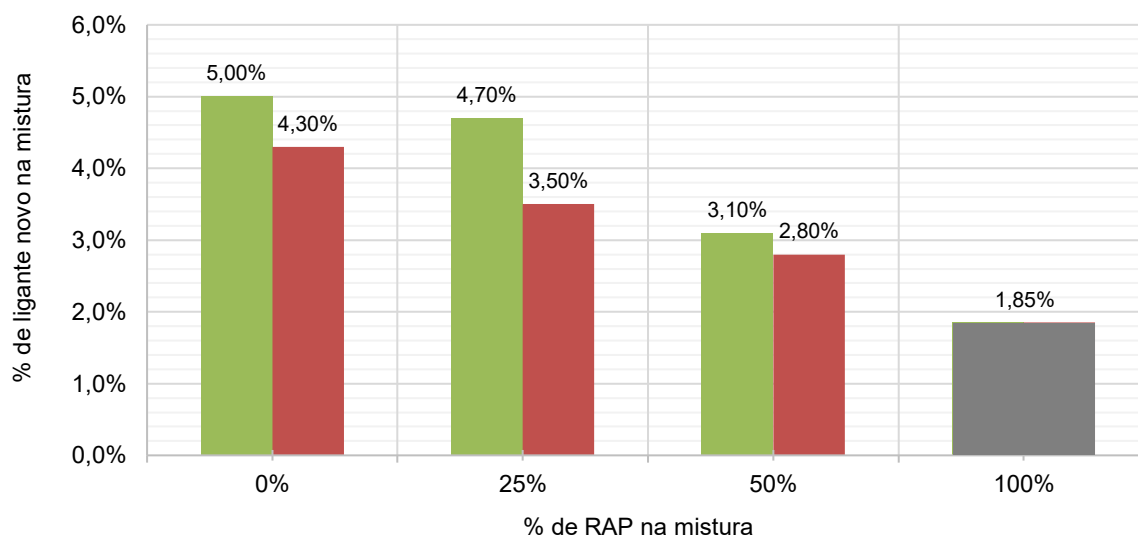
Vol. de vazios e RBV x Teor de ligante

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Em relação aos novos teores de ligante virgem requeridos para a mistura asfáltica, conforme a variação de RAP na composição, o percentual requerido para atingir o limite alvo de vazios em 4,0% sofre alteração. O gráfico da Figura 49 demonstra a variação do teor de ligante novo requerido em relação à substituição de RAP na mistura. Conforme o padrão de comportamento, quando maior o percentual de fresado incorporado na mistura, menor a quantidade de ligante novo requerido, em conformidade com o estudo de Tarsi, Tataranni e Sangiorgi, (2020). Considerando ainda o tipo de material empregado para o agregado miúdo, quando da utilização de pó de pedra de origem granítica, o percentual de ligante necessário para a adesividade de todas as partículas, a um volume de vazios de 4,0%, é maior que o requerido para quando utilizado pó de pedra de origem basáltica. Isto deve-se à textura da superfície (o granito apresenta uma superfície mais áspera e angular, com maior área específica que o basalto, que por sua vez pode apresentar problemas de adesividade), à absorção do ligante e composição mineralógica. O gráfico da Figura 50, por sua vez, indica esta variação considerando a parcela em que o RAP é inserido: se de forma global em substituição ao conjunto de agregados, isolado como agregado graúdo ou isolado apenas como agregado miúdo. Pelo comportamento do gráfico, em todos os casos em que a valorização do RAP ocorreu apenas na parcela de agregado graúdo, o nível de ligante virgem requerido na mistura foi superior àquele comparado à valorização de todas as granulometrias. Isto deve-se à menor área superficial do agregado graúdo, sendo que a maior parte do ligante se concentra na parcela do agregado miúdo.

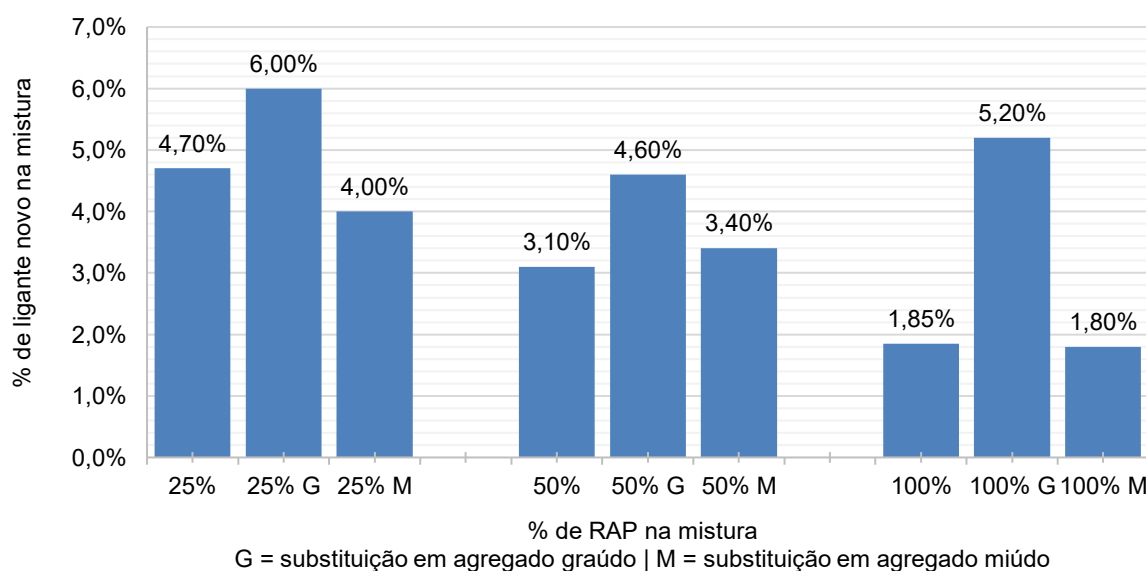
Conforme elencado por Ceratti, Bernucci e Soares (2015) e Querino e Carvalho (2020), o aumento do teor de ligante na substituição exclusiva de agregados graúdos pode ser explicado pela graduação descontínua causada na curva granulométrica, situação, que via de regra, há necessidade de maior percentual de ligante para preencher os vazios, que outrora deveriam ser preenchidos com finos, dada a falsa distribuição do RAP quando do estado coletado em campo.

Figura 49 – Redução da variação do teor de ligante novo requerido em relação à substituição de RAP na mistura asfáltica. Em verde os resultados considerando os corpos de prova com a utilização de pó de granito, enquanto em vermelho os resultados para utilização de pó de basalto como agregado miúdo. O nível 100% (cinza) representa a amostra moldada apenas com RAP, sem novos agregados.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 50 – Variação do teor de ligante novo requerido em relação à parcela de substituição de RAP na mistura asfáltica (total, agregado graúdo ou miúdo).



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

A falsa granulometria provida na separação dos materiais, tendo em vista o efeito do ligante existe, que se mobiliza durante a nova mistura, em função da temperatura, liberando os grânulos e alterando a distribuição de partículas total, é um dos principais problemas quando se realiza apenas a substituição da fração fina por

RAP. Na Figura 51, por exemplo, é possível perceber que a amostra durante o teste de estabilidade apresentou rompimento total da peça, sem agregação geral do conjunto. Tendo isto em vista, bem como o fato de que a economia em novo ligante ocorreu apenas à parcela de 25% de substituição do RAP, sendo irrisória para as demais faixas, não se verifica viável a separação por granulometria quando da valorização de RAP em novas misturas asfálticas. Assim, é mais vantajoso que o RAP seja incorporado em sua faixa granulométrica por inteiro.

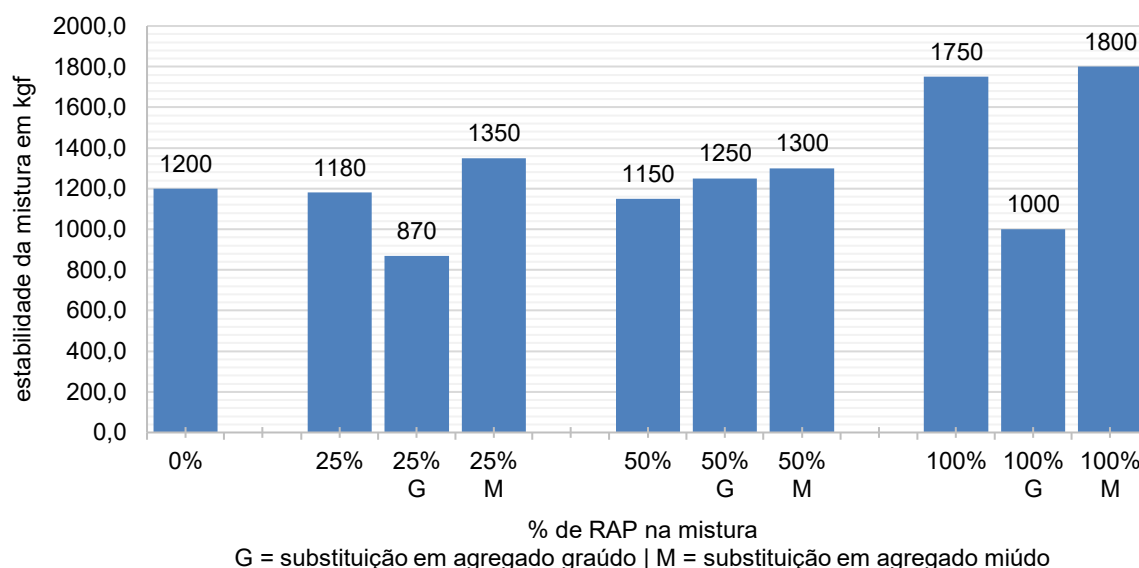
Figura 51 – Corpo de prova submetido ao ensaio de estabilidade Marshall, demonstrando o rompimento de uma amostra sem coesão adequada em que se verifica a falta de miúdos para o intertravamento da estrutura pétreo na substituição exclusiva de parte do RAP.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Quanto à variação da estabilidade em relação aos diferentes grupos, o gráfico da Figura 52 demonstra a variação de estabilidade das misturas considerando a parcela de valorização do RAP para um volume de vazios de 4%. Torna-se possível perceber que melhorias na estabilidade foram verificadas apenas na parcela de substituição de agregados miúdos com RAP. A queda quando da utilização apenas como agregado graúdo pode ser explicada pela decomposição dos grânulos quando da reativação do ligante envelhecido, causando a variação na distribuição granulométrica e menor travamento da estrutura. Pode ser explicado também pelo consumo excessivo de ligante, causando, conseqüentemente, maior fluência e deformação do conjunto.

Figura 52 – Variação de estabilidade Marshall das misturas considerando o local de aplicação do RAP para um volume de vazios de 4%.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Considerando que a substituição exclusiva do RAP como agregado graúdo não apresentou bons resultados, e a diferença da substituição exclusiva como agregados miúdos em relação à substituição total não foi tão expressiva, a separação de RAP por faixa granulométrica foi abandonada para a etapa seguinte do planejamento experimental, quanto às demais características físicas e mecânicas. Isto, pois, com a substituição total há maior incremento do resíduo em novas misturas.

4.3 ETAPA 2 – DADOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS COM O TEOR ÓTIMO DE LIGANTE

Com base no exposto, seguindo os resultados complementares de resistência mecânica requerida pelas normas aplicáveis, e tendo-se definido os percentuais ótimos de ligante novo às misturas com valorização de RAP em toda a sua faixa granulométrica, os dados do Quadro 12 demonstram os resultados obtidos em laboratório.

Quadro 12 – Resultados físico-mecânicos dos corpos de prova com base no teor ótimo de ligante determinado a partir da Etapa 1.

Dosagem	% ligante novo	Massa esp. (g/cm ³)	Estabilidade (kgf)	Fluência (c.mm)	Desgaste (%)	Res. à tração (kgf/cm ²)
0% GR	5,00%	2,44	933,02	213	11,86	9,89
50% GR	3,09%	2,31	1130,12	299	17,08	7,38
100%	1,85%	2,31	1153,49	524	14,97	15,09
0% BA	4,30%	2,57	1035,55	255	13,77	7,43
50% BA	2,80%	2,43	1357,51	288	19,05	10,08

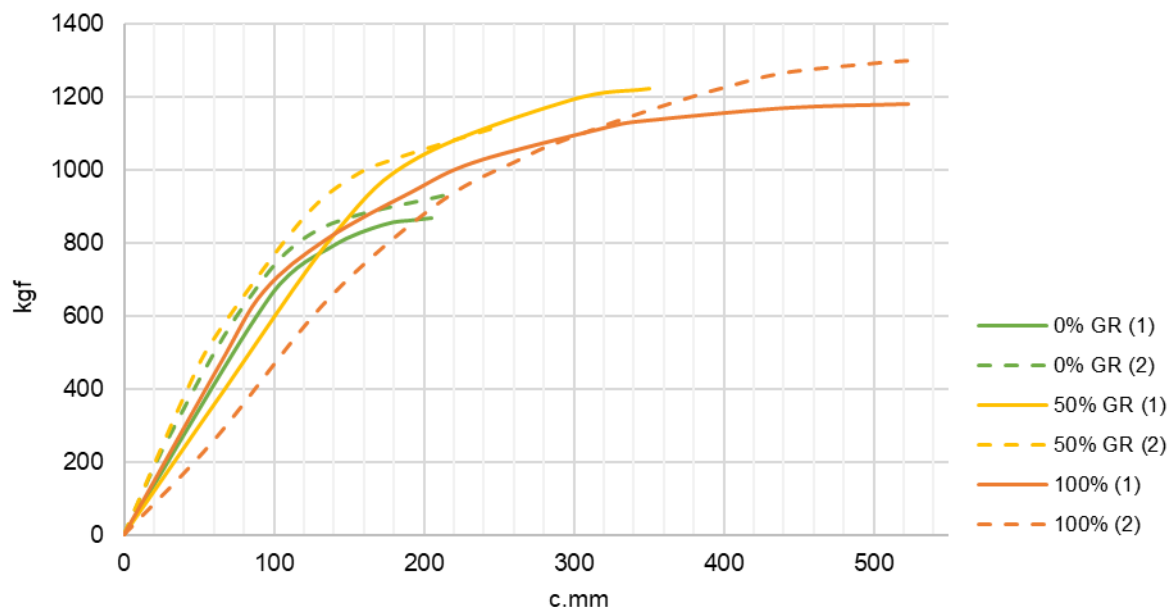
GR = com pó de granito | BA = com pó de basalto

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, conforme DNIT 31/ES, o resultado do ensaio deve atender a, no mínimo, 0,65 MPa, equivalente a 6,62 kgf/cm². Verifica-se que todas as dosagens atenderam aos critérios normativos.

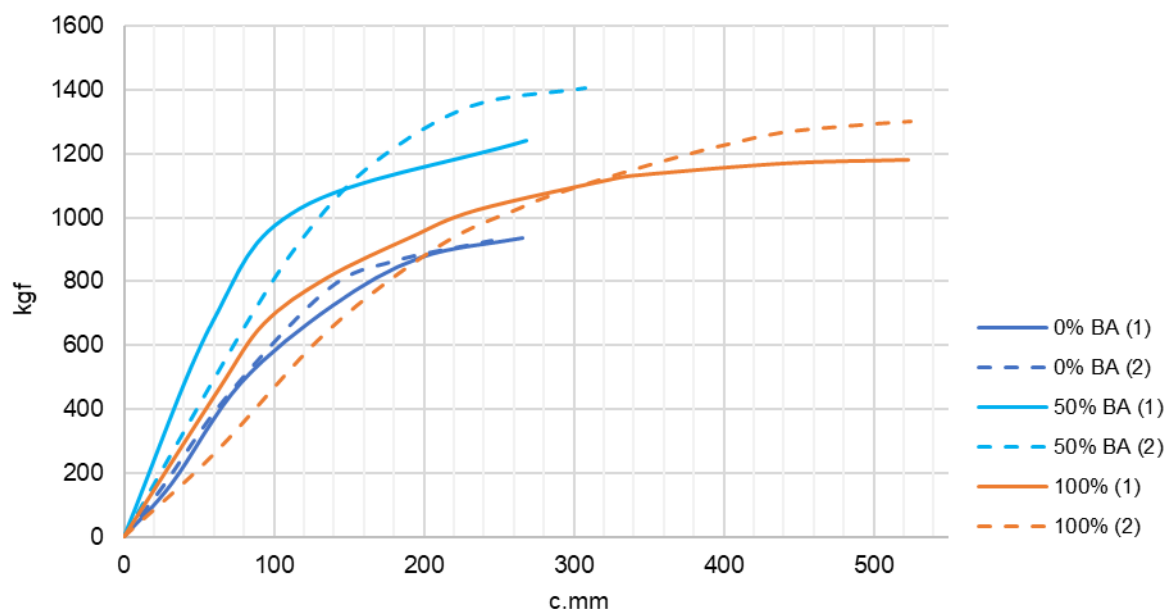
Em relação às propriedades reológicas de deformação em relação à carga aplicada, os gráficos da Figura 53 e Figura 54 apresentam os resultados de estabilidade por deformação de todos os corpos de prova realizados. É importante destacar que os gráficos foram gerados a partir da coleta manual de dados realizada durante os ensaios, uma vez que o equipamento disponível não dispõe de um sistema automatizado para a extração direta das informações. Esse procedimento exigiu um controle rigoroso durante a execução dos testes, garantindo que os registros fossem precisos e representassem fielmente as respostas dos corpos de prova às cargas aplicadas. Observa-se claramente, com o incremento do RAP um aumento na deformação sob a ação de maiores cargas. O incremento da deformação indica uma possível alteração na rigidez e na resistência da estrutura, aspectos que devem ser considerados na formulação das dosagens e na avaliação da durabilidade do material frente às solicitações impostas pelo tráfego e pelas condições ambientais.

Figura 53 – Estabilidade por deformação dos corpos de prova na Etapa 2 para os corpos de prova produzidos com utilização de RAP e pó de granito em kgf (eixo y) por c.mm (eixo x).



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 54 – Estabilidade por deformação dos corpos de prova na Etapa 2 para os corpos de prova produzidos com utilização de RAP e pó de basalto em kgf (eixo y) por c.mm (eixo x).



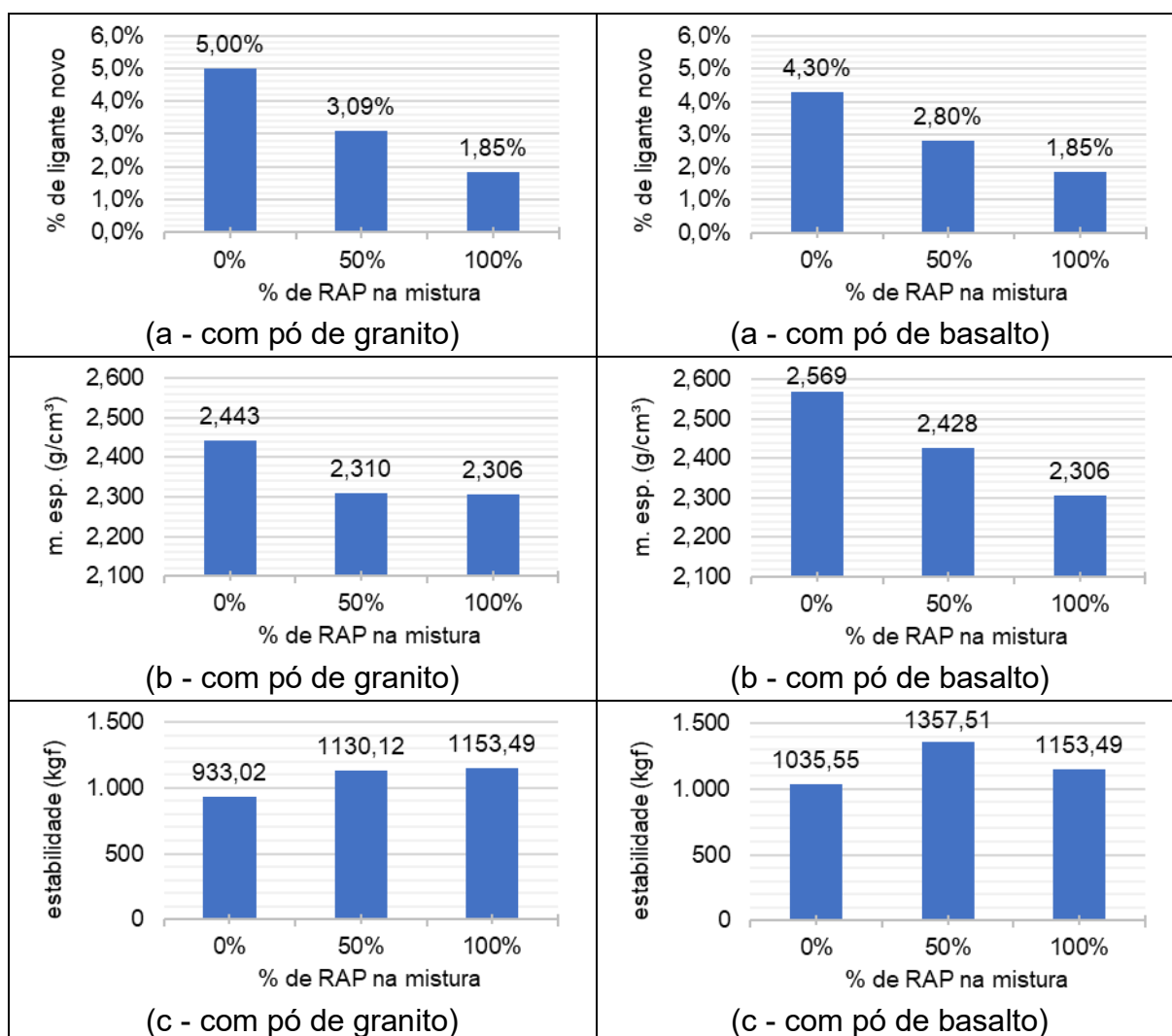
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Em relação às demais propriedades físico-mecânicas apresentadas no Quadro 12, o gráfico da Figura 55 apresenta de maneira sintética as informações

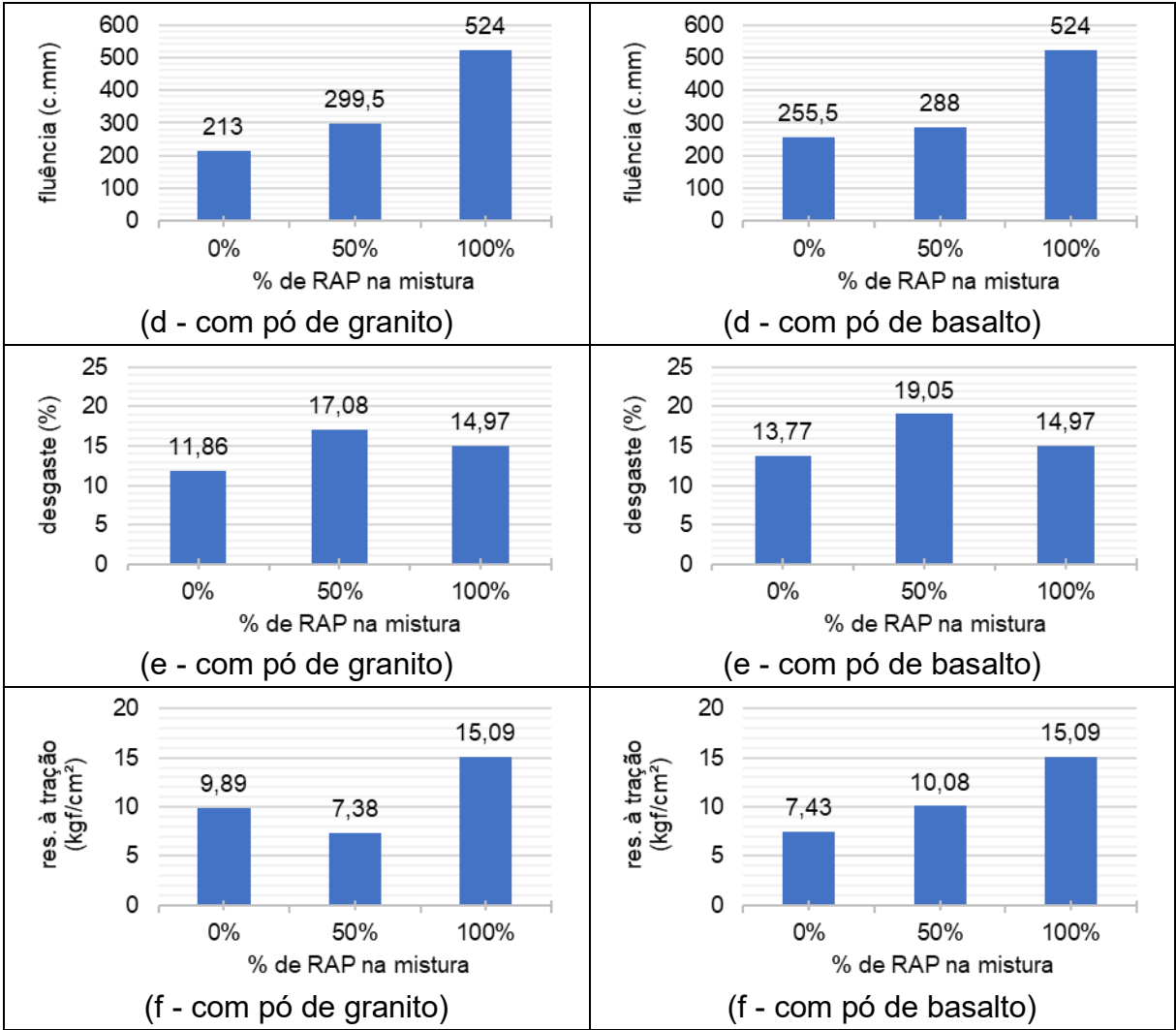
coletadas. O gráfico (a) apresenta o teor de ligante novo da mistura em percentual; o gráfico (b) apresenta a informação de massa específica real, em g/cm^3 ; o gráfico (c) apresenta a estabilidade corrigida, em kgf; o gráfico (d) apresenta a fluência, em c.mm; o gráfico (e) apresenta o desgaste, em percentual, e o gráfico (f) a resistência à tração por compressão diametral, em kgf/cm^2 , todos estes em relação ao percentual de RAP e composição da dosagem, tendo como referência o tipo de agregado miúdo - granito ou basalto.

Figura 55 – Resultados das propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova ensaiados na Etapa 2. O gráfico (a) apresenta o teor de ligante novo da mistura em percentual; o gráfico (b) apresenta a informação de massa específica real, em g/cm^3 ; o gráfico (c) apresenta a estabilidade corrigida, em kgf; o gráfico (d) apresenta a fluência, em c.mm; o gráfico (e) apresenta o desgaste, em percentual, e o gráfico (f) a resistência à tração por compressão diametral, em kgf/cm^2 , todos estes em relação ao percentual de RAP e composição da dosagem, tendo como referência o tipo de agregado miúdo - granito ou basalto.

(continua)



(conclusão)



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Observa-se que, conforme já identificado na Etapa 1, quanto maior o nível de valorização do RAP, fresado, na mistura asfáltica, menor o nível requerido de ligante virgem. A economia é ainda maior quando da utilização de pó de pedra basáltica em relação à granítica, desde que observado o atendimento aos parâmetros mínimos de adesividade previsto por Normas e Instruções de Serviço.

Em relação à densidade da mistura, há a tendência de redução da massa específica conforme o incremento do RAP. A densidade é menor para a mistura com utilização de pó de pedra de origem granítica que em relação ao pó de pedra de origem basáltica, dada a densidade intrínseca destes materiais constituintes.

Quanto à estabilidade, o maior valor observado foi com 50% de RAP e utilização de pó de pedra de origem basáltica. Na situação de utilização de pó de pedra de origem granítica, quanto maior o incremento do RAP, maior a estabilidade

verificada. O mesmo parâmetro é verificado para a fluência, com exceção das misturas com utilização de pó de pedra com origem basáltica.

Em ambos os casos, para ambos os pós de pedra, o maior desgaste foi verificado na composição com 50% de RAP incorporado.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, houve incremento da resistência com o aumento do RAP quando da utilização do pó de basalto. Quando da utilização de pó de granito, houve um pequeno decréscimo na mistura de nível intermediário.

Tendo em vista a análise de variância - ANOVA, dos dados coletados, com auxílio do software Statistica, e relatório disponível no Apêndice C, observa-se a normalidade de todas as variáveis e a adequada aleatoriedade na execução do procedimento experimental. Os diagramas ternários da curva de resposta não foram plotados dado a linearidade observada em todas as determinações.

Em relação às incorporações de RAP nos corpos de prova produzidos com utilização de pó de granito, a massa específica, com $\alpha \leq 5\%$ e coeficiente de determinação em 90,96%, pode ser descrita sofrendo influência significativa do percentual de pó de granito e do percentual de fresado da mistura; o mesmo ocorre com relação à estabilidade, considerando $\alpha \leq 10\%$ e coeficiente de determinação em 81,73%; a variável fluência, com $\alpha \leq 5\%$ e coeficiente de determinação em 95,17%, é influenciada fortemente pelo teor de fresado incorporado; o desgaste, variável mais sensível, com $\alpha \leq 15\%$ e coeficiente de determinação em 74,62% apresentou influência direta de todos os componentes: pó de pedra e demais componentes constituintes, teor de fresado e teor de novo ligante; o mesmo resultado, $\alpha \leq 10\%$ e coeficiente de determinação em 85,65% pode ser observado para os resultados da resistência à tração por compressão diametral.

Por outro lado, em relação às incorporações de RAP nos corpos de prova produzidos com utilização de pó de basalto, a massa específica, com $\alpha \leq 5\%$ e coeficiente de determinação em 99,28%, pode ser descrita sofrendo influência significativa do percentual de pó de granito e do percentual de fresado da mistura; para a variável estabilidade, considerando $\alpha \leq 5\%$ e coeficiente de determinação em 88,07% todos os fatores constituintes apresentaram significância nos resultados; o mesmo comportamento se tornou visível para a variável fluência, com $\alpha \leq 5\%$ e coeficiente de determinação em 98,82%; o desgaste, variável mais sensível, com $\alpha \leq 10\%$ e coeficiente de determinação em 84,42% apresentou influência direta de todos

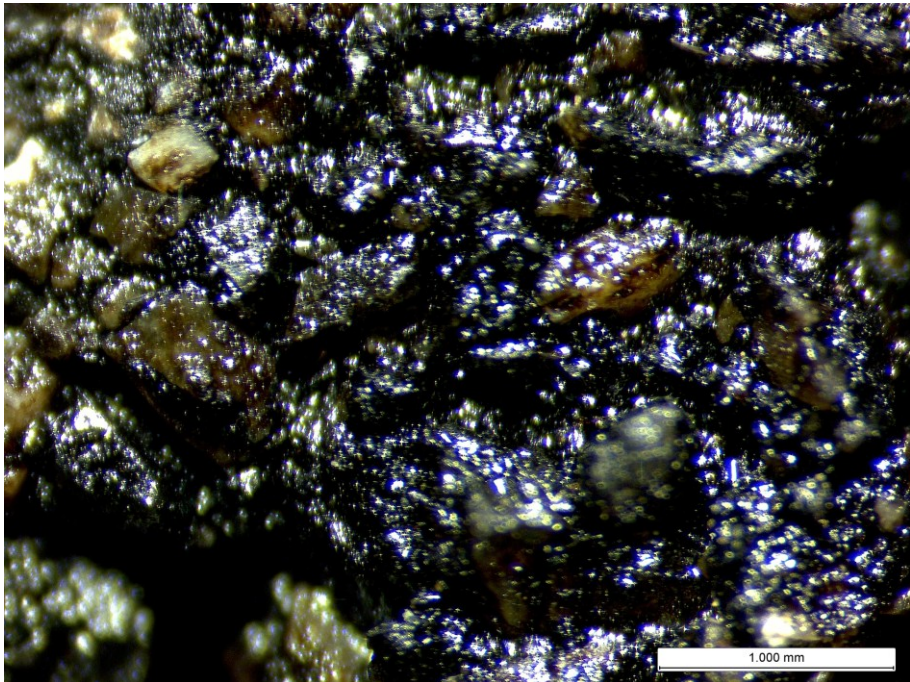
os componentes: pó de pedra e demais componentes constituintes, teor de fresado e teor de novo ligante; para a resistência à tração por compressão diametral, no entanto, com $\alpha \leq 5\%$ e coeficiente de determinação em 98,65%, os resultados acabaram sendo mais significativos para o teor de fresado disponível na dosagem.

As mesmas observações apresentadas podem ser verificadas e validadas através do diagrama de Pareto, disponível no Apêndice C.

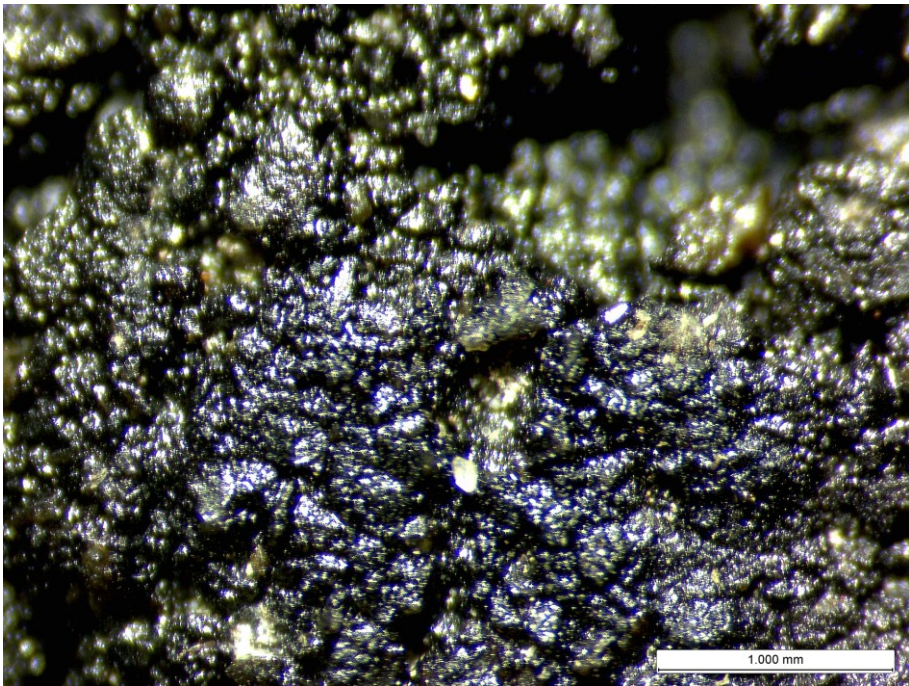
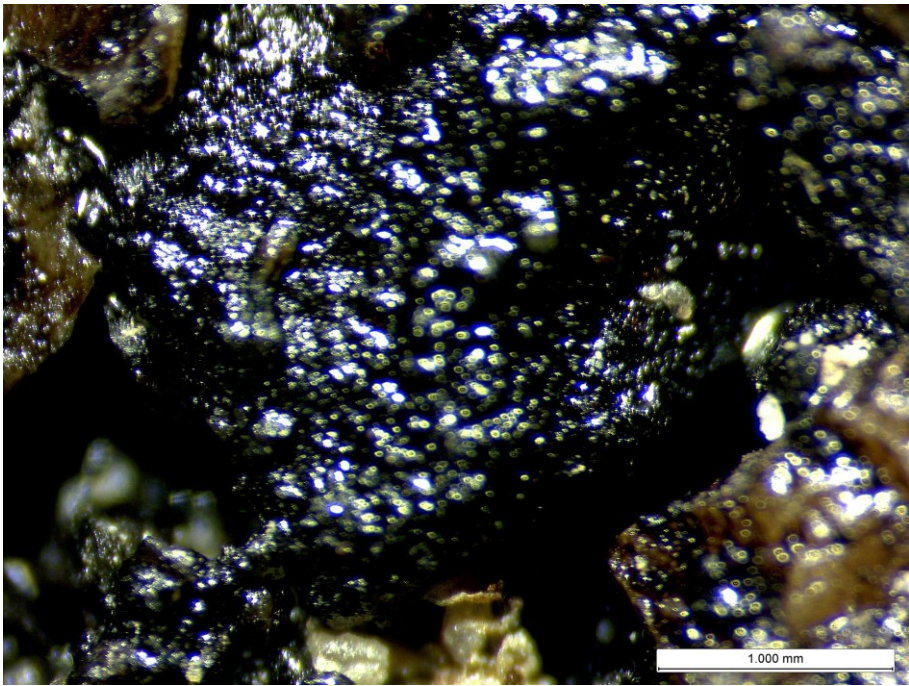
Quando observada as fraturas dos corpos de prova através de microscopia, conforme Figura 56, observa-se que as fraturas ocorreram, conforme o esperado, na zona do ligante betuminoso e/ou na interface entre ligante e agregado, mas em nenhum momento identificado a fratura no interior do agregado.

Figura 56 – Microscopia ótica da região de fratura dos corpos de prova na Etapa 2.

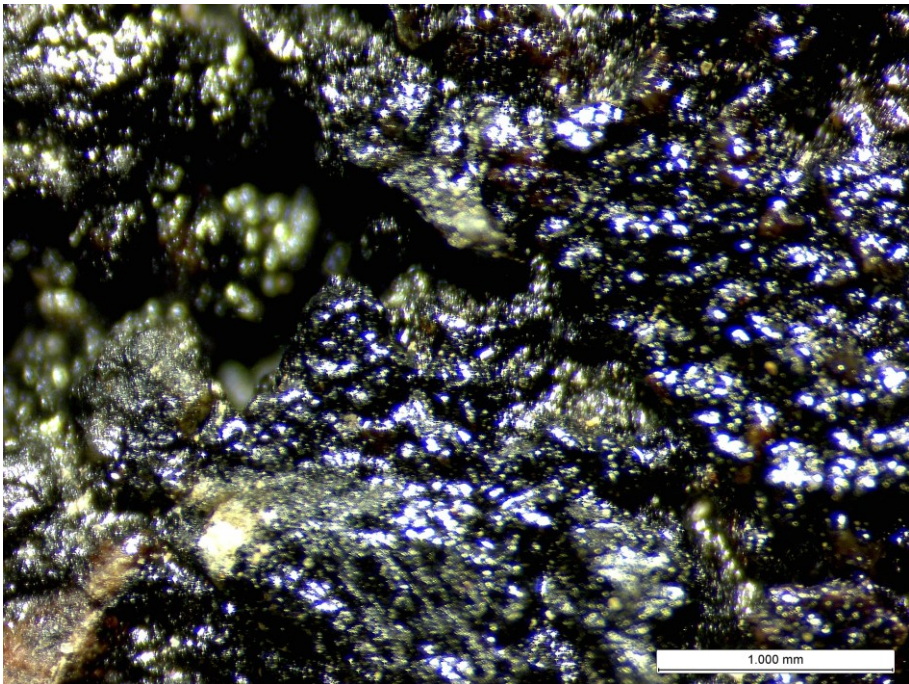
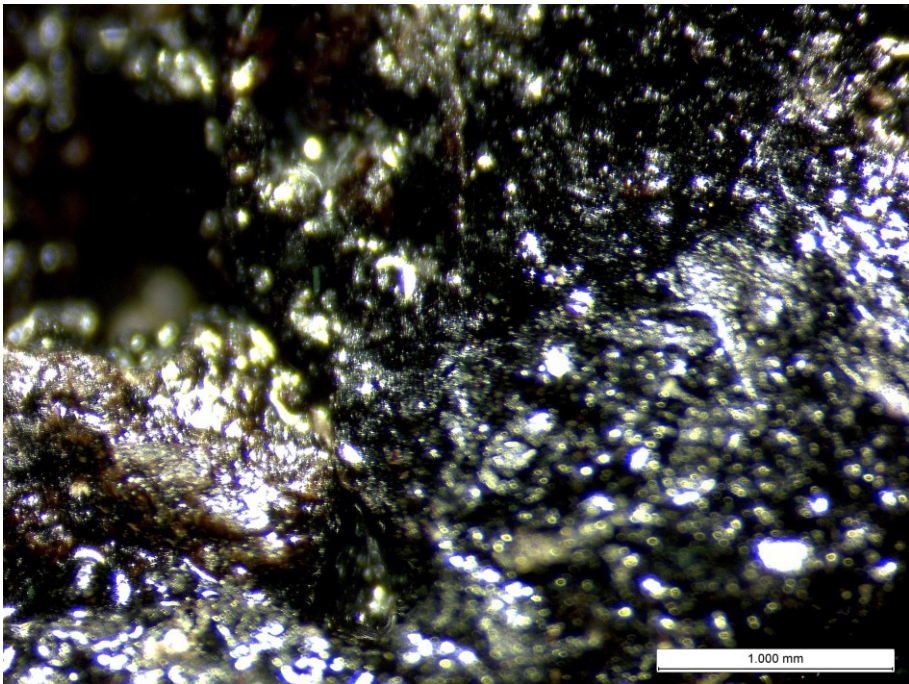
(continua)

Grupo	Identidade	Microscopia ótica da região fraturada (zoom 2x)
01	0% GR	

(continua)

Grupo	Identidade	Microscopia ótica da região fraturada (zoom 2x)
02	0% BA	
07	50% GR	

(conclusão)

Grupo	Identidade	Microscopia ótica da região fraturada (zoom 2x)
08	50% BA	
11	100%	

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Para as dosagens com brita basáltica parte das fraturas ocorreram na interface entre o ligante e o agregado, podendo indicar falta de adesividade adequada. Nestas situações o problema poderia ser contornado com a utilização de aditivos melhoradores de adesividade.

5 CONCLUSÃO

Destaca-se a plena viabilidade e atendimento normativo dos novos revestimentos asfálticos realizados com valorização de RAP e com utilização de pó de pedra de origem granítica e basáltica, resguardada a adequada caracterização e ajustes de dosagem para os parâmetros exigidos.

Torna-se também importante registrar o cuidado para com a falsa curva de distribuição granulométrica do RAP fresado, isto, pois, a separação por tamanho de partícula na etapa de campo não representará adequadamente o elemento quando submetido a novas misturas, uma vez que com o aquecimento a parcela de ligante envelhecido apresentará uma redução da viscosidade, retornando ao estado líquido e desfazendo aglomerações já existentes, tornando a curva granulométrica final da mistura diferente daquela esperada originalmente.

Tal fato é ainda mais evidente quando incorporado o RAP em parcelas isoladas, seja de agregado graúdo ou miúdo da mistura, isto pois, o ligante envelhecido tende a se concentrar na parcela de menor dimensão, em razão da maior área superficial disponível.

Observa-se redução do teor de ligante novo nas misturas em que há a valorização do fresado restrito exclusivamente à faixa de agregados miúdos, com aumento, inclusive, da estabilidade Marshall. Nas substituições exclusivas de agregados graúdos, houve justamente o comportamento inverso. Correlaciona-se ao efeito da falsa curva granulométrica do RAP no estado bruto, situação em que com o aquecimento do material ocorre a desaglomeração das partículas e alteração da curva granulométrica. Todavia ainda observa-se maior vantagem na valorização global do RAP em ambas as parcelas de agregado miúdo e graúdo, visto que os parâmetros normativos são atendidos e não resta resíduo pendente de utilização.

Com o maior nível de valorização do RAP nas misturas asfálticas, observa-se uma economia expressiva na utilização de novos ligantes betuminosos. O aumento no volume de vazios com o incremento de RAP nas misturas, em virtude da diferença de gradação dos agregados e da parcela envelhecida dos elementos constituintes colaboraram para a redução da massa específica das misturas. Para os corpos de prova produzidos com a inclusão de pó de pedra de origem basáltica na mistura foram observados maior economia nos níveis de ligante, em relação àqueles com a

utilização de pó de pedra de origem granítica, independente do nível de RAP incorporado.

O incremento na estabilidade dos corpos de prova, quanto maior a valorização de RAP, demonstra que se faz possível a produção de misturas com adequada estabilidade, semelhantes ou melhores às misturas padrão. Paralelamente, o aumento da fluência, demonstra uma suscetibilidade a pavimentos mais deformáveis quanto maior o incremento de fresado.

O aumento da resistência à tração por compressão diametral, com o incremento do RAP na dosagem, se deve ao fato que o fresado dispõe de uma parcela mais envelhecida e viscosa do ligante preexistente, situação em que misturas mais viscosas apresentam melhor desempenho sob tensão, com menor declínio na resistência quando submetidas a altas condições de temperatura e umidade.

REFERÊNCIAS

- ALESC. **Lei Complementar n.º 741, de 12 de junho de 2019**. Disponível em: <http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2019/741_2019_lei_complementar.html>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- ANTUNES, V.; NEVES, J.; FREIRE, A. C. Performance Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Surface Mixtures. **Recycling**, v. 6, n. 2, 2021.
- ARAUJO JR., L. P. V. **Estudo sobre estabilização de solo com material fresado de pavimentação asfáltica**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- ARAUJO, L. P. DE. Relação entre a resistência mecânica do pavimento asfáltico e a interação de seus constituintes. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.352 - Misturas betuminosas - Determinação da densidade aparente. . 1984, p. 3.
- _____. NBR 11.170 - Serviços de pavimentação - Terminologia. . 1990 a, p. 6.
- _____. NBR 11.171 - Serviços de pavimentação. . 1990 b, p. 2.
- _____. NBR 7.208 - Materiais betuminosos para emprego em pavimentação. . 1990 c, p. 2.
- _____. NBR 12.052 - Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio. . 1992.
- _____. NBR 12.891 - Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. . 1993 a, p. 12.
- _____. NBR 12.948 - Materiais para concreto betuminoso usinado a quente. . 1993 b, p. 3.
- _____. NBR 12.949 - Concreto betuminoso usinado a quente. . 1993 c, p. 5.
- _____. NBR 14.756 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade cinemática. . 2001, p. 11.
- _____. NBR 14.950 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. . 2003, p. 10.
- _____. NBR 10.007 - Amostragem de resíduos sólidos. . 2004 a.
- _____. NBR 15.166 - Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase. . 2004 b, p. 2.
- _____. NBR 10.004 - Resíduos sólidos - Classificação. . 2004 c, p. 77.
- _____. ABNT NBR 15573 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. . 2012 a, p. 1–8.

____. NBR 16.018 - Misturas asfálticas - Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. . 2012 b, p. 12.

____. NBR 15.087 - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. . 2012 c, p. 5.

____. NBR 5.847 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade absoluta. . 2015, p. 17.

____. NBR 6.560 - Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. . 2016 a.

____. NBR 15.619 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. . 2016 b, p. 1–7.

____. NBR 12.584 - Agregado miúdo - Verificação da adesividade ao ligante betuminoso. . 2017 a, p. 4.

____. NBR 12.583 - Agregado graúdo - Verificação da adesividade ao ligante betuminoso. . 2017 b, p. 2.

____. NBR 7.809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. . 2019.

____. NBR 16.915 - Agregados - Amostragem. . 2021 a.

____. NBR 14.883 - Petróleo, derivados de petróleo e biocombustíveis - Amostragem manual. . 2021 b.

____. NBR 16.917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. . 2021 c.

____. NBR 16.916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. . 2021 d.

____. ABNT NBR 15.184 - Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. . 2021 e, p. 1–5.

____. NBR 17.054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. . 2022 a.

____. NBR 16.974 - Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. . 2022 b.

BASTOS, J.; FROTA, T.; SOARES, J. Influência da fração fina do RAP na rigidez e na resistência mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente. **Departamento de Engenharia de Transportes - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes**, p. 1–159, 2023.

- BATTISTI, G. K. **Análise laboratorial do comportamento mecânico de material fresado, estabilizado granulométrica e quimicamente com adição de cimento**. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2019.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2006. v. 1
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. . 1988.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- CARIZZIO MONTEIRO, A. M.; SOUZA SILVA, J. P.; RIBEIRO DE REZENDE, L. Estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de asfalto fresado. **Transportes**, v. 31, n. 1, p. 2771, 28 mar. 2023.
- CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: ABEDA, 2015. v. 1
- CHAVES, J. W. R. *et al.* A importância do processo de britagem na forma dos agregados utilizados em tratamentos superficiais. **Researchgate**, p. 1–8, 2021.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. Brasília: [s.n.].
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002. . 2002.
- CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2020.
- COSTA, R.; CASTORENA, C. Assessing Recycled Binder Availability, Activity, and Contribution at Different Temperatures. **Transportation Research Record**, v. 0, n. 0, 2024.
- DELAVY, F. S. **Desempenho de revestimento em terceira faixa executados com ligante HiMA e SBS: estudo de caso de segmentos monitorados na SC-114**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resolução n.º 14, de 8 de julho de 2021. . 2021, p. 53–53.
- _____. **Infraestrutura Rodoviária**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/infraestrutura-rodoviaria>>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- DNIT. NORMA DNER-ME 053/94 - Misturas betuminosas - percentagem de betume. . 1994 a.

- ____. NORMA DNER-ME 078/94 - Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. . 1994 b.
- ____. DNER-ME 079/94 - Agregado miúdo - adesividade a ligante betuminoso. . 1994 c.
- ____. NORMA DNER-ME 151/94 - Asfaltos - determinação da viscosidade cinemática. . 1994 d.
- ____. NORMA DNER-ME 004/94 - Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada . . 1994 e.
- ____. NORMA DNER-ME 084/95 - Agregado miúdo - determinação da densidade real . . 1995 a.
- ____. NORMA DNER-ME 043/95 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. . 1995 b.
- ____. NORMA DNER-ME 193/96 - Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica . . 1996.
- ____. NORMA DNER-ME 054/97 - Equivalente de areia. . 1997.
- ____. NORMA DNER-ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica. . 1998 a.
- ____. NORMA DNER-ME 035/98 - Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. . 1998 b.
- ____. NORMA DNER-ME 081/98 - Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. . 1998 c.
- ____. NORMA DNER-ME 009/98 - Petróleo e derivados - determinação da densidade - método do densímetro. . 1998 d.
- ____. NORMA DNER-ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro. . 1999.
- ____. NORMA DNIT 031/2006 - ES - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. . 2006 a, p. 1–14.
- ____. NORMA DNIT 095/2006 - EM - Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. . 2006 b, p. 6.
- ____. NORMA DNIT 155/2010-ME - Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. . 2010 a.
- ____. NORMA DNIT 131/2010 - ME - Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. . 2010 b.
- ____. NORMA DNIT 130/2010 - ME - Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio. . 2010 c.

____. NORMA DNIT 129/2011- EM - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. . 2011, p. 4.

____. NORMA DNIT 178/2018 - PRO - Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. . 2018 a, p. 01–19.

____. NORMA DNIT 135/2018 - ME - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. . 2018 b.

____. NORMA DNIT 184/2018 - ME - Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. . 2018 c.

____. NORMA DNIT 136/2018 - ME - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. . 2018 d.

____. NORMA DNIT 412/2019 - ME - Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. . 2019.

____. NORMA DNIT 425/2020 - ME - Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio. . 2020 a.

____. NORMA DNIT 427/2020 - ME - Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. . 2020 b, p. 1–9.

____. NORMA DNIT 411/2021 - ME - Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. . 2021 a.

____. NORMA DNIT 413/2021 - ME - Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. . 2021 b.

____. NORMA DNIT 428/2022 – ME - Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio. . 2022.

____. NORMA DNIT 447/2024 – ME - Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de ensaio. . 2024, p. 1–9.

ENIEB, M. *et al.* Sustainability of using reclaimed asphalt pavement: based-reviewed evidence. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1973, n. 1, p. 12242, ago. 2021.

ESTADÃO. Modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil. 2022.

GAO, J. *et al.* Reducing the variability of multi-source reclaimed asphalt pavement materials: A practice in China. **Construction and Building Materials**, v. 278, p. 122389, 5 abr. 2021.

GASPAR, M. DE S. **Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2019.

K. LAKSHMI ROJA, E. M.; MOGAWER, W. Performance and blending evaluation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 11, p. 2441–2457, 2021.

KUCHIISHI, A. K. *et al.* **Influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e cimento Portland** 2017

LIMA, L. B. F.; OLIVEIRA, R. G. Diagnóstico ambiental do material fresado de pavimentos asfálticos para fins de gerenciamento em Aparecida de Goiânia e Goiânia-GO. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 1, p. 1–155, 2023.

LIU, Q. *et al.* Study on the Thermal Equilibrium Process When Mixing Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement (Rap): Experimental Investigation and Simulation. **SSRN**, 2024.

MENG, Y. *et al.* Effect of increasing preheating temperature on the activation and aging of asphalt binder in reclaimed asphalt pavement (RAP). **Journal of Cleaner Production**, v. 402, p. 136780, 2023.

MOSCHETTA, A.; MELLO, M. Â. M. DA S. Estudo de caso com a reutilização de material fresado como revestimento primário em vias do município de Videira e Joinville. **Ignis Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, v. 9, n. 2, p. 5–18, mar. 2021.

OCTAVIANO, A. P. **Estudo de caso de aditivos poliméricos ao asfalto: aplicação de PMQP CAP 65/90 com adição de SBS na SP-300**. Guarapuava: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

PEREIRA, A. G. **Desenvolvimento de misturas asfálticas contendo material fresado e ligante asfáltico modificado com grafite**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2023.

- PINTO, C. DA S. **Reutilização de material asfáltico fresado: avaliação da potencialidade de utilização em aterros rodoviários**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação asfáltica - conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- QUERINO, M. L.; CARVALHO, L. C. **Traço de asfalto em uma mistura de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) produzido por uma usina de asfalto para tapa-buracos**FEPESMIG, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1411>>. Acesso em: 26 abr. 2024
- TARSI, G.; TATARANNI, P.; SANGIORGI, C. The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. **Materials**, v. 13, 14 set. 2020.
- WEETMAN, C. **Economia circular**. São Paulo: Autêntica, 2019.
- WIRTGEN GROUP. **Recicladoras e estabilizadoras de solos**. Disponível em: <<https://www.wirtgen-group.com/ocs/pt-br/wirtgen/recicladoras-e-estabilizadoras-de-solos-65-c/>>. Acesso em: 1 nov. 2024.
- YANG, J. *et al.* Measurement of particle agglomeration and aggregate breakdown of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123681, 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TRAÇOS DOS CORPOS DE PROVA – ETAPA 1

DOSAGENS COM UTILIZAÇÃO DE PÓ DE PEDRA - GRANITO

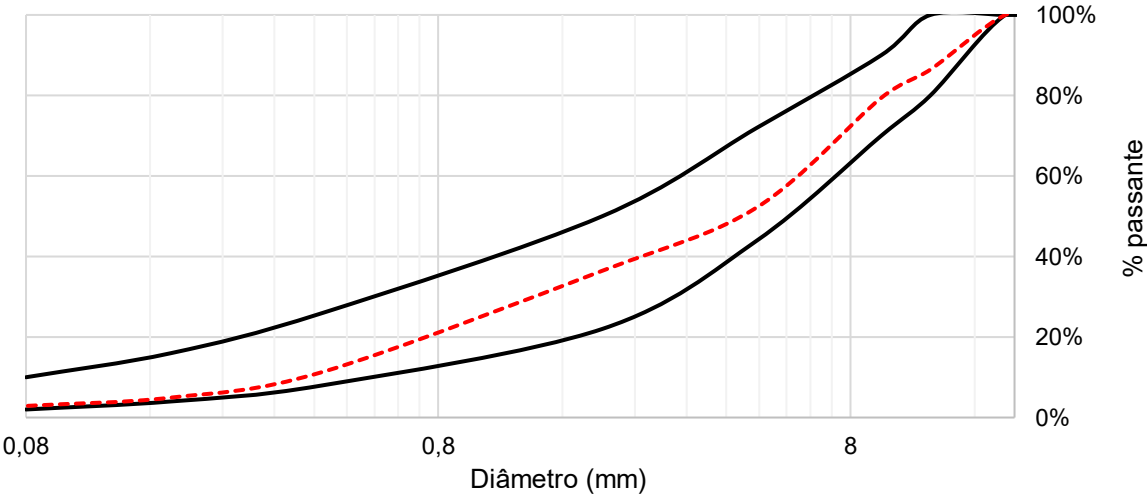
Faixa de agregados: Curva “C” - DNIT.

Quadro 13 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem granítica).

Peneira	Brita 1 (%pas.)	Brita 0 (%pas.)	Pó pedra (%pas.)	Mistura	Faixa "C" - DNIT	
1"	25,00 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,50 mm	32,87	100,00	86,43	80,00	100,00
3/8"	09,50 mm	6,28	100,00	79,40	70,00	90,00
4	04,75 mm	0,19	10,40	52,24	44,00	72,00
10	02,00 mm	0,19	0,29	36,45	22,00	50,00
40	00,42 mm	0,14	0,00	11,34	8,00	26,00
80	00,18 mm	0,03	0,00	4,95	4,00	16,00
200	00,08 mm	0,00	0,00	2,88	2,00	10,00
Distribuição	20,00%	30,00%	50,00%	100,00%		

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

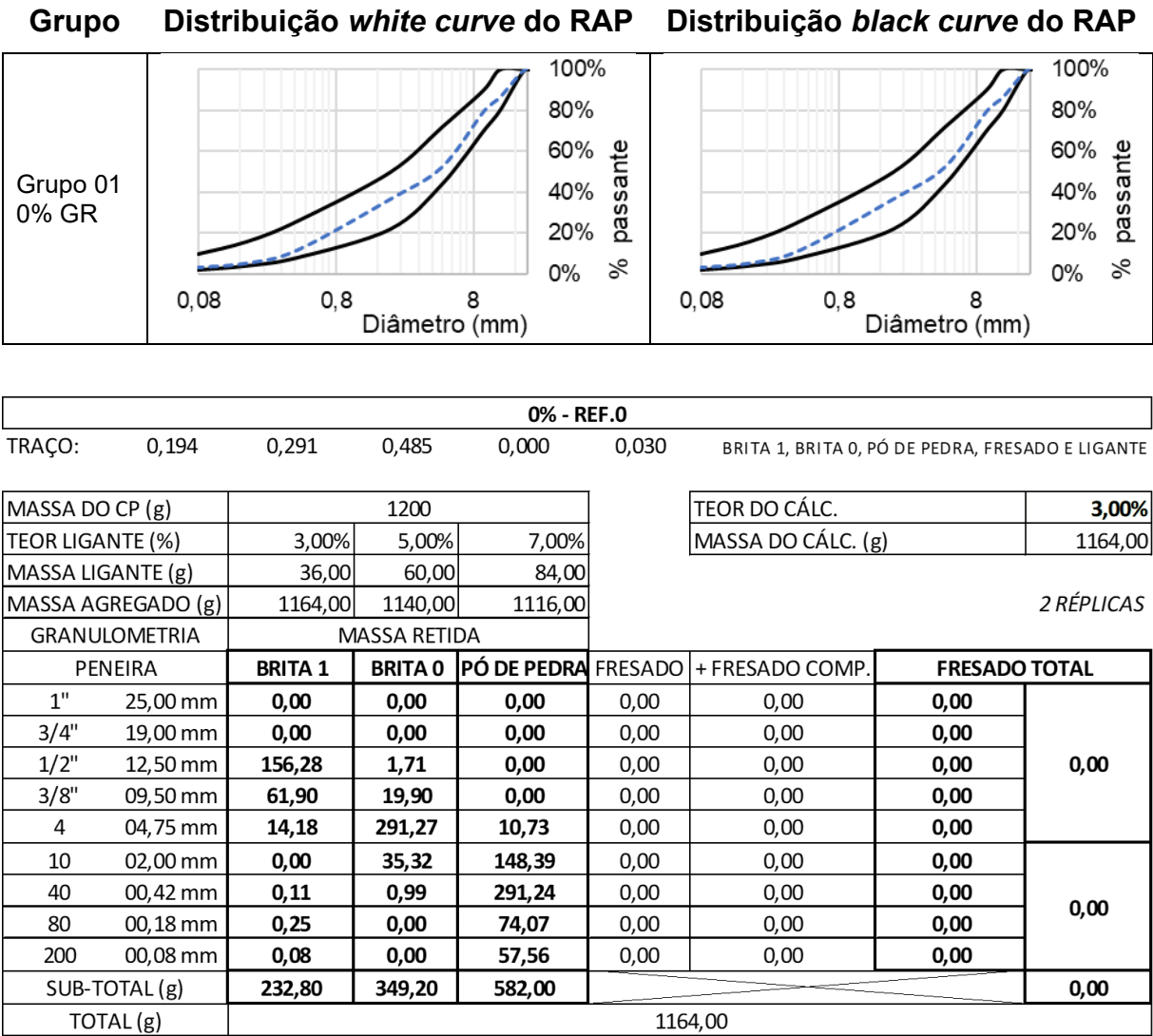
Figura 57 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem granítica). Na imagem a curva resultante da mistura do Quadro 13 corresponde à linha tracejada vermelha, enquanto os limites inferiores e superiores da curva de dosagem “C” - DNIT, estão representadas por linhas pretas contínuas, indicando que a mistura se encontra dentro dos limites normativos.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 58 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 01 (0% GR), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

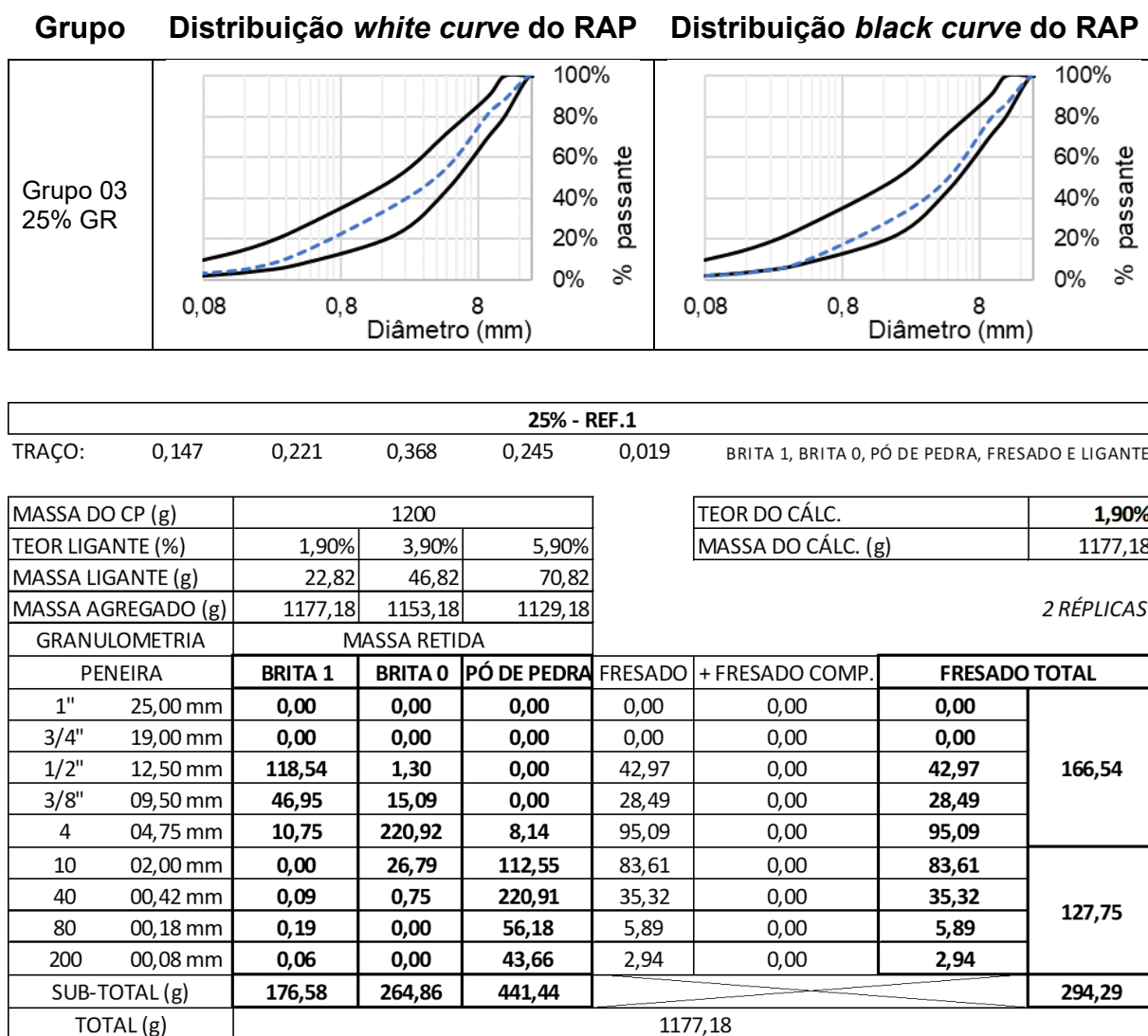
0% - REF.0									
TRAÇO:		0,190	0,285	0,475	0,000	0,050	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200				TEOR DO CÁLC.		5,00%	
TEOR LIGANTE (%)		3,00%	5,00%	7,00%		MASSA DO CÁLC. (g)		1140,00	
MASSA LIGANTE (g)		36,00	60,00	84,00		2 RÉPLICAS			
MASSA AGREGADO (g)		1164,00	1140,00	1116,00					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	153,06	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	60,63	19,49	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,88	285,26	10,51	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	02,00 mm	0,00	34,59	145,33	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,97	285,24	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	72,55	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	56,38	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUB-TOTAL (g)		228,00	342,00	570,00					
TOTAL (g)		1140,00							

0% - REF.0									
TRAÇO:		0,186	0,279	0,465	0,000	0,070	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		7,00%
TEOR LIGANTE (%)		3,00%	5,00%	7,00%			MASSA DO CÁLC. (g)		1116,00
MASSA LIGANTE (g)		36,00	60,00	84,00			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1164,00	1140,00	1116,00					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	149,83	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	59,35	19,08	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,59	279,26	10,29	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	02,00 mm	0,00	33,86	142,27	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,95	279,23	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	71,02	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	55,19	0,00	0,00	0,00		
SUB-TOTAL (g)		223,20	334,80	558,00				0,00	
TOTAL (g)		1116,00							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 59 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 03 (25% GR), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

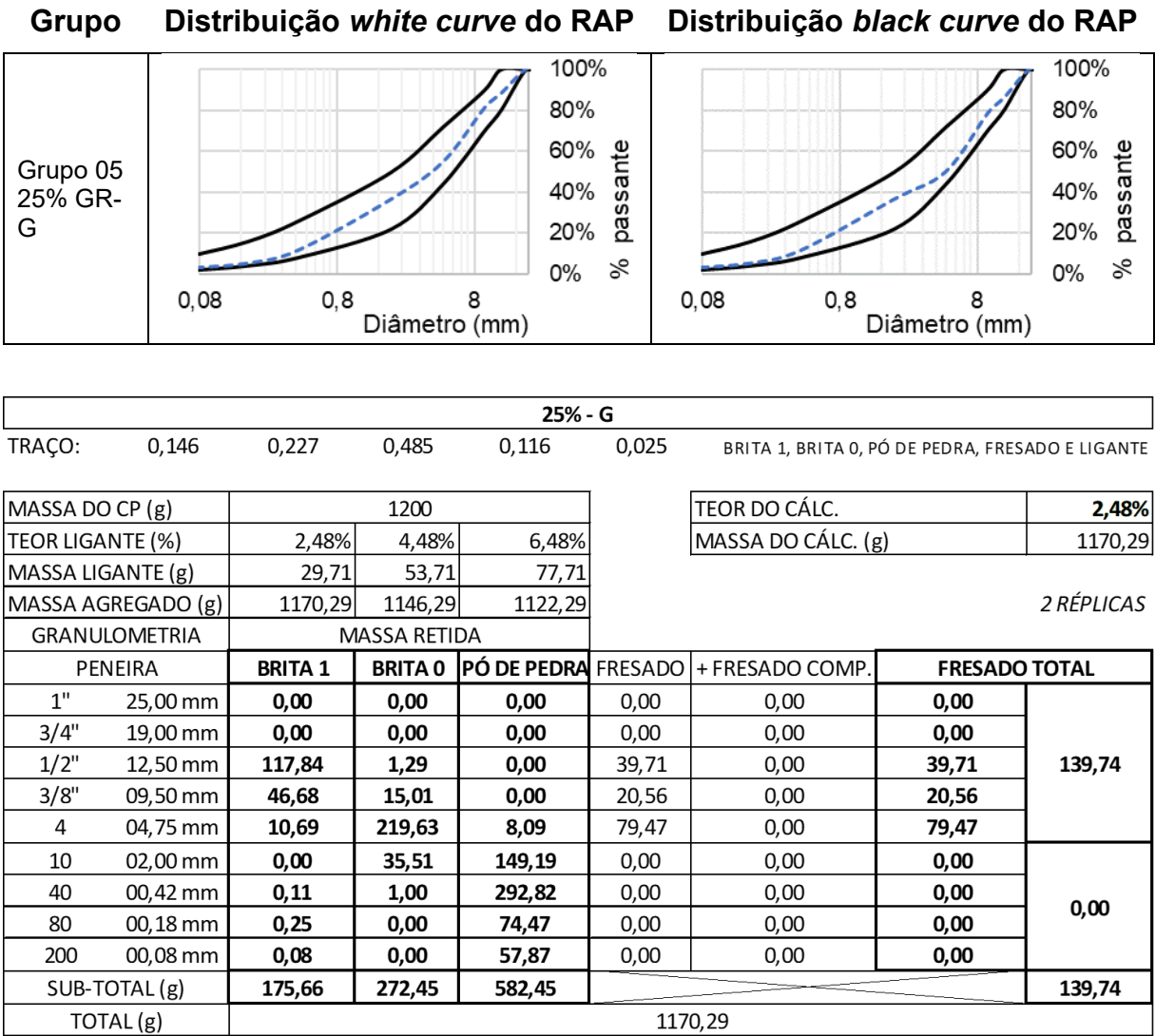
25% - REF.1									
TRAÇO:		0,144	0,216	0,360	0,240	0,039	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		3,90%
TEOR LIGANTE (%)		1,90%	3,90%	5,90%			MASSA DO CÁLC. (g)		1153,18
MASSA LIGANTE (g)		22,82	46,82	70,82			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1177,18	1153,18	1129,18					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	163,15	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	116,12	1,27	0,00	42,09	0,00	42,09		
3/8"	09,50 mm	45,99	14,79	0,00	27,91	0,00	27,91		
4	04,75 mm	10,53	216,42	7,97	93,15	0,00	93,15		
10	02,00 mm	0,00	26,24	110,26	81,90	0,00	81,90	125,15	
40	00,42 mm	0,08	0,74	216,40	34,60	0,00	34,60		
80	00,18 mm	0,18	0,00	55,04	5,77	0,00	5,77		
200	00,08 mm	0,06	0,00	42,77	2,88	0,00	2,88		
SUB-TOTAL (g)		172,98	259,46	432,44				288,29	
TOTAL (g)		1153,18							

25% - REF.1									
TRAÇO:		0,141	0,212	0,353	0,235	0,059	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		5,90%
TEOR LIGANTE (%)		1,90%	3,90%	5,90%			MASSA DO CÁLC. (g)		1129,18
MASSA LIGANTE (g)		22,82	46,82	70,82			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1177,18	1153,18	1129,18					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	159,75	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	113,70	1,24	0,00	41,21	0,00	41,21		
3/8"	09,50 mm	45,04	14,48	0,00	27,33	0,00	27,33		
4	04,75 mm	10,31	211,92	7,81	91,21	0,00	91,21		
10	02,00 mm	0,00	25,70	107,96	80,20	0,00	80,20	122,54	
40	00,42 mm	0,08	0,72	211,90	33,88	0,00	33,88		
80	00,18 mm	0,18	0,00	53,89	5,65	0,00	5,65		
200	00,08 mm	0,06	0,00	41,88	2,82	0,00	2,82		
SUB-TOTAL (g)		169,38	254,06	423,44				282,29	
TOTAL (g)		1129,18							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 60 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 05 (25% GR-G), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

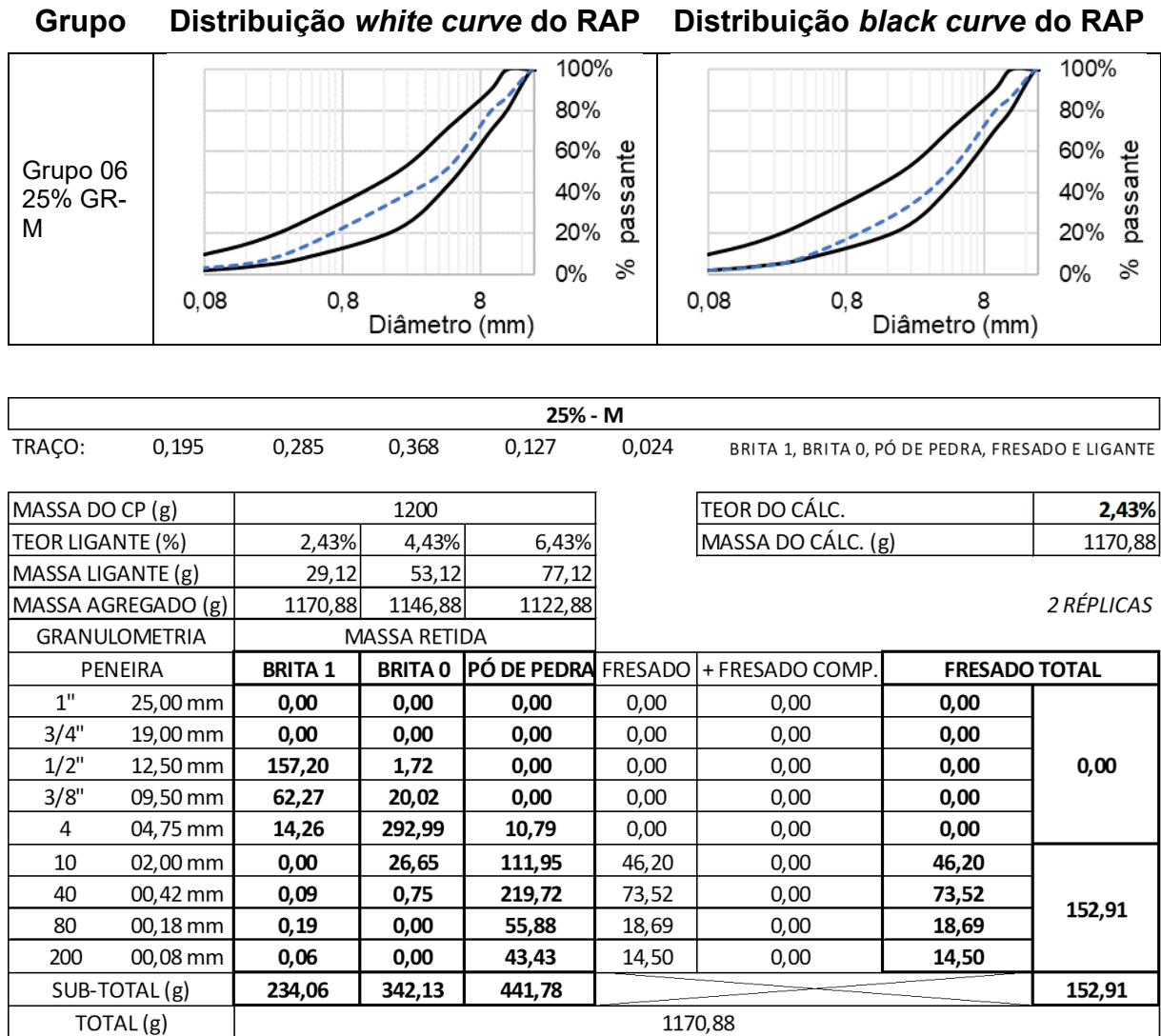
25% - G									
TRAÇO:		0,143	0,222	0,475	0,114	0,045	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		4,48%
TEOR LIGANTE (%)		2,48%	4,48%	6,48%			MASSA DO CÁLC. (g)		1146,29
MASSA LIGANTE (g)		29,71	53,71	77,71					
MASSA AGREGADO (g)		1170,29	1146,29	1122,29			2 RÉPLICAS		
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	136,88	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	115,43	1,26	0,00	38,90	0,00	38,90		
3/8"	09,50 mm	45,72	14,70	0,00	20,14	0,00	20,14		
4	04,75 mm	10,47	215,13	7,93	77,84	0,00	77,84		
10	02,00 mm	0,00	34,78	146,13	0,00	0,00	0,00	0,00	
40	00,42 mm	0,11	0,98	286,81	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	72,95	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	56,69	0,00	0,00	0,00		
SUB-TOTAL (g)		172,05	266,86	570,50				136,88	
TOTAL (g)		1146,29							

25% - G									
TRAÇO:		0,140	0,218	0,465	0,112	0,065	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200				TEOR DO CÁLC.		6,48%	
TEOR LIGANTE (%)		2,48%	4,48%	6,48%		MASSA DO CÁLC. (g)		1122,29	
MASSA LIGANTE (g)		29,71	53,71	77,71		2 RÉPLICAS			
MASSA AGREGADO (g)		1170,29	1146,29	1122,29					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	134,01	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	113,01	1,24	0,00	38,08	0,00	38,08		
3/8"	09,50 mm	44,76	14,39	0,00	19,72	0,00	19,72		
4	04,75 mm	10,25	210,62	7,76	76,21	0,00	76,21	0,00	
10	02,00 mm	0,00	34,06	143,07	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,96	280,81	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	71,42	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	55,50	0,00	0,00	0,00		
SUB-TOTAL (g)		168,45	261,27	558,56				134,01	
TOTAL (g)		1122,29							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 61 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 06 (25% GR-M), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

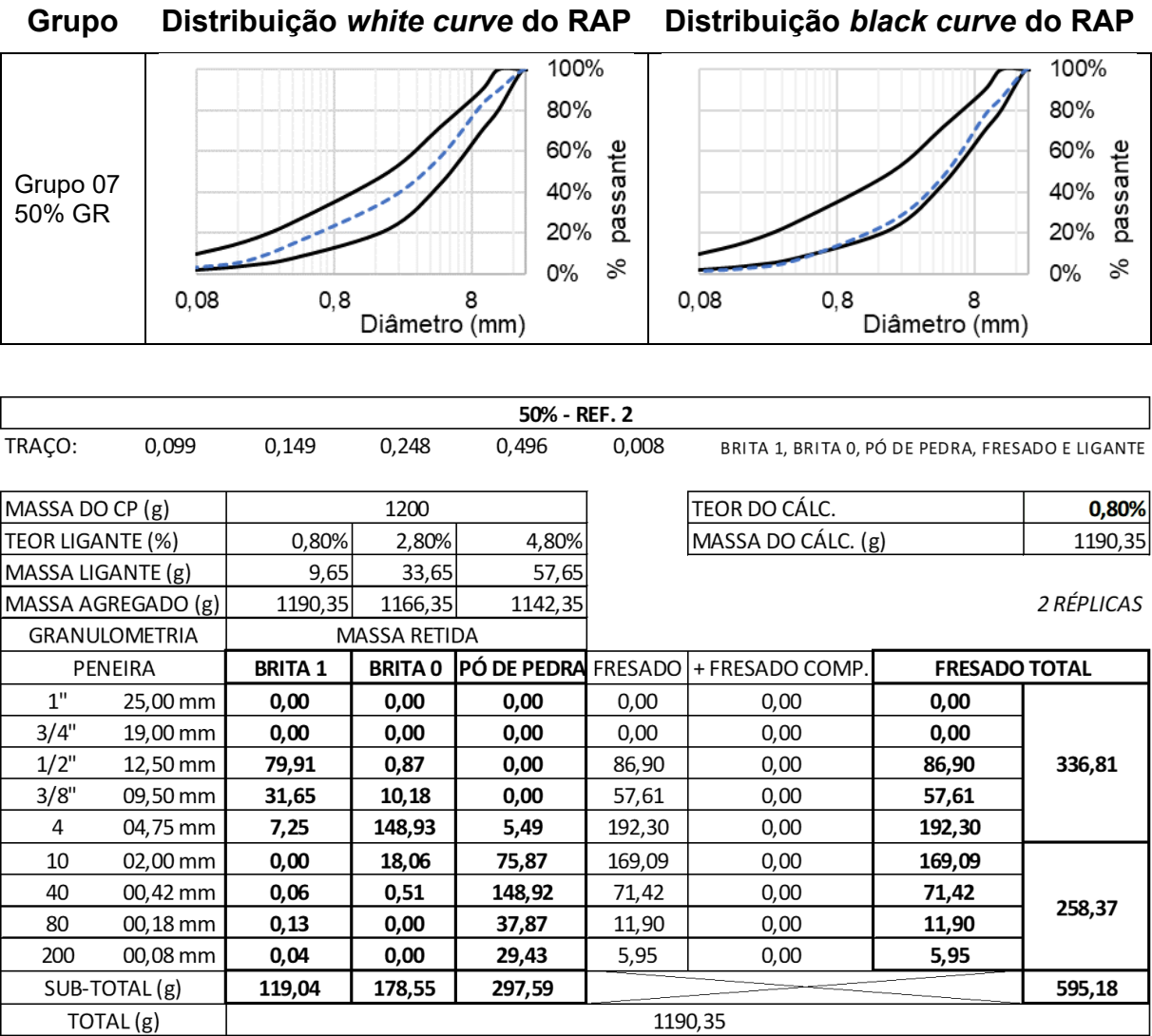
25% - M									
TRAÇO:		0,191	0,279	0,361	0,125	0,044	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		4,43%
TEOR LIGANTE (%)		2,43%	4,43%	6,43%			MASSA DO CÁLC. (g)		1146,88
MASSA LIGANTE (g)		29,12	53,12	77,12			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1170,88	1146,88	1122,88					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	153,98	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	60,99	19,61	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,97	286,98	10,57	0,00	0,00	0,00	149,77	
10	02,00 mm	0,00	26,10	109,66	45,25	0,00	45,25		
40	00,42 mm	0,08	0,73	215,22	72,01	0,00	72,01		
80	00,18 mm	0,18	0,00	54,74	18,31	0,00	18,31		
200	00,08 mm	0,06	0,00	42,54	14,20	0,00	14,20	149,77	
SUB-TOTAL (g)		229,27	335,12	432,72					
TOTAL (g)		1146,88							

25% - M									
TRAÇO:		0,187	0,273	0,353	0,122	0,064	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		6,43%
TEOR LIGANTE (%)		2,43%	4,43%	6,43%			MASSA DO CÁLC. (g)		1122,88
MASSA LIGANTE (g)		29,12	53,12	77,12			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1170,88	1146,88	1122,88					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	150,76	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	59,71	19,20	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,68	280,98	10,35	0,00	0,00	0,00	146,64	
10	02,00 mm	0,00	25,55	107,36	44,31	0,00	44,31		
40	00,42 mm	0,08	0,72	210,72	70,51	0,00	70,51		
80	00,18 mm	0,18	0,00	53,59	17,92	0,00	17,92		
200	00,08 mm	0,06	0,00	41,65	13,90	0,00	13,90	146,64	
SUB-TOTAL (g)		224,47	328,11	423,67					
TOTAL (g)		1122,88							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 62 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 07 (50% GR), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

50% - REF. 2									
TRAÇO:		0,097	0,146	0,243	0,486	0,028	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		2,80%
TEOR LIGANTE (%)		0,80%	2,80%	4,80%			MASSA DO CÁLC. (g)		1166,35
MASSA LIGANTE (g)		9,65	33,65	57,65			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1190,35	1166,35	1142,35					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	330,02	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	78,30	0,86	0,00	85,14	0,00	85,14		
3/8"	09,50 mm	31,01	9,97	0,00	56,45	0,00	56,45		
4	04,75 mm	7,10	145,93	5,38	188,42	0,00	188,42	253,16	
10	02,00 mm	0,00	17,70	74,34	165,68	0,00	165,68		
40	00,42 mm	0,06	0,50	145,92	69,98	0,00	69,98		
80	00,18 mm	0,12	0,00	37,11	11,66	0,00	11,66		
200	00,08 mm	0,04	0,00	28,84	5,83	0,00	5,83		
SUB-TOTAL (g)		116,64	174,95	291,59					583,18
TOTAL (g)		1166,35							

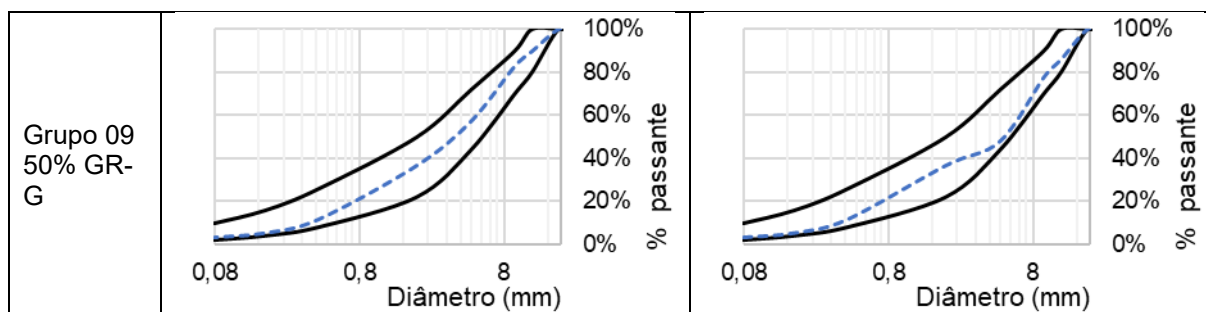
50% - REF. 2									
TRAÇO:		0,095	0,143	0,238	0,476	0,048	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200			TEOR DO CÁLC.		4,80%		
TEOR LIGANTE (%)		0,80%	2,80%	4,80%	MASSA DO CÁLC. (g)		1142,35		
MASSA LIGANTE (g)		9,65	33,65	57,65	2 RÉPLICAS				
MASSA AGREGADO (g)		1190,35	1166,35	1142,35					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	323,23	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	76,69	0,84	0,00	83,39	0,00	83,39		
3/8"	09,50 mm	30,38	9,77	0,00	55,29	0,00	55,29		
4	04,75 mm	6,96	142,93	5,27	184,55	0,00	184,55	247,95	
10	02,00 mm	0,00	17,33	72,81	162,27	0,00	162,27		
40	00,42 mm	0,06	0,49	142,91	68,54	0,00	68,54		
80	00,18 mm	0,12	0,00	36,35	11,42	0,00	11,42		
200	00,08 mm	0,04	0,00	28,25	5,71	0,00	5,71		
SUB-TOTAL (g)		114,24	171,35	285,59				571,18	
TOTAL (g)		1142,35							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 63 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 09 (50% GR-G), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)

Grupo Distribuição *white curve* do RAP Distribuição *black curve* do RAP



50% - G						
TRAÇO:	0,098	0,162	0,486	0,234	0,020	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE

MASSA DO CP (g)	1200		
TEOR LIGANTE (%)	1,95%	3,95%	5,95%
MASSA LIGANTE (g)	23,41	47,41	71,41
MASSA AGREGADO (g)	1176,59	1152,59	1128,59

TEOR DO CÁLC.	1,95%
MASSA DO CÁLC. (g)	1176,59

2 RÉPLICAS

GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA						
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL	
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	280,99
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1/2"	12,50 mm	78,98	0,86	0,00	79,85	0,00	79,85	
3/8"	09,50 mm	31,29	10,06	0,00	41,34	0,00	41,34	
4	04,75 mm	7,16	147,21	5,42	159,80	0,00	159,80	0,00
10	02,00 mm	0,00	35,70	149,99	0,00	0,00	0,00	
40	00,42 mm	0,12	1,00	294,39	0,00	0,00	0,00	
80	00,18 mm	0,25	0,00	74,87	0,00	0,00	0,00	
200	00,08 mm	0,08	0,00	58,19	0,00	0,00	0,00	
SUB-TOTAL (g)		117,88	194,84	582,87				280,99
TOTAL (g)		1176,59						

(conclusão)

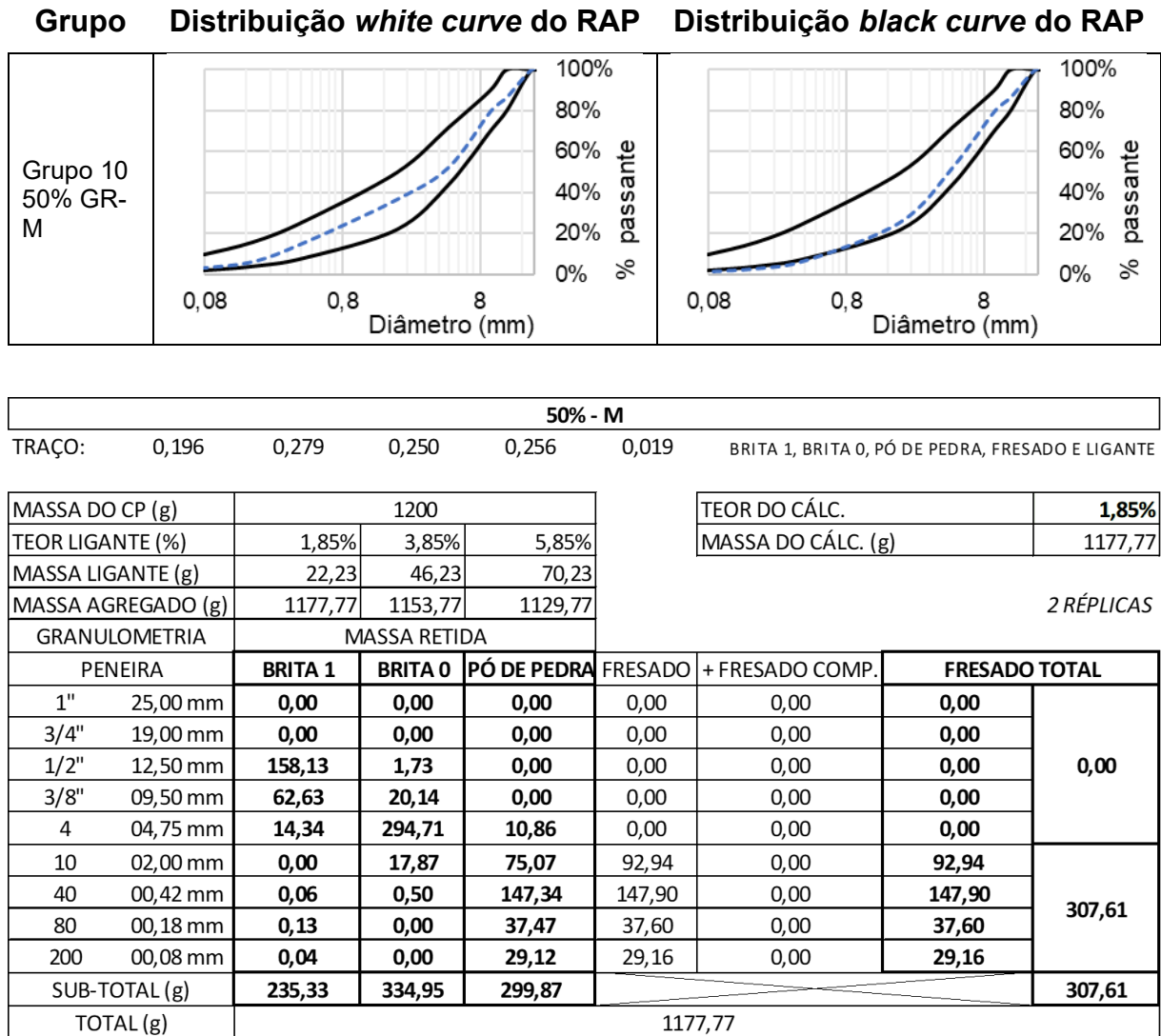
50% - G									
TRAÇO:		0,096	0,159	0,476	0,229	0,040	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		3,95%
TEOR LIGANTE (%)		1,95%	3,95%	5,95%			MASSA DO CÁLC. (g)		1152,59
MASSA LIGANTE (g)		23,41	47,41	71,41			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1176,59	1152,59	1128,59					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	275,26	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	77,37	0,85	0,00	78,22	0,00	78,22		
3/8"	09,50 mm	30,65	9,85	0,00	40,50	0,00	40,50		
4	04,75 mm	7,02	144,21	5,31	156,54	0,00	156,54	0,00	
10	02,00 mm	0,00	34,97	146,93	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,98	288,39	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,25	0,00	73,35	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	57,00	0,00	0,00	0,00	275,26	
SUB-TOTAL (g)		115,48	190,87	570,98					
TOTAL (g)		1152,59							

50% - G									
TRAÇO:		0,094	0,156	0,466	0,225	0,060	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		5,95%
TEOR LIGANTE (%)		1,95%	3,95%	5,95%			MASSA DO CÁLC. (g)		1128,59
MASSA LIGANTE (g)		23,41	47,41	71,41			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1176,59	1152,59	1128,59					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	269,53	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	75,76	0,83	0,00	76,59	0,00	76,59		
3/8"	09,50 mm	30,01	9,65	0,00	39,66	0,00	39,66		
4	04,75 mm	6,87	141,20	5,20	153,28	0,00	153,28	0,00	
10	02,00 mm	0,00	34,25	143,87	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,96	282,38	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	71,82	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	55,81	0,00	0,00	0,00	269,53	
SUB-TOTAL (g)		113,07	186,90	559,09					
TOTAL (g)		1128,59							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 64 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 10 (50% GR-M), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



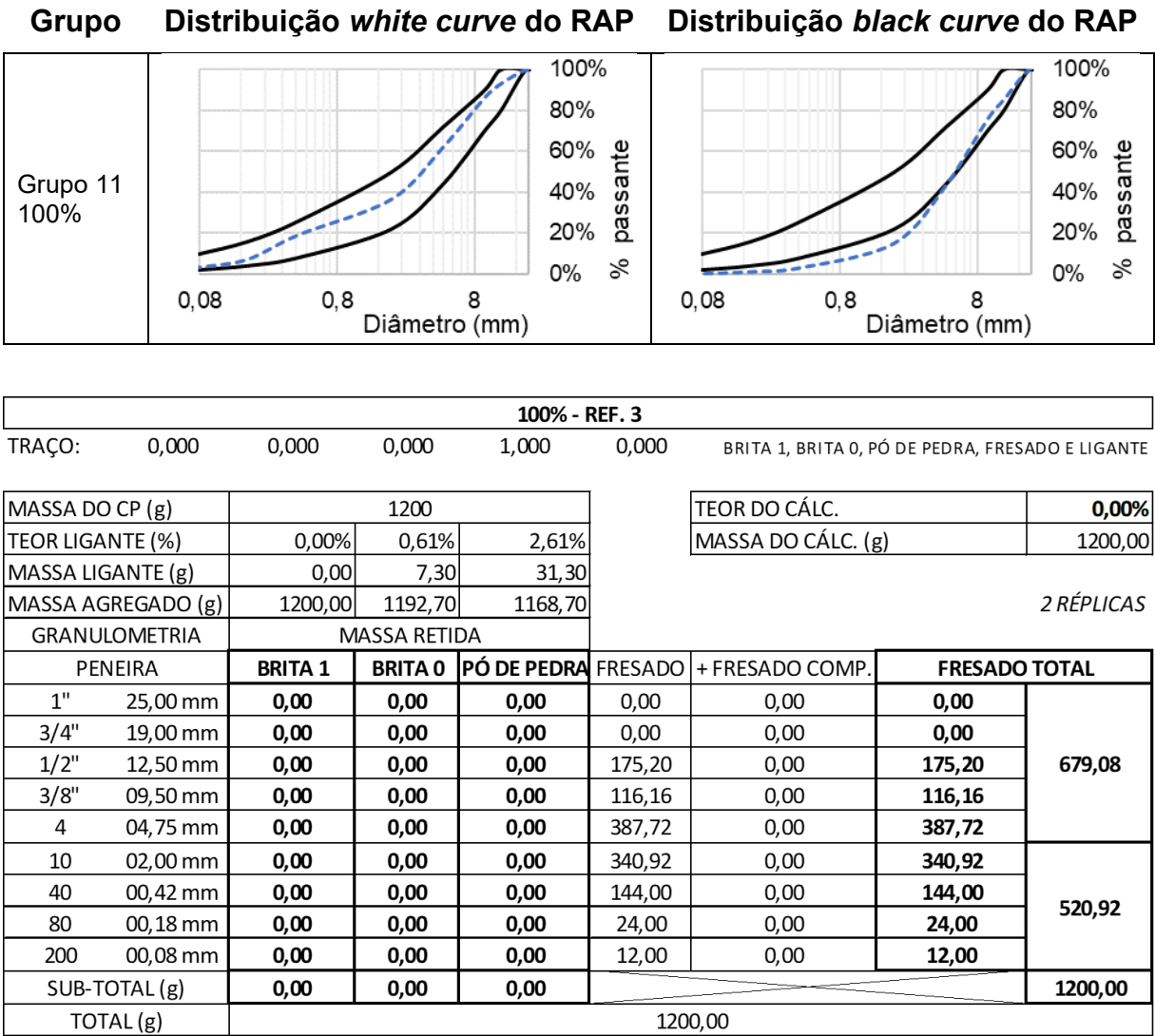
50% - M									
TRAÇO:		0,192	0,273	0,245	0,251	0,039	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		3,85%
TEOR LIGANTE (%)		1,85%	3,85%	5,85%			MASSA DO CÁLC. (g)		1153,77
MASSA LIGANTE (g)		22,23	46,23	70,23			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1177,77	1153,77	1129,77					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	154,90	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	61,36	19,73	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	14,05	288,71	10,64	0,00	0,00	0,00	301,34	
10	02,00 mm	0,00	17,51	73,54	91,05	0,00	91,05		
40	00,42 mm	0,06	0,49	144,34	144,89	0,00	144,89		
80	00,18 mm	0,12	0,00	36,71	36,84	0,00	36,84		
200	00,08 mm	0,04	0,00	28,53	28,57	0,00	28,57		
SUB-TOTAL (g)		230,53	328,13	293,76				301,34	
TOTAL (g)		1153,77							

50% - M									
TRAÇO:		0,188	0,268	0,240	0,246	0,059	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		5,85%
TEOR LIGANTE (%)		1,85%	3,85%	5,85%			MASSA DO CÁLC. (g)		1129,77
MASSA LIGANTE (g)		22,23	46,23	70,23			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1177,77	1153,77	1129,77					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	151,68	1,66	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	60,08	19,32	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,76	282,70	10,42	0,00	0,00	0,00	295,08	
10	02,00 mm	0,00	17,14	72,01	89,15	0,00	89,15		
40	00,42 mm	0,06	0,48	141,34	141,88	0,00	141,88		
80	00,18 mm	0,12	0,00	35,95	36,07	0,00	36,07		
200	00,08 mm	0,04	0,00	27,93	27,97	0,00	27,97		
SUB-TOTAL (g)		225,74	321,30	287,65				295,08	
TOTAL (g)		1129,77							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 65 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 11 (100%), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

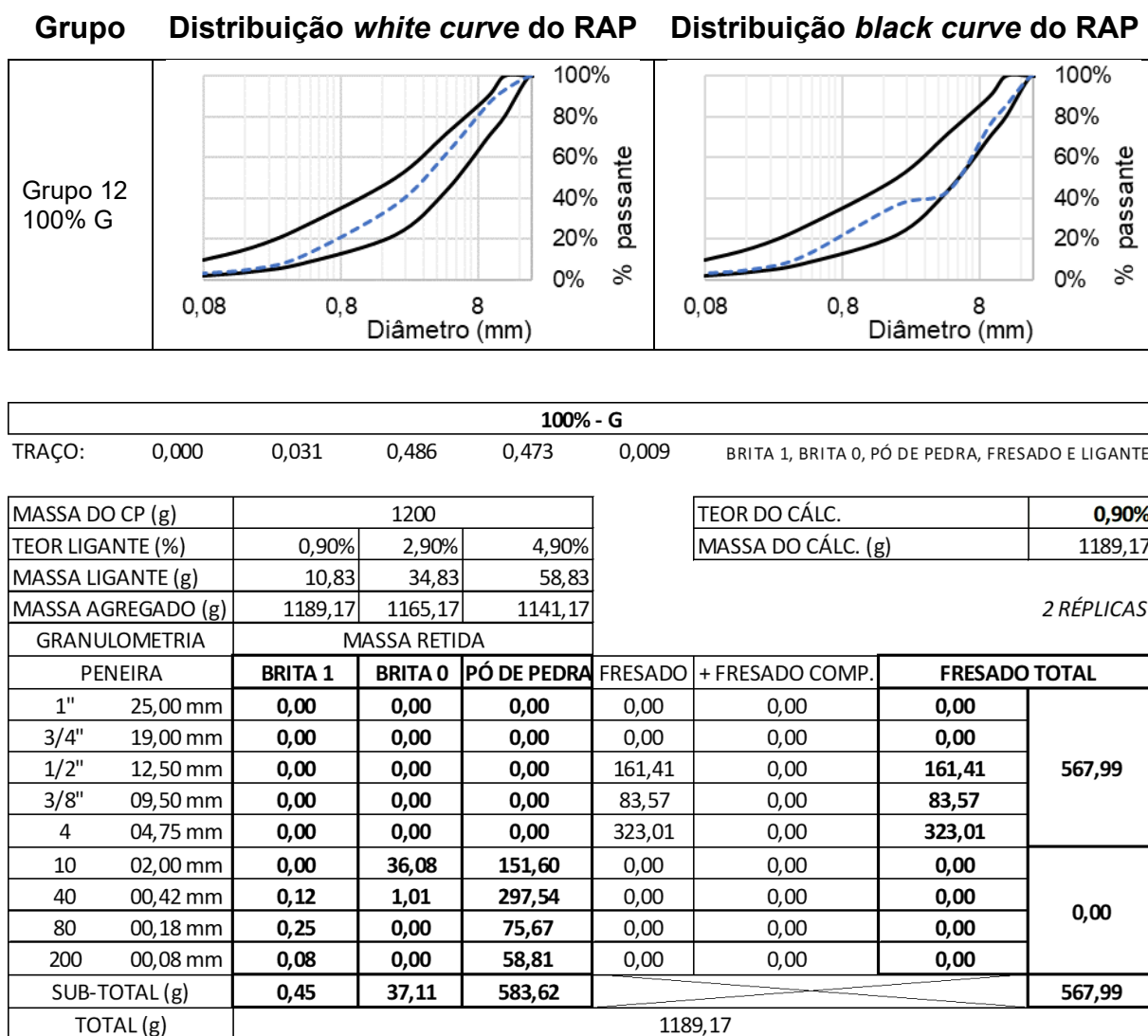
100% - REF. 3									
TRAÇO:		0,000	0,000	0,000	0,994	0,006	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		0,61%
TEOR LIGANTE (%)		0,00%	0,61%	2,61%			MASSA DO CÁLC. (g)		1192,70
MASSA LIGANTE (g)		0,00	7,30	31,30			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1200,00	1192,70	1168,70					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	674,95	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	0,00	0,00	0,00	174,13	0,00	174,13		
3/8"	09,50 mm	0,00	0,00	0,00	115,45	0,00	115,45		
4	04,75 mm	0,00	0,00	0,00	385,36	0,00	385,36	517,75	
10	02,00 mm	0,00	0,00	0,00	338,85	0,00	338,85		
40	00,42 mm	0,00	0,00	0,00	143,12	0,00	143,12		
80	00,18 mm	0,00	0,00	0,00	23,85	0,00	23,85		
200	00,08 mm	0,00	0,00	0,00	11,93	0,00	11,93		
SUB-TOTAL (g)		0,00	0,00	0,00				1192,70	
TOTAL (g)		1192,70							

100% - REF. 3									
TRAÇO:		0,000	0,000	0,000	0,974	0,026	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200			TEOR DO CÁLC.		2,61%		
TEOR LIGANTE (%)		0,00%	0,61%	2,61%	MASSA DO CÁLC. (g)		1168,70		
MASSA LIGANTE (g)		0,00	7,30	31,30	2 RÉPLICAS				
MASSA AGREGADO (g)		1200,00	1192,70	1168,70					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	661,37	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	0,00	0,00	0,00	170,63	0,00	170,63		
3/8"	09,50 mm	0,00	0,00	0,00	113,13	0,00	113,13		
4	04,75 mm	0,00	0,00	0,00	377,61	0,00	377,61	507,33	
10	02,00 mm	0,00	0,00	0,00	332,03	0,00	332,03		
40	00,42 mm	0,00	0,00	0,00	140,24	0,00	140,24		
80	00,18 mm	0,00	0,00	0,00	23,37	0,00	23,37		
200	00,08 mm	0,00	0,00	0,00	11,69	0,00	11,69		
SUB-TOTAL (g)		0,00	0,00	0,00				1168,70	
TOTAL (g)		1168,70							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 66 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 12 (100%-G), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

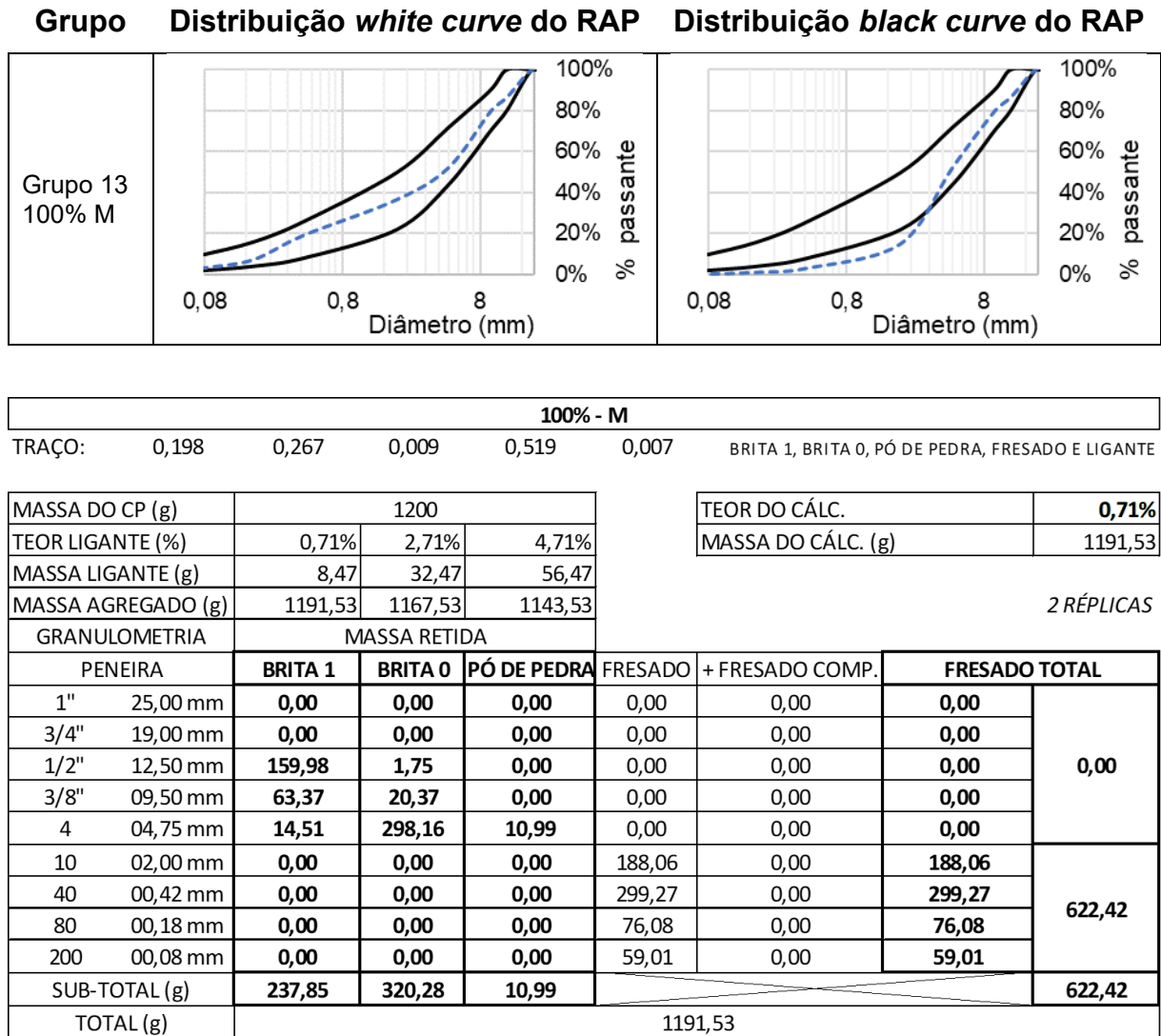
100% - G									
TRAÇO:		0,000	0,030	0,477	0,464	0,029	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200				TEOR DO CÁLC.		2,90%	
TEOR LIGANTE (%)		0,90%	2,90%	4,90%		MASSA DO CÁLC. (g)		1165,17	
MASSA LIGANTE (g)		10,83	34,83	58,83		2 RÉPLICAS			
MASSA AGREGADO (g)		1189,17	1165,17	1141,17					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	556,53	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	0,00	0,00	0,00	158,15	0,00	158,15		
3/8"	09,50 mm	0,00	0,00	0,00	81,89	0,00	81,89		
4	04,75 mm	0,00	0,00	0,00	316,49	0,00	316,49	0,00	
10	02,00 mm	0,00	35,36	148,54	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,99	291,54	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,25	0,00	74,15	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	57,62	0,00	0,00	0,00	556,53	
SUB-TOTAL (g)		0,44	36,36	571,84					
TOTAL (g)		1165,17							

100% - G									
TRAÇO:		0,000	0,030	0,467	0,454	0,049	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		4,90%
TEOR LIGANTE (%)		0,90%	2,90%	4,90%			MASSA DO CÁLC. (g)		1141,17
MASSA LIGANTE (g)		10,83	34,83	58,83					
MASSA AGREGADO (g)		1189,17	1165,17	1141,17			2 RÉPLICAS		
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	545,06	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	0,00	0,00	0,00	154,89	0,00	154,89		
3/8"	09,50 mm	0,00	0,00	0,00	80,20	0,00	80,20		
4	04,75 mm	0,00	0,00	0,00	309,97	0,00	309,97	0,00	
10	02,00 mm	0,00	34,63	145,48	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,97	285,53	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	72,62	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	56,43	0,00	0,00	0,00	545,06	
SUB-TOTAL (g)		0,44	35,61	560,06					
TOTAL (g)		1141,17							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 67 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 13 (100%-M), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

100% - M									
TRAÇO:		0,194	0,262	0,009	0,508	0,027	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200				TEOR DO CÁLC.		2,71%	
TEOR LIGANTE (%)		0,71%	2,71%	4,71%		MASSA DO CÁLC. (g)		1167,53	
MASSA LIGANTE (g)		8,47	32,47	56,47		2 RÉPLICAS			
MASSA AGREGADO (g)		1191,53	1167,53	1143,53					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	156,75	1,72	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	62,09	19,96	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	14,22	292,15	10,76	0,00	0,00	0,00	609,88	
10	02,00 mm	0,00	0,00	0,00	184,27	0,00	184,27		
40	00,42 mm	0,00	0,00	0,00	293,24	0,00	293,24		
80	00,18 mm	0,00	0,00	0,00	74,55	0,00	74,55		
200	00,08 mm	0,00	0,00	0,00	57,82	0,00	57,82	609,88	
SUB-TOTAL (g)		233,06	313,83	10,76					
TOTAL (g)		1167,53							

100% - M									
TRAÇO:		0,190	0,256	0,009	0,498	0,047	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200				TEOR DO CÁLC.		4,71%	
TEOR LIGANTE (%)		0,71%	2,71%	4,71%		MASSA DO CÁLC. (g)		1143,53	
MASSA LIGANTE (g)		8,47	32,47	56,47		2 RÉPLICAS			
MASSA AGREGADO (g)		1191,53	1167,53	1143,53					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	153,53	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	60,81	19,55	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,93	286,15	10,54	0,00	0,00	0,00	597,34	
10	02,00 mm	0,00	0,00	0,00	180,48	0,00	180,48		
40	00,42 mm	0,00	0,00	0,00	287,21	0,00	287,21		
80	00,18 mm	0,00	0,00	0,00	73,02	0,00	73,02		
200	00,08 mm	0,00	0,00	0,00	56,63	0,00	56,63	597,34	
SUB-TOTAL (g)		228,27	307,38	10,54					
TOTAL (g)		1143,53							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

DOSAGENS COM UTILIZAÇÃO DE PÓ DE PEDRA - BASALTO

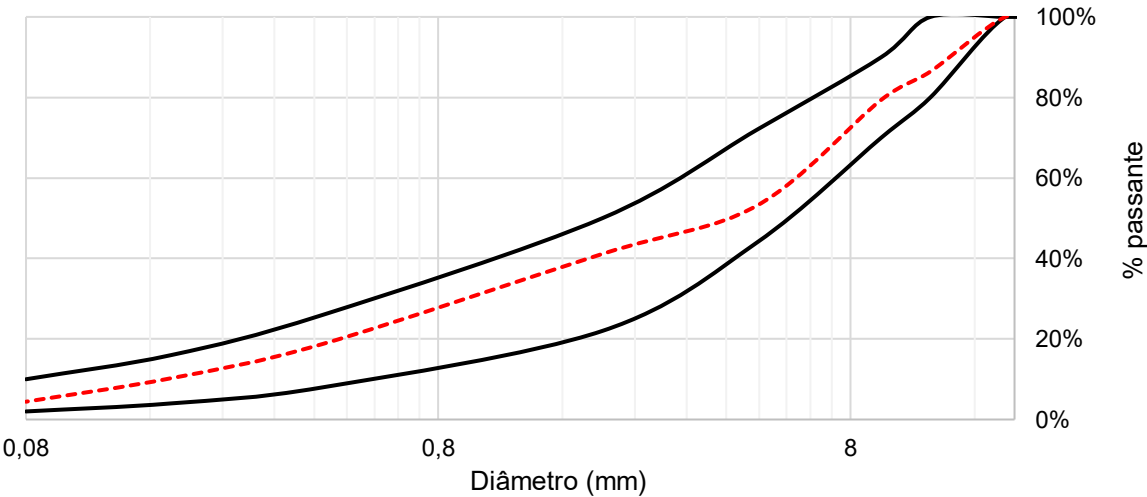
Faixa de agregados: Curva “C” - DNIT.

Quadro 14 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem basáltica).

Peneira		Brita 1 (% _{pas.})	Brita 0 (% _{pas.})	Pó pedra (% _{pas.})	Mistura	Faixa "C" - DNIT	
1"	25,00 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,50 mm	32,87	99,51	100,00	86,43	80,00	100,00
3/8"	09,50 mm	6,28	93,81	100,00	79,40	70,00	90,00
4	04,75 mm	0,19	10,40	100,00	53,16	44,00	72,00
10	02,00 mm	0,19	0,29	82,00	41,12	22,00	50,00
40	00,42 mm	0,14	0,00	37,50	18,78	8,00	26,00
80	00,18 mm	0,03	0,00	20,50	10,26	4,00	16,00
200	00,08 mm	0,00	0,00	8,85	4,43	2,00	10,00
Distribuição		20,00%	30,00%	50,00%	100,00%		

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

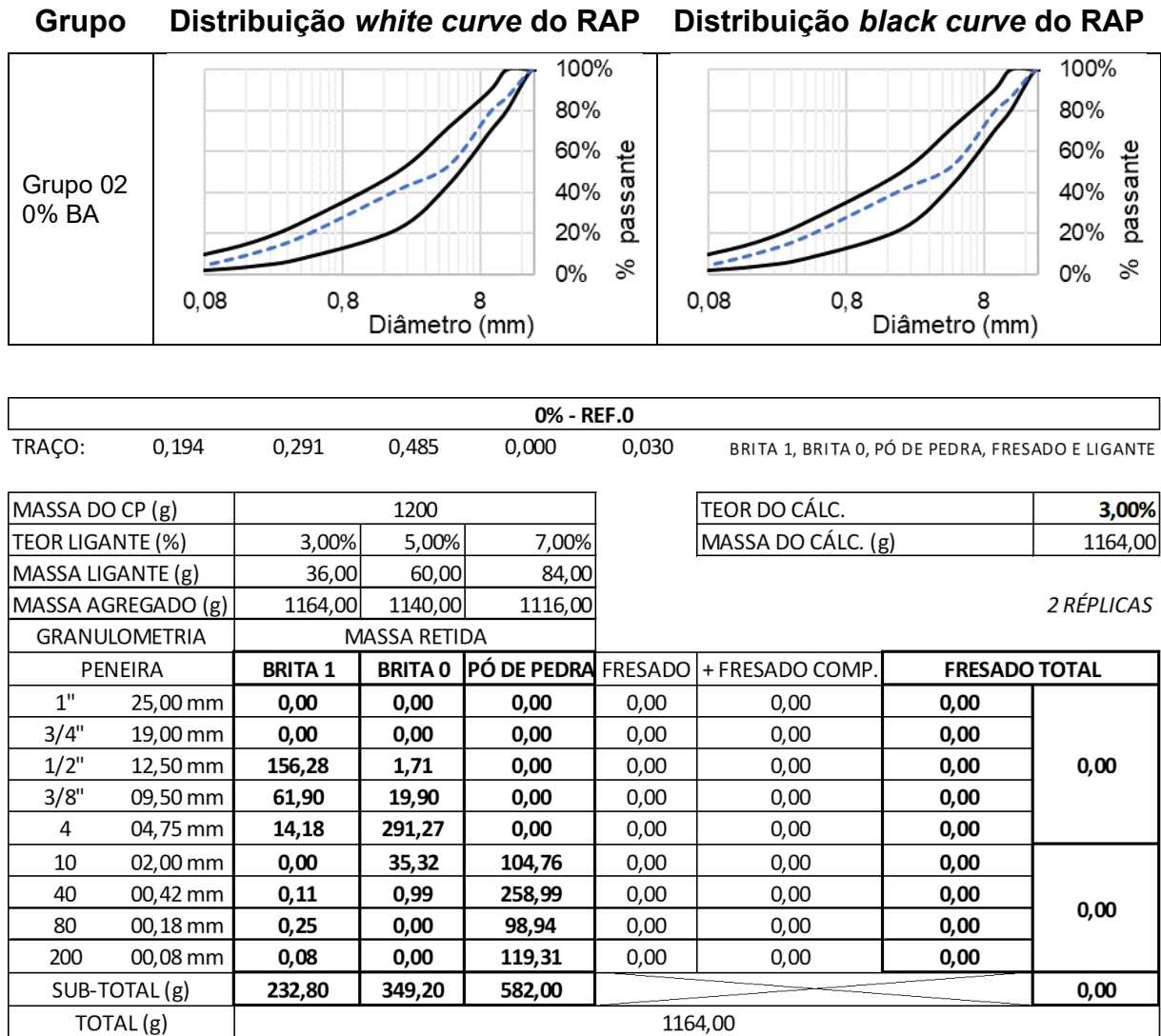
Figura 68 – Distribuição granulométrica entre os agregados naturais (considerando pó de pedra de origem basáltica). Na imagem a curva resultante da mistura do Quadro 14 corresponde à linha tracejada vermelha, enquanto os limites inferiores e superiores da curva de dosagem “C” - DNIT, estão representadas por linhas pretas contínuas, indicando que a mistura se encontra dentro dos limites normativos.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 69 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 02 (0% BA) seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

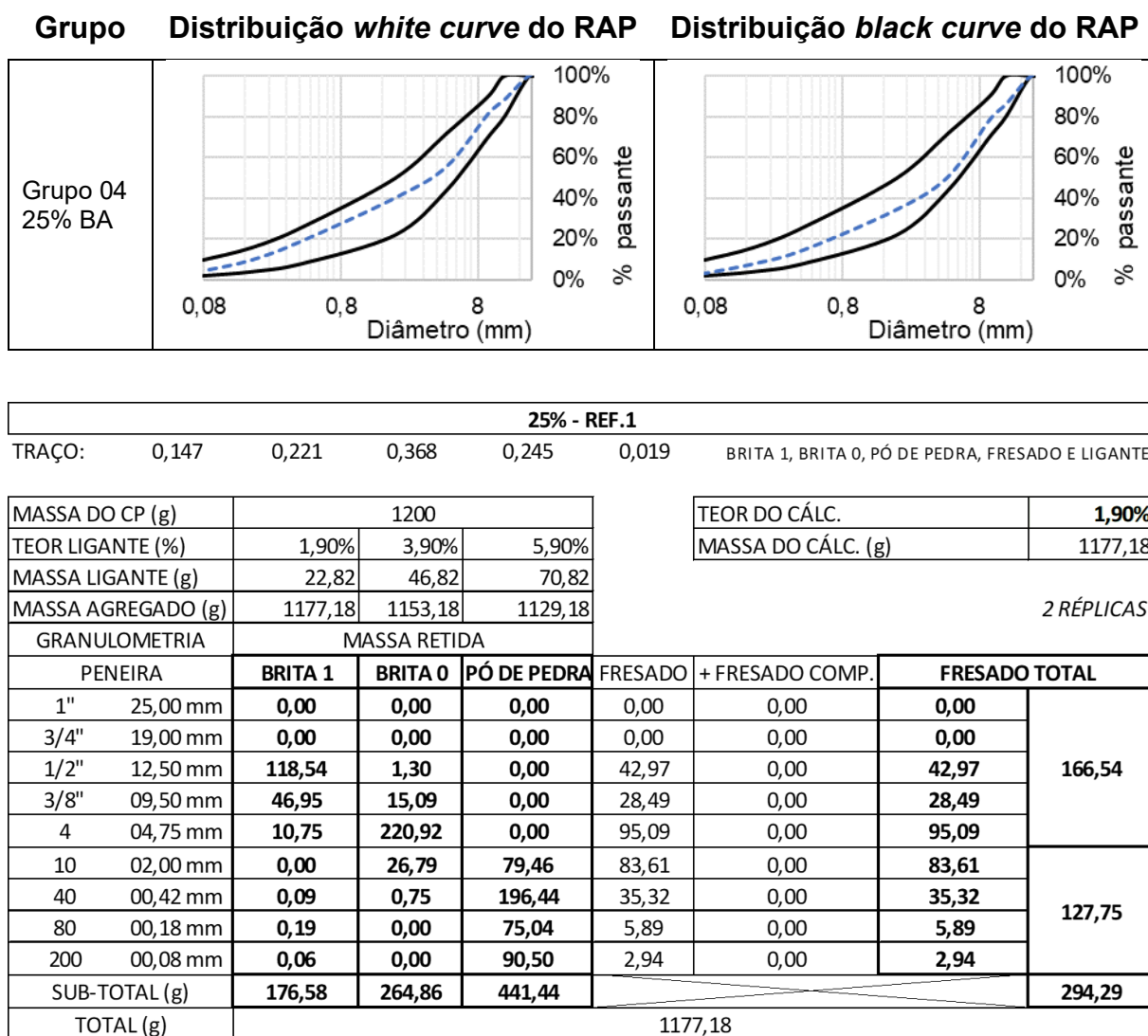
0% - REF.0									
TRAÇO:		0,190	0,285	0,475	0,000	0,050	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		5,00%
TEOR LIGANTE (%)		3,00%	5,00%	7,00%			MASSA DO CÁLC. (g)		1140,00
MASSA LIGANTE (g)		36,00	60,00	84,00			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1164,00	1140,00	1116,00					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	153,06	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	60,63	19,49	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,88	285,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	02,00 mm	0,00	34,59	102,60	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,97	253,65	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	96,90	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	116,85	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUB-TOTAL (g)		228,00	342,00	570,00					
TOTAL (g)		1140,00							

0% - REF.0									
TRAÇO:		0,186	0,279	0,465	0,000	0,070	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		7,00%
TEOR LIGANTE (%)		3,00%	5,00%	7,00%			MASSA DO CÁLC. (g)		1116,00
MASSA LIGANTE (g)		36,00	60,00	84,00			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1164,00	1140,00	1116,00					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	149,83	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00		
3/8"	09,50 mm	59,35	19,08	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	04,75 mm	13,59	279,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	02,00 mm	0,00	33,86	100,44	0,00	0,00	0,00		
40	00,42 mm	0,11	0,95	248,31	0,00	0,00	0,00		
80	00,18 mm	0,24	0,00	94,86	0,00	0,00	0,00		
200	00,08 mm	0,08	0,00	114,39	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUB-TOTAL (g)		223,20	334,80	558,00					
TOTAL (g)		1116,00							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 70 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 04 (25% BA), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

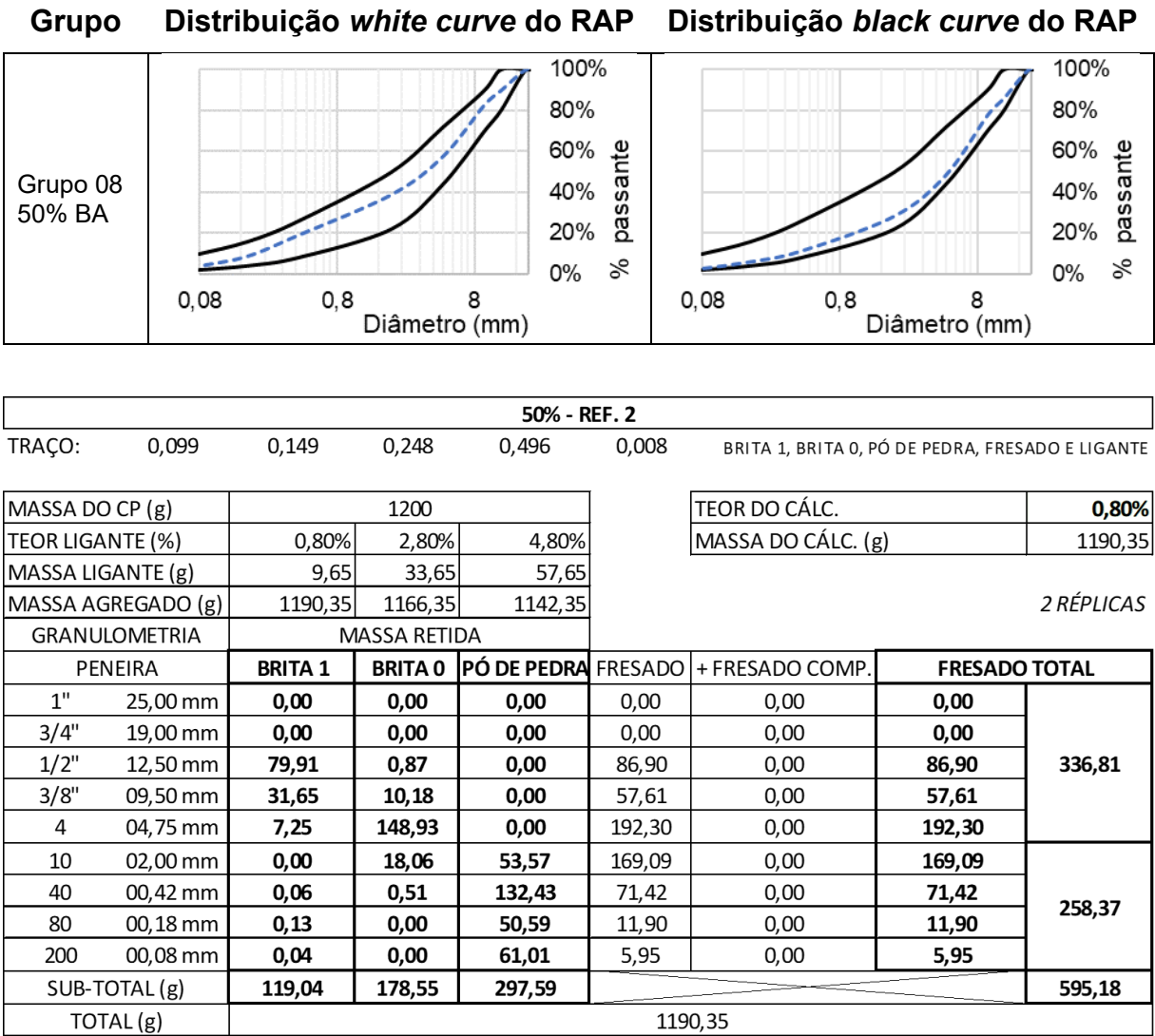
25% - REF.1									
TRAÇO:		0,144	0,216	0,360	0,240	0,039	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		3,90%
TEOR LIGANTE (%)		1,90%	3,90%	5,90%			MASSA DO CÁLC. (g)		1153,18
MASSA LIGANTE (g)		22,82	46,82	70,82					
MASSA AGREGADO (g)		1177,18	1153,18	1129,18			2 RÉPLICAS		
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	163,15	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	116,12	1,27	0,00	42,09	0,00	42,09		
3/8"	09,50 mm	45,99	14,79	0,00	27,91	0,00	27,91		
4	04,75 mm	10,53	216,42	0,00	93,15	0,00	93,15		
10	02,00 mm	0,00	26,24	77,84	81,90	0,00	81,90	125,15	
40	00,42 mm	0,08	0,74	192,44	34,60	0,00	34,60		
80	00,18 mm	0,18	0,00	73,51	5,77	0,00	5,77		
200	00,08 mm	0,06	0,00	88,65	2,88	0,00	2,88		
SUB-TOTAL (g)		172,98	259,46	432,44				288,29	
TOTAL (g)		1153,18							

25% - REF.1									
TRAÇO:		0,141	0,212	0,353	0,235	0,059	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		5,90%
TEOR LIGANTE (%)		1,90%	3,90%	5,90%			MASSA DO CÁLC. (g)		1129,18
MASSA LIGANTE (g)		22,82	46,82	70,82			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1177,18	1153,18	1129,18					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	159,75	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	113,70	1,24	0,00	41,21	0,00	41,21		
3/8"	09,50 mm	45,04	14,48	0,00	27,33	0,00	27,33		
4	04,75 mm	10,31	211,92	0,00	91,21	0,00	91,21	122,54	
10	02,00 mm	0,00	25,70	76,22	80,20	0,00	80,20		
40	00,42 mm	0,08	0,72	188,43	33,88	0,00	33,88		
80	00,18 mm	0,18	0,00	71,98	5,65	0,00	5,65		
200	00,08 mm	0,06	0,00	86,81	2,82	0,00	2,82		
SUB-TOTAL (g)		169,38	254,06	423,44				282,29	
TOTAL (g)		1129,18							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 71 – Distribuição granulométrica da dosagem final entre os agregados naturais e o percentual de RAP incorporado, para o Grupo 08 (50% BA), seguido pelos traços para produção dos corpos de prova em laboratório, considerando três variações de ligante novo/complementar (teor inferior, intermediário e superior), para determinação do nível ótimo da mistura.

(continua)



(conclusão)

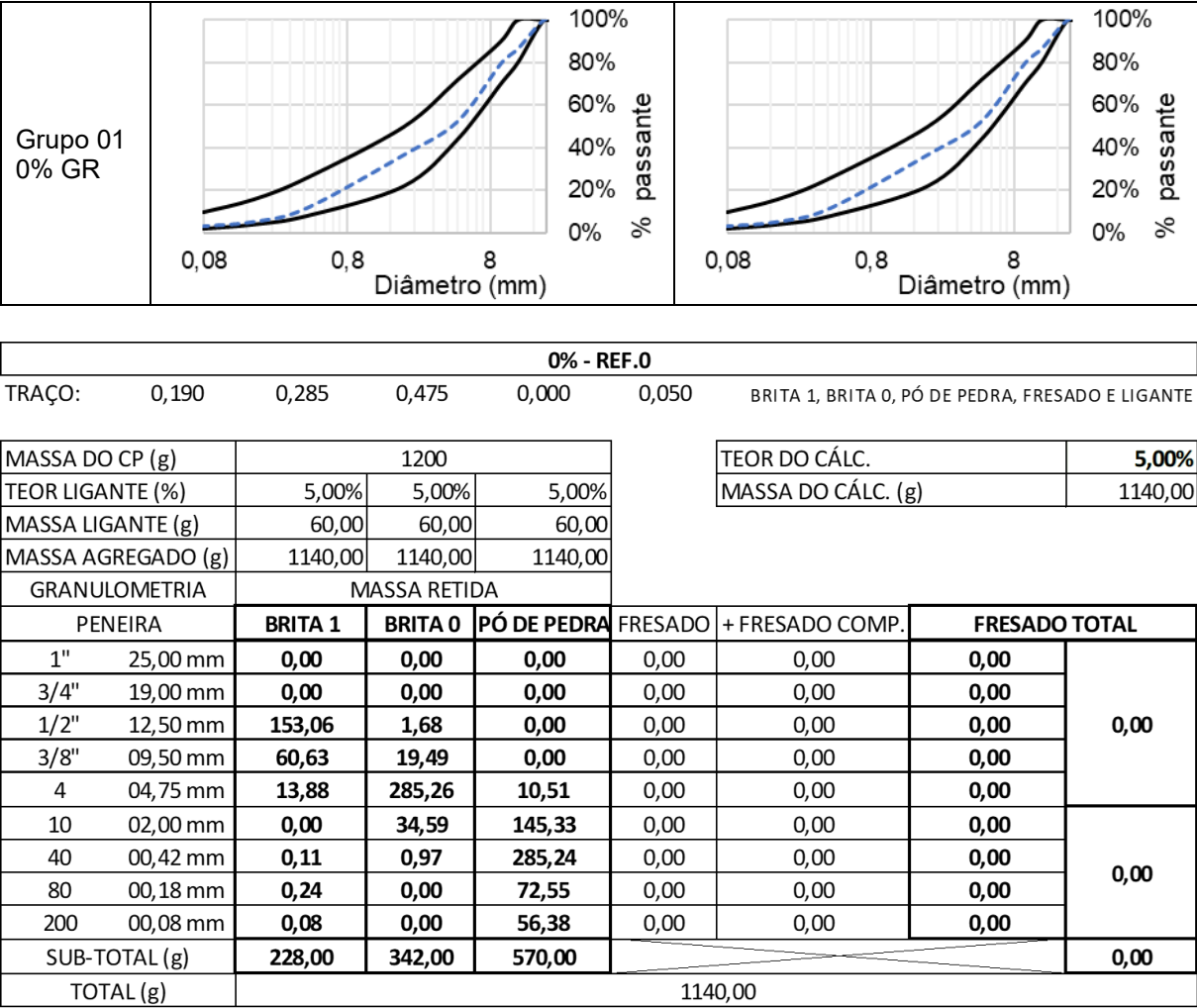
50% - REF. 2									
TRAÇO:		0,097	0,146	0,243	0,486	0,028	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200					TEOR DO CÁLC.		2,80%
TEOR LIGANTE (%)		0,80%	2,80%	4,80%			MASSA DO CÁLC. (g)		1166,35
MASSA LIGANTE (g)		9,65	33,65	57,65			2 RÉPLICAS		
MASSA AGREGADO (g)		1190,35	1166,35	1142,35					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	330,02	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	78,30	0,86	0,00	85,14	0,00	85,14		
3/8"	09,50 mm	31,01	9,97	0,00	56,45	0,00	56,45		
4	04,75 mm	7,10	145,93	0,00	188,42	0,00	188,42	253,16	
10	02,00 mm	0,00	17,70	52,49	165,68	0,00	165,68		
40	00,42 mm	0,06	0,50	129,76	69,98	0,00	69,98		
80	00,18 mm	0,12	0,00	49,57	11,66	0,00	11,66		
200	00,08 mm	0,04	0,00	59,78	5,83	0,00	5,83		
SUB-TOTAL (g)		116,64	174,95	291,59				583,18	
TOTAL (g)		1166,35							

50% - REF. 2									
TRAÇO:		0,095	0,143	0,238	0,476	0,048	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200				TEOR DO CÁLC.		4,80%	
TEOR LIGANTE (%)		0,80%	2,80%	4,80%		MASSA DO CÁLC. (g)		1142,35	
MASSA LIGANTE (g)		9,65	33,65	57,65		2 RÉPLICAS			
MASSA AGREGADO (g)		1190,35	1166,35	1142,35					
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA							
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL		
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	323,23	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
1/2"	12,50 mm	76,69	0,84	0,00	83,39	0,00	83,39		
3/8"	09,50 mm	30,38	9,77	0,00	55,29	0,00	55,29		
4	04,75 mm	6,96	142,93	0,00	184,55	0,00	184,55	247,95	
10	02,00 mm	0,00	17,33	51,41	162,27	0,00	162,27		
40	00,42 mm	0,06	0,49	127,09	68,54	0,00	68,54		
80	00,18 mm	0,12	0,00	48,55	11,42	0,00	11,42		
200	00,08 mm	0,04	0,00	58,55	5,71	0,00	5,71		
SUB-TOTAL (g)		114,24	171,35	285,59					571,18
TOTAL (g)		1142,35							

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

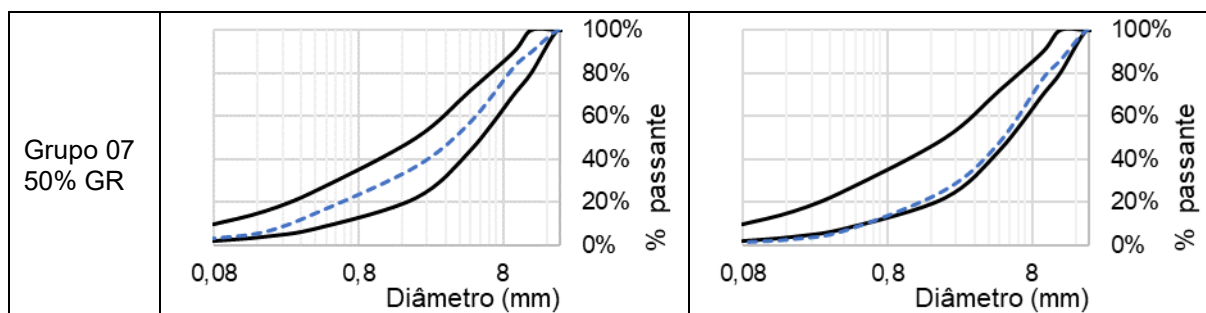
APÊNDICE B – TRAÇOS DOS CORPOS DE PROVA – ETAPA 2

Figura 72 – Dosagem com pó de granito e valorização de RAP em 0%.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

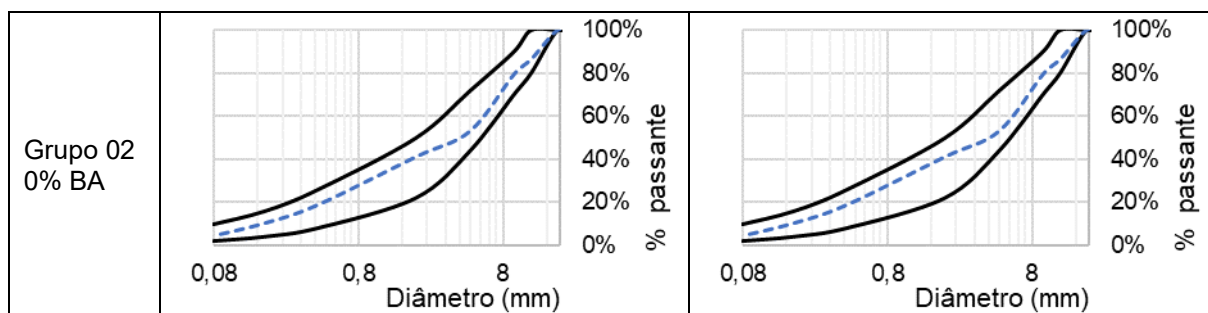
Figura 73 – Dosagem com pó de granito e valorização de RAP em 50%.



50% - REF. 2								
TRAÇO:	0,097	0,145	0,242	0,485	0,031	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE		
MASSA DO CP (g)		1200			TEOR DO CÁLC.		3,10%	
TEOR LIGANTE (%)		3,10%	3,10%	3,10%	MASSA DO CÁLC. (g)		1162,80	
MASSA LIGANTE (g)		37,20	37,20	37,20				
MASSA AGREGADO (g)		1162,80	1162,80	1162,80				
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA						
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL	
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1/2"	12,50 mm	78,06	0,85	0,00	84,88	0,00	84,88	
3/8"	09,50 mm	30,92	9,94	0,00	56,28	0,00	56,28	
4	04,75 mm	7,08	145,48	5,36	187,85	0,00	187,85	
10	02,00 mm	0,00	17,64	74,12	165,18	0,00	165,18	
40	00,42 mm	0,06	0,50	145,47	69,77	0,00	69,77	
80	00,18 mm	0,12	0,00	37,00	11,63	0,00	11,63	
200	00,08 mm	0,04	0,00	28,75	5,81	0,00	5,81	
SUB-TOTAL (g)		116,28	174,42	290,70				581,40
TOTAL (g)		1162,80						

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

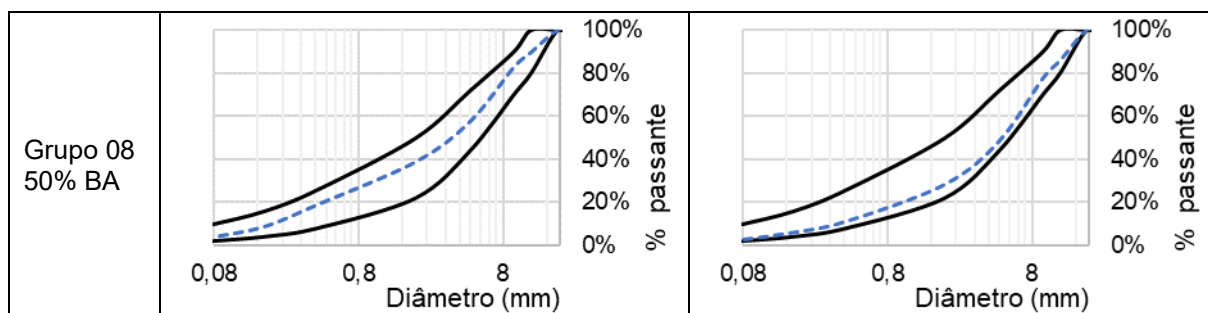
Figura 74 – Dosagem com pó de basalto e valorização de RAP em 0%.



0% - REF.0							
TRAÇO:	0,191	0,287	0,479	0,000	0,043	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE	
MASSA DO CP (g)		1200			TEOR DO CÁLC.		4,30%
TEOR LIGANTE (%)		4,30%	4,30%	4,30%	MASSA DO CÁLC. (g)		1148,40
MASSA LIGANTE (g)		51,60	51,60	51,60			
MASSA AGREGADO (g)		1148,40	1148,40	1148,40			
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA					
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,50 mm	154,18	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00
3/8"	09,50 mm	61,07	19,63	0,00	0,00	0,00	0,00
4	04,75 mm	13,99	287,36	0,00	0,00	0,00	0,00
10	02,00 mm	0,00	34,85	103,36	0,00	0,00	0,00
40	00,42 mm	0,11	0,98	255,52	0,00	0,00	0,00
80	00,18 mm	0,24	0,00	97,61	0,00	0,00	0,00
200	00,08 mm	0,08	0,00	117,71	0,00	0,00	0,00
SUB-TOTAL (g)		229,68	344,52	574,20			0,00
TOTAL (g)		1148,40					

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 75 – Dosagem com pó de basalto e valorização de RAP em 50%.



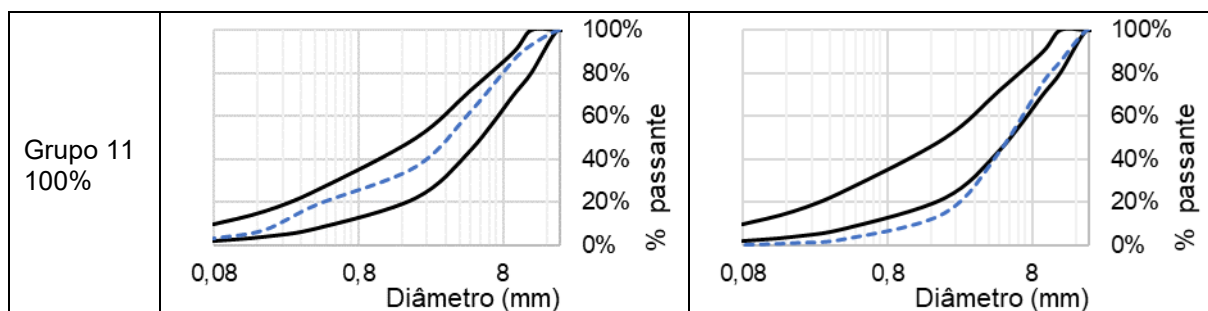
50% - REF. 2							
TRAÇO:	0,097	0,146	0,243	0,486	0,028	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE	

MASSA DO CP (g)	1200			TEOR DO CÁLC.	2,80%
TEOR LIGANTE (%)	2,80%	2,80%	2,80%	MASSA DO CÁLC. (g)	1166,40
MASSA LIGANTE (g)	33,60	33,60	33,60		
MASSA AGREGADO (g)	1166,40	1166,40	1166,40		

GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA						
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL	
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	330,03
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1/2"	12,50 mm	78,30	0,86	0,00	85,15	0,00	85,15	
3/8"	09,50 mm	31,01	9,97	0,00	56,45	0,00	56,45	
4	04,75 mm	7,10	145,93	0,00	188,43	0,00	188,43	253,17
10	02,00 mm	0,00	17,70	52,49	165,69	0,00	165,69	
40	00,42 mm	0,06	0,50	129,76	69,98	0,00	69,98	
80	00,18 mm	0,12	0,00	49,57	11,66	0,00	11,66	
200	00,08 mm	0,04	0,00	59,78	5,83	0,00	5,83	
SUB-TOTAL (g)		116,64	174,96	291,60				583,20
TOTAL (g)		1166,40						

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 76 – Dosagem com valorização de RAP em 100%.



100% - REF. 3							
TRAÇO:	0,000	0,000	0,000	0,982	0,019	BRITA 1, BRITA 0, PÓ DE PEDRA, FRESADO E LIGANTE	
MASSA DO CP (g)		1200			TEOR DO CÁLC.		1,85%
TEOR LIGANTE (%)		1,85%	1,85%	1,85%	MASSA DO CÁLC. (g)		1177,80
MASSA LIGANTE (g)		22,20	22,20	22,20			
MASSA AGREGADO (g)		1177,80	1177,80	1177,80			
GRANULOMETRIA		MASSA RETIDA					
PENEIRA		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	FRESADO	+ FRESADO COMP.	FRESADO TOTAL
1"	25,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,00 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,50 mm	0,00	0,00	0,00	171,96	0,00	171,96
3/8"	09,50 mm	0,00	0,00	0,00	114,01	0,00	114,01
4	04,75 mm	0,00	0,00	0,00	380,55	0,00	380,55
10	02,00 mm	0,00	0,00	0,00	334,61	0,00	334,61
40	00,42 mm	0,00	0,00	0,00	141,34	0,00	141,34
80	00,18 mm	0,00	0,00	0,00	23,56	0,00	23,56
200	00,08 mm	0,00	0,00	0,00	11,78	0,00	11,78
SUB-TOTAL (g)		0,00	0,00	0,00			1177,80
TOTAL (g)		1177,80					

Fonte: Elaboração do Autor (2024).

APÊNDICE C – RELATÓRIOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA - COM PÓ DE GRANITO
VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)

Figura 77 – ANOVA para a variável massa específica (g/cm³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

ANOVA; Var.:M.E. (g/cm³) (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	0,024136	2	0,012068	0,002398	3	0,000799	15,09464	0,027176	0,909609	0,849349
Quadratic	0,000000	0	0,000000	0,002398	3	0,000799			0,909609	0,849349
Special Cubic	0,000000	0	0,000000	0,002398	3	0,000799			0,909609	0,849349
Cubic	0,000000	0	0,000000	0,002398	3	0,000799			0,909609	0,849349
Total Adjusted	0,026535	5	0,005307							

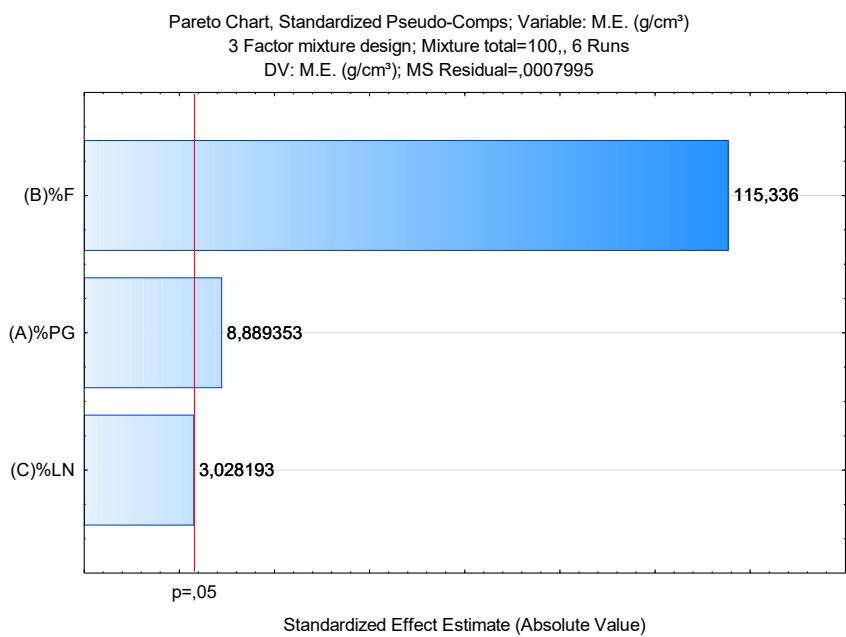
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 78 – Coeficientes para a variável massa específica (g/cm³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

Coeffs (recoded comps); Var.:M.E. (g/cm³); R-sqr=,9096; Adj:,8493 (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: M.E. (g/cm³); MS Residual=,0007995						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PG	1,86478	0,209776	8,8894	0,003002	1,19717	2,53238
(B)%F	2,30600	0,019994	115,3360	0,000001	2,24237	2,36963
(C)%LN	19,86589	6,560311	3,0282	0,056392	-1,01195	40,74373

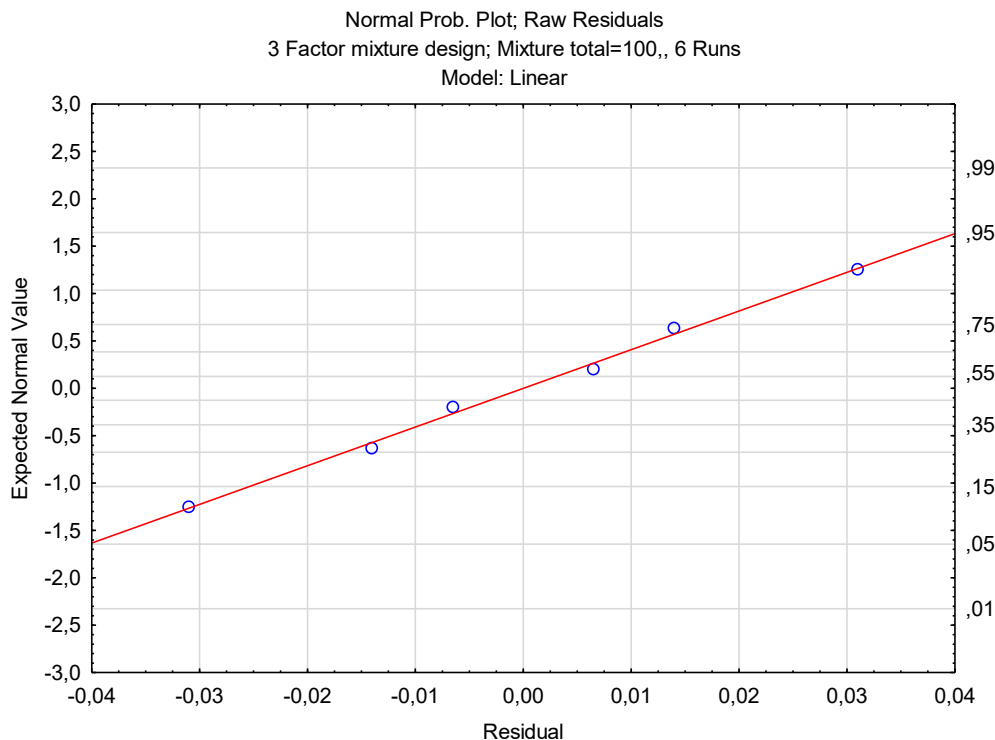
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 79 – Gráfico de Pareto para a variável massa específica (g/cm³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



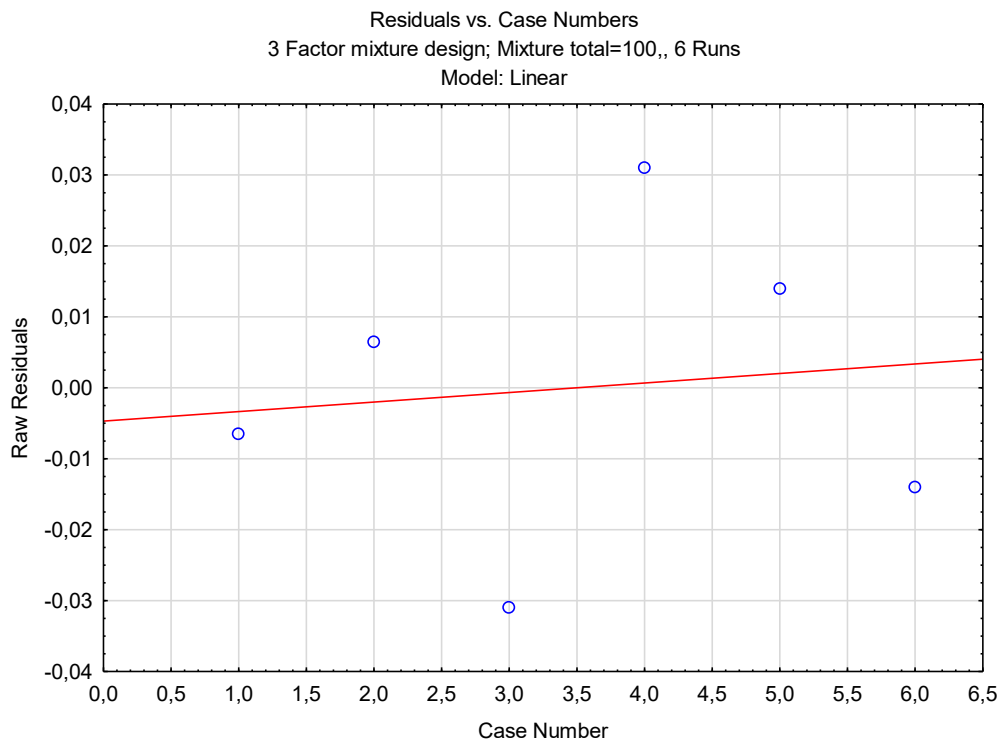
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 80 – Gráfico de normalidade para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 81 – Aleatoriedade do ensaio para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL ESTABILIDADE (kgf)

Figura 82 – ANOVA para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

ANOVA; Var.:EST. (kgf) (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	58667,73	2	29333,86	13113,22	3	4371,075	6,710904	0,078082	0,817316	0,695527
Quadratic	0,00	0	0,00	13113,22	3	4371,075			0,817316	0,695527
Special Cubic	0,00	0	0,00	13113,22	3	4371,075			0,817316	0,695527
Cubic	0,00	0	0,00	13113,22	3	4371,075			0,817316	0,695527
Total Adjusted	71780,95	5	14356,19							

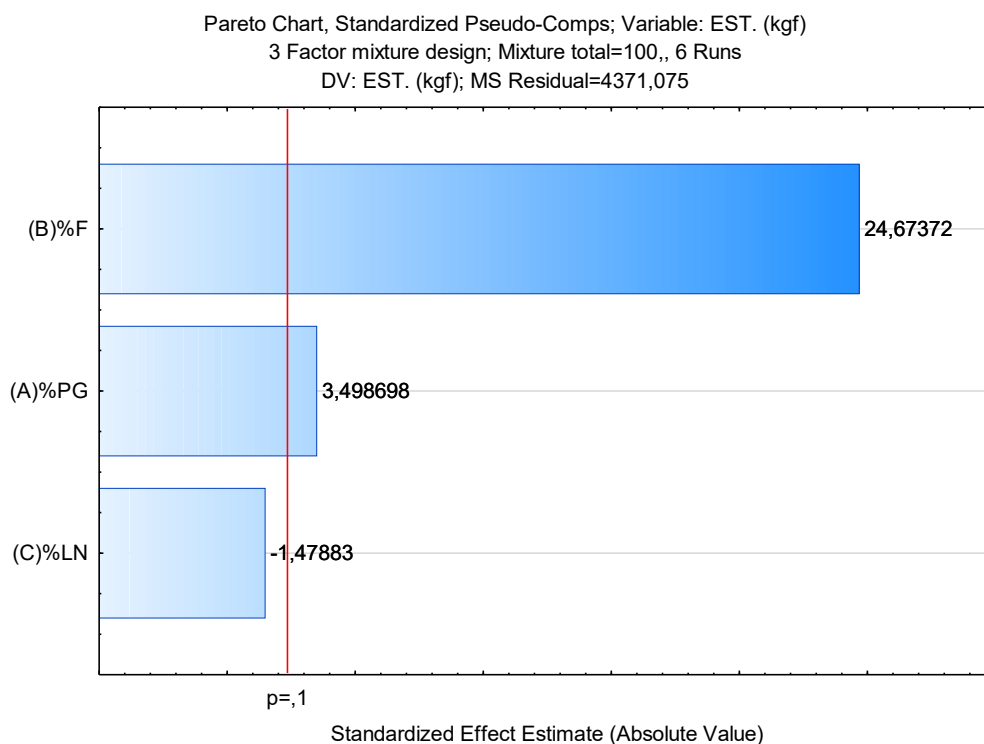
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 83 – Coeficientes para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

Coeffs (recoded comps); Var.:EST. (kgf); R-sqr=,8173; Adj:,6955 (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: EST. (kgf); MS Residual=4371,075						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PG	1716,1	490,50	3,49870	0,039518	155,1	3277,12
(B)%F	1153,5	46,75	24,67372	0,000146	1004,7	1302,27
(C)%LN	-22684,3	15339,43	-1,47883	0,235729	-71501,3	26132,58

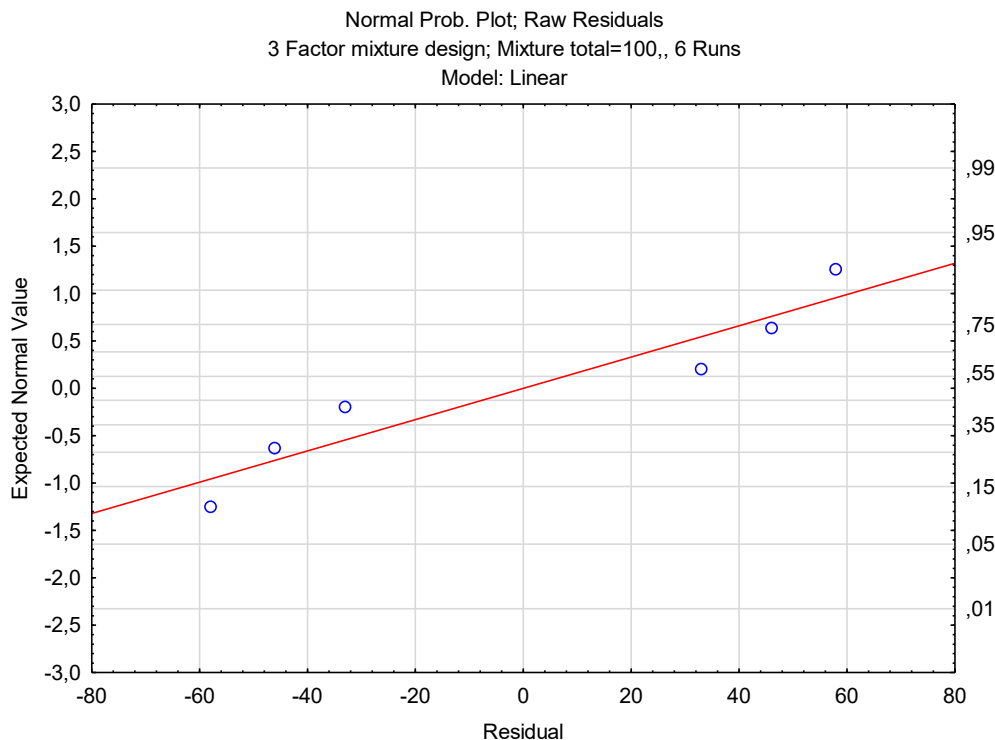
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 84 – Gráfico de Pareto para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



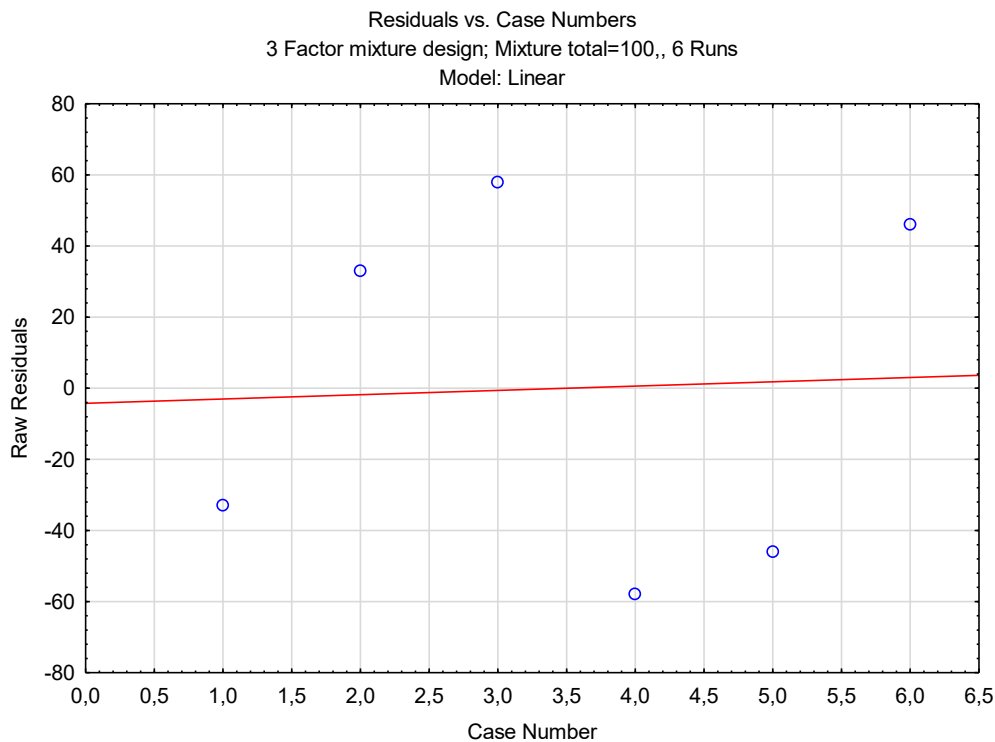
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 85 – Gráfico de normalidade para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 86 – Aleatoriedade do ensaio para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL FLUÊNCIA (c.mm)

Figura 87 – ANOVA para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

ANOVA; Var.:FLU (c.mm) (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	103069,0	2	51534,50	5230,500	3	1743,500	29,55807	0,010614	0,951703	0,919506
Quadratic	0,0	0	0,00	5230,500	3	1743,500			0,951703	0,919506
Special Cubic	0,0	0	0,00	5230,500	3	1743,500			0,951703	0,919506
Cubic	0,0	0	0,00	5230,500	3	1743,500			0,951703	0,919506
Total Adjusted	108299,5	5	21659,90							

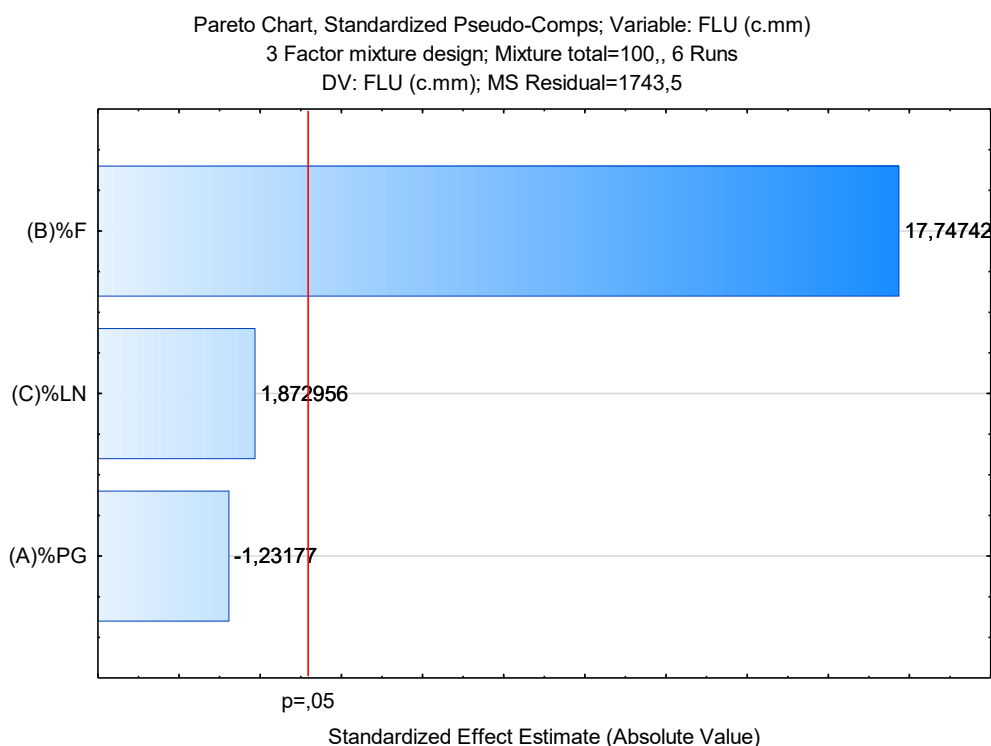
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 88 – Coeficientes para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

Coeffs (recoded comps); Var.:FLU (c.mm); R-sqr=,9517; Adj:,9195 (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: FLU (c.mm); MS Residual=1743,5						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PG	-381,58	309,784	-1,23177	0,305781	-1367,5	604,29
(B)%F	524,00	29,525	17,74742	0,000390	430,0	617,96
(C)%LN	18144,87	9687,823	1,87296	0,157791	-12686,1	48975,84

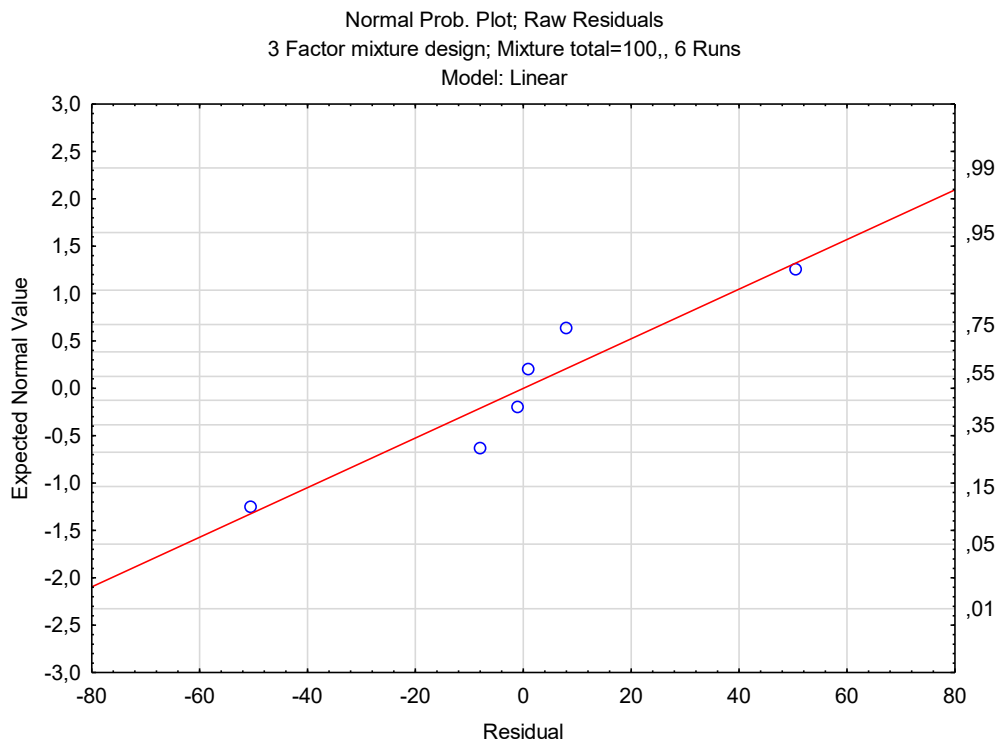
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 89 – Gráfico de Pareto para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



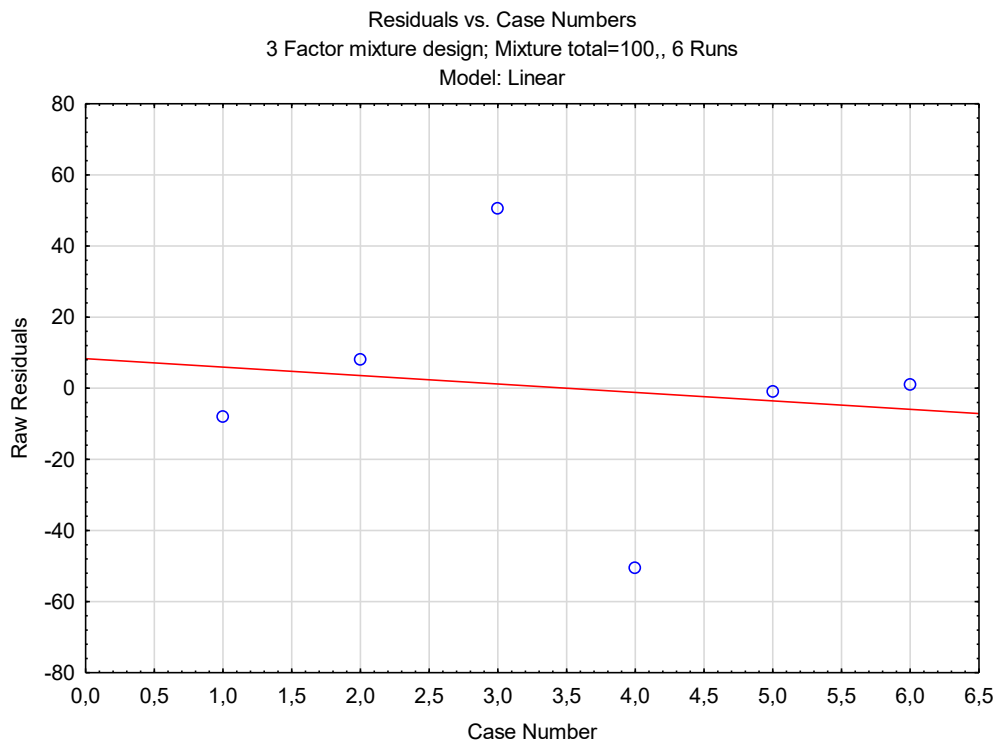
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 90 – Gráfico de normalidade para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 91 – Aleatoriedade do ensaio para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL DESGASTE (%)

Figura 92 – ANOVA para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

ANOVA; Var.:DESG. (%) (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	27,53290	2	13,76645	9,361250	3	3,120417	4,411735	0,127810	0,746267	0,577112
Quadratic	0,00000	0	0,00000	9,361250	3	3,120417			0,746267	0,577112
Special Cubic	0,00000	0	0,00000	9,361250	3	3,120417			0,746267	0,577112
Cubic	0,00000	0	0,00000	9,361250	3	3,120417			0,746267	0,577112
Total Adjusted	36,89415	5	7,37883							

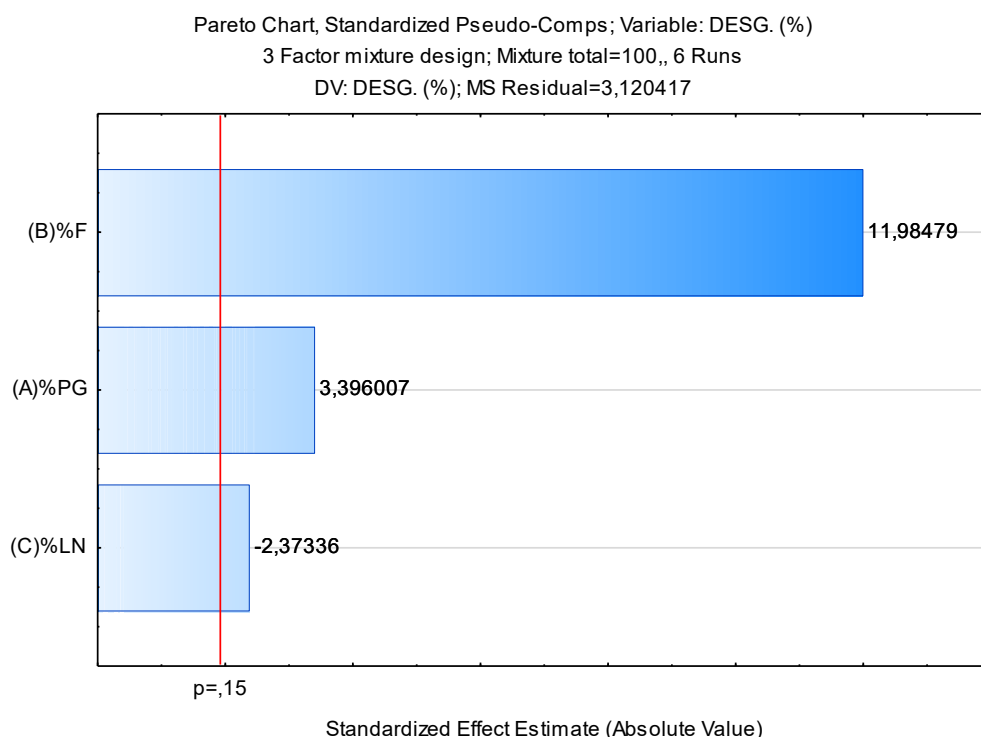
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 93 – Coeficientes para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

Coeffs (recoded comps); Var.:DESG. (%); R-sqr=,7463; Adj:,5771 (GRANITO); 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: DESG. (%); MS Residual=3,120417						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PG	44,506	13,1055	3,39601	0,042586	2,80	86,2140
(B)%F	14,970	1,2491	11,98479	0,001250	10,99	18,9451
(C)%LN	-972,714	409,8467	-2,37336	0,098205	-2277,03	331,6015

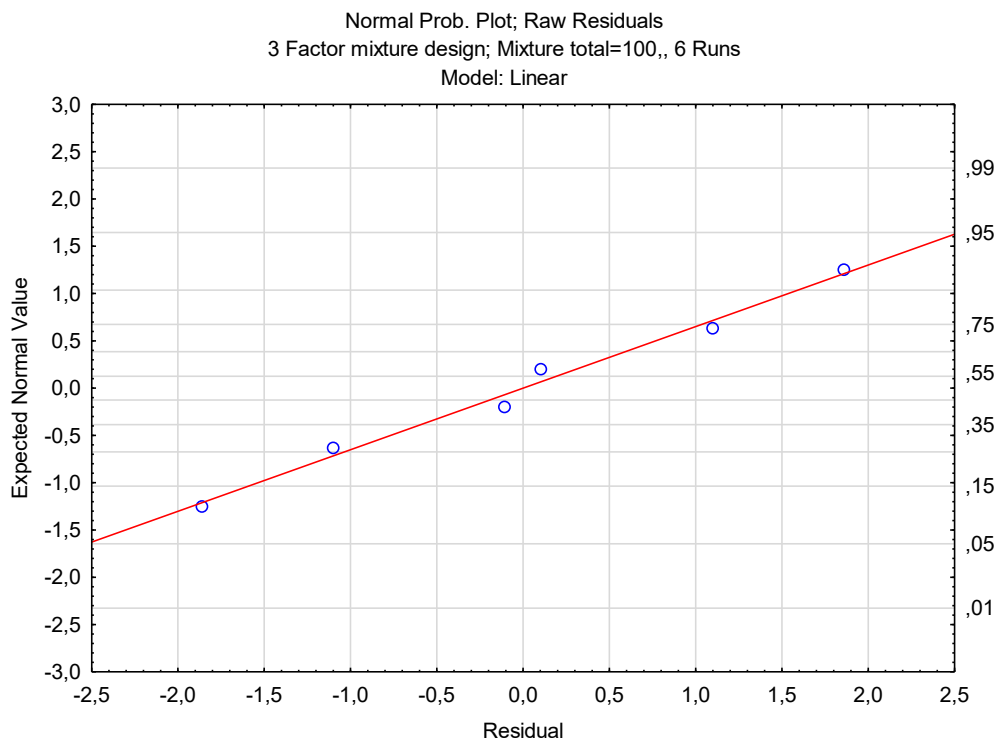
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 94 – Gráfico de Pareto para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



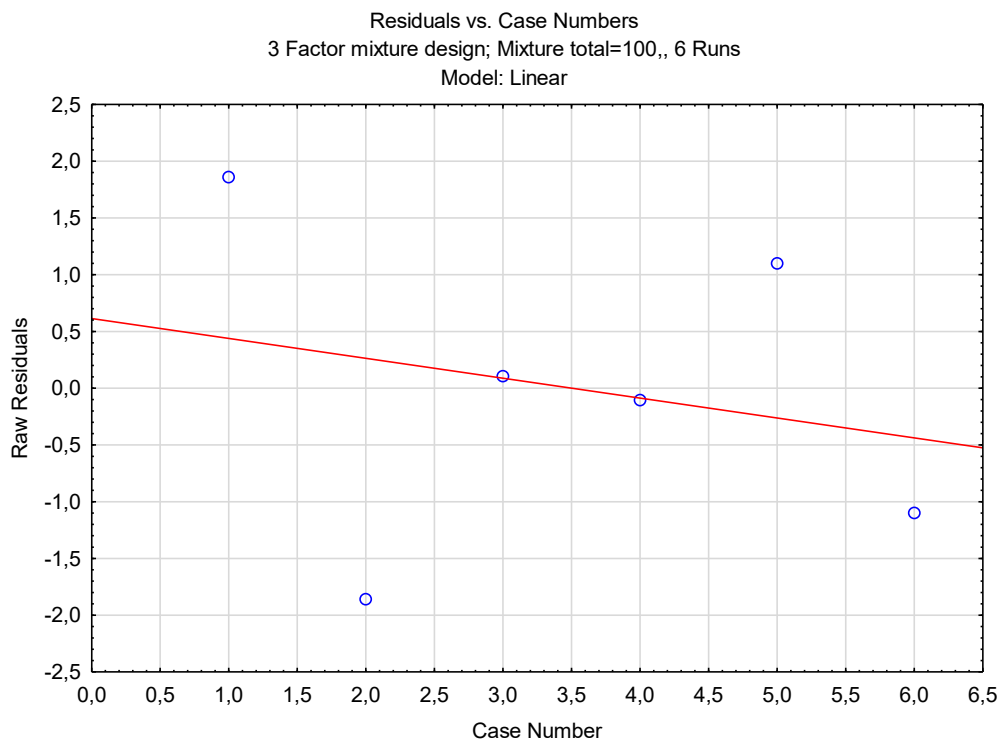
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 95 – Gráfico de normalidade para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 96 – Aleatoriedade do ensaio para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (kgf/cm²)

Figura 97 – ANOVA para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

ANOVA; Var.: RES. TRAÇÃO (kgf/cm ²) (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	61,87410	2	30,93705	10,36225	3	3,454083	8,956660	0,054331	0,856551	0,760918
Quadratic	0,00000	0	0,00000	10,36225	3	3,454083			0,856551	0,760918
Special Cubic	0,00000	0	0,00000	10,36225	3	3,454083			0,856551	0,760918
Cubic	0,00000	0	0,00000	10,36225	3	3,454083			0,856551	0,760918
Total Adjusted	72,23635	5	14,44727							

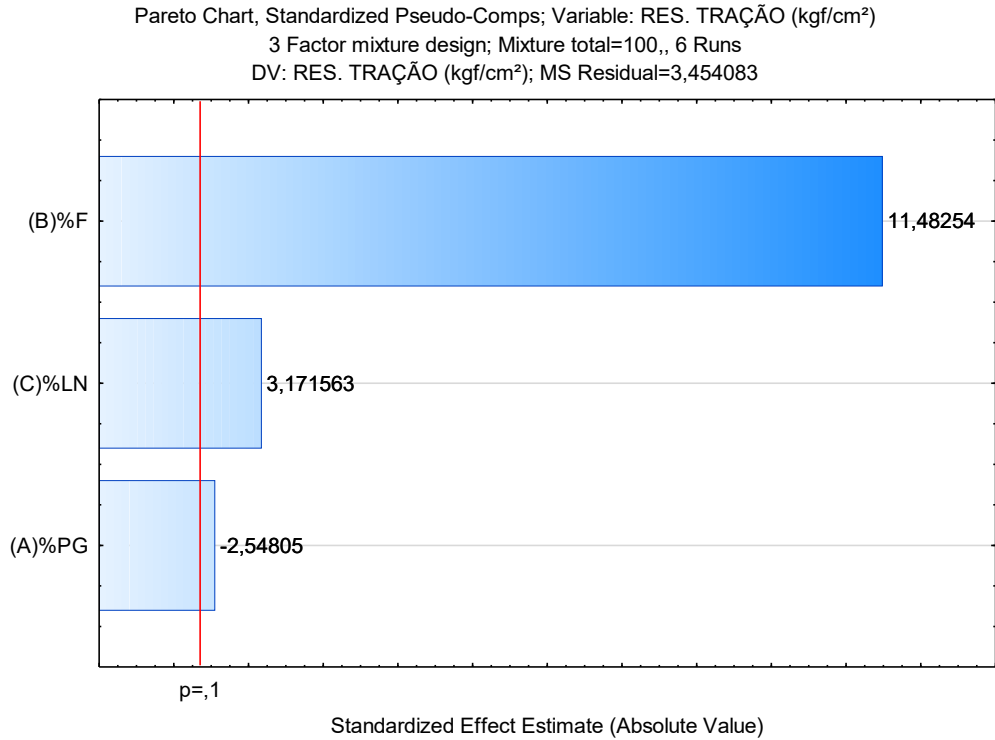
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 98 – Coeficientes para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.

Coeffs (recoded comps); Var.: RES. TRAÇÃO (kgf/cm ²); R-sqr=,8566; Adj.,7609 (GRANITO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: RES. TRAÇÃO (kgf/cm ²); MS Residual=3,454083							
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
(A)%PG	-35,134	13,7884	-2,54805	0,084086	-79,0144	8,747	
(B)%F	15,090	1,3142	11,48254	0,001418	10,9077	19,272	
(C)%LN	1367,587	431,2028	3,17156	0,050420	-4,6928	2739,867	

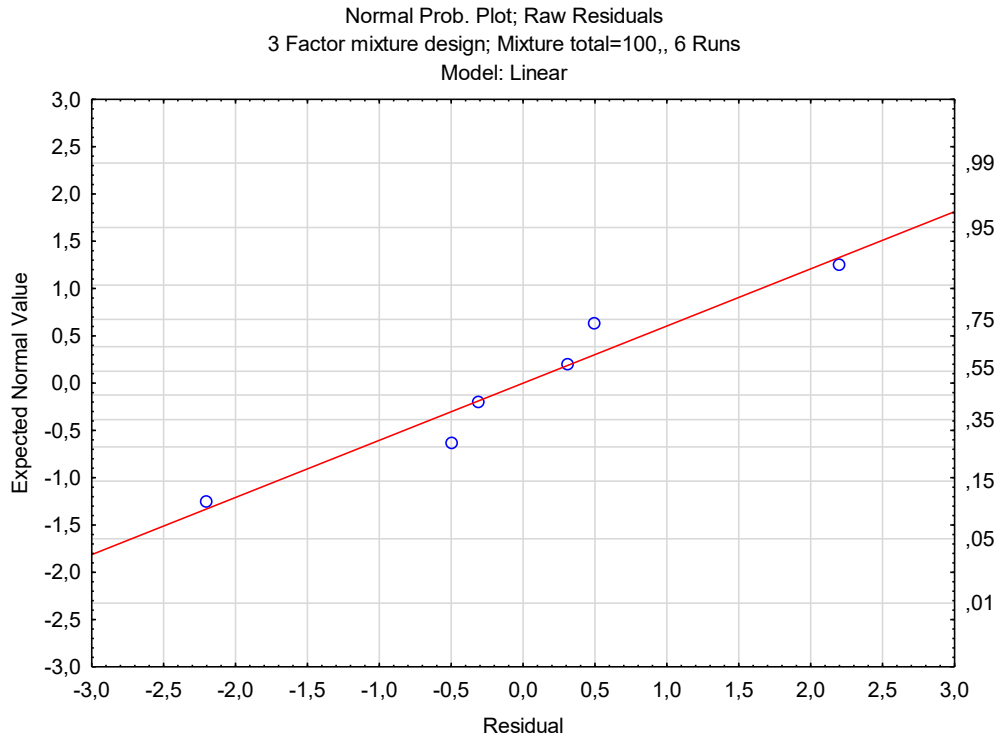
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 99 – Gráfico de Pareto para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



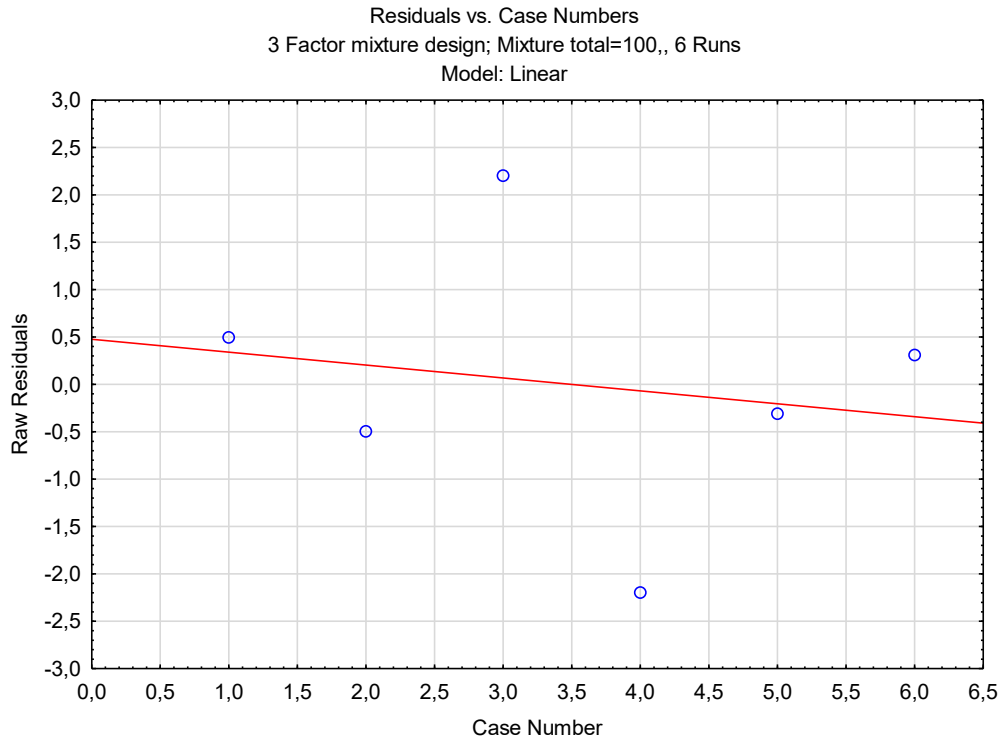
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 100 – Gráfico de normalidade para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 101 – Aleatoriedade do ensaio para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de granito.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

ANOVA - COM PÓ DE BASALTO
VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)

Figura 102 – ANOVA para a variável massa específica (g/cm³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

ANOVA; Var.:M.E. (g/cm ³) (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100., 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	0,069302	2	0,034651	0,000503	3	0,000168	206,8726	0,000611	0,992801	0,988002
Quadratic	0,000000	0	0,000000	0,000503	3	0,000168			0,992801	0,988002
Special Cubic	0,000000	0	0,000000	0,000503	3	0,000168			0,992801	0,988002
Total Adjusted	0,069805	5	0,013961							

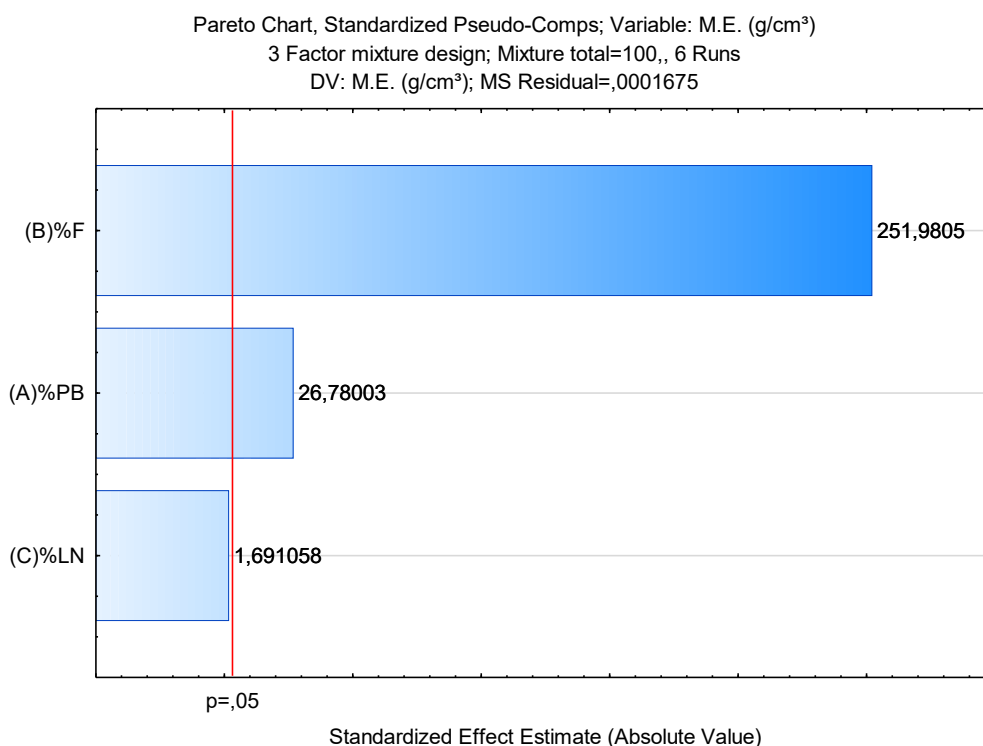
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 103 – Coeficientes para a variável massa específica (g/cm³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

Coeffs (recoded comps); Var.:M.E. (g/cm ³); R-sqr=,9928; Adj:,988 (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100., 6 Runs DV: M.E. (g/cm ³); MS Residual=,0001675						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PB	2,472721	0,092335	26,7800	0,000114	2,17887	2,76657
(B)%F	2,306000	0,009152	251,9805	0,000000	2,27688	2,33512
(C)%LN	6,329784	3,743092	1,6911	0,189405	-5,58241	18,24197

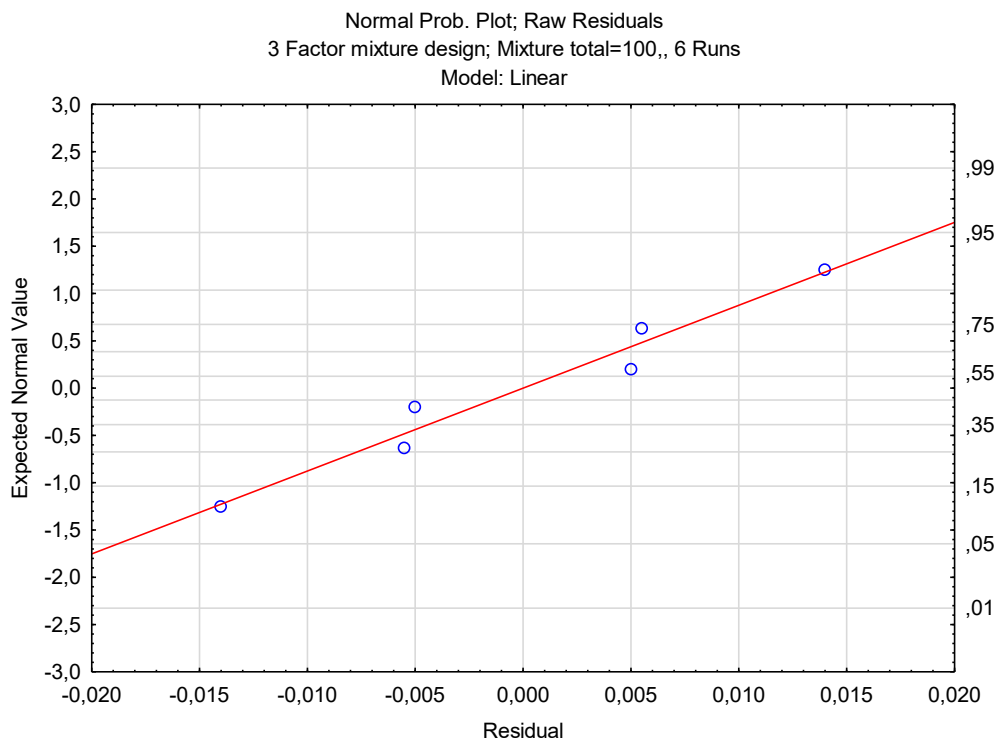
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 104 – Gráfico de Pareto para a variável massa específica (g/cm³) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



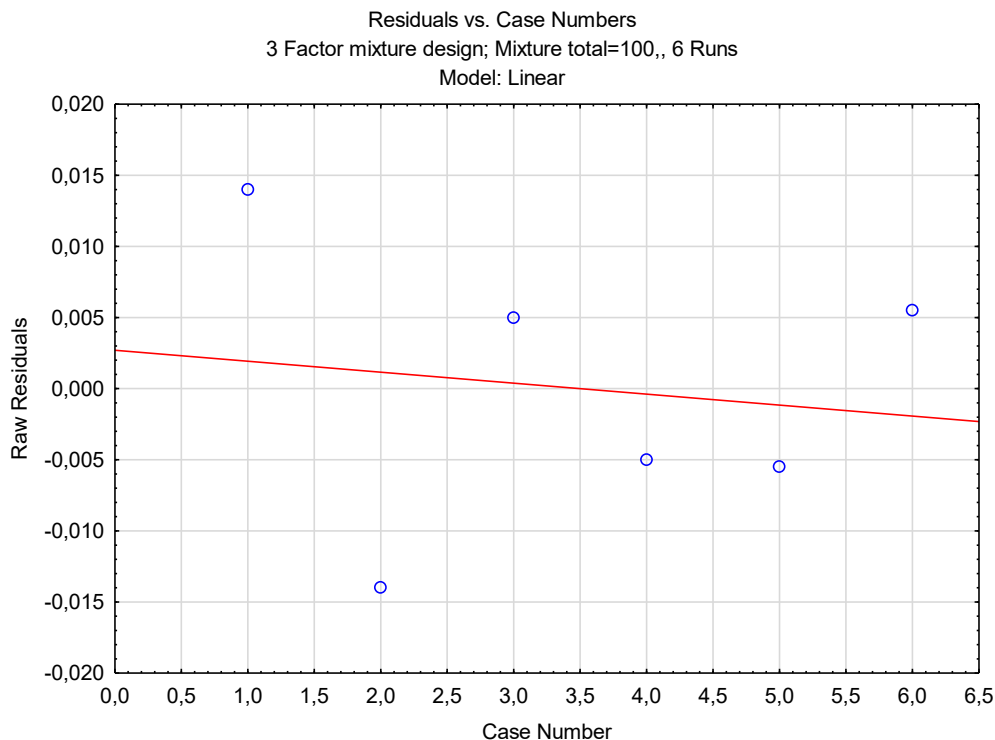
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 105 – Gráfico de normalidade para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 106 – Aleatoriedade do ensaio para a variável massa específica (g/cm^3) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL ESTABILIDADE (kgf)

Figura 107 – ANOVA para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

ANOVA; Var.:EST. (kgf) (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	106128,2	2	53064,08	14372,09	3	4790,695	11,07649	0,041191	0,880730	0,801216
Quadratic	0,0	0	0,00	14372,09	3	4790,695			0,880730	0,801216
Special Cubic	0,0	0	0,00	14372,09	3	4790,695			0,880730	0,801216
Total Adjusted	120500,2	5	24100,05							

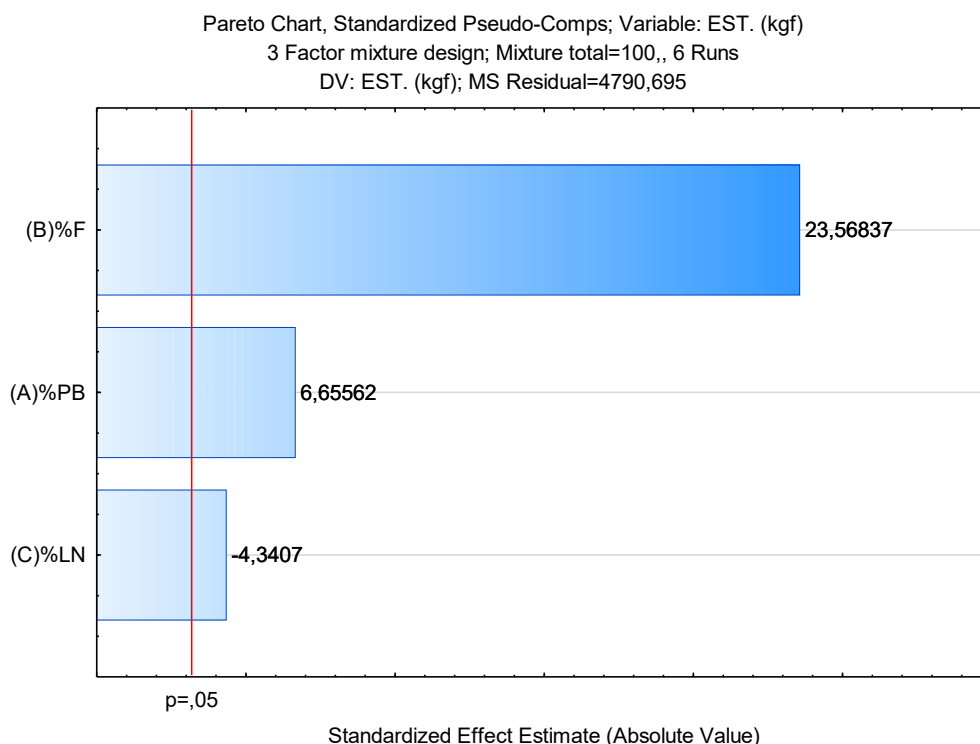
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 108 – Coeficientes para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

Coeffs (recoded comps); Var.:EST. (kgf); R-sqr=,8807; Adj:,8012 (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: EST. (kgf); MS Residual=4790,695						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PB	3286,6	493,81	6,65562	0,006913	1715	4858,1
(B)%F	1153,5	48,94	23,56837	0,000167	998	1309,2
(C)%LN	-86892,5	20018,08	-4,34070	0,022567	-150599	-23186,1

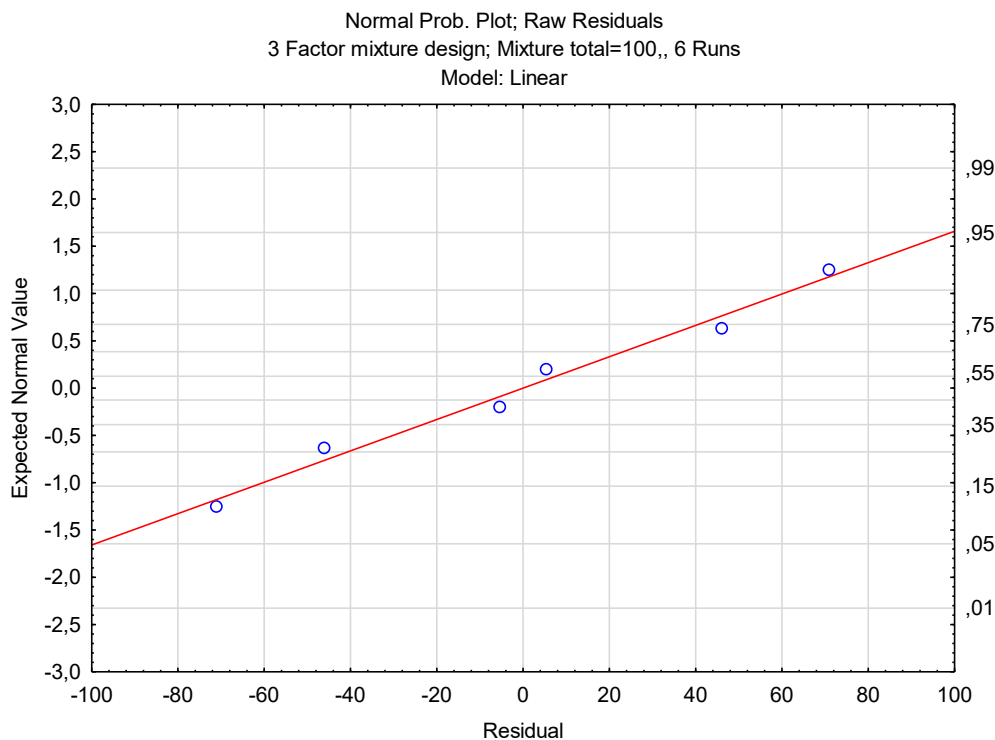
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 109 – Gráfico de Pareto para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



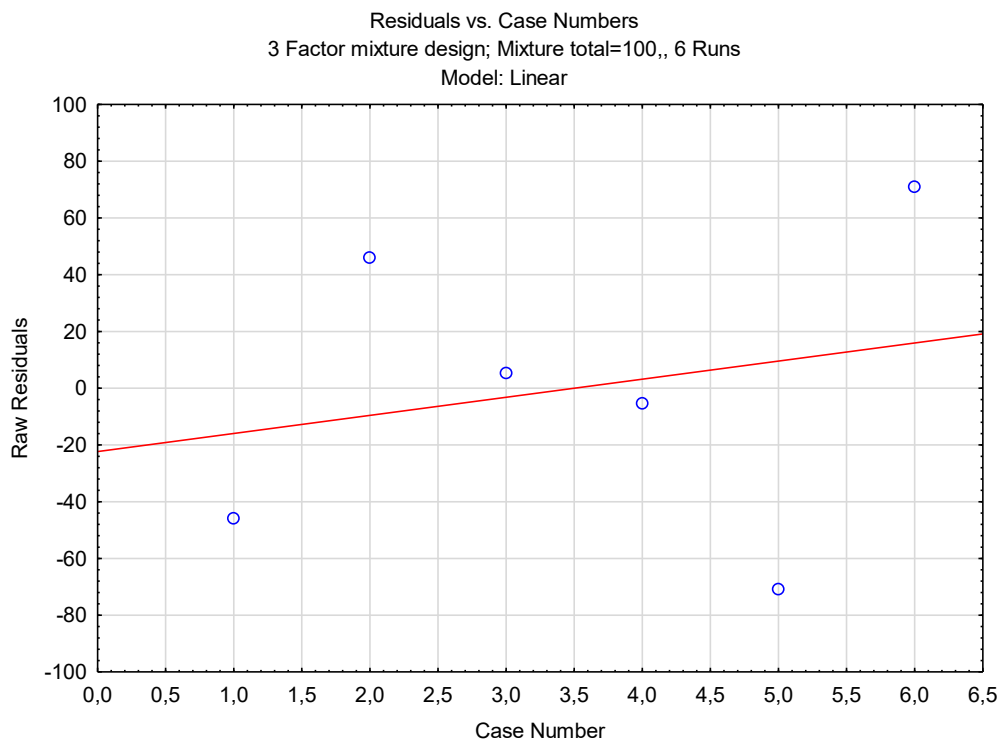
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 110 – Gráfico de normalidade para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 111 – Aleatoriedade do ensaio para a variável estabilidade (kgf) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL FLUÊNCIA (c.mm)

Figura 112 – ANOVA para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

ANOVA; Var.:FLU (c.mm) (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	85896,33	2	42948,17	1022,500	3	340,8333	126,0093	0,001276	0,988236	0,980394
Quadratic	0,00	0	0,00	1022,500	3	340,8333			0,988236	0,980394
Special Cubic	0,00	0	0,00	1022,500	3	340,8333			0,988236	0,980394
Total Adjusted	86918,83	5	17383,77							

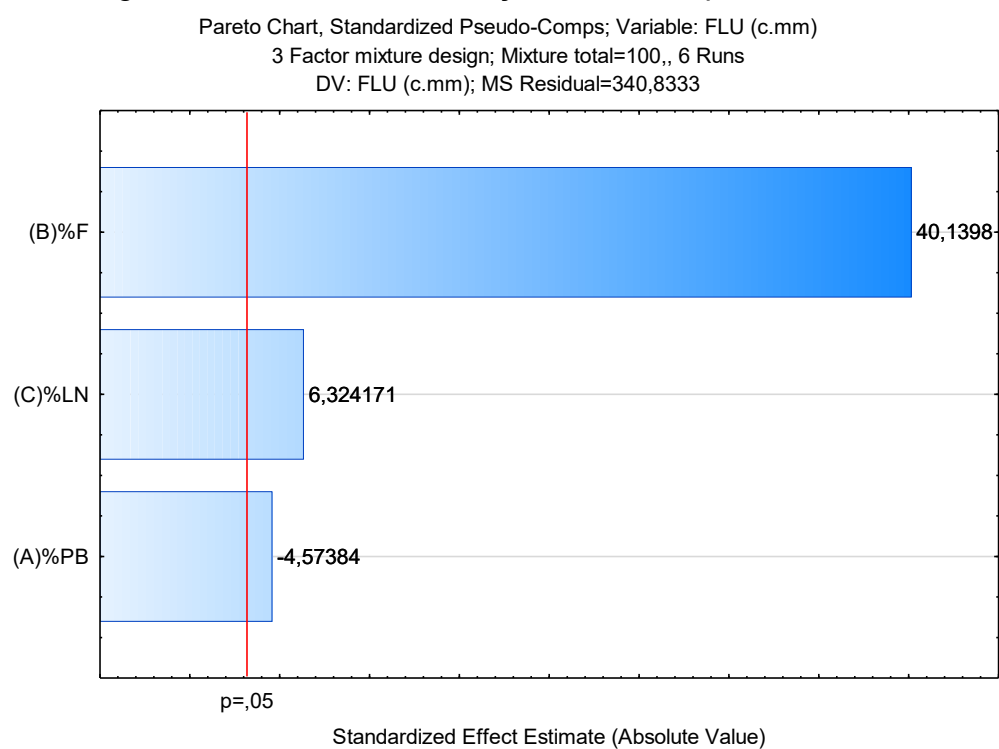
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 113 – Coeficientes para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

Coeffs (recoded comps); Var.:FLU (c.mm); R-sqr=,9882; Adj:,9804 (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: FLU (c.mm); MS Residual=340,8333							
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
(A)%PB	-602,43	131,713	-4,57384	0,019612	-1021,60	-183,26	
(B)%F	524,00	13,054	40,13980	0,000034	482,46	565,54	
(C)%LN	33767,41	5339,420	6,32417	0,007993	16774,99	50759,83	

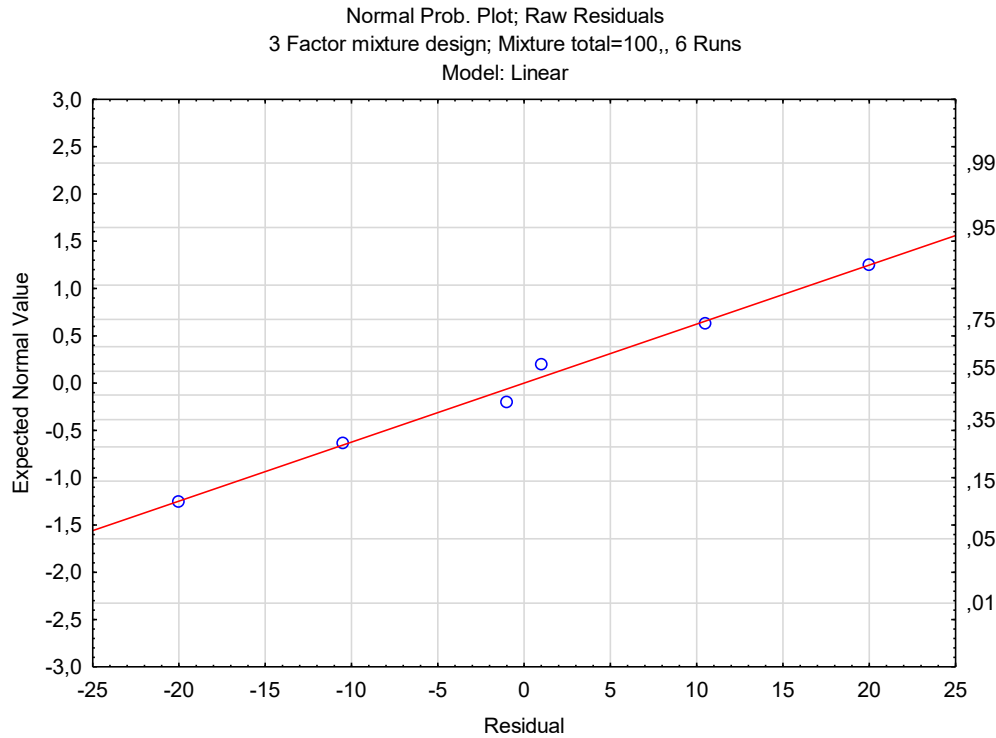
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 114 – Gráfico de Pareto para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



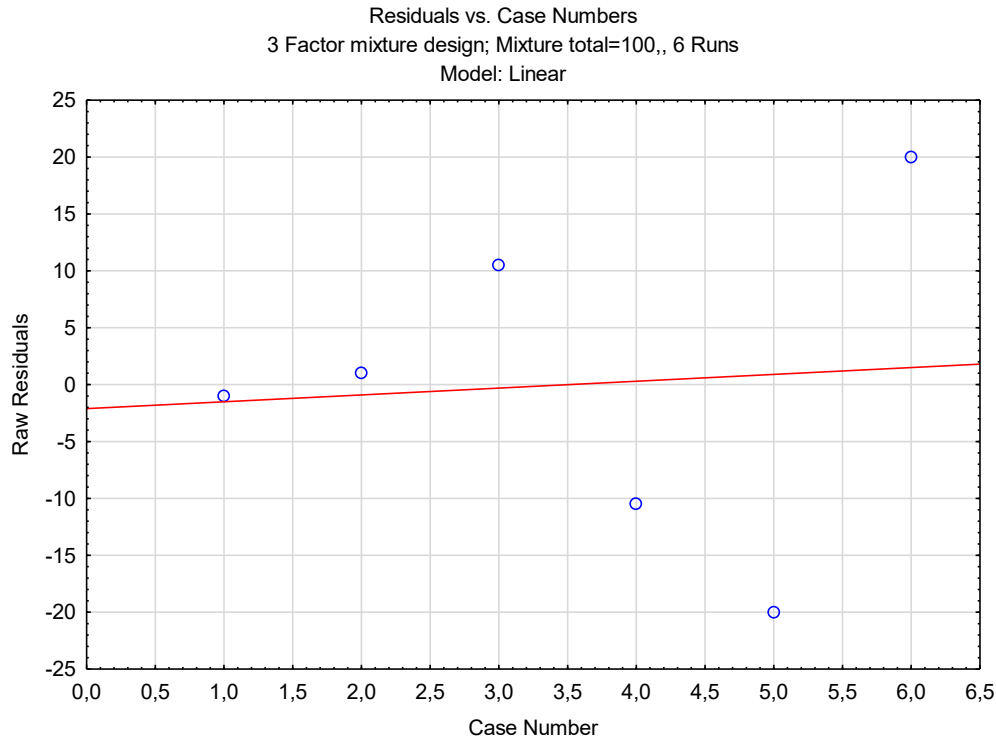
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 115 – Gráfico de normalidade para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 116 – Aleatoriedade do ensaio para a variável fluência (c.mm) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL DESGASTE (%)

Figura 117 – ANOVA para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

ANOVA; Var.:DESG. (%) (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	30,64320	2	15,32160	5,652400	3	1,884133	8,131909	0,061457	0,844268	0,740446
Quadratic	0,00000	0	0,00000	5,652400	3	1,884133			0,844268	0,740446
Special Cubic	0,00000	0	0,00000	5,652400	3	1,884133			0,844268	0,740446
Total Adjusted	36,29560	5	7,25912							

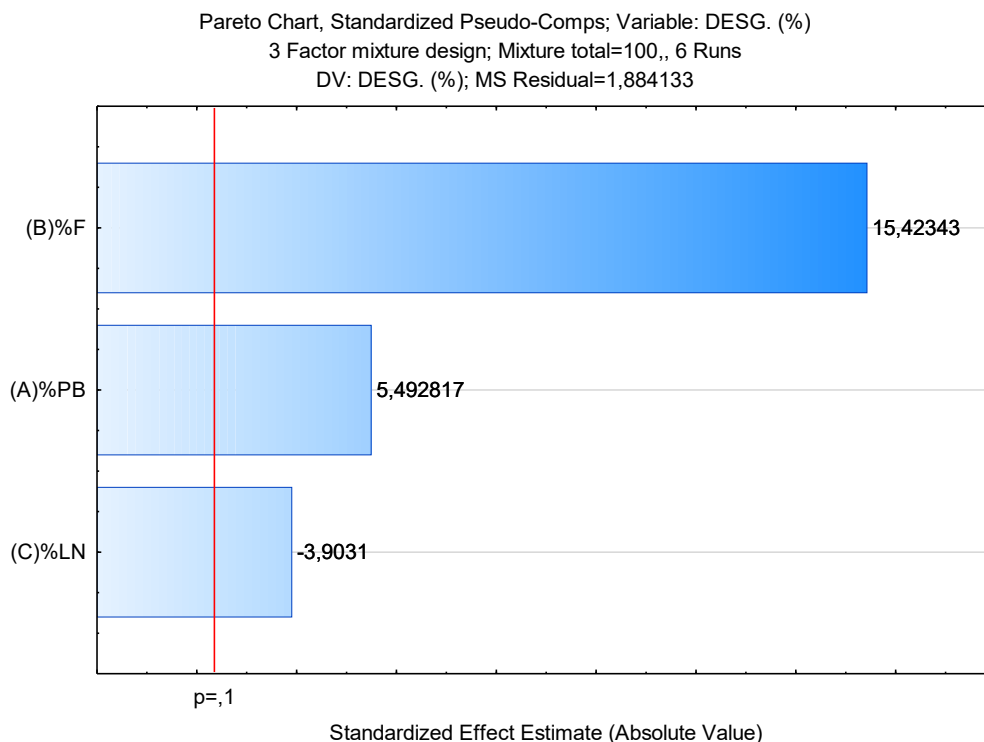
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 118 – Coeficientes para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

Coeffs (recoded comps); Var.:DESG. (%); R-sqr=,8443; Adj:,7404 (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: DESG. (%); MS Residual=1,884133						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)%PB	53,79	9,7929	5,49282	0,011873	22,63	84,956
(B)%F	14,97	0,9706	15,42343	0,000592	11,88	18,059
(C)%LN	-1549,49	396,9894	-3,90310	0,029859	-2812,89	-286,092

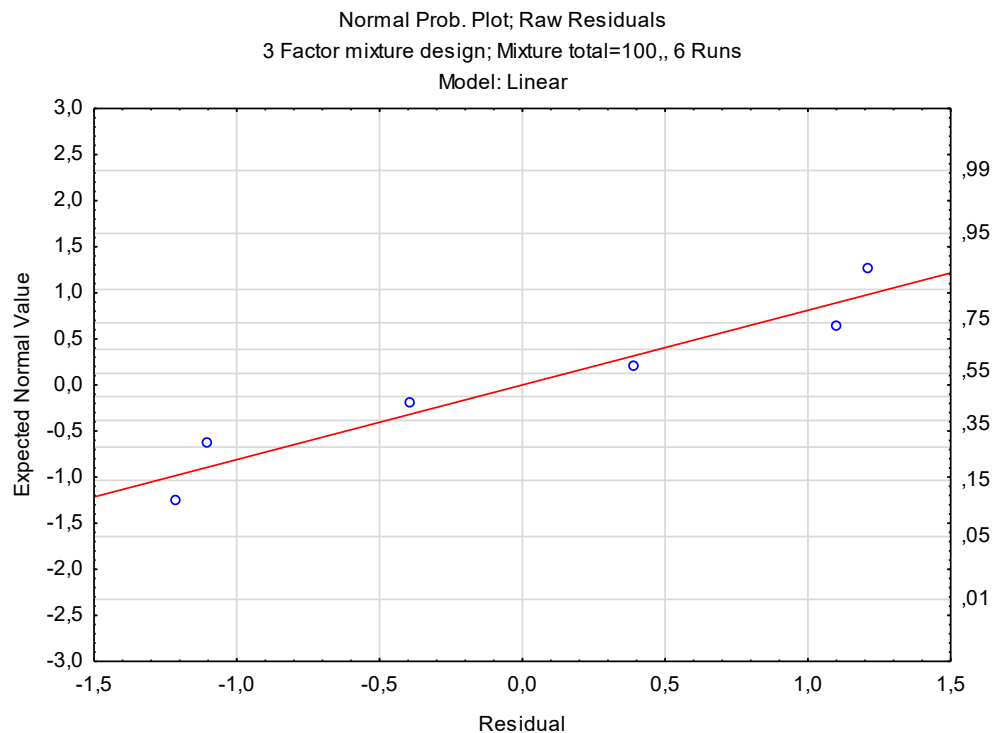
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 119 – Gráfico de Pareto para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



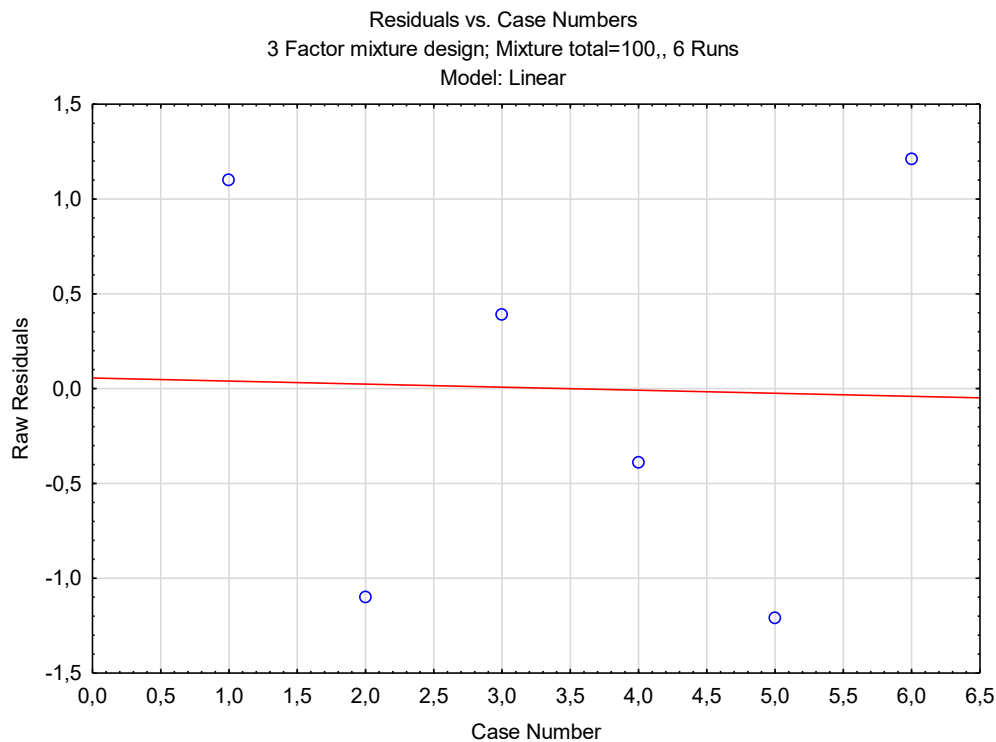
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 120 – Gráfico de normalidade para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 121 – Aleatoriedade do ensaio para a variável desgaste (%) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

VARIÁVEL RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (kgf/cm²)

Figura 122 – ANOVA para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

ANOVA; Var.: RES. TRAÇÃO (kgf/cm ²) (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs (Some terms were excluded from the respective full models)										
Model	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p	R-Sqr	R-Sqr Adjusted
Linear	60,61663	2	30,30832	0,827500	3	0,275833	109,8791	0,001563	0,986532	0,977554
Quadratic	0,00000	0	0,00000	0,827500	3	0,275833			0,986532	0,977554
Special Cubic	0,00000	0	0,00000	0,827500	3	0,275833			0,986532	0,977554
Total Adjusted	61,44413	5	12,28883							

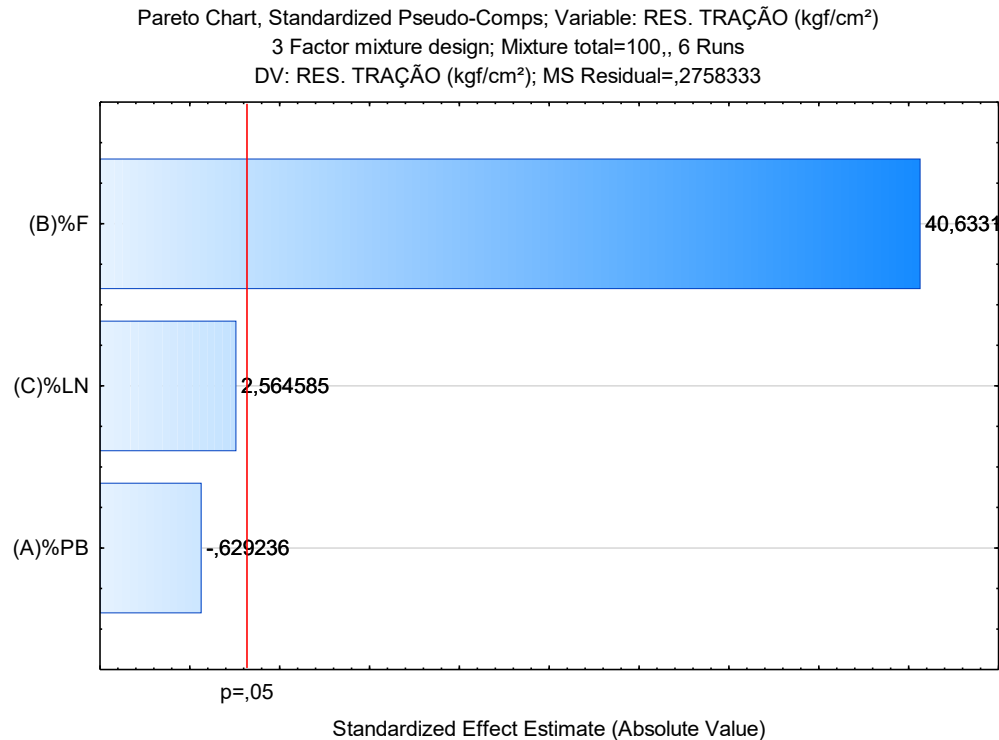
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 123 – Coeficientes para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.

Coeffs (recoded comps); Var.: RES. TRAÇÃO (kgf/cm ²); R-sqr=,9865; Adj:,9776 (BASALTO) 3 Factor mixture design; Mixture total=100,, 6 Runs DV: RES. TRAÇÃO (kgf/cm ²); MS Residual=,2758333							
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(3)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	
(A)%PB	-2,3577	3,7470	-0,62924	0,573848	-14,2823	9,5668	
(B)%F	15,0900	0,3714	40,63318	0,000033	13,9081	16,2719	
(C)%LN	389,5503	151,8960	2,56458	0,082883	-93,8507	872,9513	

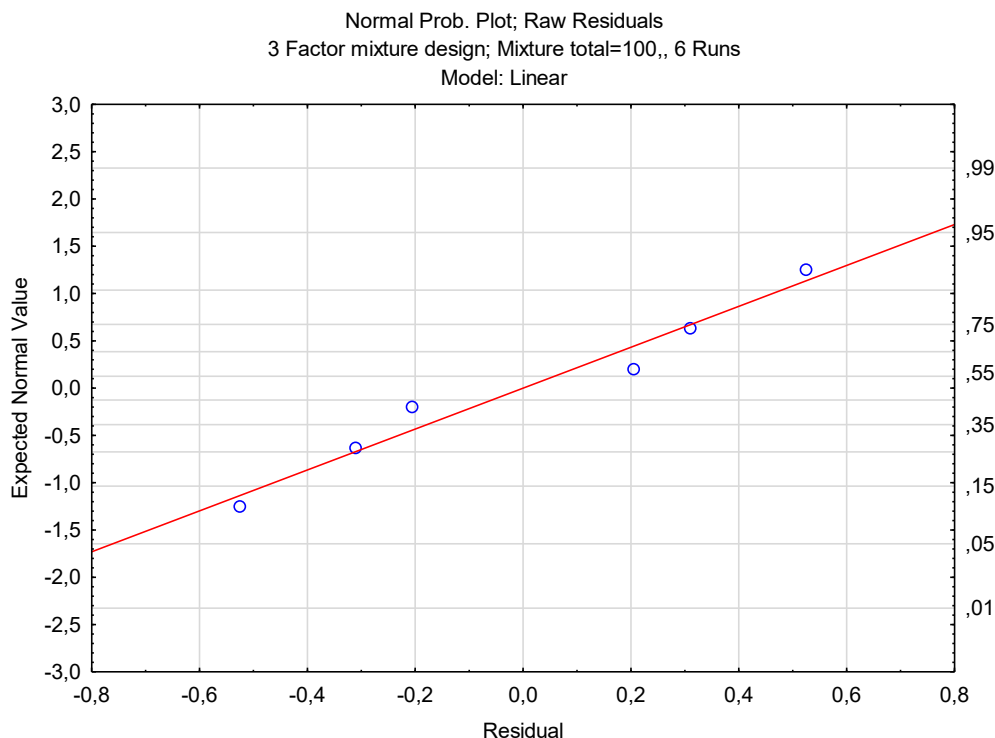
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 124 – Gráfico de Pareto para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



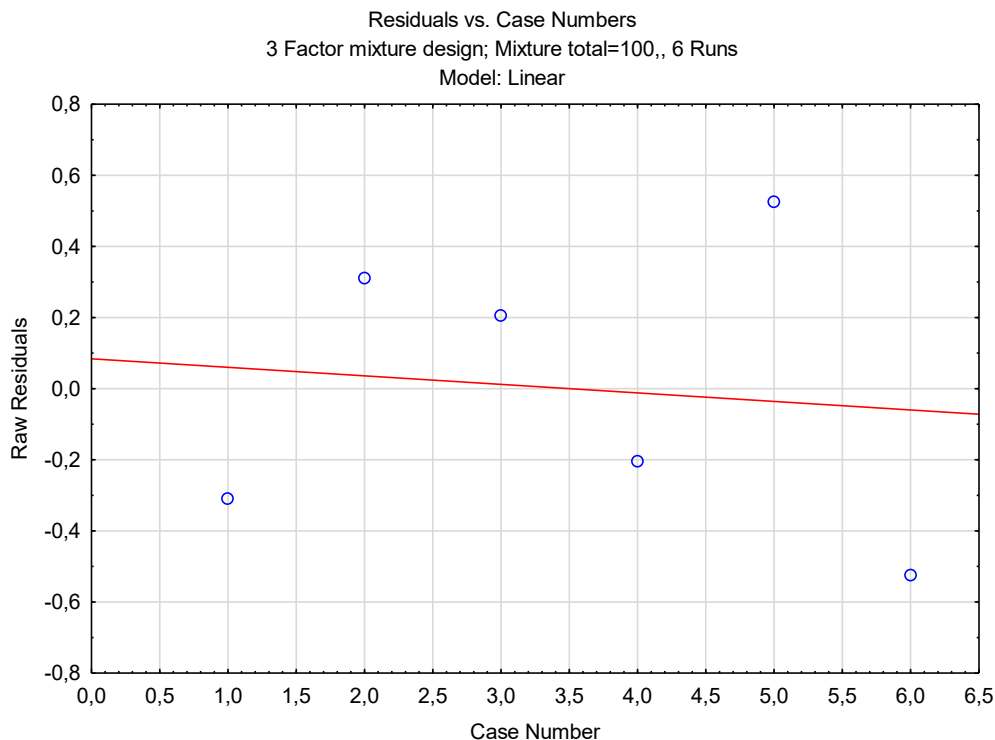
Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 125 – Gráfico de normalidade para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).

Figura 126 – Aleatoriedade do ensaio para a variável tração (kgf/cm²) em relação às amostras de dosagem considerando a utilização de RAP e pó de basalto.



Fonte: Elaboração do Autor (2024).