



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**KIM FARIAS PENICHE
RAFAEL AUGUSTO DE LIMA PINHEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DOS AGREGADOS BRITA 0, PÓ DE
PEDRA E AREIA PARA FINS DE USO EM CONCRETO ASFALTICO.
ESTUDO DE CASO: OBRA DO BRT METROPOLITANO DE BELÉM.**

**BELÉM – PA
2023**

**KIM FARIAS PENICHE
RAFAEL AUGUSTO DE LIMA PINHEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DOS AGREGADOS BRITA 0, PÓ DE
PEDRA E AREIA PARA FINS DE USO EM CONCRETO ASFALTICO.
ESTUDO DE CASO: OBRA DO BRT METROPOLITANO DE BELÉM.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de
Tecnologia da Universidade Federal do Pará,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Marcelo Figueiredo Massulo
Aguiar

BELÉM – PA

2023

KIM FARIAS PENICHE
RAFAEL AUGUSTO DE LIMA PINHEIRO

CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DOS AGREGADOS BRITA 0, PÓ DE PEDRA E AREIA PARA FINS DE USO EM CONCRETO ASFALTICO. ESTUDO DE CASO: OBRA DO BRT METROPOLITANO DE BELÉM.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 17 de novembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO FIGUEIREDO MASSULO AGUIAR
Data: 20/11/2023 17:10:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar
Orientador – UFPA

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCUS VINICIUS GUERRA SERAPHICO DE ASSI
Data: 29/11/2023 09:08:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho
Examinador Interno – UFPA

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO BENTES KATO
Data: 27/11/2023 21:10:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Bentes Kato
Examinador Interno – UFPA

BOM
Aprovado, com conceito _____, em 17 de novembro de 2023.

AGRADECIMENTO

Agradecemos primeiramente a Deus, que nos deu oportunidade, força de vontade e coragem para superar todos os desafios, que surgiram em nossos caminhos durante o decorrer da graduação do curso de Bacharelado em Engenharia Civil.

Agradecemos às nossas famílias por nos proporcionarem uma excelente estrutura familiar que nos deu segurança nos estudos. Também agradecemos aos nossos amigos que sempre nos deram forças e incentivos durante as dificuldades que surgiram no decorrer da graduação, direta e indiretamente.

Agradecemos ao Engenheiro Waldnei Lino da Silva por todo o auxílio no fornecimento dos materiais, os quais foram fundamentais na realização deste estudo, a conclusão do trabalho seria impossível sem a sua contribuição.

Agradecemos por fim, ao nosso orientador, o Professor Dr. Marcelo Massulo, que com sua vasta experiência nos instruiu e repassou seus conhecimentos, de modo claro, objetivo e compreensível. Agradecemos também pelo total apoio, incentivo e confiança, saiba que admiramos seu trabalho, dedicação e competência.

PENICHE, Kim Farias.; PINHEIRO, Rafael Augusto de Lima. CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DOS AGREGADOS BRITA 0, PÓ DE PEDRA E AREIA PARA FINS DE USO EM CONCRETO ASFALTICO. ESTUDO DE CASO: OBRA DO BRT METROPOLITANO DE BELÉM. 2023. 80 p. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém).

RESUMO

A caracterização tecnológica de agregados é fundamental para obras de pavimentação, pois ela mensura as propriedades e ajuda a prever o comportamento dos agregados na mistura asfáltica, quando em serviço. Entretanto, nem sempre é possível fazer essa caracterização em todas as obras, uma vez que as grandes distâncias, ausência de zoneamento ambiental, precárias condições de acesso e infraestrutura indisponível, limitam o processo de extração e direcionamento do agregado para o consumo. Com isso, estudos de caracterização tecnológica devem ser feitos com a finalidade de se utilizar agregados minerais mais próximas dos centros de consumo das obras. Portanto, o objetivo desse trabalho é caracterizar os agregados: brita 0, pó de pedra e areia natural utilizados para compor o concreto asfáltico do pavimento flexível da obra do BRT da Região Metropolitana de Belém na rodovia BR-316, conforme especificações indicadas por normas do DNIT. Para tanto, foram utilizados os ensaios de análise granulométrica, índice de forma, abrasão Los Angeles e massa específica de agregados graúdo e miúdo. Os principais resultados foram: abrasão “Los Angeles” = 34,11 %; índice de forma = 2,165; massa específica dos agregados: brita 0 = 2,658 g/cm³, areia natural = 2,625 g/cm³ e pó de pedra = 2,638 g/cm³; análise granulométrica: brita 0 possui graduação aberta com distribuição granulométrica contínua, areia natural tem graduação densa, com distribuição granulométrica contínua e pó de pedra apresenta graduação densa similar a areia natural. A melhor proporção de agregados, segundo o método das tentativas, para atingir a “faixa C” do DNIT foi de 60 % de brita 0, 25 % de pó de pedra e 15 % de areia natural, com massa específica da mistura de agregados = 2,648 g/cm³. Portanto, conclui-se que os agregados atendem às especificações do DNIT para a “faixa C” do concreto asfáltico (CA).

Palavras-chave: Agregados, ensaio de caracterização, concreto asfáltico, “faixa C” DNIT.

PENICHE, Kim Farias.; PINHEIRO, Rafael Augusto de Lima. TECHNICAL CHARACTERIZATION OF GRAVEL 0 AGGREGATES, STONE DUST AND SAND FOR USE IN ASPHALT CONCRETE. CASE STUDY: BELÉM METROPOLITAN BRT PROJECT. 2023. 80 p. Graduation in Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém).

ABSTRACT

The technological characterization of aggregates is essential for paving works, as it measures the properties and helps to predict the behavior of the aggregates in the asphalt mixture, when in service. However, it is not always possible to make this characterization in all works, since the great distances, absence of environmental zoning, precarious access conditions and unavailable infrastructure, limit the process of extraction and direction of the aggregate for consumption. Thus, technological characterization studies should be carried out in order to use mineral aggregates closer to the consumption centers of the works. Therefore, the objective of this work is to characterize the aggregates: gravel 0, stone dust and natural sand used to compose the asphalt concrete of the flexible pavement of the BRT work in the Metropolitan Region of Belém on the BR-316 highway, according to specifications indicated by DNIT standards. To this end, the tests of particle size analysis, shape index, Los Angeles abrasion and specific mass of coarse and fine aggregates were used. The main results were: "Los Angeles" abrasion = 34.11 %; form index = 2.165; Specific mass of aggregates: gravel 0 = 2.658 g/cm³, natural sand = 2.625 g/cm³ and stone dust = 2.638 g/cm³ ; particle size analysis: Gravel 0 has an open gradation with continuous granulometric distribution, natural sand has a dense gradation with continuous granulometric distribution and stone dust has a dense gradation similar to natural sand. The best proportion of aggregates, according to the trial method, to reach the "range C" of the DNIT was 60 % of crushed stone 0, 25 % of stone dust and 15 % of natural sand, with specific mass of the aggregate mixture = 2.648 g/cm³. Therefore, it is concluded that the aggregates meet the DNIT specifications for the "C range" of asphalt concrete (AC).

Keywords: Aggregates, characterization test, asphalt concrete, "C range" DNIT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos agregados.	18
Figura 2 - Graduações típicas de agregados.	19
Figura 3 - Ilustração do peneiramento de agregados.	20
Figura 4 - Massa mínima de amostra de ensaio.	21
Figura 5 - Graduação para o ensaio.	22
Figura 6 - Carga Abrasiva.	22
Figura 7 - Quantidade mínima da amostra.	24
Figura 8 - Frasco de Chapman.	25
Figura 9 - Massa mínima de amostra de ensaio.	27
Figura 10 - Pilha de agregados graúdos de brita 0.	32
Figura 11 - Pilha de agregados miúdos de pó de pedra.	33
Figura 12 - Pilha de agregados miúdos de areia natural.	33
Figura 13 - Visão geral da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.	34
Figura 14 - Visão geral da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.	34
Figura 15 - Fluxograma do programa de atividades.	35
Figura 16 - Divisão dos materiais.	37
Figura 17 - Materiais armazenados.	37
Figura 18 - Amostra 1: brita 0, pó de pedra e areia natural.	39
Figura 19 - Medição do comprimento e espessura do agregado com paquímetro.	40
Figura 20 - Máquina de abrasão “Los Angeles”.	40
Figura 21 - Alturas consecutivas dos agregados: (a) pó de pedra; (b) areia natural.	41
Figura 22 - Determinação dos pesos: (a) seco; (b) saturada superfície seca; (c) submerso.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais, ensaios repetições e normas.	38
Tabela 2 - Ensaio, norma e valor de referência.	42
Tabela 3 - Classificação dos coeficientes de variação.....	43
Tabela 4 - Composição granulométrica das amostras do agregado brita 0.	47
Tabela 5 - Composição granulométrica das amostras do agregado pó de pedra.	48
Tabela 6 - Composição granulométrica das amostras do agregado areia natural.....	49
Tabela 7 - Abertura, percentual retido médio e percentual retido acumulado.....	50
Tabela 8 - Resultados do módulo de finura e dimensão máxima do agregado.	50
Tabela 9 - Composição granulométrica das amostras 2, 3 e 4 do agregado pó de pedra.	51
Tabela 10 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0, pó de pedra e areia natural.....	53
Tabela 11 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0 e pó de pedra.....	54
Tabela 12 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0 e areia natural.....	55
Tabela 13 - Índice de forma da brita 0.....	59
Tabela 14 - Massa seca (A), saturada superfície seca (B) e submersa (C).	60
Tabela 15 - Resultados da massa específica real do agregado brita 0.	64
Tabela 16 - Resultados da massa específica aparente do agregado brita 0.	64
Tabela 17 - Resultados de massa específica dos agregados miúdos.	68
Tabela 18 - Material, ensaio, determinação e variabilidade aceitável.....	69
Tabela 19 - Material, massa específica, proporção e massa específica ponderada.	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado de brita 0.....	45
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado pó de pedra.	45
Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado de areia natural.	46
Gráfico 4 - Curva granulométrica média dos agregados.	46
Gráfico 5 - Curva granulométrica dos agregados e da mistura para a “faixa C”.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivos Gerais	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	AGREGADOS UTILIZADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS	16
2.2	PRINCIPAIS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	19
2.2.1	Análise granulométrica	20
2.2.2	Abrasão “Los Angeles”	21
2.2.3	Índice de forma	23
2.2.4	Massa específica de agregado miúdo	25
2.2.5	Absorção e massa específica de agregado graúdo	26
2.2.6	Equivalente de areia	28
2.2.7	Durabilidade	29
2.2.8	Adesividade	29
2.3	RELATOS DE PESQUISAS COM AGREGADOS PARA REVESTIMENTO ASFÁLTICO	30
3	MATERIAIS E MÉTODO	32
3.1	MATERIAIS	32
3.2	DESCRIÇÃO DO MÉTODO	35
3.2.1	Preparação das amostras	36
3.2.2	Ensaio de caracterização	37
3.2.2.1	Ensaio de granulometria	38
3.2.2.2	Ensaio de índice de forma	39
3.2.2.3	Ensaio de abrasão “Los Angeles”	40
3.2.2.4	Ensaio de massa específica de agregado miúdo	41
3.2.2.5	Ensaio de absorção e massa específica de agregado graúdo	41
3.3	ANÁLISES DOS RESULTADOS	42

3.4	USO DO MÉTODO DAS TENTATIVAS PARA DEFINIR A PROPORÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS PARA O ATENDIMENTO DA FAIXA “C” DO DNIT	43
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	44
4.1.1	Verificação das especificações	44
4.1.2	Verificação quanto a variabilidade	51
4.1.3	Método das tentativas	52
4.2	ABRASÃO “LOS ANGELES”	56
4.2.1	Verificação das especificações	56
4.2.2	Verificação quanto a variabilidade	57
4.3	ÍNDICE DE FORMA	57
4.3.1	Verificação das especificações	59
4.3.2	Verificação quanto a variabilidade	59
4.4	MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO	60
4.4.1	Verificação das especificações	64
4.4.2	Verificação quanto a variabilidade	65
4.5	MASSA ESPECÍFICA DE AGREGADO MIÚDO	65
4.5.1	Verificação das especificações	68
4.5.2	Verificação quanto a variabilidade	68
4.6	MASSA ESPECÍFICA DA MISTURA DE AGREGADOS	69
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5	CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	71
5.1	CONCLUSÃO	71
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	APÊNDICE A – PROPORÇÕES E MISTURAS DOS MATERIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico, mudanças de hábitos e tendência de mercado demandam cada vez mais, a necessidade do uso e ocupação do solo nas diferentes regiões do Brasil. Entretanto, a transformação do espaço geográfico brasileiro não tem ocorrido em ritmo suficiente para aumentar a demanda da mobilidade urbana e rural da sociedade atual, a qual ocorre, principalmente, por meio da utilização do modal rodoviário. E isso se deve, basicamente pela falta de interesses das empresas e dos Governos Federal, Estaduais e Municipais em desenvolver o zoneamento ambiental para a mineração regional, do alto custo do transporte de materiais comumente usados para compor as múltiplas camadas de um pavimento e insuficiência de recursos financeiros destinados à execução de obras de construção, ampliação e reforma do setor de infraestrutura de transportes, entre outros.

O setor de agregados minerais possui grande relevância para a sociedade moderna, uma vez que o crescimento da população, dos setores de bens e serviços ocorrem concomitantemente com o consumo dos agregados minerais (FERREIRA e FONSECA JÚNIOR 2012, p. 09 e 32). Desse modo, a utilização de agregados de reservas regionais oriundos de locais mais próximos dos principais centros de consumo, ou mesmo as margens de rodovias já implantadas, geraria efeitos positivos sobre a produtividade da economia, visto que reduziria gastos com transporte de longas distâncias ao longo do país, que por sua vez, permitiria melhor aproveitamento dos recursos financeiros fornecidos pelo Governo Federal para o desenvolvimento de obras de pavimentação.

Tratando-se da produção e consumo de materiais disponíveis nas proximidades de obras da Região Metropolitana de Belém do Pará, com a finalidade de diminuir o custo final tanto dos agregados pétreos, quanto das obras de pavimentação, mostram-se imprescindíveis estudos a respeito de sua viabilidade econômica, como forma de incentivar investimentos intensos e constantes, tanto na fase de pesquisa quanto de lavra, por parte dos setores público e privado, uma vez que os agregados minerais são insumos primordiais no desenvolvimento socioeconômico de um país e, também fundamentais para a qualidade de vida da população da região.

Atualmente, existem estudos e normas que definem as propriedades necessários que os agregados devem possuir para atender os diferentes tipos de demandas de mercado. Mais precisamente o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), normaliza a utilização dos agregados na camada de revestimento de um pavimento. Para se obter resultados

confiáveis e reproduzíveis, torna-se necessário a utilização de ensaios mecânicos laboratoriais, uma vez que tais procedimentos identificam e quantificam propriedades, de forma a utilizar materiais de qualidades adequadas em pavimentação.

Nesse contexto, o presente estudo traz consigo a perspectiva de analisar a viabilidade técnica do uso dos agregados brita 0, pó de pedra e areia natural como agregados de um concreto asfáltico, extraídas de reservas do Estado do Pará, e utilizada pela usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA na camada de rolamento do pavimento flexível da obra Bus Rapid Transit (BRT) da Região Metropolitana de Belém na rodovia BR-316.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar os agregados: brita 0, pó de pedra e areia natural utilizados para compor o concreto asfáltico do pavimento flexível da obra BRT da Região Metropolitana de Belém na rodovia BR-316, conforme especificações indicadas por normas do DNIT.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos, tem-se:

- Verificar o atendimento dos resultados de cada amostra ensaiada, conforme os requisitos da norma do DNIT 031/2006 – ES e da norma da ABNT NBR 7211/2022, para determinação da viabilidade da utilização do material em concretos asfáltico;
- Analisar a variação dos resultados de um mesmo ensaio entre duas amostras diferentes;
- Utilizar o método das tentativas para definir o melhor percentual de mistura desses agregados para compor a “faixa C” do DNIT.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), o Brasil, atualmente, dispõe de apenas 12,4 % de rodovias pavimentadas, das quais, em sua grande maioria, são revestidas por pavimento flexível (CNT 2022, p. 14). Além disso, durante o período de 2011 a 2021, foi registrado o crescimento de 58,0 % da frota de veículos leves e pesados que circulam no país (CNT. 2022, p. 19). Esses dados coletados passam a estimular e realizar o desenvolvimento de estudos e pesquisas de caráter científico e tecnológico concernentes à pavimentação asfáltica, visando contribuir para o desenvolvimento de novos pavimentos asfálticos, eficientes e com menor custo, através consumo dos materiais locais, os quais possibilitam melhorias socioeconômica da região e redução dos custos de pavimentação.

Dentre as diversas camadas de um pavimento flexível, a camada de rolamento é uma das principais, sendo composta pela mistura de agregados e ligante asfáltico que, como camada superior, possui a função de receber e resistir aos carregamentos vindas do tráfego, como também permitir a circulação de pessoas e veículos. E para que o seu desempenho em serviço de seja satisfatório é importante conhecer e selecionar as principais propriedades que os agregados minerais constituintes da mistura asfáltica devem possuir, visto que são os componentes mais utilizados, representando cerca de 90 % a 95 % em peso e de 70 % a 85 % do volume da mistura (MENDES 2011, p. 16, apud ASPHALT INSTITUTE, 1989) e tem influência direta na formação e manutenção estrutural do concreto asfáltico (CA).

A falta de uma estrutura de coleta e análises de dados geológicos apurados em diferentes regiões do Brasil, ligados aos fatores de alta demanda, alto custo relativo de transporte e baixo valor agregado, vem limitando o mercado potencial de agregados minerais a curtas e médias distâncias. Diante disso, para se tornar os agregados minerais econômica e tecnologicamente viáveis à pavimentação asfáltica, é preciso viabilizar a exploração de jazidas minerais mais próximas dos centros de consumo (FERREIRA e FONSECA JÚNIOR 2012, p. 09 e 32).

Desse modo torna-se necessário estudos de caracterização tecnológica em agregados regionais, visando a definição das propriedades requeridas para os diferentes usos na região, uma vez que a partir do conhecimento referente as características mineralógica, física e química dos materiais, as empresas poderão otimizar racionalmente o uso dos recursos naturais através de, dosagem do tipo e da quantidade adequada de materiais utilizados, como também prever o seu comportamento posterior, quando em serviço.

Adicionalmente, o trabalho também tem relevância por ser o primeiro trabalho acadêmico desenvolvido no Laboratório de Misturas Asfálticas da UFPA, após o período de pandemia de COVID-19, significando a reativação deste Laboratório.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente monografia está estruturada em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

No Capítulo 1 encontra-se a introdução do tema, apresentando justificativa e objetivos geral e específicos.

No Capítulo 2 é realizada a abordagem quanto à revisão bibliográfica, onde há informações sobre os agregados utilizados em misturas asfálticas, os principais ensaios de caracterização dos agregados. Além disso, também são apresentados relatos de pesquisas com agregados para revestimento asfáltico de diferentes regiões do país.

O Capítulo 3 refere-se aos materiais e métodos utilizados para a realização do estudo, em que são apresentados a origem e local de coleta dos materiais, a preparação das amostras e métodos de ensaios utilizados, os resultados a serem analisados e a definição da proporção dos agregados para mistura asfáltica utilizado o método das tentativas.

No Capítulo 4 encontra-se a apresentação e discursão dos resultados. Nele, são exibidos todos os parâmetros obtidos visando o atendimento ou não das especificações das normas vigentes da ABNT e do DNIT, assim como a variabilidade aceitável da repetibilidade dos resultados. Além disso, é feita uma análise comparativa entre valores obtidos pelo presente estudo e dados verificados anteriormente por outros pesquisadores. Por fim, são apresentadas as proporções da mistura dos agregados para o atendimento da “faixa C” do DNIT.

No Capítulo 5 é apresentada a conclusão deste estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidas na área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor fundamentar o trabalho, abordam-se referenciais teóricos sobre a importância de se conhecer e selecionar adequadamente as propriedades dos agregados que compõem os revestimentos asfálticos de um pavimento flexível. Em seguida apresentam-se os ensaios de análise granulométrica, índice de forma, abrasão Los Angeles e massa específica de agregados graúdo e miúdo, durabilidade, equivalente de areia e adesividade. Por fim, serão apresentados alguns trabalhos acadêmicos que contém resultados destes ensaios em diferentes regiões brasileiras.

2.1 Agregados utilizados em misturas asfálticas

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 217), “agregado é um termo genérico para os materiais que estão nas dimensões da fração areia, dos pedregulhos, e maiores dimensões, decorrentes da britagem de rochas minerais ou de cascalheiras de ocorrência natural”. Além disso, pode-se dizer que os agregados são materiais fragmentados de origem natural e ou artificial sem forma ou volume definidos utilizados, em tamanhos e propriedades adequadas, em obras de infraestruturas em geral.

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 217), “a variedade de agregados passíveis de utilização em pavimentos asfálticos é muito grande. Contudo, cada utilização em particular requer agregados com características específicas e isso inviabiliza muitas fontes potenciais”.

Os diferentes tipos de agregados são fundamentais nas obras de pavimentação asfálticas. Eles estão presentes em diversas etapas da construção das múltiplas camadas finitas de um pavimento flexível e, por isso, é importante sabermos das propriedades e características que os agregados apresentam, tanto na sua forma isolada e ou formando misturas, pois a partir do conhecimento de cada uma delas, podemos otimizar racionalmente o uso dos recursos naturais através de, dosagem do tipo e da quantidade de materiais utilizados. Além disso, para que o desempenho dos agregados seja satisfatório, é importante que o engenheiro tenha o conhecimento prévio da sua origem geológica, como também, do processo físico-químico que sofreu durante o seu processo de fragmentação. (BERNUCCI et al. 2022, p. 117).

Os diferentes tipos de misturas asfálticas, constituem-se principalmente de agregados

minerais graduados com cerca de 90 % a 95 % em peso e de 70 % a 85 % do volume (MENDES 2011, p. 16, apud ASPHALT INSTITUTE, 1989). Esses agregados, quando dosados e aplicadas apropriadamente em uma ou mais camadas sobrepostas, originam estruturas duráveis, cuja função visa suportar e transmitir as possíveis influências de tensões que possam ocorrer durante a vida útil de um pavimento flexível. Segundo Bernucci et al. (2022, p. 231), “são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor extensão as propriedades químicas” (apud Roberts et al., 1993).

Segundo estudos realizados por Gouveia (2006, p. 195) “O agregado é responsável por formar a estrutura de sustentação ou esqueleto estrutural da mistura, cuja função é resistir majoritariamente à compressão e ao movimento de cargas e veículos”. Diante disso, para que a sua utilização em misturas asfálticas seja satisfatória, os agregados, devem apresentar algumas características tecnológicas, como por exemplo: graduação adequada, formas cúbicas, baixa porosidade, resistência ao choque e ao desgaste, apresentar superfície limpa, adesividade e algumas outras propriedades.

De acordo com conclusões de Leite et al. (2020, p. 124) “A macro e a microtextura da superfície de uma mistura asfáltica são intimamente relacionadas aos agregados que a compõe e definem o atrito pneu-pavimento, aspecto fundamental da segurança dos usuários”. Com isso, destaca-se que conhecimentos prévios das características morfológicas intrínsecas aos agregados, como por exemplo: (angularidade, textura, resistência ao polimento e curva granulométrica dos agregados) demonstrariam a adequação ou não dos agregados na mistura asfáltica com desempenho satisfatório.

Nesse estudo, serão apresentadas algumas características determinantes para a classificação dos agregados: natureza, tamanho e distribuição dos grãos, conforme mostrado na Figura 1. Além disso, também serão informadas as características que são analisadas para aceitação de agregados para misturas asfálticas segundo a maioria das especificações e especialmente as do DNER/ DNIT.

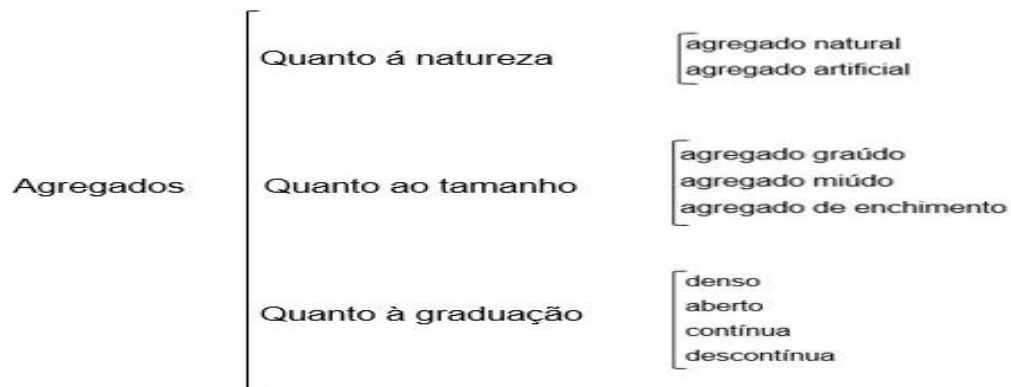
De acordo com Bernucci et al. (2022, p. 218 e 222), para a classificação dos agregados segundo a sua natureza, temos o seguinte:

- Naturais, são aqueles utilizados na forma e tamanho que se encontram no meio ambiente, passando somente por processos convencionais de britagem e ou lavagem, quando necessário;
- Artificiais, são aqueles resultantes de processos de transformações da composição química e estado físico do material, sendo os resíduos de processos

industriais os mais comuns a serem utilizados;

- Reciclados, são aqueles provenientes do reaproveitamento de materiais diversos, sendo utilizados: os materiais provenientes do uso de resíduo de construção civil, reciclagem de revestimentos asfálticos dentre outros.

Figura 1 - Classificação dos agregados.



Fonte: De autoria própria (2023).

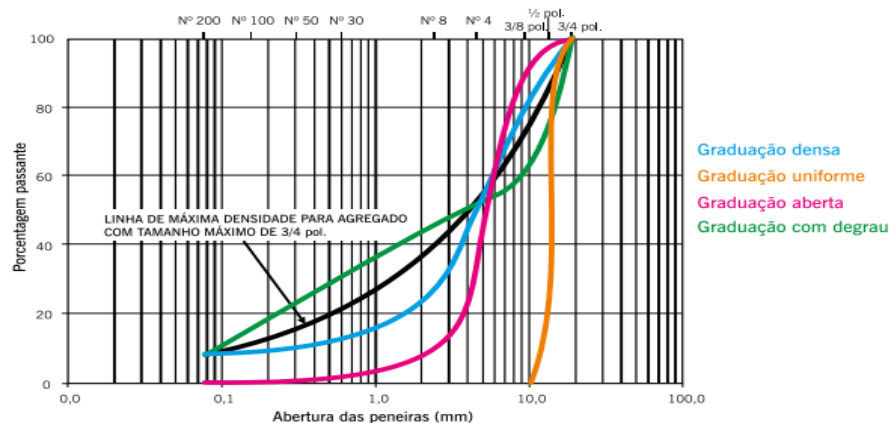
Para a classificação quanto ao tamanho, os agregados, para uso em misturas asfálticas, a norma DNER-ME 083/98 divide os agregados em graúdo e miúdo e a norma DNER-EM 367/97 em material de enchimento ou filler. O agregado graúdo é o material com dimensões maiores do que 4,8 mm e máxima de 50 mm; pode ser pedra britada, escória, seixo rolado ou outro material que atenda a especificação. O agregado miúdo é o material com dimensões maiores que 0,075 mm e máximo de 4,8 mm; pode ser areia, pó-de-pedra ou outro material que atenda a especificação. O material de enchimento é o material onde pelo menos 65% das partículas são menores que 0,075 mm; deve ser constituído por materiais, tais como cimento Portland, cal extinta, entre outros (BERNUCCI et al. 2022, p. 222).

Quanto à distribuição dos grãos, de acordo com o Bernucci et al. (2022, p. 225) os agregados podem ter graduação aberta, densa, uniforme e descontínua. A seguir são denominadas as mais importantes graduações, ilustradas conforme a Figura 2.

- Graduação densa ou bem graduada: é aquela que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, próxima à de densidade máxima;
- Graduação aberta: é aquela que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino (menor que 0,075 mm), para preencher os vazios entre as partículas maiores.

- Graduação tipo contínua: é aquela que possui partículas de um único tamanho, ou seja, apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme.
- Graduação com degrau ou descontínua: é aquela que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias.

Figura 2 - Graduações típicas de agregados.



Fonte: Bernucci et al. (2022).

Para os agregados serem utilizados em misturas asfálticas, é desejável apresentar algumas características como: tamanho e graduação adequada, resistência a abrasão, textura, forma, apresentar superfície limpa, absorção, adesividade ao ligante asfáltico, salinidade, densidade específica/massa específica, angularidade do agregado graúdo e angularidade do agregado miúdo (BERNUCCI et al. 2022, p. 231 e 232).

2.2 Principais ensaios de caracterização dos agregados

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 217), “os ensaios de laboratório e a experiência prática devem indicar como uma rocha que existe há milhões de anos irá se comportar durante sua vida de projeto em um pavimento”.

Das diversas características encontradas em laboratórios que determinam a aplicabilidade dos agregados graúdos e miúdos na camada de revestimento de um pavimento

flexível, são as características físicas dos agregados, que estabelecem a adequação ao uso em misturas asfálticas. E para obtê-las, é necessário a realização de ensaios de caracterização que determinem: a granulometria, a massa específica, a densidade real e aparente, adesividade, absorção de água, teor de material pulverulento, resistência ao choque e ao desgaste e forma.

2.2.1 Análise granulométrica

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 223), “a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos e das camadas granulares em pavimentos asfálticos”.

O ensaio de análise granulométrica de agregados é especificado segundo a norma DNIT 412/2019 – ME. E para a determinação da composição granulométrica é necessário a realização do peneiramento dos agregados pelo conjunto de peneiras da série normal e série intermediária com fundo e tampa, conforme Figura 3.

Figura 3 - Ilustração do peneiramento de agregados.



Fonte: Bernucci et al. (2022).

Para a obtenção das amostras, é necessário a retirada de amostragem dos agregados de diferentes condições de estocagem e, para isso, deve-se seguir os procedimentos indicados pela norma DNER – PRO 120/97. Além disso, deve-se fazer a redução do material para ensaio no laboratório segundo as orientações da norma DNER – PRO 199/1996 até a quantidade indicada para o ensaio, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Massa mínima de amostra de ensaio.

Tamanho máximo dos agregados, mm	Massa mínima de amostra para o ensaio, kg
4,75	0,3 a 0,5
9,50	1
12,50	2
19,00	5
25,00	10

Fonte: Norma DNIT 412/2019 – ME.

A determinação da distribuição granulométrica de um agregado é feita através da análise das porcentagens das massas retidas e/ou passadas em um conjunto de peneiras com aberturas progressivamente menores, variando de acordo com a norma ou especificação usada (CUNHA 2004, p. 5).

A representação dos resultados obtidos do ensaio pode ser feita de forma gráfica, no qual traça-se a curva granulométrica em um diagrama semilogarítmico que tem como parâmetros a dimensão das partículas e peso do material em porcentagem (LEITE et al. 2020, p. 69), onde a ordenada corresponde à porcentagem total de peso passante em um dado tamanho sobre uma escala aritmética, e a abscissa representa o tamanho da partícula, plotada em escala logarítmica (MENDES 2011, p. 24).

2.2.2 Abrasão “Los Angeles”

Segundo Leite et al. (2020, p. 75), “a abrasão ocorre no agregado durante todo o processo de manipulação das misturas asfálticas durante o processo de usinagem, nos serviços de execução da camada do revestimento e pela ação do tráfego”.

O ensaio de abrasão “Los Angeles” de determinado agregado graúdo, é capaz de mensurar e simular um potencial perda da massa pelo desgaste das partículas de agregado. Para a determinação da abrasão para agregados pétreos, deve-se seguir às especificações da norma DNER-ME 035/98, a qual utiliza de uma faixa de graduação (A, B, C, D, E, F e G) estabelecida pela própria norma para a obtenção da massa mínima das porções de agregado necessária para

a realização do ensaio, bem como, do número de rotações necessárias para ocorrer o misto de impacto e desgaste do material com a carga abrasiva. A Figura 5 mostra à granulometria mais próxima possível da que deverá ser usada.

Figura 5 - Graduação para o ensaio.

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: Norma DNER-ME 035/98.

A norma DNER-ME 035/98 estabelece por meio da graduação o número e o peso das esferas, a serem utilizadas como carga abrasiva, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Carga Abrasiva.

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: Norma DNER-ME 035/98.

Com a seleção da porção da massa e das esferas abrasivas. É utilizado o tambor da máquina “Los Angeles” para imprimir um misto de impactos e desgastes nos agregados. As

rotações do tambor giratório devem variar entre 500 a 1.000 rpm com uma velocidade que fica em torno de 30 a 33 rpm (rotações por minuto) até completar 500 rotações, para as graduações A, B, C e D e 1000 rotações para as graduações E, F e G.

Após a retirada do conjunto (agregados e esferas) do tambor da máquina, separam-se as esferas, limpam-se as mesmas com a escova, e lava-se a amostra na peneira 1,7 mm. Em seguida, reúne-se todo o agregado, e coloca-se para secar em estufa à temperatura entre 105 °C e 110 °C, durante, no mínimo, 3 horas. Posteriormente, retira-se o material da estufa, deixa-se esfriar, e determina-se sua massa. Os resultados são obtidos em porcentagem, por meio da Equação 1.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).

2.2.3 Índice de forma

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 243), “a forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade”.

O índice de forma serve como um parâmetro que permite avaliar a qualidade do agregado graúdo, em se tratando de forma dos grãos. E o ensaio necessário para realização de sua caracterização pode ser feito através do método do paquímetro, segundo a norma DNIT 425/2020 - ME (BERNUCCI et al. 2022, p. 243).

Para a obtenção das amostras, deve-se seguir os procedimentos indicados pela norma DNER – PRO 120/97. Além disso, é necessário fazer a redução do material segundo as orientações da norma DNER – PRO 199/1996 até a quantidade indicada, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Quantidade mínima da amostra.

Fração granulométrica (abertura da peneira) mm	Massa mínima da amostra inicial (kg)
< 19	5
> 19 e ≤ 25	10
> 25 e ≤ 37,5	15
> 37,5	20

Fonte: Norma DNIT 425/2020 – ME.

A determinação da distribuição granulométrica é feita através da análise das porcentagens das massas de agregados, retidas em um conjunto de peneiras com aberturas progressivamente menores, conforme especificações da norma DNIT 412 – ME.

Para a determinação do número de agregados serem medidos. Inicialmente, são coletados os valores das porcentagens das massas retidas até a peneira de abertura de malha 9,5 mm. E posteriormente, são aplicados os valores na Equação 2.

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i \quad (2)$$

Em que:

200 = número de partículas necessárias para o ensaio;

N_i = número de partículas a serem medidas na fração i ;

F_i = percentual de massa retida na fração i ;

$\sum_{i=1}^n F_i$ = Soma das porcentagens retidas em cada fração.

Para a obtenção do resultado do índice de forma (I). Deve ser feito, primeiramente a medição por meio de um paquímetro das dimensões de comprimento (c) e espessura (e) dos agregados selecionados. Em seguida, é realizado a média ponderada dos valores de comprimento ($c_{médio}$) e largura ($e_{médio}$) dos grãos. Por fim, são utilizados os valores médios na Equação 3.

$$I = \frac{c_{médio}}{e_{médio}} \quad (3)$$

Em que:

I = índice de forma do agregado;

$c_{\text{médio}}$ = comprimento médio, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos;

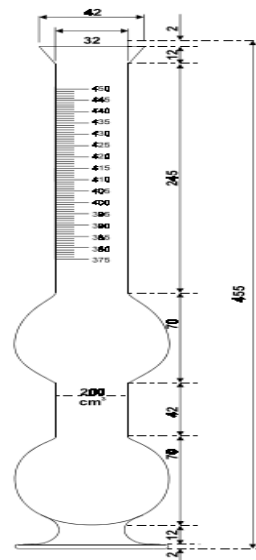
$e_{\text{médio}}$ = espessura média, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos.

2.2.4 Massa específica de agregado miúdo

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 243), “as relações entre quantidade de matéria (massa) e volume são denominadas massas específicas, e expressas geralmente em t/m^3 , kg/dm^3 ou g/cm^3 ” (apud Pinto, 2000).

O ensaio de massa específica de agregado miúdo é especificado segundo a norma DNER-ME 194/98. E para a sua determinação é necessário a quantidade de 500 g de material passante na peneira 4,8 mm e retidos na peneira 0,075 mm, como também, da utilização de um frasco de Chapman composto de dois bulbos e um gargalo graduado, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Frasco de Chapman.



Fonte: Norma DNER-ME 194/98.

Para a obtenção das amostras, deve-se seguir os procedimentos indicados pela norma DNER – PRO 120/97. Além disso, é necessário fazer a redução do material para ensaio segundo as orientações da norma DNER – PRO 199/1996 até a quantidade indicada.

A seleção da granulométrica do material deve ser feita através do método do peneiramento, o qual é usado um conjunto de peneiras intermediárias da ABNT de abertura de malha de 4,8 mm até a abertura de malha de 0,075 mm com fundo e tampa.

Para a realização do ensaio, primeiramente é adicionado água no frasco de Chapman até atingir a marca de referência da mesma, de 200 cm³. Logo em seguida, são colocados os 500 g da amostra de agregado miúdo. Por fim, é feita a leitura da altura atingida pelo conjunto água e agregado no frasco Chapman.

O cálculo da massa específica do agregado miúdo é feito por meio da Equação 4.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (4)$$

Em que:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³;

L = leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo);

200 = volume inicial de água no frasco, em cm³.

2.2.5 Absorção e massa específica de agregado graúdo

A absorção é definida como o aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento de água dentro dos seus vazios permeáveis durante um período preestabelecido, este valor é expresso em porcentagem (DNIT 413/2021 - ME).

Por definição, massa específica é relação entre a quantidade de matéria (massa) e o volume de um material expressa em quilograma por metro cúbico ou grama por centímetro cúbico, segundo o sistema internacional (BERNUCCI et al. 2022, p. 249).

O ensaio de absorção e de massa específica de agregado graúdo é especificado segundo a norma DNIT 413/2021 - ME. Para a obtenção das amostras, deve-se seguir os procedimentos indicados pela norma DNER – PRO 120/97. Além disso, é necessário fazer a redução do material para ensaio no laboratório segundo as orientações da norma DNER – PRO 199/1996.

A seleção da granulométrica do material deve ser feita através do método do peneiramento, o qual deve ser usado a peneira de 4,75 mm (# n° 4) para retirar a massa mínima de amostra de ensaio, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Massa mínima de amostra de ensaio.

Tamanho Nominal Máximo, mm (pol.)	Massa mínima para a Amostra de Ensaio, kg
12,5 (1/2") ou menor	2
19,0 (3/4")	3
25,0 (1")	4
37,5 (1 1/2")	5
50 (2")	8
63 (2 1/2")	12
75 (3")	18

Fonte: Norma DNIT 413/2021 - ME.

Para a realização do ensaio, deve-se lavar a massa da amostra em água corrente sobre a peneira 4,8 mm e, posteriormente, colocada na estufa em temperatura entre $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por um período de 1 hora há 3 horas até sua constância de massa. Seguidamente, o agregado deve ser totalmente imerso em um recipiente com água, por um período de 24 horas.

Finalizado o tempo, a amostra deve ser retirada da água e, imediatamente, deve-se secar com um pano a superfície das partículas, para então, fazer a pesagem da massa saturada com superfície seca, denominada (B).

Logo após, deve-se pegar um recipiente metálico vazado, com malha adequada a ponto de não permitir a perda de massa do agregado. Esse recipiente deve ser preso por um fio a uma haste da balança e colocado totalmente imerso em água. O sistema todo é então tarado e, em seguida, deve-se colocar a amostra dentro do recipiente metálico, para então, fazer a leitura do peso de volume d'água deslocado, denominado (C).

Por fim, retira-se a amostra do recipiente vazado e, ao mesmo tempo, o agregado de ser levado para secagem em estufa por, pelo menos, 3 horas em temperatura entre $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até constância de massa. Em seguida, realiza-se a pesagem da massa seca dos agregados, denominado (A).

Para o cálculo de massa específica real do agregado deve ser utilizado a Equação 5.

$$ME_{sa} = 0,9971 \frac{A}{A - C} \quad (5)$$

Em que:

ME_{sa} = massa específica real do grão do agregado (g/cm^3);

A = massa da amostra de ensaio, seca em estufa, no ar (g);

C = massa imersa da amostra de ensaio saturada, em água (g).

Para o cálculo de massa específica aparente deve ser utilizado a Equação 6.

$$ME_{\text{sub}} = 0,9971 \frac{A}{B - C} \quad (6)$$

Em que:

ME_{sub} = massa específica aparente do agregado saturado com superfície seca (g/cm^3);

A = massa da amostra de ensaio, seca em estufa, no ar (g);

B = massa da amostra de ensaio, na condição saturada com superfície seca, no ar (g);

C = massa imersa da amostra de ensaio saturada, em água (g).

Para o cálculo de absorção de agregados deve ser utilizado a Equação 7.

$$\text{Absorção}(\%) = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (7)$$

Em que:

A = massa da amostra de ensaio, seca em estufa, no ar (g);

B = massa da amostra de ensaio, na condição saturada com superfície seca, no ar (g);

2.2.6 Equivalente de areia

Segundo Bernucci et al. (2022, p. 234), “alguns agregados contêm certos materiais que os tornam impróprios para utilização em pavimentos asfálticos, a menos que a quantidade desses materiais seja pequena”.

Os materiais prejudiciais do tipo: vegetação, conchas e grumos de argila presentes sobre a superfície das partículas do agregado, interfere principalmente na adesividade do ligante asfáltico ao agregado. (BERNUCCI et al. 2022, p. 234).

O ensaio de equivalência de areia é regido pela norma DNER-ME 54/97, o procedimento consiste em agitar energicamente a amostra de agregados finos (passante na

peneira 4,8 mm), numa proveta padronizada, junto com uma solução flocculante e água destilada, de modo a soltar as partículas (argilas, sujeiras) aderidas ao agregado.

O resultado do ensaio é obtido através da razão entre a leitura no topo de areia e a leitura no topo da argila (material disperso).

2.2.7 Durabilidade

O ensaio de resistência ao ataque químico é comumente conhecido como durabilidade ou sanidade, é regido segundo a norma DNER-ME 089/94, a qual define a preparação da amostra e o processo de execução.

Esse ensaio reproduz, de modo acelerado, as condições de desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo. A durabilidade do agregado é obtida através da redução de peso ocasionada pela ação do ataque químico de uma solução de sódio ou magnésio e, para isso a amostra é submetida a ciclos de imersão na solução e secagem em estufa.

Segundo Gouveia (2006, p. 39), o resultado da perda do material é expresso em porcentagem, através da média ponderada calculada em função da porcentagem de perda de cada fração e com base na granulometria da mistura.

2.2.8 Adesividade

Bernucci et al. (2022, p. 246), “o efeito da água de separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas”.

A adesividade entre o asfalto e o agregado pode ser avaliada através do comportamento de partículas de agregados recobertas por ligante asfáltico (análise visual) ou do desempenho de determinadas propriedades mecânico de mistura asfáltica sob a ação da água (análise de comportamento mecânico) (BERNUCCI et al. 2022, p. 246).

O ensaio de adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso, é regido segundo a norma DNER-ME 078/94, a qual define a preparação da amostra e o processo de execução.

Nesse ensaio são avaliadas visualmente deslocamento da película betuminosa da mistura de agregado-ligante não compactada é imersa em água durante o período estabelecido.

2.3 Relatos de pesquisas com agregados para revestimento asfáltico

Costa (2017) investigou os agregados: brita 1, brita 0, pó de brita, e areia provenientes da empresa Edeconsil Construções e Locações LTDA, localizada na cidade de São Luís do Maranhão, com o intuito de realizar um estudo comparativo entre o Método Bailey e o método tradicional de tentativas para seleção de agregados de mistura asfáltica densa (CA). Alguns de seus principais resultados foram:

No ensaio de granulometria, Costa (2017) realizou três ensaios para cada amostra de agregado graúdo e miúdo, e por fim, determinou a média dos valores entre cada amostra ensaiada. As amostras analisadas foram: brita 0, brita 1, pó de pedra e areia, e com os resultados obtidos pelas suas curvas granulométricas, observou-se que agregados de tamanhos maiores, como as brita 0 e brita 1, possuem pouca quantidade de material fino por porcentagem passante em cada peneira, a partir da peneira de nº 4 (4,75 mm). Devido a isso, a representação gráfica das curvas granulométricas tende a ser muito íngreme (COSTA 2017, p. 103).

Dando continuidade na análise de Costa (2017), no qual também avaliou o resultado do ensaio de massa específica e absorção feitos segundo a norma DNER-ME 081/98, nos agregados graúdos de brita 0 e brita 1, para posterior comparação do método Bailey com o método convencional para seleção de material para misturas asfálticas. Sucendendo aos ensaios, o autor, obteve, primeiramente o resultado da massa específica das amostra de agregados de brita 0 e brita 1, os quais ponderam-se observar que a massa específica real, com valor de 2,769 kg/cm³ e massa específica aparente, com valor de 2,748 kg/cm³ para a amostra de brita 0 são maiores que os valores da amostra de brita 1, sendo eles, os valores respectivos real e aparente de 2,744 kg/cm³ e 2,717 kg/cm³. Ainda mais, ele também obteve os valores de absorção, os quais foram de 0,73 % para brita 0 e 1,01 % para brita 1. Diante de tudo, conclui-se a brita 0 têm maior densidade e, conseqüentemente, menores vazios nos agregados, como também, menor absorção de água (COSTA 2017, p. 103).

Para identificar características físicas de agregados da região meio oeste de Santa Catarina necessárias para o uso na construção e manutenção de pavimentos asfálticos, Quaiotto et al. (2020) propuseram a realização de diferentes tipos de ensaios em agregados. Dentre eles,

podemos citar o ensaio de abrasão “Los Angeles”, o qual segundo a norma (DNIT 031-2006) o valor aceitável para o desgaste de agregados graúdos deve ser inferior ou igual a 50 %. Os agregados submetidos ao ensaio são a brita 1 e brita 2, os quais foram colhidas em cinco pedreiras diferentes, sendo elas: Pedreira Treze Tílias, Britagem Gaspar, Minerocha, Plana Terra e Pedreira Triângulo. Para o resultado de abrasão nos agregados graúdos, foi obtido: 12,11 % (Pedreira Treze Tílias), 10,81 % (Britagem Gaspar), 8,97 % (Minerocha Catarinense), 7,9 % (Planaterra) e 6,00 % (Pedreira Triângulo). Logo, é observável que os valores de abrasão da brita 1 e brita 2 atendem ao requisito normativo (QUAIOTTO et al. 2020, p. 76).

Com o intuito de analisar os agregados provenientes da Região Metropolitana de Joinville, para fins de utilização na pavimentação, Meurer (2015) propôs e executou vários ensaios de laboratório pautados nas normas do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). Dente eles, pode-se citar o ensaio de massa específica para agregado miúdo, por meio do fraco de Chapman. Para a obtenção dos materiais, a autora coletou duas amostras de agregado miúdo de pó de pedra, em quatro jazidas, sendo elas: Vogelsanger, Rio Zoada, Rudnick e Sol Nascente. E para a execução do ensaio, Meurer utilizou-se da norma (DNER-ME 194/98), e obteve através da média aritmética do resultado de cada ensaio a massa específica do agregado, os quais são mostrados a seguir: 2,812 kg/cm³ (Jazida Vogelsanger), 2,838 kg/cm³ (Rio Zoada), 2,719 kg/cm³ (Rudnick) e 2,774 kg/cm³ (Sol Nascente). Portanto, conclui-se que a massa específica do agregado aumenta com a diminuição do tamanho da sua partícula, ou seja, quanto mais fino e o agregado maior será o valor de sua massa específica (MEURER 2015, p. 83).

3 Materiais e Método

Neste capítulo, são abordados assuntos relacionados à coleta dos materiais em campo e ao método usado para a realização deste estudo. Descrevendo gradativamente as etapas necessárias para a obtenção dos dados e resultados, dos quais são concebidos através de procedimentos laboratoriais, de acordo com os requisitos estabelecidos em normas. Para tratamento e análise dos resultados, serão utilizados os critérios e requisitos estipulados por normas do DNIT e da ABNT, como também pelo Coeficiente de Variação (CV). Por fim, será utilizado o método das tentativas para o proporcionamento dos agregados.

3.1 Materiais

Os agregados utilizados nessa pesquisa (brita 0, pó de pedra e areia natural) são aqueles utilizados para compor os revestimentos flexíveis da obra Bus Rapid Transit (BRT) da Região Metropolitana de Belém na rodovia BR-316. Eles são provenientes de três fontes diferentes, sendo duas pedreiras e uma jazida.

Para os agregados graúdos de brita 0, os quais são oriundos de britagem de rochas naturais estáveis de origem granítica (rocha magmática). São agregados que foram produzidos pela pedreira Britex, localizada no bairro Zona Rural, do município de Irituia no Estado do Pará. Na Figura 10, tem-se a imagem dos agregados graúdos de brita 0 armazenados em pilhas no pátio de estocagem da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.

Figura 10 - Pilha de agregados graúdos de brita 0.



Fonte: De autoria própria (2023).

Para os agregados miúdos de pó de pedra, os quais são materiais residuais, resultantes da obtenção dos agregados graúdos de pedra britada granítica (rocha magmática). São agregados que foram produzidas pela pedreira Tabal mineração, localizada no bairro Vila Pedreira, do município de Tracuateua no Estado do Pará. Na Figura 11, tem-se a imagem dos agregados miúdos de pó de pedra armazenados em pilhas no pátio de estocagem da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.

Figura 11 - Pilha de agregados miúdos de pó de pedra.



Fonte: De autoria própria (2023).

Para os agregados miúdos de areia natural, os quais são um conjunto de partículas de rochas (rochas sedimentares) degradadas extraídas de jazidas ou de leitos de água. São agregados que foram retiradas da jazida localizada no Km 21, do município de Castanhal no Estado do Pará. Na Figura 12, tem-se a imagem dos agregados miúdos de areia natural armazenados em pilhas no pátio de estocagem da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.

Figura 12 - Pilha de agregados miúdos de areia natural.



Fonte: De autoria própria (2023).

Os agregados pétreos foram fornecidos pela usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA, localizada no município de Marituba da região metropolitana de Belém no Estado do Pará. Nas Figuras 13 e 14, apresentam-se panoramas gerais da usina de asfalto que atende à obra do BRT Metropolitano.

Figura 13 - Visão geral da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.



Fonte: De autoria própria (2023).

Figura 14 - Visão geral da usina Norte Ambiental Gestão e Serviços LTDA.



Fonte: De autoria própria (2023).

A coleta de amostras dos agregados para a análise em laboratório se deu de acordo com o item: 4.3.2 Amostragem em pilhas de estocagem da norma DNER-PRO 120/97. Os agregados graúdos e miúdos foram selecionados, separados e armazenados de acordo com as quantidades suficientes para a realização de todos os ensaios. Para cada material, foram coletados 4 sacos com aproximadamente 30 kg cada, por tipo de material.

3.2 Descrição do Método

Este estudo experimental de caráter comparativo tem como intuito de analisar a viabilidade do uso dos agregados: brita 0, pó de pedra e areia natural constituintes do pavimento flexível da obra BRT da Região Metropolitana de Belém na BR-316. Para conseguir tal verificação, foram utilizadas normas e especificações do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), as quais estabelecem diretrizes para a preparação das amostras, execução dos ensaios de caracterização em laboratório. Além disso, será verificado na análise dos resultados se os valores encontrados em cada ensaio atendem aos requisitos da norma do DNIT 031/2006 – ES e da norma da ABNT NBR 7211/2022, como também, se houve variação importante dos resultados para agregados com mais de uma amostra, por meio dos critérios de precisão estipuladas por cada norma e ou pelo parâmetro estatístico denominado Coeficiente de Variação (CV). Por fim, será utilizado o método das tentativas para definir a proporção ideal dos agregados. Para tanto, foram realizadas as etapas indicadas no Fluxograma, conforme a Figura 15:

Figura 15 - Fluxograma do programa de atividades.



Fonte: De autoria própria (2023).

3.2.1) Preparação das amostras: Inicialmente, realizou-se o processo de quarteamento dos materiais, nos quais os agregados foram separados entre eles, secos e armazenados.

- 3.2.2) Ensaios de caracterização: Posteriormente, efetuou-se de maneira ordenada os ensaios diante descritos: análise granulométrica, índice de forma, abrasão Los Angeles e massa específica.
- 3.2.3) Análise dos resultados: Logo após a realização de cada ensaio, foram comparados os resultados obtidos dos ensaios para materiais com mais de uma amostra no laboratório de Asfalto, com os valores estabelecidos pela norma do DNIT 031/2006 – ES. Sendo eles: a) Agregado graúdo – desgaste “Los Angeles” igual ou inferior a 50% (DNER-ME 035) e b) Agregado graúdo e miúdo – análise granulométrica (camada de rolamento da “faixa C”), como também, pela norma da ABNT NBR 7211/2022. Sendo ele: a) Agregado graúdo – índice de forma (IF < 3). Também se analisou a precisão da repetibilidade dos ensaios, quando possível, através dos critérios de precisão estipuladas por cada norma e/ou pelo Coeficiente de Variação (CV).
- 3.2.4) Método das tentativas: Foi definido a proporção ideal dos agregados para o atendimento da “faixa C”. Sendo demonstrado o cálculo da proporção ideal em 3 condições: brita 0 + pó de pedra + areia natural; brita 0 + pó de pedra e brita 0 + areia natural.

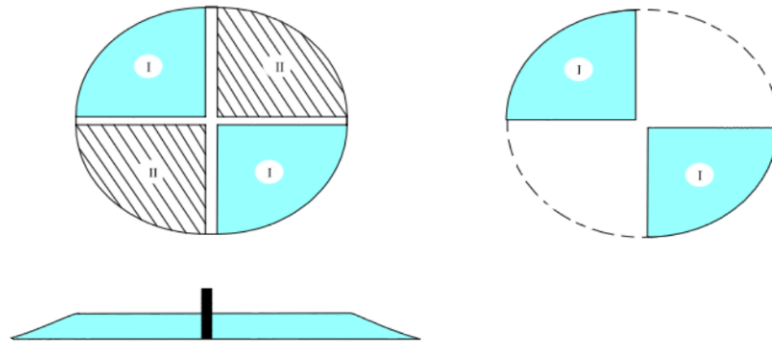
Nos subitens 3.1 a 3.4 são detalhados os procedimentos de cada uma das etapas do método.

3.2.1 Preparação das amostras

A caracterização das propriedades dos agregados está diretamente ligada à homogeneização, quarteamento e armazenamento das amostras. Em virtude disso, este estudo seguiu as recomendações da coletânea de normas vigentes do DNIT, as quais descrevem os procedimentos de como devem ser preparados os agregados graúdos e miúdos para os ensaios.

Para a realização dos procedimentos foram seguidas as especificações da norma DNER-PRO 199/96, conforme mostrado na Figura 16. E posteriormente, os materiais foram armazenados conforme a Figura 17.

Figura 16 - Divisão dos materiais.



Fonte: Norma DNER-PRO 199/96.

Figura 17 - Materiais armazenados.



Fonte: De autoria própria (2023).

3.2.2 Ensaios de caracterização

Os ensaios propostos para este estudo, apresentados na Tabela 1, foram realizados de acordo com as especificações das normas do DNIT, utilizando o Laboratório para Estudo de Misturas Asfálticas (LEMA) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Na Tabela 1 constam o nome do ensaio, o número de repetições do ensaio e a norma que rege o procedimento para cada um dos três materiais (brita 0, pó de pedra e areia natural) utilizados no trabalho.

Tabela 1 - Materiais, ensaios repetições e normas.

Material Ensaiado	Ensaio	Número de repetições	Norma
Brita 0	Granulometria	4	DNIT 412/2019 - ME
Pó de pedra	Granulometria	4	DNIT 412/2019 - ME
Areia natural	Granulometria	4	DNIT 412/2019 - ME
Brita 0	Índice de Forma	2	DNIT 425/2020 - ME
Brita 0	Abrasão “Los Angeles”	1	DNER-ME 035/98
Pó de pedra	Massa específica	2	DNER-ME 194/98
Areia natural	Massa específica	2	DNER-ME 194/98
Brita 0	Massa específica	2	DNIT 413/2021 - ME
Brita 0	Absorção	2	DNIT 413/2021 - ME

Fonte: De autoria própria (2023).

3.2.2.1 Ensaio de granulometria

Para a determinação da composição granulométrica das amostras dos agregados graúdos e miúdos, seguiu-se às especificações da norma DNIT 412/2019 - ME. Inicialmente, foram separadas e quarteadas as massas de brita 0, de pó de pedra e areia natural, segundo a norma DNER-PRO 199/96, para as quantidades mínimas por amostra de ensaio.

Finalizada as reduções, pesaram-se as quantidades de 1,0 kg de brita 0, 0,5 kg de pó de pedra e 0,5 Kg de areia natural, as quais juntas representariam a amostra 1, como mostrado Figura 18. Para que o resultado da análise dos materiais, seja representativa, optou-se por produzir mais amostras, com as mesmas quantidades de material, as quais foram denominadas de amostra 2, amostra 3 e amostra 4.

Concomitantemente ao peneiramento manual das amostras, pesou-se o material retido em cada peneira, para posterior construção da curva granulométrica. Com os dados deste ensaio, também foi possível calcular o módulo de finura e dimensão máxima dos agregados.

Figura 18 - Amostra 1: brita 0, pó de pedra e areia natural.



Fonte: De autoria própria (2023).

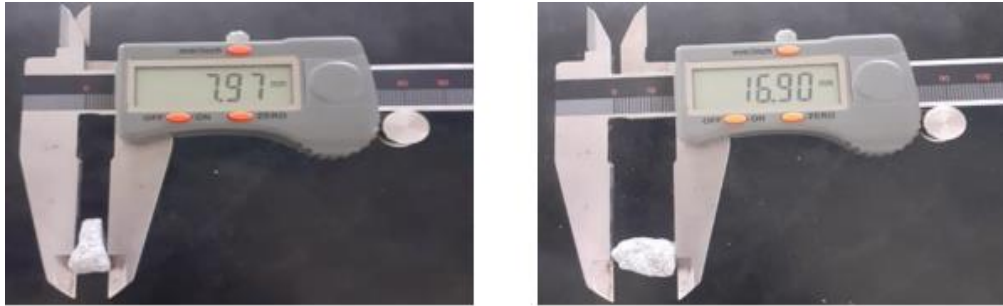
3.2.2.2 Ensaio de índice de forma

O DNIT 425/2020 - ME descreve o método para determinação do índice de forma do agregado graúdo, através do uso do paquímetro. Para a obtenção da amostra necessária para a realização do ensaio, foram separadas e quarteadas certa quantidade de massa de brita 0, segundo especificações da norma DNER-PRO 199/96, para as quantidades mínimas por amostra de ensaio.

De posse do número de agregados das amostras, é feito a medição do comprimento e da espessura de cada um dos agregados, os quais foram efetuados, com auxílio de um paquímetro analógico, como mostrados na Figura 19.

Finalizada as medições, são utilizados dos valores médios de comprimento (c) e espessura (e) dos grãos das várias frações para a realização do cálculo do índice de forma do agregado.

Figura 19 - Medição do comprimento e espessura do agregado com paquímetro.



Fonte: De autoria própria (2023).

3.2.2.3 Ensaio de abrasão “Los Angeles”

O ensaio de determinação da abrasão “Los Angeles” foi realizado para o agregado graúdo seguindo as prescrições da norma DNER-ME 035/98. Para a obtenção da amostra necessária para a realização do ensaio, foram separadas e quarteadas as massas de brita 0, segundo a norma DNER-PRO 199/96. Para realização do ensaio, levou-se em consideração a graduação “C”, a qual estipulava a utilização de 5.000 g de agregados, como também, 8 esferas de aço. Além disso, foi utilizado uma bandeja metálica adequada para a retirada de material do tambor da máquina de abrasão “Los Angeles”, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Máquina de abrasão “Los Angeles”.



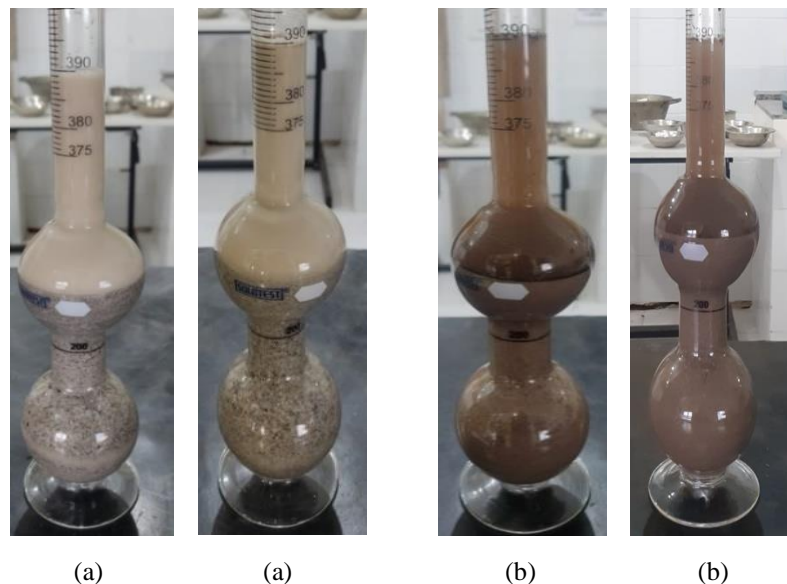
Fonte: De autoria própria (2023).

3.2.2.4 Ensaio de massa específica de agregado miúdo

Para a determinação da massa específica dos agregados miúdos de pó de pedra e areia natural, foram seguidas às especificações da norma DNER-ME 035/98. Inicialmente, foram separadas e quarteadas as massas de pó de pedra e areia natural, segundo a norma DNER-PRO 199/96.

Por determinação de norma, foi realizado o ensaio para duas amostras de mesmo agregado, dos quais resultaram em duas alturas consecutivas no frasco Chapman para as amostras de agregados: pó de pedra e areia natural, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Alturas consecutivas dos agregados: (a) pó de pedra; (b) areia natural.



Fonte: De autoria própria (2023).

3.2.2.5 Ensaio de absorção e massa específica de agregado graúdo

Para a determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo, foram seguidas às especificações da norma DNIT 413/2021 - ME. Inicialmente, foram separados e quarteados os agregados de brita 0, conforme determinado pela norma DNER-PRO 199/96.

A execução do ensaio consiste em realizar a medição do peso da amostra nas condições: seca, saturada superfície seca e submersa, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Determinação dos pesos: (a) seco; (b) saturada superfície seca; (c) submerso.



Fonte: De autoria própria (2023).

3.3 Análises dos resultados

Logo após a execução dos ensaios, os resultados serão analisados segundo duas grandes categorias. Primeiro será verificado se os agregados ensaiados atendem os valores normativos do DNIT e da ABNT, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio, norma e valor de referência.

Ensaio	Norma	Valor de Referência
Índice de Forma	ABNT NBR 7211/2022	IF < 3
Abrasão "Los Angeles"	DNIT 031/2006 – ES	Desgaste < 50%
Análise Granulométrica	DNIT 031/2006 – ES	“faixa C”

Fonte: De autoria própria (2023).

Na segunda verificação, será analisado a variação dos resultados dos ensaios para materiais com mais de uma amostra. Essa análise levará em consideração os critérios de precisão estipuladas por cada norma que rege o procedimento de ensaio para cada um dos três

materiais e/ou pelo parâmetro estatístico denominado Coeficiente de Variação (CV), o qual é calculado pela divisão entre o desvio padrão e a média dos valores (GOMES, 1985). Na Tabela 3 constam informações do Coeficientes de Variação, o quais são classificados em baixo, médio, alto, e muito alto.

Tabela 3 - Classificação dos coeficientes de variação.

Coeficientes de Variação	
Baixos	inferior a 10 %
Médios	entre 10 e 20 %
Altos	entre 20 e 30 %
Muito Altos	acima de 30 %

Fonte: De autoria própria (2023).

3.4 Uso do método das tentativas para definir a proporção ideal dos agregados para o atendimento da Faixa “C” do DNIT

Será utilizado o método das tentativas para definir a proporção ideal das misturas dos três agregados: brita 0, pó de pedra e areia natural para compor uma mistura de agregados que atenda a “faixa C” da norma DNIT 031/2006 – ES. Sendo demonstrado o cálculo da proporção ideal em 3 condições: brita 0 + pó de pedra + areia natural, brita 0 + pó de pedra e brita 0 + areia natural.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados todos os parâmetros obtidos, por meio da realização de ensaios de caracterização dos agregados pétreos: brita 0, pó de pedra e areia natural. Os tópicos a seguir dividem os resultados de acordo com o critério de realização de cada ensaio, desse modo pode ser analisado a variação dos resultados para agregados com mais de uma amostra, através do Coeficiente de Variação (CV) e/ou pelo critério de precisão estipulados por cada norma. Além disso, será comparado e classificado os valores obtidos de acordo com os limites de aplicações especificados pela norma da ABNT NBR 7211/2022 e do DNIT 031/2006 – ES. Por fim, serão apresentadas proporções ideais das misturas dos três agregados em 3 condições: brita 0 + pó de pedra + areia natural; brita 0 + pó de pedra e brita 0 + areia natural para o atendimento da “faixa C” do DNIT, por meio do uso do método das tentativas, assim como a massa específica da mistura de agregados.

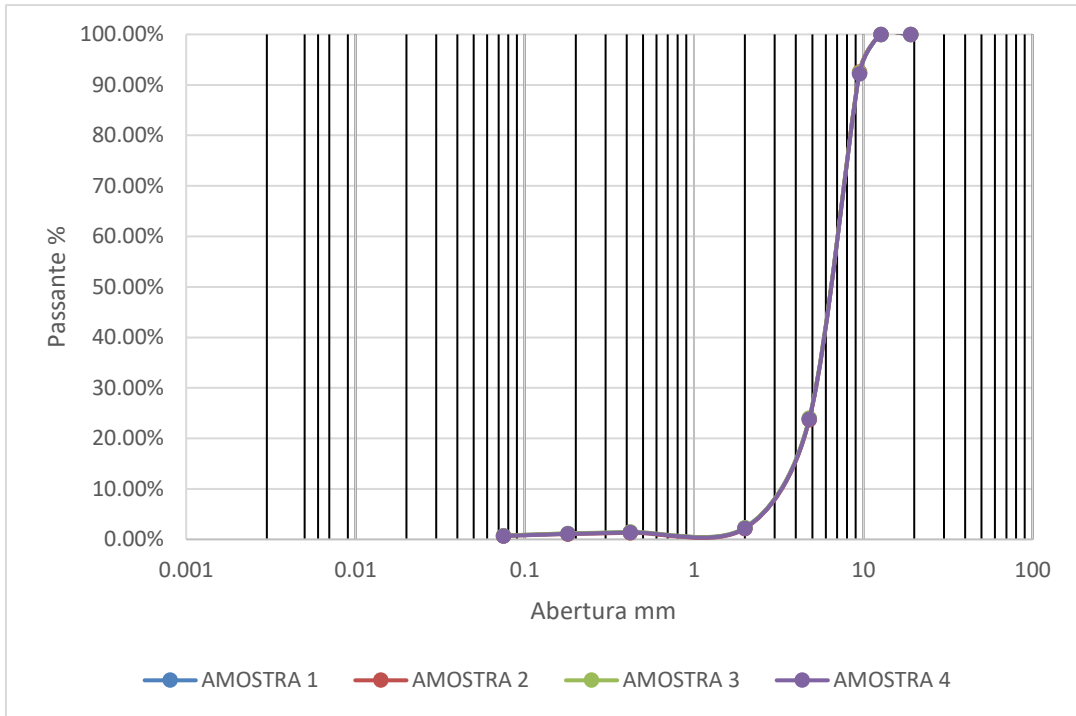
4.1 Análise Granulométrica

As amostras dos agregados foram submetidas ao ensaio de granulométrica por peneiramento, conforme especificações da norma DNIT 412/2019 - ME, para identificar como que as partículas dos agregados que compõem as amostras estão distribuídas.

4.1.1 Verificação das especificações

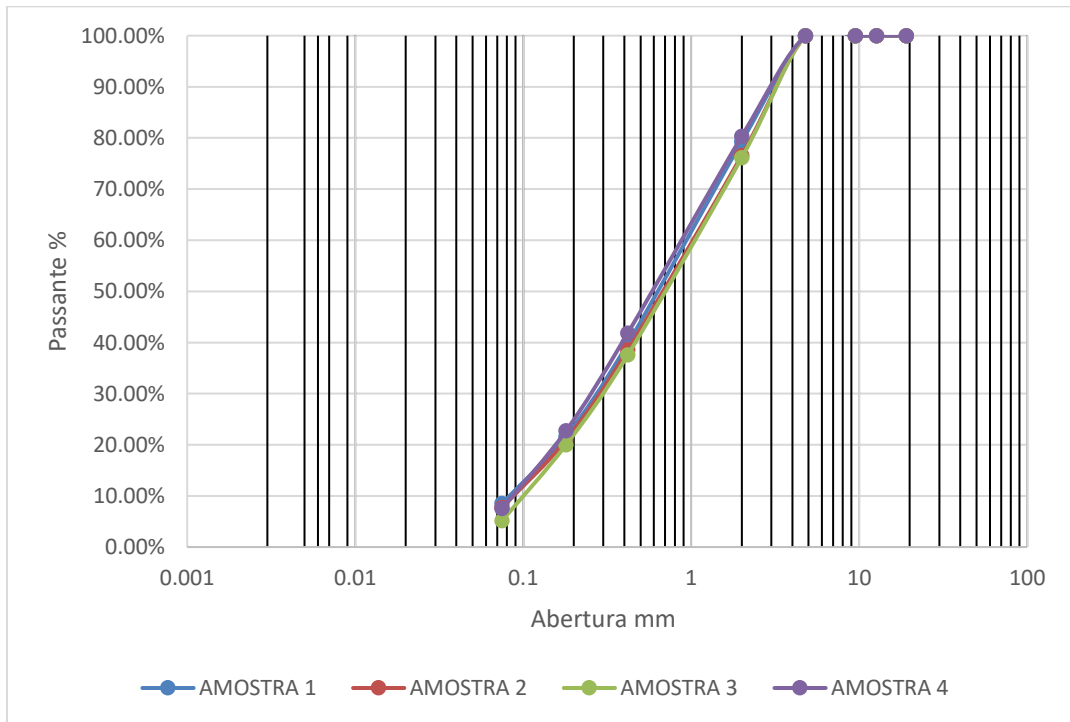
Com as porcentagens que passam em cada peneira e os seus respectivos diâmetros foi criado a Curva Granulométrica dos agregados, conforme apresentado no Gráfico 1 referente à brita 0, Gráfico 2 referente ao pó de pedra, Gráfico 3 referente à areia e Gráfico 4 referente à granulometria média dos agregados.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado de brita 0.



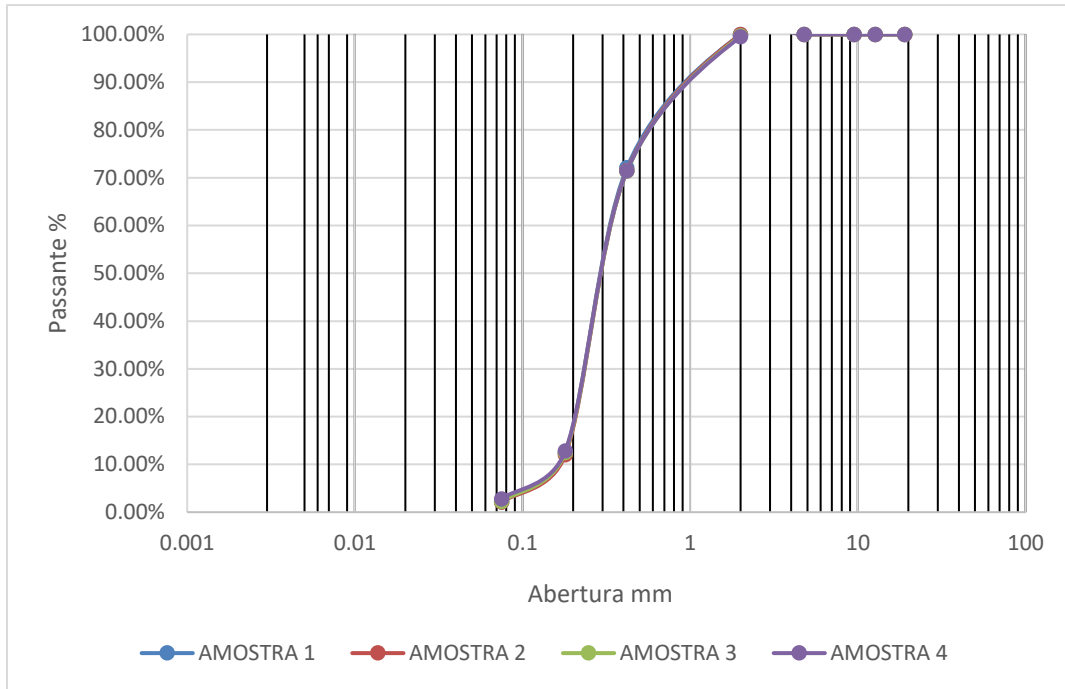
Fonte: De autoria própria (2023).

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado pó de pedra.



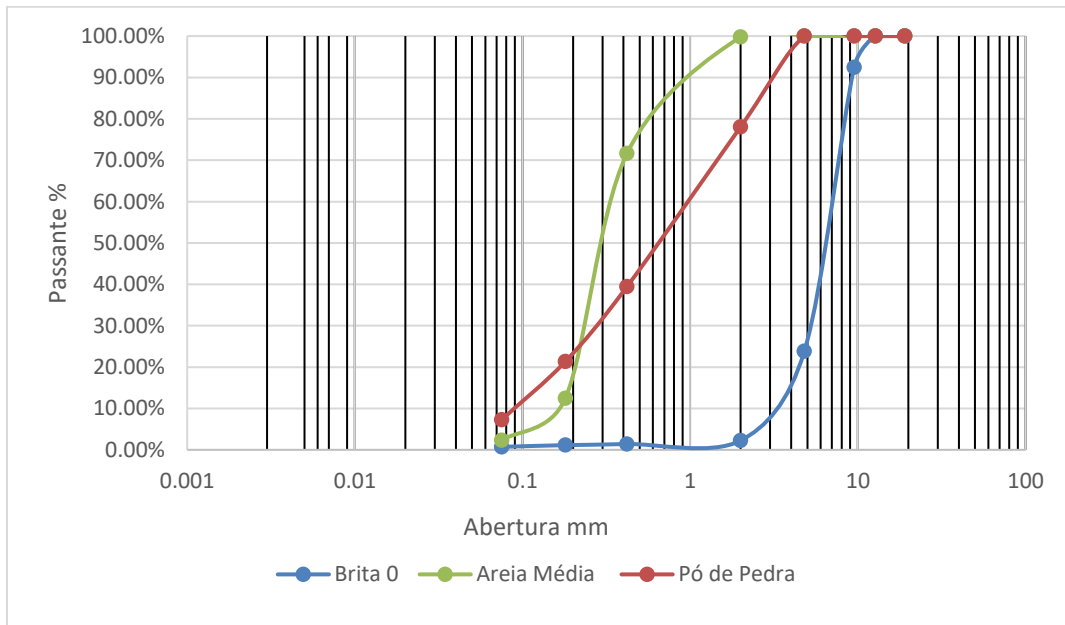
Fonte: De autoria própria (2023).

Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado de areia natural.



Fonte: De autoria própria (2023).

Gráfico 4 - Curva granulométrica média dos agregados.



Fonte: De autoria própria (2023).

Vale ressaltar que os valores dispostos no Gráfico 4 representam uma média entre resultados de 4 ensaios de granulometria para amostras diferentes dos materiais.

A partir das curvas granulométricas obtidas, é possível a observação das quatro amostras

quanto à graduação dos agregados apresentados. No qual é verificado, que a brita 0, possui graduação mais aberta, com insuficiência de material fino, uma vez que suas curvas granulométricas se apresentam muito íngremes. Para mais, também é observado que o pó de pedra e areia natural têm uma graduação mais densa, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

O resultado dos ensaios de granulometria pode ser visto nas Tabelas 4, 5 e 6, o qual relaciona a porcentagem passante nas peneiras de cada agregado com as respectivas peneiras.

Tabela 4 - Composição granulométrica das amostras do agregado brita 0.

Agregado Graúdo Brita 0							
Abertura (mm)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão do ensaio	Desvio Padrão do aceitável
	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante
19,1	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,32 %
12,7	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,32 %
9,5	92,31 %	92,46 %	92,44 %	92,52 %	92,43 %	0,09 %	0,81 %
4,8	23,94 %	23,67 %	24,05 %	23,80 %	23,86 %	0,16 %	1,32 %
2,0	2,30 %	2,14 %	2,33 %	2,21 %	2,25 %	0,08 %	0,53 %
0,42	1,43 %	1,31 %	1,47 %	1,38 %	1,40 %	0,07 %	0,27 %
0,18	1,16 %	1,08 %	1,20 %	1,09 %	1,13 %	0,06 %	0,27 %
0,075	0,76 %	0,69 %	0,75 %	0,68 %	0,72 %	0,04 %	0,27 %

Fonte: De autoria própria (2023).

Fica claro perceber que as quatro amostras do agregado graúdo de brita 0 possuem pouca quantidade de partículas mais finas em suas composições, uma vez que as amostras têm baixo percentual passante a a partir da peneira de nº 4 (4,8 mm).

Tabela 5 - Composição granulométrica das amostras do agregado pó de pedra.

Agregado Miúdo Pó De Pedra							
Abertura (mm)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão do ensaio	Desvio Padrão aceitável
	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante
19,1	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
12,7	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
9,5	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
4,8	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
2,0	76,13 %	76,56 %	79,30 %	80,32 %	78,08%	2,05 %	0,55 %
0,42	37,60 %	38,58 %	39,79 %	41,86 %	39,46%	1,84 %	0,83 %
0,18	20,01 %	20,95 %	21,66 %	22,75 %	21,34%	1,15 %	0,83 %
0,075	5,18 %	7,73 %	8,55 %	7,58 %	7,26%	1,45 %	0,37 %

Fonte: De autoria própria (2023).

As quatro amostras de agregado miúdo de pó de pedra têm uma granulometria mais constante com uma boa quantidade de partículas mais finas distribuídas em sua composição.

Tabela 6 - Composição granulométrica das amostras do agregado areia natural.

Agregado Miúdo Areia Natural							
Abertura (mm)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão do ensaio	Desvio Padrão aceitável
	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante
19,1	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
12,7	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
9,5	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
4,8	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
2,0	100,00 %	100,00 %	99,74 %	99,52 %	99,81 %	0,23 %	0,26 %
0,42	72,12 %	71,55 %	71,39 %	71,47 %	71,63 %	0,33 %	0,55 %
0,18	12,44 %	12,03 %	12,52 %	12,83 %	12,45 %	0,33 %	0,36 %
0,075	2,16 %	2,13 %	2,24 %	2,81 %	2,33 %	0,32 %	0,37 %

Fonte: De autoria própria (2023).

As quatro amostras de agregado miúdo de areia natural têm uma granulometria mais constante com uma boa quantidade de partículas mais finas distribuídas em sua composição.

Fica verificado, então, que a brita 0, pó de pedra e areia natural, isoladamente, não atendem por completo a granulometria da “faixa C” estabelecida pela norma DNIT 031/2006 – ES, uma vez que os três materiais possuem alta e ou baixa porcentagem passante em algumas peneiras. Entretanto, vale ressaltar que, dificilmente um material sozinho atenda à especificação do DNIT. Logo, são necessários misturar três ou quatro materiais diferentes para obter uma proporção boa de agregados em mistura asfáltica.

Também, foram calculados o módulo de finura e dimensão máxima do agregado, mediante o valor médio do percentual retido e percentual retido acumulado da composição granulométrica das amostras 1, 2, 3 e 4 apresentados na Tabela 7, o qual relaciona a porcentagem retida nas peneiras de cada agregado com as respectivas peneiras.

Tabela 7 - Abertura, percentual retido médio e percentual retido acumulado.

Abertura (mm)	Agregados: Graúdos e Miúdos					
	Brita 0		Pó de pedra		Areia Natural	
	Amostras 1,2,3 e 4		Amostras 1,2,3 e 4		Amostras 1,2,3 e 4	
	Média percentual retido	Percentual retido acumulado	Média percentual retido	Percentual retido acumulado	Média percentual retido	Percentual retido acumulado
19,1	0,00 %	0,00%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
12,7	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
9,5	7,62 %	7,62 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
4,8	68,52 %	76,13 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
2,0	21,62 %	97,75 %	21,92 %	21,92 %	0,19 %	0,19 %
0,42	0,85 %	98,60 %	38,62 %	60,54 %	28,18 %	28,37 %
0,18	0,26 %	98,87 %	18,12 %	78,66 %	59,18 %	87,55 %
0,075	0,41 %	99,28 %	14,08 %	92,74 %	10,12 %	97,67 %
Fundo	0,72 %	100,00 %	7,26 %	100,00 %	2,33 %	100,00 %

Fonte: De autoria própria (2023).

Os resultados obtidos do módulo de finura e dimensão máxima do agregado de brita 0, pó de pedra e areia natural são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do módulo de finura e dimensão máxima do agregado.

Agregado	Módulo de Finura	Dimensão Máxima Do Agregado
Brita 0	4,71	9,5 mm
Pó de Pedra	2,54	4,8 mm
Areia Natural	2,14	2,0 mm

Fonte: De autoria própria (2023).

4.1.2 Verificação quanto a variabilidade

Segundo os parâmetros de repetibilidade da Tabela A1- Precisão de agregados graúdos e Tabela A2 - Precisão de agregados miúdos (500 g) do anexo A da norma DNIT ME- 412/2019, tanto os valores de Desvio Padrão dos agregados de brita 0 como os da areia natural atenderam aos valores normativos, entretanto os ensaios de granulometria do pó de pedra não apresentaram repetibilidade adequada.

Diante disso, os desvios-padrão foram recalculados considerando a exclusão das amostras 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Em nenhum dos casos, obteve-se a repetibilidade exigida na norma, porém o desvio-padrão considerando somente as amostras 2, 3 e 4 apresentou os melhores resultados, os quais estão reproduzidos na tabela 9.

Tabela 9 - Composição granulométrica das amostras 2, 3 e 4 do agregado pó de pedra.

Abertura (mm)	Agregado Miúdo Pó De Pedra					
	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão do ensaio	Desvio Padrão aceitável
	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante	Percentual passante
19,1	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
12,7	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
9,5	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
4,8	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,26 %
2,0	76,56 %	79,30 %	80,32 %	78,73 %	1,94 %	0,55 %
0,42	38,58 %	39,79 %	41,86 %	40,08 %	1,66 %	0,83 %
0,18	20,95 %	21,66 %	22,75 %	21,79 %	0,90 %	0,83 %
0,075	7,73 %	8,55 %	7,58 %	7,95 %	0,52 %	0,37 %

Fonte: De autoria própria (2023).

Estes resultados, mesmo não atingindo o nível de repetibilidade exigido pela norma nas peneiras A e B, não comprometem a utilização dos valores médios do ensaio de granulometria.

Porém, registra-se o alerta para um grande cuidado no manuseio e quarteamento do pó de pedra, visando obter amostras mais uniformes em termos de granulometria.

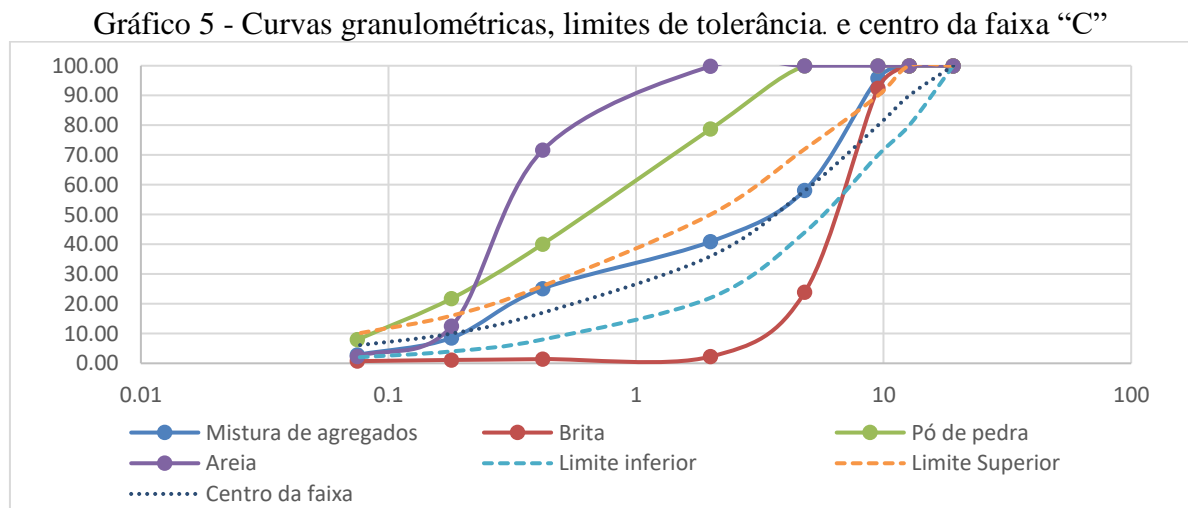
4.1.3 Método das tentativas

O Método das tentativas é um método numérico muito utilizado para descobrir qual a proporção adequada de cada material individual quando são misturados dois ou mais materiais para atender a especificação do DNIT para concreto asfáltico (SENÇO 2007, p. 281).

De posse da granulometria dos agregados: brita 0, pó de pedra e areia natural mostradas na tabela 4, tabela 5 e Tabela 6 do item: 4.2.1, foi feito o método das tentativas de modo a definir a proporção em que cada componente deve entrar na mistura especificada pela “faixa C” (camada destinada ao rolamento) do DNIT, os quais constam no Apêndice A do trabalho.

Vale ressaltar que durante o proporciomantro dos agregados minerais em todas as condições foi percebido a saída da proporção das misturas de agregados do intervalo do limite superior e limite inferior da “faixa C”, sendo necessário entrar no limite de tolerância.

Após várias tentativas, verificou-se que a melhor proporção utilizando os três materiais é de: brita 0 (60 %), pó de pedra (25 %) e areia (15 %), conforme mostrado no Gráfico 5. É possível perceber que a mistura dos três agregados na proporção indicada fica próxima do centro da faixa em várias peneiras e próxima do limite superior das faixas nas peneiras 9,75 e 0,42.



Fonte: De autoria própria (2023).

O resultado do método das tentativas para a melhor proporção utilizando os três materiais (brita 0 + pó de pedra + areia natural) pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0, pó de pedra e areia natural.

Mistura – Brita 0 + Pó de Pedra + Areia Natural							
Peneira (mm)	Proporção	0,60	0,25	0,15	= 1	Tolerância	
	Faixa C	Brita 0	Pó de Pedra	Areia Natural	Mistura de Agregados		
	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante		
19,1	100	100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
12,7	80 - 100	100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
9,5	70 - 90	92,43	100	100	95,46	± 7 %	No limite de tolerância
4,8	44 - 72	23,86	100	100	54,32	± 5 %	Dentro da faixa
2,0	22 - 50	2,25	78,73	99,81	36,00	± 5 %	Dentro da faixa
0,42	8 - 26	1,4	40,08	71,63	21,60	± 5 %	Dentro da faixa
0,18	4 - 16	1,13	21,79	12,45	7,99	± 3 %	Dentro da faixa
0,075	2 - 10	0,72	7,95	2,3	2,76	± 2 %	Dentro da faixa

Fonte: De autoria própria (2023).

Em função da granulometria mais fina dos materiais na peneira 9,5 mm (conforme Tabela 10) é impossível se encaixar a mistura (brita 0 + pó de pedra + areia natural) dentro dos limites aceitáveis da “faixa C” de 70 % a 90 %, sendo necessário sempre entrar na faixa de tolerância de valor de ± 7 %.

Também é possível atingir a mistura de agregados para a “faixa C” misturando as proporções dos agregados: brita 0 (68 %) e pó de pedra (32 %) ou a proporção dos agregados:

brita 0 (65 %) e areia natural (35 %), conforme mostrado na Tabela 11 e Tabela 12. Sendo impossível de se obter a mistura somente com os agregados de pó de pedra e areia natural.

Tabela 11 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0 e pó de pedra.

Mistura – Brita 0 + Pó de Pedra						
Peneira (mm)	Proporção	0,68	0,32	= 1	Tolerância	
	Faixa C	Brita 0	Pó de Pedra	Mistura de Agregados		
	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante		
19,1	100	100	100	100	± 7 %	Dentro da faixa
12,7	80 - 100	100	100	100	± 7 %	Dentro da faixa
9,5	70 - 90	92,43	100	94,85	± 7 %	No limite de tolerância
4,8	44 - 72	23,86	100	48,22	± 5 %	Dentro da faixa
2,0	22 - 50	2,25	78,73	26,72	± 5 %	Dentro da faixa
0,42	8 - 26	1,4	40,08	13,78	± 5 %	Dentro da faixa
0,18	4 - 16	1,13	21,79	7,74	± 3 %	Dentro da faixa
0,075	2 - 10	0,72	7,95	2,81	± 2 %	Dentro da faixa

Fonte: De autoria própria (2023).

Da mesma forma, foi impossível se encaixar a mistura (brita 0 + pó de pedra) dentro dos limites aceitáveis da “faixa C” de 70 % a 90 %, em função da granulometria mais fina dos materiais na peneira 9,5 mm (conforme Tabela 11), sendo necessário sempre entrar na faixa de tolerância de valor de ± 7 %.

Tabela 12 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0 e areia natural.

Mistura – Brita 0 + Areia natural						
Peneira (mm)	Proporção	0,65	0,35	= 1	Tolerância	
	Faixa C	Brita 0	Areia Natural	Mistura de Agregados		
	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante		
19,1	100	100	100	100	± 7 %	Dentro da faixa
12,7	80 - 100	100	100	100	± 7 %	Dentro da faixa
9,5	70 - 90	92,43	100	95,08	± 7 %	No limite de tolerância
4,8	44 - 72	23,86	100	50,51	± 5 %	Dentro da faixa
2,0	22 - 50	2,25	99,81	36,40	± 5 %	Dentro da faixa
0,42	8 - 26	1,4	71,63	25,98	± 5 %	Dentro da faixa
0,18	4 - 16	1,13	12,45	5,09	± 3 %	Dentro da faixa
0,075	2 - 10	0,72	2,3	1,27	± 2 %	No limite de tolerância

Fonte: De autoria própria (2023).

Por fim, para a mistura (brita 0 + areia natural) mostrada na Tabela 12, observou-se que tanto a granulometria mais fina dos materiais na peneira de 9,5 mm da faixa de 70 % a 90 %, como também, na peneira de 0,075 mm da faixa de 2 % a 10 % ficaram fora dos limites aceitáveis da “faixa C”, sendo necessário entrar na faixa de tolerância de $\pm 7 \%$ e $\pm 2 \%$ respectivamente. Embora atenda parcialmente à especificação do DNIT, não deve ser utilizada. Logo, deve-se priorizar as demais misturas para evitar problemas construtivos.

4.2 Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão “Los Angeles” foi realizado apenas no agregado graúdo de brita 0 enquadrado na graduação “C”, conforme as prescrições da norma DNER-ME 035/98. Para a determinação do resultado da abrasão, foi utilizado a diferença entre a massa inicial de 5.000 g da amostra retidas nas peneiras (6,3 mm e 4,8 mm) e a massa final de 3294,5 g após do desgaste sofrido pelo material no ensaio. Essa diferença, expressa em porcentagem do peso inicial da amostra de agregado, conforme dada na Equação 8.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (8)$$

$$A_n = \frac{5.000 - 3.294,5}{5.000} \times 100$$

$$A_n = 34,11 \%$$

Em que:

A_n = abrasão “Los Angeles”, em porcentagem;

m_n = massa inicial da amostra, em g;

m'_n = massa da amostra após ensaio, em g.

4.2.1 Verificação das especificações

Para que os agregados constituintes em um pavimento asfáltico tenham uma boa capacidade de resistir a quebras, degradação e desintegração. As especificações norma DNIT 031/2006 – ES limitam os valores de abrasão “Los Angeles” a igual ou inferior a 50,00 %. Por conta disso, fica verificado que a brita 0, com resultado de abrasão de 34,11 % obteve resultado satisfatório, uma vez que o valor ficou abaixo do limite estabelecido por norma.

Realizando um comparativo entre os valores obtidos pela pesquisa de Quaiotto et al. (2020), para os agregados de brita 1 e brita 2, com resultados de: 12,11 % (Pedreira Treze

Tilias), 10,81 % (Britagem Gaspar), 8,97 % (Minerocha Catarinense), 7,9 % (Planaterra) e 6,00 % (Pedreira Triângulo) e o valor atual de 34,11 % para o agregado de brita 0 (pedreira Britex), existiu uma grande variação nos resultados. Diante disso, pode-se considerar que há uma variação da propriedade mecânica dos agregados. E isso se deve ao fato de que, os agregados estão localizados em regiões com formações geológicas diferentes. Para mais, os agregados de brita 0 do estudo em questão, tenderam a sofrer maiores desgastes do tráfego do que os agregados pesquisados por Quaiotto et al. (2020), porém como atendem à especificação do DNIT, podem ser utilizados como agregados de concreto asfáltico.

4.2.2 Verificação quanto a variabilidade

Em virtude de se ter realizado o ensaio de abrasão “Los Angeles” somente uma vez, não cabem análises sobre a variabilidade do mesmo.

4.3 Índice de forma

O ensaio de índice de forma foi realizado somente em duas amostras de de brita 0, conforme as prescrições da norma DNIT 425/2020 – ME.

Como não houve partículas retidas na peneira 12,7 mm (conforme Tabela 4 – Composição granulométrica das amostras do agregado brita 0), as 200 partículas necessárias para a execução dos ensaios foram selecionadas entre os materiais que passaram na # 12,7 mm e que ficaram retidos na # 9,5 mm).

Para a obtenção do resultado do índice de forma, foram realizados, primeiramente a medição por meio de um paquímetro as dimensões de comprimento (c) e espessura (e) dos 200 grãos selecionados. Em seguida, foi calculado a média ponderada das dimensões dos comprimentos e das larguras desses grãos. Por fim, com a obtenção dos valores, foi realizado a divisão entre o comprimento médio e a largura média na Equação 9.

$$I = \frac{C_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}} \quad (9)$$

Cálculo para a amostra 1:

$$I = \frac{C_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}}$$

$$I = \frac{17,27}{8,03}$$

$$I = 2,15$$

Cálculo para a amostra 2:

$$I = \frac{C_{\text{médio}}}{e_{\text{médio}}}$$

$$I = \frac{17,16}{7,87}$$

$$I = 2,18$$

Cálculo da média aritmética entre a amostra 1 e amostra 2 na Equação 10:

$$I_{\text{médio}} = \frac{I_{(\text{amostra 1})} + I_{(\text{amostra 2})}}{2} \quad (10)$$

$$I_{\text{médio}} = \frac{2,15 + 2,18}{2}$$

$$I_{\text{médio}} = 2,165$$

Em que:

I= índice de forma do agregado;

$C_{\text{médio}}$ = comprimento médio, expresso em milímetros (mm);

$e_{\text{médio}}$ = espessura média, expresso em milímetros (mm).

4.3.1 Verificação das especificações

Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Índice de forma da brita 0.

Amostra	Fração (mm)	Quantidade de Grãos	c/e	Média (c/e)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
1	9,5	200	2,15	2,17	0,01512	0,70 %
2	9,5	200	2,18			

Fonte: De autoria própria (2023).

O limite estabelecido por norma para o índice de forma (I) deve ser inferior a 3, de acordo com a ABNT NBR 7211/2022, o que significa que as partículas dos agregados graúdos aplicados em mistura asfáltica devem possuir, em sua maioria, a forma cúbica. Portanto, foi atestado que o agregado de brita 0 com valor médio de $I = 2,165$ está dentro das especificações normativas. Logo, o material pode ser utilizado como agregado de concreto asfáltico.

4.3.2 Verificação quanto a variabilidade

Como a norma DNIT 425/2020 ME não traz recomendações específicas sobre a repetibilidade deste ensaio, a análise da variabilidade será embasada no coeficiente de variação. O resultado do índice de forma (I) teve variabilidade muito pequena para o agregado graúdo de brita 0, uma vez que o Coeficiente de Variabilidade (CV) da amostra 1 e amostra 2, com valor de 0,70 % ficou classificado como: Baixo (inferior a 10 %), conforme mostrado na Tabela 3 do item: 3.3. Logo, o ensaio teve uma boa repetibilidade com resultado confiável.

4.4 Massa específica e absorção de agregado graúdo

O ensaio de massa específica e absorção da amostra 1 e amostra 2 da brita 0, foram realizados conforme a norma DNIT 413/2021 - ME.

Para o cálculo de massa específica do agregado na condição seca (A), saturada superfície seca (B) e saturada superfície seca - submersa (C), foram utilizados os valores descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Massa seca (A), saturada superfície seca (B) e submersa (C).

Massa (g)	1° Determinação	2° Determinação
Massa Seca (A)	1996,00	1996,6
Massa Saturada Superfície Seca (B)	2011,30	2013,3
Massa Saturada Superfície Seca - Submersa (C)	1246,12	1248,99

Fonte: De autoria própria (2023).

Para o cálculo da massa específica real do agregado, foi utilizado a Equação 11:

$$ME_{sa} = 0,9971 \frac{A}{A - C} \quad (11)$$

Cálculo para a amostra 1:

$$ME_{sa} = 0,9971 \frac{A}{A - C}$$

$$ME_{sa} = 0,9971 \times \frac{1996,00}{1996,00 - 1246,12}$$

$$ME_{sa} = 2,654 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo para a amostra 2:

$$ME_{sa} = 0,9971 \frac{A}{A - C}$$

$$ME_{sa} = 0,9971 \times \frac{1996,60}{1996,60 - 1248,99}$$

$$ME_{sa} = 2,663 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da média aritmética entre a amostra 1 e amostra 2 na Equação 12:

$$ME_{sa\text{médio}} = \frac{ME_{sa(\text{amostra 1})} + ME_{sa(\text{amostra 2})}}{2} \quad (12)$$

$$ME_{sa\text{médio}} = \frac{2,654 + 2,663}{2}$$

$$ME_{sa\text{médio}} = 2,658 \text{ g/cm}^3$$

Em que:

ME_{sa} = massa específica real do agregado, em g/cm^3 ;

A = massa da amostra seca em estufa, em g;

C = massa saturada superfície seca (submersa), em g.

Para o cálculo da massa específica aparente do agregado, foi utilizado a Equação 13:

$$ME_{sub} = 0,9971 \frac{A}{B - C} \quad (13)$$

Cálculo para a amostra 1:

$$ME_{sub} = 0,9971 \frac{A}{B - C}$$

$$ME_{\text{sub}} = 0,9971 \times \frac{1996,00}{2011,30 - 1246,12}$$

$$ME_{\text{sub}} = 2,601 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo para a amostra 2:

$$ME_{\text{sub}} = 0,9971 \frac{A}{B - C}$$

$$ME_{\text{sub}} = 0,9971 \times \frac{1996,60}{2013,30 - 1248,99}$$

$$ME_{\text{sub}} = 2,605 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da média aritmética entre a amostra 1 e amostra 2 na Equação 14:

$$ME_{\text{submédio}} = \frac{ME_{\text{sub}}(\text{amostra 1}) + ME_{\text{sub}}(\text{amostra 2})}{2} \quad (14)$$

$$ME_{\text{submédio}} = \frac{2,601 + 2,605}{2}$$

$$ME_{\text{submédio}} = 2,603 \text{ g/cm}^3$$

Em que:

ME_{sub} = massa específica aparente do agregado saturado com superfície seca (g/cm^3);

A = massa da amostra de ensaio, seca em estufa, no ar (g);

B = massa da amostra de ensaio, na condição saturada com superfície seca, no ar (g);

C = massa imersa da amostra de ensaio saturada, em água (g).

Para o cálculo da porcentagem de absorção do agregado, foi utilizado a Equação 15:

$$\text{Absorção}(\%) = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (15)$$

Cálculo para a amostra 1:

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{2011,30 - 1996,00}{1996,00} \times 100$$

$$\text{Absorção (\%)} = 0,8 \%$$

Cálculo para a amostra 2:

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{2013,30 - 1996,60}{1996,60} \times 100$$

$$\text{Absorção (\%)} = 0,8 \%$$

Cálculo da média aritmética entre a amostra 1 e amostra 2 na Equação 16:

$$\text{Absorção (\%)}_{\text{médio}} = \frac{\text{Absorção (\%)}_{(\text{amostra 1})} + \text{Absorção (\%)}_{(\text{amostra 2})}}{2} \quad (16)$$

$$\text{Absorção (\%)}_{\text{médio}} = \frac{0,8 + 0,8}{2}$$

$$\text{Absorção (\%)}_{\text{médio}} = 0,8 \%$$

Em que:

A = massa da amostra de ensaio, seca em estufa, no ar (g);

B = massa da amostra de ensaio, na condição saturada com superfície seca, no ar (g);

C = massa imersa da amostra de ensaio saturada, em água (g).

4.4.1 Verificação das especificações

Os valores de massa específica real, massa específica aparente das amostras 1 e amostra 2 de brita 0 determinados nesse estudo são apresentados na Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 - Resultados da massa específica real do agregado brita 0.

Amostra	Material	Massa específica real (g/cm ³)	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão dos ensaios	Desvio Padrão aceitável
1	Brita 0	2,654	2,658	0,0044	0,009
2	Brita 0	2,663			

Fonte: De autoria própria (2023).

Tabela 16 - Resultados da massa específica aparente do agregado brita 0.

Amostra	Material	Massa específica aparente (g/cm ³)	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão dos ensaios	Desvio Padrão aceitável
1	Brita 0	2,601	2,603	0,0019	0,007
2	Brita 0	2,605			

Fonte: De autoria própria (2023).

A norma DNIT 031/2006 – ES não estipula valores máximos e ou mínimos aceitáveis para os resultados de massa específica e absorção de agregado graúdo. Entretanto, é importante saber que quanto menor a densidade do agregado, maiores são os vazios nos grãos e, conseqüentemente, maior será a absorção de água e ou ligante asfáltico (GOUVEIA 2006, p. 63).

Realizando um comparativo entre os valores obtidos pela pesquisa de Costa (2017), para o agregados de brita 0, com resultados de 2,769 kg/cm³ (massa específica real), 2,748 kg/cm³ (massa específica aparente) e 0,7 % (absorção) e os valores atuais do estudo, com resultados de 2,658 g/cm³ (massa específica real), 2,603 g/cm³ (massa específica aparente) e 0,8 % (porcentagem de absorção), existe uma pequena variação nos resultados. Isso se deve ao fato de que, os agregados apresentados estão localizados em regiões com formações geológicas diferentes. Ainda mais, pode-se verificar que a brita 0 utilizada no estudo em questão, apresenta menor massa específica, tanto seca quanto saturada superfície seca e, conseqüentemente, maiores vazios permeáveis nos agregados, como também maior absorção. Logo, a mistura asfáltica resultante tenderá a precisar de maiores teores de ligante asfáltico em sua composição.

4.4.2 Verificação quanto a variabilidade

Por serem agregados naturais de mesma composição mineralógica, a variabilidade dos resultados de duas determinações consecutivas entre a amostra 1 e amostra 2 de brita 0 não variaram muito entre si. E isso é verificado a partir da Tabela 15 e Tabela 16, onde os valores do Desvio Padrão dos ensaios de massa específica real, com valor de 0,0044 e massa específica aparente, com valor de 0,0018 não diferiu em mais de 0,009 para a massa específica real e 0,007 para a massa específica aparente, conforme especificações da norma DNIT 413/2021 – ME. Ainda mais, considerando o nível de precisão exigido pela norma os resultados da porcentagem de absorção foram iguais a 0,8 %. Logo, o ensaio teve uma boa repetibilidade com resultado confiável.

4.5 Massa específica de agregado miúdo

Foi realizado o ensaio para determinação da massa específica de duas amostras do mesmo agregado miúdo de pó de pedra e agregado miúdo de areia natural, segundo as especificações da norma DNER-ME 194/98.

Para o cálculo da massa específica, foi utilizado a diferença entre o valor da altura do volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo no frasco de Chapman e a altura de referência da mesma, de 200 cm³ na Equação 17.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (17)$$

Cálculo para o agregado miúdo pó de pedra da amostra 1 na altura de 389 cm:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

$$\gamma = \frac{500}{389 - 200}$$

$$\gamma = 2,645 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo para o agregado miúdo pó de pedra da amostra 2 na altura de 390 cm:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

$$\gamma = \frac{500}{390 - 200}$$

$$\gamma = 2,631 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da média aritmética entre a amostra 1 e amostra 2 na Equação 18:

$$\gamma_{\text{médio}} = \frac{\gamma_{(\text{amostra 1})} + \gamma_{(\text{amostra 2})}}{2} \quad (18)$$

$$\gamma_{\text{médio}} = \frac{2,645 + 2,631}{2}$$

$$\gamma_{\text{médio}} = 2,638 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo para o agregado miúdo areia natural da amostra 1 na altura de 390 cm:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

$$\gamma = \frac{500}{390 - 200}$$

$$\gamma = 2,631 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo para o agregado miúdo areia natural da amostra 2 na altura de 391 cm:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

$$\gamma = \frac{500}{391 - 200}$$

$$\gamma = 2,618 \text{ g/cm}^3$$

Cálculo da média aritmética entre a amostra 1 e amostra 2 na Equação 19:

$$\gamma_{\text{médio}} = \frac{\gamma_{(\text{amostra 1})} + \gamma_{(\text{amostra 2})}}{2} \quad (19)$$

$$\gamma_{\text{médio}} = \frac{2,631 + 2,618}{2}$$

$$\gamma_{\text{médio}} = 2,6245 \text{ g/cm}^3$$

Em que:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm^3 ;

L = leitura no frasco, em cm.

4.5.1 Verificação das especificações

Os valores de massa específica dos agregados miúdos de pó de pedra e areia natural determinados nesse estudo são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados de massa específica dos agregados miúdos.

Material	Ensaio	Amostra 1 (g/cm³)	Amostra 2 (g/cm³)	Média (g/cm³)
Pó de pedra	Massa específica	2,645	2,631	2,638
Areia natural	Massa específica	2,631	2,618	2,625

Fonte: De autoria própria (2023).

A norma DNIT 031/2006 não estipula valores máximos e ou mínimos aceitáveis para os resultados de massa específica de agregado miúdo.

Fazendo um comparativo entre os valores obtidos pela pesquisa de Meurer (2015), para o agregado miúdo de pó de pedra, provenientes da Região Metropolitana de Joinville, com resultados de 2,812 kg/cm³ (Jazida Vogelsanger), 2,838 kg/cm³ (Rio Zoada), 2,719 kg/cm³ (Rudnick), 2,774 kg/cm³ (Sol Nascente) e os valores atuais do estudo, com resultados de 2,638 g/cm³ para o agregado pó de pedra (pedreira Tabal mineração) e 2,6245 g/cm³ para o agregado areia natural (jazidas Castanhal), existe uma pequena variação nos resultados. E isso pode ser relacionado a uma granulometria bem distribuída entre as frações mais finas dos materiais, visto que os agregados apresentados estão localizados em regiões com formações geológicas diferentes.

4.5.2 Verificação quanto a variabilidade

O resultado das duas determinações consecutivas das amostras 1 e 2 de massa específica dos agregados miúdos de pó de pedra e areia natural determinados nesse estudo são

apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Material, ensaio, determinação e variabilidade aceitável.

Material	Ensaio	1° Determinação Amostra 1 (g/cm³)	2° Determinação Amostra 2 (g/cm³)	Diferença (g/cm³)	Variabilidade Aceitável (g/cm³)
Pó de pedra	Massa específica	2,645	2,631	0,014	0,05
Areia natural	Massa específica	2,631	2,618	0,013	0,05

Fonte: De autoria própria (2023).

Pode-se verificar na Tabela 18 que a diferença entre as duas determinações consecutivas de ambos os agregados não diferiu entre si de mais de 0,05 g/cm³, conforme especificações da norma DNER-ME 194/98. Logo, o ensaio teve uma boa repetibilidade com resultado confiável.

4.6 Massa específica da mistura de agregados

De posse dos valores das massas específicas médias referentes a Tabela 15 e Tabela 17 e das proporções dos agregados utilizando os três materiais da Tabela 10, realizou-se o cálculo da massa específica ponderada, dos quais resultaram na massa específica da mistura de agregados, sendo eles apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Material, massa específica, proporção e massa específica ponderada.

Material	Massa específica	Proporção	Massa específica ponderada
Brita 0	2,658	60 %	1,5948
Pó de pedra	2,638	25 %	0,6595
Areia natural	2,625	15 %	0,3938
Massa específica da mistura de agregados			2,648

Fonte: De autoria própria (2023).

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentam-se a seguir algumas considerações finais sobre os resultados do trabalho:

Os materiais estudados atendem plenamente aos valores de índice de forma e abrasão “Los Angeles”. Quanto à granulometria, a mistura dos 3 materiais atende à especificação da “faixa C” do DNIT, somente se for observada a faixa de tolerância entre as peneiras 9,5 e 12,7 mm. As massas específicas dos três agregados estão dentro da normalidade.

Os níveis de repetibilidade dos ensaios foram satisfatórios, exceto no ensaio de granulometria do pó de pedra. Este ensaio foi um dos primeiros a ser realizado, indicando que a prática laboratorial é relevante para a qualidade dos ensaios.

Os resultados de caracterização dos presentes agregados constataram que os mesmos são aptos para uso como agregados em concretos asfálticos, “faixa C” do DNIT, embora seja de se esperar que a mistura vá requerer um teor de ligante asfáltico mais elevado em função da granulometria fina, especialmente da brita 0.

Por fim, ressalta-se que é muito importante a caracterização dos materiais de pavimentação e, também da prática para realizar os ensaios. Tais aspectos foram contemplados nesse trabalho que ajudou a reativar o laboratório de Misturas Asfálticas da UFPA, após o período sem atividades durante a pandemia de COVID-19.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente estudo e as recomendações para a continuidade dos trabalhos nessa área de estudo.

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho teve seu desenvolvimento baseado na ideia de analisar as características e propriedades adequadas que os agregados: brita 0, pó de pedra e areia natural que compõem as misturas asfálticas da obra BRT Metropolitano de Belém devem ter para o uso em pavimentação, como também apresentar proporções ideais das misturas dos três materiais para atendimento da “faixa C” do DNIT. A razão para isso é que como a demanda por esses materiais está crescendo a cada dia e os grandes centros consumo localizam-se a cada vez mais distantes das reservas minerais regulamentadas. Logo, mostram-se imprescindíveis estudos de viabilidade econômica e tecnológica de agregados regionais, principalmente como forma de estimular novas pesquisas científicas para aumentar o volume e a qualidade dos agregados logo, por conseguinte reduzir gastos com transporte e, conseqüentemente diminuir os custos finais de obras de pavimentação.

Levando-se em conta a importância dos agregados no desempenho da camada de rolamento de um pavimento flexível, buscou-se, num primeiro momento, realizar estudos e pesquisas por meio de referencial teórico relacionados sobre a importância de se conhecer e selecionar adequadamente as propriedades dos agregados.

O segundo passo tratou a respeito da definição de quais ensaios laboratoriais de caracterização seriam necessários para avaliar a aplicabilidade de cada um dos três agregados em mistura asfáltica. Com isso, apresentou-se os ensaios de análise granulométrica, índice de forma, abrasão “Los Angeles” e massa específica de agregados graúdo e miúdo.

O terceiro passo tratou da análise da variação dos resultados de um mesmo ensaio entre duas amostras diferentes, no qual buscou-se comparar os resultados obtidos com os valores de referência fornecidos pelas normas do DNIT e da ABNT, com intuito de avaliar a aplicabilidade dos materiais em mistura asfáltica e, por fim utilizou-se do método das tentativas para definir o

melhor percentual de mistura desses agregados para compor a “faixa C” do DNIT, sendo os resultados finais apresentados:

- Ensaio de abrasão “Los Angeles”: Brita 0 = 34,11 % < 50 %, está abaixo do limite estabelecido pela norma, podendo então, ser aplicado na concepção de uma mistura asfáltica.
- Ensaio de índice de forma: Brita 0 = valor médio de $I = 2,165 < 3$, atende as especificações da norma, podendo assim, ser aplicado em mistura asfáltica.
- Ensaio de massa específica: Brita 0 = 2,658 g/cm³ (massa específica real) e 2,603 g/cm³ (massa específica aparente); Areia natural = 2,625 g/cm³; Pó de pedra = 2,638 g/cm³, estão dentro da normalidade, logo podem ser aplicados em mistura asfáltica.
- Análise granulométrica da Brita 0: Material com graduação aberta e distribuição granulométrica contínua, possuindo um maior número de vazios, necessitando de outros materiais para atingir o esqueleto mineral da mistura asfáltica.
- Análise granulométrica da Areia natural: Material com graduação densa, e distribuição granulométrica contínua, sua curva granulométrica tende a se aproximar à curva de máximo peso específico, sendo assim a distribuição fornece quantidade suficiente de finos para preencher os espaços deixados pelas partículas maiores.
- Análise granulométrica do Pó de pedra: Graduação densa similar à areia, diante disso, pode-se concluir que os agregados tendem a proporcionar um esqueleto mineral com menos vazios em mistura asfáltica.
- Método das tentativas: Para as diferentes tentativas de proporção das misturas dos materiais, as que mais se aproximaram dos valores especificados pela “faixa C” do DNIT utilizando os três agregados foram: brita 0 (60 %) + pó de pedra (25 %) + areia natural (15 %); brita 0 (68 %) + pó de pedra (32 %).

Diante de todos os resultados obtidos, conclui-se que os materiais encontrados na região do Estado do Pará, podem ser utilizados para compor a camada de rolamento do pavimento

flexível da obra Bus Rapid Transit (BRT) da Região Metropolitana de Belém sem perdas técnicas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função da indisponibilidade de algumas informações, orçamento e tempo para a conclusão dessa dissertação, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Fazer os demais ensaios de agregados que não foram feitos na pesquisa: equivalente de areia, sanidade, adesividade e teor de material pulverulento;
- Repetir mais vezes os mesmos ensaios de modo a analisar melhor a repetibilidade dos mesmos;
- Fazer misturas asfálticas com esse agregado e analisar os resultados;
- Comparar os resultados dos materiais atuais com o agregado graúdo natural (seixo) mediante análises estatísticas tais como T Student ou ANOVA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 10 p. 2022.

BERNUCCI, Liedi Bariani. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2ª edição 750 p. il. color. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. Pesquisa CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE de rodovias 2022: relatório gerencial. Brasília: CNT, SEST SENAT, 229 p. il. color. 2022.

COSTA, Erikson Carvalho. Estudo comparativo entre o método Bailey e o método convencional para seleção de agregados para misturas asfálticas densas. 2017. 143 p. Trabalho de conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Maranhão, 2017.

CUNHA, Marcos Bottene. Avaliação do Método de Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas. 2004. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 078/94: Agregados – Adesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 3 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 089/94: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 6 p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNER-ME 035/98: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 6 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 194/98: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 4 p. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 120/97: Coleta de amostras de agregados. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 5 p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 054/97: Equivalente de areia. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 10 p. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 413/2021-ME: Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 12 p. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 412/2019-ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 12 p. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 425/2020-ME: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 7 p. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006-ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 14 p. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 199/96: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 5 p. 1996.

FERREIRA, Gilson Ezequiel; FONSECA JÚNIOR, Carlos Alberto Felix. Mercado de Agregados no Brasil. In: ADÃO, B.D.L; SALVADOR, L.M.D.A. Manual de Agregados para Construção Civil. 2ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p, cap 2, pg 09-32.

GOMES, Frederico Pimentel. Curso de Estatística Experimental. 13ª edição. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo: Livraria Nobel, 1985.

GOUVEIA, L. T. Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas. 2006. 340 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2006.

LEITE, Leni Mathias Figueiredo, et al. Informação básicas sobre materiais asfálticos: A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), 191 p. il. Color. 2021.

MENDES, Larissa de Oliveira. A utilização do método Bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2011.

MEURER, Priscilla. Caracterização de Materiais Rochosos do Norte de Santa Catarina para fins de Aplicação em Obras de Pavimentação. 2015. 92 p. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, 2015.

QUAIOTTO, Alana.; LUVIZÃO, Gislaíne. Estudo das características físicas de agregados da região Meio-Oeste de Santa Catarina para utilização em pavimentação asfáltica. Conhecimento em Construção, Joaçaba, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 65–82, maio, 2020.

SENÇO, Wlastermiller de. Manual de técnicas de pavimentação. 2ª edição ampl. São Paulo: Pini, 2007.

APÊNDICE A – PROPORÇÕES E MISTURAS DOS MATERIAS

Tabela A1 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0, pó de pedra e areia natural.

Mistura – Brita 0 + Pó de Pedra + Areia Natural							
		Proporção	0,55	0,25	0,20	= 1	
Peneira (mm)	Faixa C	Brita 0	Pó de Pedra	Areia Natural	Mistura de Agregados	Tolerância	
	%	%	%	%	%		
		Passante	Passante	Passante	Passante	Passante	
19,1	100	100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
12,7	80 - 100	100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
9,5	70 - 90	92,43	100	100	95,84	± 7 %	No limite de tolerância
4,8	44 - 72	23,86	100	100	58,12	± 5 %	Dentro da faixa
2,0	22 - 50	2,25	78,73	99,81	40,88	± 5 %	Dentro da faixa
0,42	8 - 26	1,4	40,08	71,63	25,12	± 5 %	Dentro da faixa
0,18	4 - 16	1,13	21,79	12,45	8,56	± 3 %	Dentro da faixa
0,075	2 - 10	0,72	7,95	2,3	2,84	± 2 %	Dentro da faixa

Fonte: De autoria própria (2023).

Tabela A2 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0 e pó de pedra.

Mistura – Brita 0 + Pó de Pedra						
Proporção		0,55	0,45	= 1		
Peneira (mm)	Faixa C	Brita 0	Pó de Pedra	Mistura de Agregados	Tolerância	
	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante		
19,1	100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
12,7	80 - 100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
9,5	70 - 90	92,43	100	95,84	± 7 %	No limite de tolerância
4,8	44 - 72	23,86	100	58,12	± 5 %	Dentro da faixa
2,0	22 - 50	2,25	78,73	36,67	± 5 %	Dentro da faixa
0,42	8 - 26	1,4	40,08	18,81	± 5 %	Dentro da faixa
0,18	4 - 16	1,13	21,79	10,43	± 3 %	Dentro da faixa
0,075	2 - 10	0,72	7,95	3,66	± 2 %	Dentro da faixa

Fonte: De autoria própria (2023).

Tabela A3 - Proporção e mistura dos materiais: brita 0 e areia natural.

Mistura – Brita 0 + Areia Natural						
	Proporção	0,68	0,32	= 1		
Peneira (mm)	Faixa C	Brita 0	Areia Natural	Mistura de Agregados		Tolerância
	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante		
19,1	100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
12,7	80 - 100	100	100	100,00	± 7 %	Dentro da faixa
9,5	70 - 90	92,43	100	94,85	± 7 %	No limite de tolerância
4,8	44 - 72	23,86	100	48,22	± 5 %	Dentro da faixa
2,0	22 - 50	2,25	99,81	33,47	± 5 %	Dentro da faixa
0,42	8 - 26	1,4	71,63	23,87	± 5 %	Dentro da faixa
0,18	4 - 16	1,13	12,45	4,75	± 3 %	Dentro da faixa
0,075	2 - 10	0,72	2,3	1,23	± 2 %	No limite de tolerância

Fonte: De autoria própria (2023).