INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

CÂMPUS – GOIÂNIA

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ELIO DIVINO NUNES DE BARROS FILHO

AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES DE AGREGADOS GRAÚDOS DE PEDREIRAS DE GOIÁS

Goiânia, GO

2026

INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO

NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissãoassinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título dedivulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

[ ] Tese	[ ] Artigo Científico
[ ] Dissertação	[ ] Capítulo de Livro
[ ] Monografia – Especialização	[ ] Livro
[X] TCC - Graduação	[ ] Trabalho Apresentado em Evento
[ ] Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____	

Nome Completo do Autor: Elio Divino Nunes de Barros Filho
Matrícula: 20171011050173
Título do Trabalho: AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES DE AGREGADOS GRAÚDOS DE PEDREIRAS DE GOIÁS.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acessoaberto);
2. ( ) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somenteapós a data_/_____/___(Embargo);
3. ( ) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acessorestrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

( ) O documento está sujeito a registro de patente.
( ) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
( ) Outra justificativa:_____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidosno texto ou conteúdo do documento entregue;
iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documentoentregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 23/01/2026.

Elio Divino Nunes de Barros Filho
_____
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Elio Divino Nunes de Barros Filho

AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES DE AGREGADOS GRAÚDOS DE PEDREIRAS DE GOIÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Giovane Batalione

Goiânia, GO
2026

B277a Barros Filho, Elio Divino Nunes de.
Avaliação do desgaste por abrasão Los Angeles de agregados graúdos de pedreiras de Goiás / Elio Divino Nunes de Barros Filho. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2026.
56 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Giovane Batalione.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Agregados graúdos - abrasão Los Angeles - Goiás (Estado). 2. Pavimentação rodoviária. 3. Materiais de construção. I. Batalione, Giovane (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 625

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Elio Divino Nunes de Barros Filho

Avaliação do desgaste por abrasão Los Angeles de agregados graúdos de pedreiras regionais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto Fed eral de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Membros da banca: Me. Giovane Batalione (orientador), Esp. Wesley Pimenta de Menezes, Dr. João Carlos de Oliveira.

Aprovado em 15 de Março de 2025.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Giovane Batalione**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 25/03/2025 07:58:39.
- **Wesley Pimenta de Menezes**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/03/2025 12:52:48.
- **Joao Carlos de Oliveira**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/03/2025 18:11:15.
- **Matilde Batista Melo**, **COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC0001 - GYN-CCBEC**, em 19/03/2025 11:23:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 629076
Código de Autenticação: fc0e47f886

DEDICATÓRIA

À minha mãe, fonte inesgotável de inspiração e apoio. Sua força moldou este caminho acadêmico.

AGRADECIMENTOS

A materialização deste trabalho ocorreu, principalmente, com a ajuda de várias pessoas. É com gratidão que expresso meus agradecimentos a todos que desempenharam papéis fundamentais nesse trajeto. Especialmente, quero estender minha sincera gratidão:

À minha mãe, que fez parte desta jornada, mesmo que não por completa, mas sempre com constante inspiração e apoio em todos os momentos. Seu suporte foi uma bússola confiável, guiando-me em direção aos objetivos almejados.

Ao meu orientador, Giovane Batalione, pela orientação dedicada, paciência e confiança depositada ao longo desta jornada acadêmica. Suas contribuições foram cruciais para a concretização deste trabalho.

Aos meus amigos, pelos valiosos conselhos, discussões produtivas e compreensão durante esta jornada acadêmica. Estar perto de vocês tornou esse período mais leve.

Cada um desempenhou um papel vital na construção deste trabalho, formando uma equipe excepcional que contribuiu para o sucesso desta pesquisa acadêmica.

Agradeço a todos que, de diversas maneiras, contribuíram para este projeto e para o enriquecimento da minha jornada acadêmica a e para minha formação profissional.

EPÍGRAFE

“As pedras revelam não apenas suas dimensões físicas, mas também a resistência que sustentam contra o tempo. “

(Autor desconhecido)

RESUMO

AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES DE AGREGADOS GRAÚDOS DE PEDREIRAS DE GOIÁS

A seleção de agregados que conciliem disponibilidade e durabilidade é fundamental para o desempenho mecânico de pavimentos rodoviários e concretos, especialmente em regiões com elevada demanda por materiais para infraestrutura civil. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência ao desgaste por abrasão de agregados graúdos provenientes de diferentes regiões do Estado de Goiás, visando à sua aplicação em obras de pavimentação rodoviária e construção civil. A metodologia adotada compreendeu uma revisão bibliográfica sobre as propriedades dos agregados e sua influência no desempenho mecânico, seguida da realização de ensaios laboratoriais de granulometria e de Desgaste por Abrasão Los Angeles, conduzidos conforme as normas técnicas vigentes do DNIT e da ABNT. As amostras foram classificadas em faixas granulométricas específicas, o que permitiu definir as condições adequadas de ensaio, incluindo massa amostral, carga abrasiva e número de rotações. Os resultados obtidos foram expressos como percentuais médios de perda por abrasão e comparados aos limites máximos estabelecidos pelas normas técnicas, predominantemente situados entre 40% e 50%. Observou-se que a maioria das amostras apresentou desempenho satisfatório, com valores de abrasão inferiores aos limites normativos, enquanto algumas ultrapassaram os valores de referência, evidenciando restrições quanto ao seu uso em camadas submetidas a maiores solicitações mecânicas. A análise dos resultados indicou que a resistência ao desgaste está fortemente associada à origem geológica e à composição mineralógica dos agregados, sendo os materiais de natureza ígnea, como basaltos, os que apresentaram melhor desempenho. Conclui-se que os agregados avaliados possuem potencial para aplicação em pavimentação, desde que respeitados os critérios normativos e consideradas alternativas de uso para materiais com desempenho inferior, contribuindo para uma utilização técnica mais eficiente dos recursos minerais regionais.

Palavras-chave: Agregados graúdos. Abrasão Los Angeles. Pavimentação rodoviária. Granulometria. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

EVALUATION OF LOS ANGELES ABRASION WEAR OF COARSE AGGREGATES FROM QUARRIES IN GOIÁS

The selection of aggregates that combine availability and durability is fundamental to the mechanical performance of road pavements and concrete structures, especially in regions with high demand for materials for civil infrastructure. In this context, the present study aimed to evaluate the resistance to abrasion wear of coarse aggregates from different regions of the State of Goiás, with a view to their application in road paving works and civil construction. The methodology comprised a bibliographic review on aggregate properties and their influence on mechanical performance, followed by laboratory tests of particle size distribution and Los Angeles abrasion, conducted in accordance with the current technical standards of DNIT and ABNT. The samples were classified into specific gradation ranges, which allowed the definition of appropriate testing conditions, including sample mass, abrasive charge, and number of rotations. The results were expressed as mean percentages of abrasion loss and compared with the maximum limits established by technical standards, predominantly ranging between 40% and 50%. It was observed that most samples exhibited satisfactory performance, with abrasion values below the normative limits, while some exceeded the reference values, indicating restrictions on their use in layers subjected to higher mechanical demands. The analysis indicated that abrasion resistance is strongly associated with the geological origin and mineralogical composition of the aggregates, with igneous materials, such as basalt, presenting the best performance. It is concluded that the evaluated aggregates have potential for application in pavement construction, provided that normative criteria are met and alternative uses are considered for materials with inferior performance, contributing to a more technically efficient use of regional mineral resources.

Keywords: Coarse aggregates. Los Angeles abrasion. Road paving. Particle size distribution. Mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda de agregados no Brasil, durante os anos de 2000 a 2023. 18
Figura 2 - Obras de Infraestrutura Civil: a) Trecho GO-108, entre Guarani de Goiás e o Parque Estadual de Terra Ronca e b) Viaduto em Caldas Novas 20
Figura 3 - Principais classificações dos agregados 22
Figura 4 - Representação gráfica do aparelho utilizado no ensaio Treton 31
Figura 5 - Preparação das amostras: Secagem em bandeja metálica 36
Figura 6 - Ensaio granulométrico: a) peneiramento e b) pesagem das frações retidas 37
Figura 7 - Fluxograma do Ensaio de Granulometria 38
Figura 8 - Preparo para o Ensaio de Abrasão Los Angeles: a) limpeza para posterior encaminhamento à estufa 39
Figura 9 - Preparo para o Ensaio de Abrasão Los Angeles: a) amostras em estufa e b) pesagem do material seco 39
Figura 10 - Máquina de Abrasão Los Angeles 41
Figura 11 - a) Encaminhamento ao tambor e b) Incorporação das cargas abrasivas 42
Figura 12 - a) Peneiramento em malha de 1,7 mm e b) lavagem do material retido. 42
Figura 13 - Ensaio de Abrasão Los Angeles: a) Secagem final em estufa e b) pesagem final . 43
Figura 14 - Fluxograma do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles 44
Figura 15 - Representação Gráfica do Ensaio de Abrasão Los Angeles 48

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Principais Utilizações dos Agregados 18
Tabela 2 – Massas específicas rochas comumente utilizadas na construção civil 26
Tabela 3 - Relação entre a graduação, determinação da carga abrasiva e massa amostral 38
Tabela 4 - Massa mínima amostral 40

Quadro 1 - Origem e Classificação das amostras 34
Quadro 2 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal) 35
Quadro 3 - Limites Normativos para o Ensaio de Abrasão Los Angeles 45
Quadro 4 - Definição de dados utilizados em etapa anterior ao ensaio de abrasão 46
Quadro 5 - Dados brutos do resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles 47

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ANEPAC – Associação nacional das Entidades de Produtores de agregados para Construção

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura Transportes

ME – Método de Ensaio

ES – Especificação de Serviços

IFG – Instituto federal de educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

NM – Norma Mercosul

SSS – Saturada Seca Superficialmente

R – Resistência ao Esmagamento do Agregado

Mu – Estado Úmido

Ms - Estado Seco

Mi – Massa inicial

Mf – Massa Final

RCCs – Resíduos de Construção Civil

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1 Justificativa 15
1.2 Objetivos 16
1.2.1 Objetivo Geral 16
1.2.2 Objetivos Específicos 16
1.3 Estrutura do Trabalho 16
2. REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1 Agregados na Construção Civil 17
2.2 Pavimentação Rodoviária em Goiás: Panorama e Impactos 19
2.3 Agregados 20
2.4 Classificação dos agregados 21
2.4.1 Classificação granulométrica dos agregados 22
2.4.2 Classificação dos agregados quanto à origem 23
2.4.3 Classificação dos agregados quanto à massa específica 24
2.5 Propriedades dos agregados 24
2.5.1 Propriedades físicas dos agregados 25
2.5.2 Propriedades mecânicas dos agregados 28
2.6 Ensaios complementares para a caracterização mecânica dos agregados graúdos 30
2.6.1 Ensaio de Resistência ao choque: Treton 30
2.6.2 Resistência ao esmagamento 32
3. METODOLOGIA 33
3.1 Pesquisa Bibliográfica 33
3.2 Ensaios Laboratoriais 34
3.2.1 Seleção e Identificação dos Materiais 34
3.2.2 Preparação das amostras para o ensaio de Granulometria 35
3.2.3 Análise Granulométrica 36

3.2.4 Preparação para a Execução do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles 38
3.2.5 Ensaio de Abrasão Los Angeles 41
3.2.6 Determinação do Índice de Abrasão 43
4. RESULTADOS 45
4.1 Limites Normativos de Abrasão para Agregados Graúdos 46
4.2 Caracterização Granulométrica Aplicada ao Ensaio de Abrasão Los Angeles 46
4.3 Apresentação dos Resultados de Abrasão Los Angeles 46
5. CONCLUSÕES 51
REFERÊNCIAS 52

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é frequentemente reconhecida como um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento nacional, desempenhando papel essencial na implementação de infraestrutura e no impulso econômico. Neste sentido, Teixeira et al. (2005) concluem que o investimento no setor é de significativa relevância, visto que promove o aumento da renda e a geração de empregos, fomentando o crescimento do país.

No âmbito regional, especificamente no Estado de Goiás, o Manual do Sistema Rodoviário (2022) aponta que a malha rodoviária estadual totaliza 21.212,68 km, dos quais 11.918 km são pavimentados, enquanto cerca de 8.288,97 km ainda correspondem a rodovias não pavimentadas. O documento indica, ainda, que aproximadamente 340 km encontram-se em fase de pavimentação e outros 665 km em etapa de planejamento. O fato de cerca de 40% da malha rodoviária estadual ainda carecer de pavimentação evidencia não apenas uma expressiva demanda por investimentos em infraestrutura viária, mas também uma oportunidade técnica para a investigação e aplicação de materiais locais em obras rodoviárias na região.

Para suprir essa demanda, os agregados assumem protagonismo, constituindo a principal fração volumétrica dos materiais compósitos utilizados em pavimentação. Segundo Neville (2016), os agregados ocupam pelo menos três quartos (75%) do volume do concreto. Consequentemente, a qualidade destes constituintes é determinante. O autor ressalta ainda que, embora agregados satisfatórios não garantam por si sós um bom concreto, é improvável obter um compósito de qualidade com agregados inadequados.

Cavalcante et al. (2012) corroboram essa visão, afirmando que muitas patologias não derivam apenas da falta de manutenção, mas precipuamente da escolha, dosagem e aplicação de materiais com características que não atendem à demanda de projeto. Nesse contexto, a característica mineralógica e física dos agregados é vital para garantir estruturas duráveis, como ressaltam Bernucci et al. (2008) no tocante a revestimentos asfálticos.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica de agregados graúdos provenientes de pedreiras regionais, com ênfase na análise de resistência ao desgaste (Abrasão Los Angeles). O estudo visa verificar a adequabilidade destes materiais para aplicação em pavimentos rígidos (concreto de Cimento Portland), pavimentos flexíveis (concreto betuminoso e tratamentos superficiais) e concretos submetidos a esforços impactantes, confrontando os resultados obtidos com os parâmetros e limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, contribuindo assim para a otimização dos recursos na infraestrutura rodoviária do Estado de Goiás.

1.1 Justificativa

A realização desta pesquisa fundamenta-se, primeiramente, no papel central que os agregados desempenham na engenharia civil. Sendo componentes majoritários em concretos, argamassas e pavimentos, a qualidade desses insumos repercute diretamente na segurança e durabilidade das obras de infraestrutura. No contexto do Estado de Goiás, que possui uma extensa malha rodoviária ainda carente de pavimentação, a demanda por materiais pétreos é crescente. À vista disso, identificar e validar fontes regionais de agregados trata-se não apenas uma questão técnica, mas de estratégia econômica para viabilizar a expansão da infraestrutura local.

Sob essa ótica de valorização regional, ao validar tecnicamente materiais extraídos de pedreiras locais, reduz-se a necessidade de transporte de insumos de jazidas distantes, fator que onera substancialmente o orçamento de obras de pavimentação. Além disso, essa estratégia mitiga o impacto ambiental associado à logística, promovendo uma gestão mais racional e responsável dos recursos naturais próximos disponíveis.

Tecnicamente, o estudo justifica-se pela necessidade de caracterizar o comportamento mecânico dos agregados graúdos quando submetidos a esforços de desgaste. Durante sua utilização em diferentes aplicações da engenharia civil, esses materiais podem estar sujeitos a solicitações mecânicas repetitivas, capazes de promover a degradação progressiva dos grãos. Nesse sentido, o ensaio de Abrasão Los Angeles constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação da resistência ao desgaste dos agregados, permitindo inferir seu desempenho potencial e identificar limitações quanto à sua aplicação, evitando o emprego de materiais com comportamento mecânico inadequado.

Por fim, para além das contribuições técnicas e econômicas, este trabalho reveste-se de importância singular na esfera acadêmica ao integrar e complementar um projeto de pesquisa em andamento, fruto de mais de uma década de investigações conduzidas pelo professor orientador em colaboração com discentes dos cursos técnicos e superiores da área. Além de propiciar ao autor a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos na graduação, o estudo contribui para a consolidação de uma base de dados pública e técnica.

1.2 Objetivos

A seguir serão apresentados os objetivos.

1.2.1 Objetivo Geral

- Avaliar o desempenho de agregados graúdos de pedreiras do Estado de Goiás pelo parâmetro de Desgaste Por Abrasão Los Angeles.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Executar ensaios de composição granulométrica e desgaste por abrasão Los Angeles em agregados graúdos.
- Apresentar os requisitos de aceitabilidade do uso de agregados graúdos em pavimentos e concretos.
- Avaliar a conformidade técnica dos agregados analisados comparando os resultados obtidos com as especificações vigentes da ABNT e do DNIT.
- Contribuir com o projeto desenvolvido por profissionais da área da construção civil e de transportes do Instituto Federal de Goiás (IFG) – Câmpus Goiânia, e proporcionar uma base de dados sobre as propriedades de agregados graúdos de diferentes regiões do Estado de Goiás.

1.3 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo apresenta a Introdução, que contextualiza o cenário rodoviário goiano e a demanda por insumos de qualidade. Nesta seção, estabelecem-se a justificativa técnica e acadêmica da pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos que orientam o estudo.

O segundo capítulo dedica-se ao Referencial Teórico, que compõe a base conceitual necessária para a compreensão dos fenômenos estudados. Discorre-se sobre a definição, classificação e importância dos agregados na engenharia civil, com ênfase em suas propriedades físicas e mecânicas. Especial atenção é conferida ao parâmetro de desgaste à abrasão, como critério determinante para a durabilidade e usabilidade dos materiais em obras de infraestrutura.

No terceiro capítulo, descreve-se a Metodologia, detalhando os procedimentos experimentais adotados. São especificados os protocolos para a execução dos ensaios de Caracterização Granulométrica e de Desgaste por Abrasão Los Angeles, assegurando a conformidade com as normas técnicas vigentes.

O quarto capítulo é dedicado aos Resultados e Discussões. Os dados obtidos são analisados e comparados com os limites de aceitabilidade normativos, verificando-se a viabilidade técnica do uso desses agregados em infraestruturas rodoviárias e concretos. Por fim, o quinto capítulo apresenta a Conclusão, sintetizando os principais achados da pesquisa e apresentando as considerações finais do trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

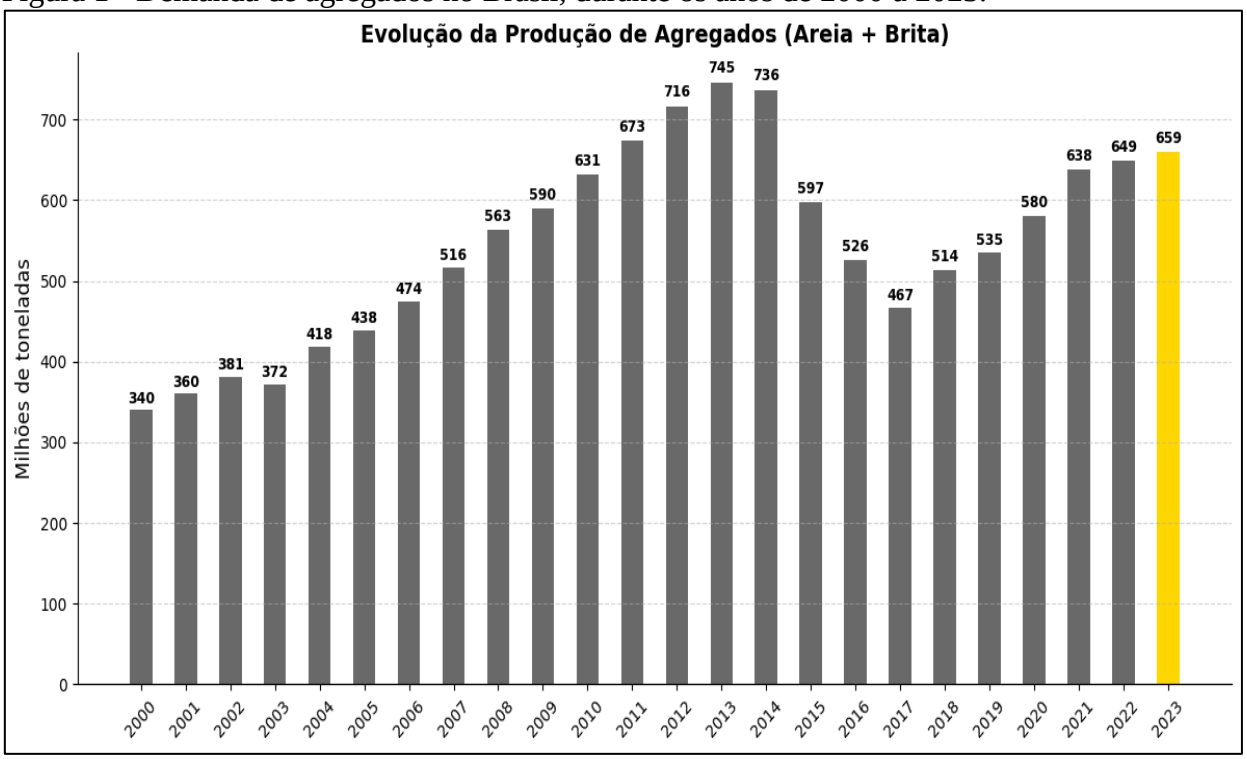
Nesta seção, são apresentados e discutidos os conceitos e definições necessários para a compreensão e análise dos fenômenos investigados nesta pesquisa. Inicialmente, discorre-se sobre os conceitos basilares e a relevância dos agregados na indústria da construção civil, avançando para a sua classificação e propriedades, com ênfase crítica no parâmetro de resistência ao desgaste.

Paralelamente, a construção e manutenção de vias urbanas têm gerado um consumo expressivo de materia-prima o qual é extraído de jazidas naturais. Entretanto, as restrições impostas pela legislação ambiental quanto à exploração de recursos naturais geraram escassez e custos altos na aquisição de matérias-primas.

2.1 Agregados na Construção Civil

Os agregados constituem insumos fundamentais para a construção civil, sendo empregados de forma extensiva em obras de infraestrutura e edificações dos mais diversos portes e finalidades. Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC), o Brasil possui aproximadamente 3.100 empresas dedicadas à produção desses materiais, o que evidencia a relevância econômica e estratégica do setor no contexto nacional. A evolução da demanda nacional por agregados pode ser observada na Figura 1, que apresenta a produção brasileira de areia e brita ao longo dos últimos anos.

Figura 1 - Demanda de agregados no Brasil, durante os anos de 2000 a 2023.



Fonte: ANEPAC (2022)

De acordo com os dados da ANEPAC, em 2022, a produção total alcançou aproximadamente 640 milhões de toneladas, refletindo a retomada gradual do setor após o período de retração observado entre 2013 e 2017. Apesar dessa recuperação, nota-se que os níveis de produção registrados antes da crise ainda não haviam sido plenamente superados, permanecendo próximos aos valores observados em 2011. Para 2023, a entidade projetou um crescimento da ordem de 3%, indicando expectativas positivas quanto ao desempenho do setor, ainda que de forma moderada.

A importância dos agregados nesse tipo de aplicação é destacada por Santana (1993), ao afirmar que as misturas asfálticas utilizadas na pavimentação apresentam uma composição extremamente dependente desses materiais, sendo cerca de 77% em volume e aproximadamente 94% em massa constituídas por agregados.

Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta os principais tipos de agregados utilizados na construção civil e suas usuais aplicações.

Tabela 1 - Principais Utilizações dos Agregados

Tipos de Agregados	**Aplicações Usuais**
Areia artificial e areia natural	Assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, embolso, podendo entrar na composição de concreto e asfalto.

Pedrisco	Confecção de pavimentação asfáltica, lajotas, bloquetes, intertravados, lajes, jateamento de túneis e acabamentos em geral.
Brita 1	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações, como na construção de pontes, edificações e grandes lajes.
Brita 2	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas.
Brita 3	Também denominada pedra de lastro utilizada nas ferrovias.
Brita 4	Produto destinado a obras de drenagem, como drenos sépticos e fossas.
Rachão ou pedra marroada	Fabricação de gabiões, muros de contenção e bases.
Brita graduada	Em base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas.

Fonte: Adaptado de Resende *et al.* (2009)

2.2 Pavimentação Rodoviária em Goiás: Panorama e Impactos

O estado de Goiás tem vivenciado um ciclo de investimentos sem precedentes em infraestrutura rodoviária, com destaque para obras de pavimentação, restauração e duplicação que visam ampliar a capacidade logística, promover a integração regional e melhorar a segurança viária. Em 2025, a Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (Goinfra) executou um amplo programa de obras rodoviárias, composto por mais de 70 frentes de serviço distribuídas por todas as regiões do Estado, abarcando mais de 1.800 quilômetros de pavimentações, duplicações e restaurações em rodovias estaduais.

Segundo a própria Goinfra, apenas no ano de 2025, 38 obras foram concluídas, reforçando o ritmo acelerado do programa e a prioridade conferida ao setor. O investimento total previsto para o conjunto de obras rodoviárias e civis ultrapassa R$ 3,7 bilhões, financiados pelo Tesouro Estadual e pelo Fundo Estadual de Infraestrutura, o que representa um dos maiores volumes de recursos já alocados para infraestrutura no estado.

Entre as intervenções em andamento destacam-se obras estratégicas de pavimentação que possuem efeitos diretos sobre a mobilidade e o escoamento da produção. Na Região Metropolitana de Goiânia, por exemplo, foram pavimentados cerca de 11,7 km da GO-319 entre Hidrolândia e Aragoiânia, além da pavimentação de 31,9 km da GO-219, ligando

Hidrolândia a Bela Vista de Goiás. Outros trechos de pavimentação de grande impacto incluem, no Norte goiano, a estrada GO-110, cujo projeto contempla mais de 50 km de pavimentação entre Iaciara e Estiva, integrando importantes municípios da região e favorecendo o desenvolvimento da malha de transporte local.

A amplitude das intervenções não se restringe à pavimentação pura, abrangendo também duplicações, restaurações e melhorias funcionais. Na Região Sudoeste, por exemplo, estão em curso ações como a restauração de 91 km da GO-184 (entre Aporé e Itumirim) e a pavimentação de 40 km da GO-401, reforçando a integração com as regiões de produção agrícola e industrial. O elevado volume de obras rodoviárias em execução e concluídas reforça a importância da qualidade dos materiais empregados, especialmente agregados para pavimentação, uma vez que condições de serviço adversas, como tráfego intenso, variações climáticas e cargas pesadas, demandam materiais com alta resistência ao desgaste e à abrasão.

Esses investimentos não apenas ampliam a malha física de rodovias, como também elevam as exigências técnico-estruturais sobre os materiais utilizados nos pavimentos, reforçando a pertinência de estudos que avaliem parâmetros como a abrasão Los Angeles e outras propriedades mecânicas dos agregados. A Figura 2 ilustra obras de infraestruturas rodoviárias em execução no ano de 2025, em municípios goianos.

Figura 2 - Obras de Infraestrutura Civil: a) Trecho GO-108, entre Guarani de Goiás e o Parque Estadual de Terra Ronca e b) Viaduto em Caldas Novas

(a) (b)



Fonte: GOINFRA (2025)

2.3 Agregados

No âmbito da infraestrutura rodoviária e da tecnologia dos materiais de construção, o conceito de agregados passou por uma significativa evolução ao longo das últimas décadas.

Conforme destaca Santos (2021), esses materiais foram, por muito tempo, interpretados sob uma perspectiva essencialmente utilitarista, sendo empregados majoritariamente como elementos de preenchimento, com a finalidade de conferir volume às misturas cimentícias e reduzir seus custos. Tal compreensão, entretanto, mostrou-se limitada frente às exigências de desempenho impostas às obras de engenharia contemporâneas.

Com o avanço do conhecimento técnico-científico, esse paradigma foi progressivamente superado. Atualmente, reconhece-se que, em razão de sua expressiva participação volumétrica nas misturas, os agregados exercem influência direta e determinante sobre propriedades fundamentais dos compósitos cimentícios, tais como resistência mecânica, durabilidade, estabilidade dimensional e comportamento frente às solicitações ambientais e de serviço. Assim, deixam de ser considerados materiais passivos e passam a ocupar papel central no desempenho global das estruturas.

Sob o ponto de vista físico-químico, Bauer (2008) define o agregado como um sistema particulado e incoeso, de atividade química praticamente nula, constituído por um conjunto de grãos distribuídos em ampla faixa granulométrica. Essa concepção enfatiza o caráter estrutural do material, ao mesmo tempo em que ressalta sua relativa inércia química, característica essencial para garantir a compatibilidade com ligantes hidráulicos.

Tal entendimento encontra respaldo na normalização técnica brasileira. A NBR 9935 (ABNT, 2024) conceitua os agregados como materiais granulares, geralmente inertes, oriundos de processos naturais ou artificiais de fragmentação — abrangendo areias, cascalhos e britas — bem como materiais reciclados ou industrializados, desde que apresentem propriedades adequadas para aplicação em argamassas e concretos. Essa definição amplia o escopo do material, incorporando novas fontes de agregados compatíveis com os princípios da engenharia sustentável.

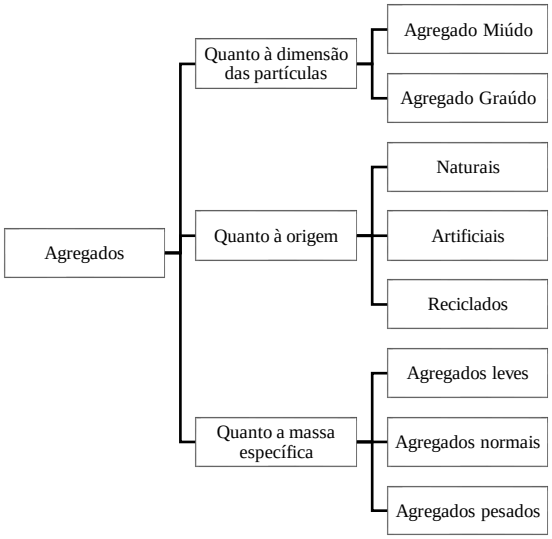
Complementarmente, a NBR 7211 (ABNT, 2022) estabelece os limites dimensionais que caracterizam tecnicamente os agregados destinados ao concreto. Segundo a norma, enquadram-se nessa categoria os materiais pétreos cujos grãos apresentam dimensões nominais compreendidas entre 0,075 mm e 152 mm. Partículas com dimensões inferiores a esse intervalo são classificadas como fíleres ou materiais pulverulentos, enquanto aquelas superiores são denominadas matacões ou pedra de mão.

2.4 Classificação dos agregados

A compreensão das diferentes classificações dos agregados é fundamental para a adequada seleção desses materiais em aplicações de engenharia, uma vez que suas características físicas e mecânicas influenciam diretamente o desempenho dos compósitos

cimentícios. No contexto da tecnologia dos materiais de construção, os agregados podem ser classificados segundo diferentes critérios, entre as classificações mais relevantes para a engenharia civil, destacam-se aquelas baseadas na granulometria, na origem e na massa específica dos materiais. A Figura 3 ilustra as principais classificações dos agregados.

Figura 3 - Principais classificações dos agregados



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Em sequência, são apresentados maiores detalhes sobre essas classificações, com ênfase em seus fundamentos conceituais.

2.4.1 Classificação granulométrica dos agregados

A classificação granulométrica constitui um dos critérios mais fundamentais na caracterização dos agregados, uma vez que a dimensão das partículas exerce influência direta sobre a trabalhabilidade, a compacidade e o desempenho mecânico das misturas cimentícias. No contexto normativo brasileiro, a NBR 7211 (ABNT, 2022) estabelece as definições aplicáveis aos agregados empregados em concretos, fundamentando-se nas prescrições das normas NBR NM 66 (ABNT, 1998) e NBR 9935 (ABNT, 2024).

De acordo com essas normas, os agregados são classificados, quanto à granulometria, em agregados miúdos e agregados graúdos, com base no comportamento das partículas durante o ensaio de peneiramento, realizado conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), utilizando peneiras normalizadas segundo a NBR NM 3310-1 (ABNT, 2011).

Define-se como agregado miúdo aquele cujas partículas passam integralmente pela peneira de abertura nominal de 4,75 mm e são retidas na peneira de 150 µm. Essa fração

granular desempenha papel essencial no preenchimento dos vazios entre os grãos maiores, influenciando diretamente a coesão, a trabalhabilidade e o acabamento superficial das misturas.

Por sua vez, o agregado graúdo é caracterizado por partículas que passam pela peneira de abertura nominal de 75 mm e são retidas na peneira de 4,75 mm. Essa fração é responsável, em grande medida, pela resistência mecânica e pela estabilidade volumétrica dos concretos, sendo particularmente relevante em aplicações estruturais e em pavimentação.

Dessa forma, a classificação granulométrica não apenas estabelece categorias normativas bem definidas, mas também fornece subsídios técnicos essenciais para a seleção e o controle dos agregados em função do desempenho esperado do material compósito.

2.4.2 Classificação dos agregados quanto à origem

Outro critério amplamente adotado na engenharia civil refere-se à origem dos agregados, a qual está diretamente relacionada ao processo de formação ou obtenção do material e pode influenciar suas propriedades físicas, mecânicas e ambientais. Segundo Bernucci et al. (2022), os agregados podem ser classificados, quanto à origem, em naturais, artificiais e reciclados.

Os agregados naturais são aqueles utilizados praticamente em seu estado original, tal como são encontrados no meio ambiente, sendo submetidos, quando necessário, apenas a processos físicos simples, como lavagem, peneiramento ou britagem. Inserem-se nessa categoria materiais como areias naturais de rios ou barrancos, cascalhos e seixos rolados provenientes de leitos fluviais.

Os agregados artificiais, por sua vez, resultam de processos industriais que alteram o estado físico e, em alguns casos, a composição química do material original. São comumente obtidos a partir de resíduos industriais ou de processos controlados de transformação. Incluem-se nesse grupo, por exemplo, agregados provenientes da britagem de rochas, cuja granulometria final depende diretamente da intervenção humana.

Já os agregados reciclados são obtidos a partir do reaproveitamento de materiais previamente utilizados, como resíduos da construção civil ou materiais provenientes da fresagem e reciclagem de pavimentos asfálticos. Essa classe de agregados assume relevância crescente no contexto da sustentabilidade, ao contribuir para a redução do consumo de recursos naturais e do volume de resíduos destinados a aterros.

Assim, a classificação quanto à origem permite não apenas diferenciar os agregados sob o ponto de vista técnico, mas também incorporar critérios ambientais e econômicos à sua seleção.

2.4.3 Classificação dos agregados quanto à massa específica

A massa específica aparente constitui outro parâmetro relevante na classificação dos agregados, estando diretamente associada ao peso próprio das estruturas e às propriedades finais do concreto. De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2024), os agregados podem ser classificados, quanto a esse critério, em leves, normais e pesados.

Os agregados leves apresentam massa específica aparente inferior a 2000 kg/m³ e são empregados, sobretudo, em aplicações que demandam redução do peso estrutural, como em concretos leves e elementos pré-moldados. Exemplos típicos incluem argila expandida, escória siderúrgica expandida, vermiculita e resíduos sinterizados.

Os agregados normais possuem massa específica aparente compreendida entre 2000 kg/m³ e 3000 kg/m³, sendo os mais amplamente utilizados na construção civil. Essa classe abrange a maior parte das areias, britas e pedregulhos empregados em concretos e argamassas convencionais.

Por fim, os agregados pesados caracterizam-se por massa específica aparente superior a 3000 kg/m³, sendo utilizados em situações especiais que exigem elevada densidade, como estruturas de blindagem contra radiação ou obras que demandam alta resistência mecânica. Entre os materiais representativos dessa classe destacam-se a barita, a magnetita, a limonita e a hematita.

2.5 Propriedades dos agregados

De forma geral, as propriedades dos agregados podem ser classificadas em propriedades físicas, relacionadas à constituição, à estrutura interna e às características geométricas das partículas, e propriedades mecânicas, associadas à capacidade do material de resistir a esforços como compressão, impacto e desgaste. Essas propriedades atuam de maneira integrada, influenciando a resistência, a durabilidade e a estabilidade das estruturas (Bernucci et al., 2022).

O conhecimento das características dos agregados é essencial para a adequada dosagem de concretos hidráulicos, usualmente produzidos com cimento Portland, e de concretos betuminosos, uma vez que as propriedades desses materiais dependem diretamente de parâmetros como a massa específica aparente, a porosidade, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos grãos. Nesse contexto, apresentam-se a seguir as principais propriedades físicas e mecânicas dos agregados, com ênfase naquelas mais relevantes para o desempenho de agregados graúdos empregados em infraestruturas rodoviárias, servindo de base conceitual para a análise da resistência à abrasão discutida nos tópicos subsequentes.

2.5.1 Propriedades físicas dos agregados

As propriedades físicas dos materiais correspondem às características intrínsecas que condicionam o seu comportamento frente a estímulos externos, sem que haja alteração em sua composição química. No caso dos agregados, essas propriedades exercem influência direta sobre o desempenho mecânico, a durabilidade e a estabilidade dos concretos e pavimentos. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as propriedades dos agregados podem ser agrupadas em três conjuntos principais, conforme os fatores que as governam:

- Características dependentes da porosidade, tais como massa específica aparente, absorção de água, resistência, módulo de elasticidade e sanidade;
- Características dependentes da composição química e mineralógica, incluindo resistência mecânica, módulo de elasticidade, presença de substâncias deletérias e cargas elétricas superficiais;
- Características dependentes das condições de fabricação e processamento, relacionadas ao tamanho, à forma e à textura superficial das partículas.

Nesse contexto, destaca-se a massa específica, uma das propriedades físicas mais relevantes na caracterização dos agregados, por estar diretamente associada ao consumo de materiais, à compacidade das misturas e ao comportamento mecânico dos compósitos cimentícios.

2.5.1.1 Massa específica dos agregados

A massa específica é definida como a razão entre a massa e o volume de um material. No caso dos agregados, essa propriedade pode ser determinada considerando diferentes condições de umidade, tais como estado natural úmido, seco ao ar, saturado com superfície seca ou completamente seco. Entretanto, para fins de caracterização técnica e comparação entre materiais, recomenda-se adotar a massa do agregado em condição completamente seca, de modo a eliminar a influência da umidade nos resultados. O volume associado à determinação da massa específica pode referir-se ao volume real dos grãos, desconsiderando os vazios permeáveis.

Para agregados graúdos empregados em pavimentação, a massa específica e a absorção de água são determinadas conforme o método prescrito na norma (DNIT, 1997), a qual estabelece o uso da balança hidrostática para a determinação do volume dos sólidos. A norma NBR 9935 (ABNT, 2024) estabelece a terminologia associada à massa específica dos agregados, definindo, entre outras, as seguintes condições:

- Massa específica na condição seca, correspondente à razão entre a massa do agregado completamente seco e o seu volume, desconsiderando os vazios permeáveis;
- Massa específica na condição saturada com superfície seca, definida como a razão entre a massa do agregado saturado, porém com a superfície seca, e o seu volume, também excluindo os vazios permeáveis.

Os valores de massa específica variam em função da origem geológica e da composição mineralógica do agregado. A Tabela 2 apresenta valores típicos de massa específica de agregados provenientes de diferentes grupos de rochas, conforme apresentado por Neville (1997).

Tabela 2 – Massas específicas de rochas comumente utilizadas na construção civil

Grupo	**Massa específica (g/cm³)**	**Intervalo de valores (g/cm³)**
Basalto	2,80	2,60 – 3,00
Granito	2,69	2,60 – 3,00
Arenito	2,69	2,60 – 3,00
Calcário	2,66	2,50 – 2,80
Quartzito	2,62	2,60 – 2,70

Fonte: (Neville, 1997)

2.5.1.2 Porosidade e índice de vazios

Segundo Faria et al. (2017), a porosidade e o índice de vazios são parâmetros fundamentais para a caracterização física dos agregados, pois estão diretamente relacionados à estrutura interna do material e à sua capacidade de absorver água.

A porosidade corresponde à razão entre o volume de vazios e o volume total da amostra de agregados, sendo geralmente expressa em porcentagem e assumindo valores sempre inferiores a 100%. Já o índice de vazios é definido como a relação entre o volume de vazios e o volume ocupado exclusivamente pelas partículas sólidas dos agregados, sendo usualmente expresso como um número adimensional ou decimal.

Esses parâmetros fornecem informações importantes sobre a compacidade do material e exercem influência direta sobre propriedades como absorção de água, durabilidade e comportamento mecânico dos agregados incorporados a concretos hidráulicos ou betuminosos

2.5.1.3 Absorção de água e teor de umidade

A absorção de água é definida como uma medida da quantidade de água que pode preencher os poros comunicantes dos grãos de agregados quando estes se encontram na condição saturada com superfície seca (SSS). Esse parâmetro é determinado a partir da relação

entre a massa do agregado na condição SSS e a massa do agregado seco em estufa, conforme expressa a Equação 1.

$$a = \frac{Msss - Mseca}{Mseca} \times 100 \qquad \text{Equação 1}$$

De acordo com Faria et al. (2017), esse parâmetro representa a capacidade máxima de retenção de água pelos agregados, estando diretamente associada à sua porosidade. A absorção é um parâmetro essencial para o ajuste da água de amassamento em concretos e misturas betuminosas, de modo a garantir a trabalhabilidade e o desempenho desejados. Enquanto a absorção mede a quantidade de água na condição saturada seca superficialmente (SSS), a umidade (w) mede a quantidade de água na condição real. O teor de umidade é obtido pesando-se a mistura de agregado no estado úmido (Mu) e depois no estado seco (Ms) após 24 horas em estufa, conforme apresentado na Equação 2:

$$w = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \qquad \text{Equação 2}$$

O teor de umidade é expresso em porcentagem e, para agregados graúdos, sua determinação é normatizada pelo Método de Ensaio nº 196 (DNIT, 1998c).

2.5.1.4 Compacidade e Compactação

A compacidade está associada ao grau de densificação de um material e reflete a forma como as partículas se organizam e se acomodam sob a ação de esforços de compactação. No contexto da engenharia de pavimentos, esse conceito está diretamente relacionado ao desempenho mecânico e à durabilidade das camadas estruturais.

De acordo com o DNER (1994b), o ensaio de compactação tem como objetivo estabelecer a correlação entre o teor de umidade do material e sua massa específica aparente seca, permitindo a obtenção da chamada curva de compactação. O ensaio mais empregado é o ensaio de Proctor, em suas versões normal, intermediária ou modificada, realizado por meio da aplicação de sucessivos impactos de um soquete padronizado sobre a amostra.

Segundo o DNIT (2006), denomina-se grau de compactação a razão entre a massa específica aparente seca máxima obtida em campo e a massa específica aparente seca máxima determinada em laboratório. Esse parâmetro é amplamente utilizado no controle tecnológico de obras de pavimentação, uma vez que permite verificar se o processo de compactação atende às especificações estabelecidas em projeto.

2.5.1.5 Textura superficial dos agregados

A textura superficial dos agregados exerce influência significativa sobre a aderência entre os grãos e a pasta de cimento Portland, bem como sobre a interação com o ligante betuminoso. Essa propriedade está relacionada ao grau de rugosidade e ao nível de polimento da superfície das partículas.

A classificação da textura superficial baseia-se, portanto, nas características morfológicas dos grãos. A norma inglesa BS 812 (BSI, 1975) distingue cinco tipos principais de textura superficial: vítrea, granulosa, áspera, cristalina e alveolar.

De modo geral, agregados com textura mais áspera favorecem uma melhor aderência com a pasta de cimento Portland ou com o cimento asfáltico, o que contribui para o aumento da resistência mecânica do concreto hidráulico ou betuminoso.

2.5.1.6 Granulometria

A granulometria dos agregados é uma característica essencial, uma vez que materiais granulares são amplamente utilizados em diversas aplicações, como concreto de cimento Portland, pavimentação asfáltica, lastro ferroviário, filtros e enrocamentos.

De acordo com Luz e Almeida (2012), a distribuição granulométrica está diretamente relacionada ao índice de vazios do agregado, influenciando diretamente a compacidade do concreto e do pavimento. Um menor índice de vazios resulta em um consumo reduzido de cimento no concreto hidráulico e de betume no concreto asfáltico. Além disso, no caso de lastro ferroviário e enrocamento, um índice de vazios menor implica em menor permeabilidade, o que pode ser crucial para a estabilidade e durabilidade dessas estruturas.

2.5.2 Propriedades mecânicas dos agregados

Os agregados empregados em obras de engenharia estão submetidos a diferentes tipos de solicitações mecânicas, decorrentes tanto das ações externas atuantes sobre a estrutura quanto das etapas construtivas às quais são expostos. Durante sua vida útil, esses materiais resistem a esforços de compressão, tração e flexão, transmitidos principalmente pelas camadas estruturais em que se encontram inseridos. Adicionalmente, no processo de produção, transporte, lançamento e compactação, os agregados são submetidos a ações severas de impacto, esmagamento, desgaste superficial e abrasão (NEVILLE, 2016).

Em razão dessas solicitações, torna-se fundamental a avaliação das propriedades mecânicas dos agregados por meio de ensaios laboratoriais capazes de simular, de forma controlada, as condições de serviço a que esses materiais estarão expostos. O ensaio de Abrasão

Los Angeles é o método mais amplamente empregado para a avaliação da resistência dos agregados graúdos a essas solicitações mecânicas, sendo normatizado pela NBR 16974 (ABNT, 2022) e pelo Método de Ensaio 451 (DNIT, 2024) para aplicações rodoviárias. Ressalta-se que esse ensaio constitui o parâmetro central de avaliação do desempenho dos agregados graúdos analisados nesta pesquisa.

2.5.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão representa a aptidão de um material em suportar esforços axiais que tendem a reduzir seu volume, sendo uma propriedade fortemente influenciada pela composição mineralógica, pela textura, pela forma dos grãos e pelo grau de compactação do material. No caso dos agregados, essa característica está associada, sobretudo, às propriedades da rocha de origem.

A avaliação da resistência à compressão é realizada por meio de ensaios laboratoriais padronizados, que simulam as condições de carregamento a que o material pode ser submetido em serviço. Um dos métodos mais empregados é o ensaio de compressão uniaxial, no qual a amostra é submetida a uma carga crescente até a ruptura. Conforme a NBR 45 (ABNT, 2006), esse procedimento permite determinar a carga máxima suportada pelo material e, a partir dela, calcular a tensão de ruptura, utilizada como indicador da resistência à compressão.

É importante ressaltar que os resultados obtidos nesses ensaios podem variar significativamente em função da orientação dos esforços em relação à estrutura interna da rocha. Dessa forma, o ensaio de compressão avalia, essencialmente, a qualidade da rocha matriz, não refletindo de maneira direta o desempenho do agregado já fragmentado e incorporado ao concreto. Segundo Neville (1997), valores médios da ordem de 200 MPa são considerados indicativos de boa qualidade; contudo, diversos agregados amplamente utilizados apresentam resistências significativamente menores, da ordem de 80 MPa, sem prejuízo ao seu desempenho em aplicações práticas.

2.5.2.2 Resistência ao impacto

No contexto dos agregados, que são materiais granulares, a resistência ao impacto é um parâmetro crucial para avaliar a durabilidade e o desempenho em aplicações onde o material está sujeito a esforços abruptos, como em pavimentação, pisos industriais e estruturas expostas a cargas de impacto. Ela avalia a capacidade de um material de absorver energia e resistir à fratura quando submetido a cargas dinâmicas ou choques repentinos.

2.5.2.3 Resistência à abrasão

A abrasão consiste em um processo de desgaste superficial resultante do contato e do movimento relativo entre partículas, promovendo a remoção progressiva de material da superfície dos grãos. Esse fenômeno pode ser intensificado por ações de atrito, impacto e fricção, sendo particularmente relevante em aplicações nas quais os agregados estão sujeitos a solicitações repetitivas, como em pavimentações, camadas granulares e estruturas submetidas ao tráfego.

Na construção civil, a resistência à abrasão dos agregados é um fator determinante para a durabilidade e a segurança das estruturas, uma vez que o desgaste excessivo pode comprometer a integridade das camadas estruturais e a aderência entre os materiais constituintes. Com o objetivo de avaliar essa propriedade, são empregados ensaios laboratoriais capazes de reproduzir, de forma acelerada, as condições de serviço.

O método mais difundido para essa finalidade é o ensaio de Abrasão Los Angeles, que determina a resistência do agregado graúdo ao desgaste superficial quando submetido a ações combinadas de impacto e atrito. O ensaio tem como finalidade mensurar a capacidade do agregado de resistir à fragmentação, à desagregação e à desintegração sob condições que simulam o tráfego. No Brasil, esse procedimento é normatizado pela NBR 16974 (ABNT, 2022), sendo o método adotado nesta pesquisa, cujo detalhamento é apresentado na seção de metodologia.

2.6 Ensaios complementares para a caracterização mecânica dos agregados graúdos

Além da resistência à compressão e ao desgaste por abrasão, outras propriedades mecânicas podem ser avaliadas por meio de ensaios específicos que simulam diferentes tipos de solicitações a que os agregados são submetidos durante as fases construtiva e de serviço. Nesse contexto, apresentam-se a seguir os ensaios de resistência ao choque, por meio do aparelho Treton, e de resistência ao esmagamento, os quais fornecem parâmetros complementares para a caracterização do comportamento mecânico dos agregados graúdos, especialmente em aplicações rodoviárias.

2.6.1 Ensaio de Resistência ao choque: Treton

A resistência ao choque dos agregados graúdos está relacionada à capacidade do material de suportar solicitações dinâmicas associadas a impactos repetidos, que podem provocar a fragmentação dos grãos. Esse tipo de solicitação é comum durante as etapas de produção, transporte, lançamento e compactação dos agregados, bem como em estruturas submetidas a ações dinâmicas ao longo de sua vida útil.

A determinação dessa propriedade pode ser realizada por meio do ensaio de perda ao choque no aparelho Treton, conforme o Método de Ensaio nº 399 – "Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton" (DNER, 1999). O procedimento consiste na seleção de partículas que passam pela peneira de abertura nominal de 19 mm e ficam retidas na peneira de 16 mm, escolhidas de modo a apresentar forma aproximadamente cúbica, elevada angularidade e dimensões semelhantes. A massa da amostra é definida como cinquenta vezes o valor da massa específica aparente do agregado.

Os fragmentos selecionados são introduzidos em um cilindro de aço, sobre os quais é aplicado um martelo padronizado que cai livremente de uma altura de 39,37 cm, por dez impactos consecutivos. Após a aplicação dos choques, o material é peneirado em uma peneira de abertura de 1,7 mm, sendo determinada a massa do material retido. O índice de perda ao choque é calculado a partir da relação entre a massa retida na peneira e a massa inicial da amostra, conforme a Equação 3:

$$T(\%) = \frac{M_r}{M_i} \times 100 \qquad \text{Equação 3}$$

em que:

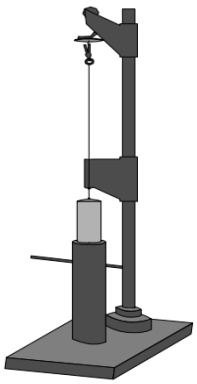
T é a perda ao choque (Treton), expressa em porcentagem;

Mr é a massa do material retido na peneira de 1,7 mm, em gramas;

Mi é a massa inicial da amostra, em gramas.

De modo a aumentar a confiabilidade dos resultados, o ensaio é normalmente realizado em duplicata, sendo adotada a média aritmética dos valores obtidos. A Figura 4 ilustra o aparelho de Treton.

Figura 4 - Representação gráfica do aparelho utilizado no ensaio Treton



Fonte: (DNER, 1998)

2.6.2 Resistência ao esmagamento

Em um primeiro momento, cabe destacar que a resistência ao esmagamento dos agregados graúdos pode ser determinada por diferentes procedimentos normatizados, a depender do campo de aplicação e do órgão regulamentador. A NBR 9938 (ABNT, 2013) estabelece um método voltado à caracterização geral dos agregados, sendo amplamente empregada em estudos de materiais e aplicações em concreto. Por sua vez, Método de Ensaio nº 197 (DNER, 1997), atualmente adotado no âmbito do DNIT, apresenta enfoque específico para obras rodoviárias, com procedimentos ajustados às condições de uso em pavimentação. Assim, embora ambos os ensaios avaliem a mesma propriedade mecânica, a resistência ao esmagamento, suas diferenças metodológicas refletem as distintas finalidades de aplicação, sendo, neste trabalho, priorizada a abordagem normativa compatível com a infraestrutura rodoviária.

O ensaio de resistência ao esmagamento é conduzido conforme o método DNER-ME 197/97 – "Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos". O procedimento consiste no preenchimento de um cilindro metálico com três camadas de agregados selecionados, de espessuras aproximadamente iguais, constituídas por partículas que passam pela peneira de 12,5 mm e ficam retidas na peneira de 9,5 mm. Cada camada é compactada mediante a aplicação de vinte e cinco golpes com uma haste de socamento padronizada.

Após o preenchimento e a compactação da amostra, aplica-se uma carga compressiva total de 400 kN, de forma contínua e uniforme, à razão de 40 kN por minuto, até que a carga máxima seja atingida. Finalizada essa etapa, o material é peneirado em uma peneira de abertura de 2,4 mm, sendo determinada a massa do material retido. A resistência ao esmagamento é calculada conforme a Equação 4:

$$R(\%) = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \qquad \text{Equação 4}$$

em que:

R é a resistência ao esmagamento do agregado, expressa em porcentagem;

Mi é a massa inicial da amostra seca, antes do ensaio, em gramas;

Mf é a massa do material retido na peneira de 2,4 mm, em gramas.

Esse ensaio fornece um indicativo da susceptibilidade do agregado à fragmentação sob elevadas cargas compressivas, sendo utilizado como parâmetro complementar na avaliação do desempenho mecânico dos agregados graúdos.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do presente estudo. A pesquisa foi estruturada em duas etapas principais: inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica, com o objetivo de fundamentar teoricamente os conceitos relacionados aos agregados graúdos e às suas propriedades físicas e mecânicas; em seguida, foram conduzidos ensaios experimentais de caracterização, compreendendo a análise granulométrica e o ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles, aplicados a amostras de agregados graúdos provenientes de diferentes regiões do Estado de Goiás.

Além da descrição dos procedimentos normativos empregados, esta seção apresenta registros fotográficos das amostras analisadas e das principais etapas experimentais, de modo a proporcionar maior clareza e reprodutibilidade dos métodos adotados.

3.1 Pesquisa Bibliográfica

A revisão bibliográfica que fundamenta este trabalho teve como finalidade reunir, analisar e consolidar os principais conceitos técnicos e científicos relacionados aos agregados graúdos, suas propriedades físicas e mecânicas, bem como sua aplicabilidade em obras de pavimentação rodoviária. Para tanto, foram consultadas obras clássicas e publicações técnicas reconhecidas na área da geotecnia, da engenharia de pavimentos e da tecnologia dos materiais de construção, assegurando consistência teórica e alinhamento com o estado da arte.

A seleção das referências priorizou publicações científicas dos últimos cinco anos, com o objetivo de incorporar informações atualizadas e minimizar o uso de dados defasados. No entanto, quando necessário, foram incluídas obras consagradas e normas técnicas fundamentais, cuja relevância permanece atual no contexto da engenharia civil.

Para a condução dos ensaios experimentais, foram consultadas normas técnicas nacionais vigentes, as quais estabeleceram os procedimentos, os equipamentos e os critérios de avaliação empregados nos ensaios de granulometria e de desgaste por abrasão Los Angeles.

As fontes bibliográficas foram obtidas por meio das bases de dados Google Acadêmico, Web of Science e Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), assegurando o acesso a periódicos científicos, artigos técnicos, dissertações, teses e documentos normativos relevantes ao tema da pesquisa.

3.2 Ensaios Laboratoriais

Os ensaios experimentais foram conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Solos, Pavimentação e Materiais de Construção do Instituto Federal de Goiás (IFG), Câmpus Goiânia. As atividades laboratoriais abrangeram a caracterização física dos agregados graúdos e a avaliação de seu desempenho mecânico, conforme os procedimentos normativos aplicáveis, com ênfase nos ensaios de granulometria e de desgaste por abrasão Los Angeles.

3.2.1 Seleção e Identificação dos Materiais

Neste estudo, foram analisadas quinze (15) amostras de agregados graúdos provenientes de diferentes regiões do Estado de Goiás, previamente disponibilizadas no laboratório. A seleção das amostras buscou contemplar uma ampla diversidade geológica e geográfica, de modo a garantir representatividade regional e permitir uma análise comparativa do desempenho dos materiais frente às solicitações mecânicas avaliadas.

As amostras foram coletadas e identificadas conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 16915 (ABNT, 2021), assegurando a rastreabilidade e a padronização das informações referentes à origem e às características dos materiais. Cada amostra foi devidamente catalogada com informações relativas à designação do material, origem geográfica, ponto de coleta, massa da amostra, local e data da amostragem, bem como o responsável pela coleta. O Quadro 1 apresenta a identificação das amostras analisadas, origem e caracterização litológica predominante.

Quadro 1 - Origem e Classificação das amostras

(continua)

Nº da Amostra	**Origem / Localização**	**Classificação e Caracterização Litológica**
01	Pedreira Anápolis, Anápolis – GO	Agregado graúdo (brita 1) de rocha ígnea do grupo gnaisse, coloração cinza claro
02	Pedreira Britago, Santa Bárbara – GO	Agregado graúdo (brita 1), rocha ígnea gnaisse, proveniente da região de Jaraguá
03	Pedreira Jaraguá, Jaraguá – GO	Rocha metamórfica do tipo micaxisto, coloração cinza, com partículas predominantemente lamelares
04	Pedreira 01, BR-242 (trecho Paranã–Peixe) Estaca 915	Agregado gnáissico com presença de micaxisto
05	Pedreira 02, Coordenadas 173º 972’29” e 86º 25921’.20”	Agregado gnáissico com presença de micaxisto

(conclusão)

Nº da Amostra	Origem / Localização	Classificação e Caracterização Litológica
06	Padre Bernardo, entorno do Distrito Federal	Rocha basáltica de coloração escura, com partículas lamelares e cúbicas
07	Pedreira Panamá, GO-320 (Goiatuba–BR-153)	Rocha ígnea basalto, coloração cinza escura
08	Pedreira Santa Tereza, GO-244, Porangatu – GO	Agregado graúdo faixa 1, rocha granítica ígnea, coloração cinza claro
09	Pedreira Jaraguá, GO-460, Jaraguá – GO	Agregado graúdo faixa 1, rocha ígnea do grupo gnaisse
10	GO-568, trecho Indiara–Palmeiras de Goiás – GO	Rocha metamórfica do tipo mármore, coloração branca com partículas alongadas
11	Pedreira próxima a Pontalina – GO	Rocha magmática do grupo gnaisse, com partículas lamelares e cúbicas
12	Pedreira Boa Vista, trecho Uruaçu–Apuí – GO	Rocha metamórfica do tipo micaxisto, coloração cinza escura
13	Pedreira de Calcário, Uruaçu – GO	Rocha metamórfica do tipo micaxisto, coloração cinza escura
14	Mina Pirineus, GO-435 (BR-414–BR-080)	Rocha calcária de coloração cinza claro, com predominância de partículas cúbicas
15	Fazenda Santa Maria, GO-419 (Itumbiara–Buriti Alegre)	Rocha basáltica de coloração escura, com partículas lamelares e cúbicas

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Observa-se, a partir do Quadro 1, que as amostras analisadas apresentam significativa diversidade litológica, rochas ígneas (basaltos e granitos), metamórficas (gnaisses, micaxistos e mármores) e sedimentares (calcários). Essa heterogeneidade reflete a complexidade geológica do Estado de Goiás, permitindo avaliar o desempenho de agregados graúdos provenientes de diferentes contextos geológicos.

3.2.2 Preparação das amostras para o ensaio de Granulometria

Inicialmente, as amostras de agregados graúdos foram retiradas dos sacos de acondicionamento, apresentando massa total aproximada de 50 kg por amostra. Em seguida, os materiais foram distribuídos uniformemente sobre bandejas metálicas, de modo a facilitar a exposição ao ambiente e garantir a homogeneidade do processo de secagem. Esse procedimento

teve como objetivo a eliminação da umidade livre presente nos agregados. A Figura 5 ilustra as principais etapas do processo de secagem natural das amostras.

Figura 5 - Preparação das amostras: Secagem em bandeja metálica



Fonte: Acervo do Autor (2025)

3.2.3 Análise Granulométrica

Concluída a etapa de secagem, as amostras foram submetidas ao ensaio de granulometria, conduzido conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022). Esse ensaio tem por objetivo a determinação da distribuição granulométrica dos agregados graúdos. O procedimento experimental consistiu no peneiramento do material por meio de um conjunto padronizado de peneiras, com aberturas nominais variando de 75,0 mm a 2,36 mm, organizadas em ordem decrescente.

Conforme estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2022), são utilizadas duas séries de peneiras: uma principal e outra auxiliar, com aberturas intermediárias, para auxiliar na construção da curva granulométrica. O quadro 2 apresenta a série de peneiras mais utilizadas no Brasil para a análise granulométrica de agregados na construção civil.

Quadro 2 – Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal)

Série Normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm

-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: ABNT NBR 16974:2022

Após o processo de peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram pesadas. A Figura 6 ilustra as etapas do ensaio de granulometria, destacando o conjunto de peneiras empregado e o procedimento de pesagem das frações retidas.

Figura 6 - Ensaio granulométrico: a) peneiramento e b) pesagem das frações retidas

(a) (b)



Fonte: Acervo do Autor (2025)

Encerrada a pesagem das frações retidas em cada peneira, os agregados foram enquadrados em suas devidas faixas de graduação, classificadas de A a G, conforme os critérios estabelecidos nas normas técnicas vigentes. A partir dessa classificação, procedeu-se à definição da carga abrasiva e da massa da amostra correspondente a cada ensaio, em conformidade com os procedimentos prescritos pela NBR 16974 (ABNT, 2022) e pelo Método de Ensaio nº 451 (DNIT, 2024).

A Tabela 3 apresenta a correlação entre as categorias de graduação dos agregados, as cargas abrasivas (números de esferas de aço), e a quantidade de massa da carga dos agregados, em gramas, utilizadas nos ensaios.

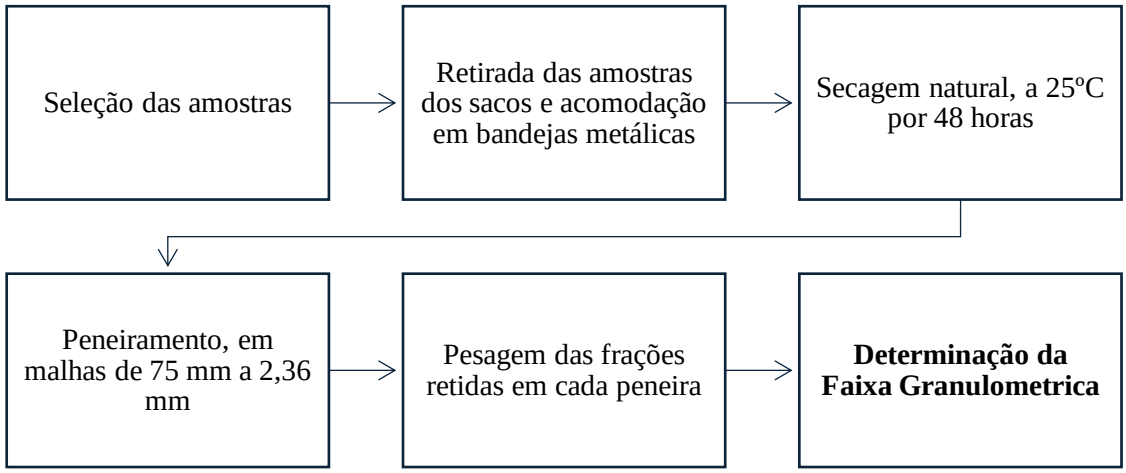
Tabela 3 - Relação entre a graduação, determinação da carga abrasiva e massa amostral

Graduação	Número de esferas	Massa da carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 300 ± 25
D	6	2 500 ± 25
E	12	5 000 ± 25
F	12	5 000 ± 25
G	12	5 000 ± 25

Fonte: Adaptado de NBR 16974 (ABNT, 2022)

A fim de proporcionar uma melhor compreensão das etapas envolvidas no Ensaio de Granulometria, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do Ensaio de Granulometria



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.4 Preparação para a Execução do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles

Dando sequência à etapa experimental, após a conclusão do ensaio de granulometria, procedeu-se à preparação das amostras destinadas ao ensaio de resistência ao desgaste e ao impacto, por meio do método de Abrasão Los Angeles. Todos os procedimentos foram conduzidos em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela NBR 16974 (ABNT, 2022) e pelo Método de Ensaio nº 451 (DNIT, 2024).

Inicialmente, as frações granulométricas previamente selecionadas foram submetidas a um processo de lavagem criteriosa, com o objetivo de remover partículas pulverulentas, materiais finos aderidos e impurezas superficiais que pudessem interferir nos resultados do ensaio. Essa etapa é fundamental para assegurar que o desgaste observado durante o ensaio seja decorrente exclusivamente das interações mecânicas entre os grãos e a carga abrasiva, e não influenciado pela presença de finos aderidos. As etapas de limpeza e preparação inicial das amostras estão ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Preparo para o Ensaio de Abrasão Los Angeles: limpeza para posterior encaminhamento à estufa



Fonte: Acervo do Autor (2025)

Após a lavagem, as amostras foram submetidas à secagem em estufa com controle térmico, mantida à temperatura de 105 ± 5 °C, por um período mínimo de 24 horas, conforme prescrito pelas normas técnicas. Concluída a secagem, as amostras foram cuidadosamente pesadas em balança de precisão. Com base nessas medições, foram então preparadas as composições de material correspondentes a cada faixa granulométrica definida anteriormente, respeitando as massas amostrais e a carga abrasiva especificadas em norma. As etapas de secagem e pesagem das amostras encontram-se ilustradas na Figura 9.

Figura 9 - Preparo para o Ensaio de Abrasão Los Angeles: a) secagem da amostra e b) pesagem do material seco

(a) (b)



Fonte: Acervo do Autor (2025)

Adicionalmente, verificou-se se a quantidade de material disponível atendia aos requisitos mínimos de massa exigidos para a execução adequada do ensaio, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa mínima amostral

Peneiras com abertura mm		**Amostra - Massa parcial (g)**						
Material		**Graduação**						
Passa	Retido	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2 500 ± 50		
63	50					2 500 ± 50		
50	37,5					5 000 ± 50	5 000 ± 50	
37,5	25	1 250 ± 25					5 000 ± 25	5 000 ± 25
25	19	1 250 ± 25						5 000 ± 25
19	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10					
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10					
9,5	6,3			2 500 ± 10				
6,3	4,75			2 500 ± 10				
4,75	2,36				5 000 ± 10			
Massas totais (g)		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	10 000 ± 100	10 000 ± 75	10 000 ± 50
Número de rotações		500	500	500	500	1 000	1 000	1 000
Carga Abrasiva		12	11	8	6	12	12	12

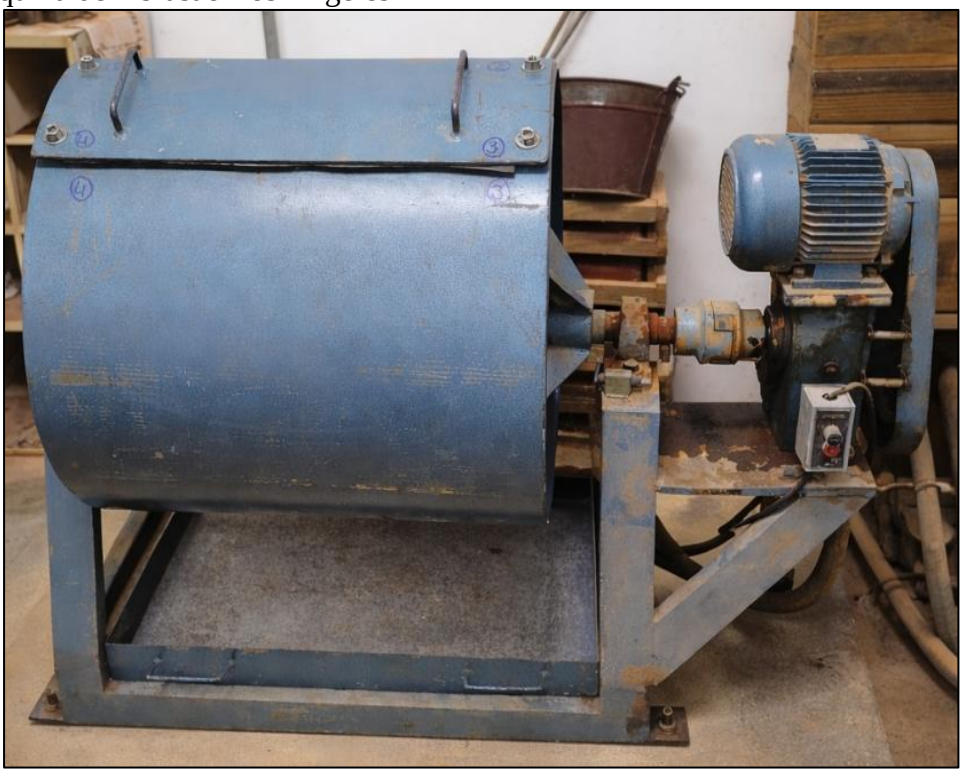
Fonte: Adaptado de NBR 16974 (2022)

A Tabela 4 apresenta, após a classificação da amostra em sua respectiva faixa de graduação, a massa total da amostra, a carga abrasiva, e o número de rotações a serem programadas na máquina de Abrasão Los Angeles, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 16974 (ABNT, 2022).

3.2.5 Ensaio de Abrasão Los Angeles

O ensaio de determinação do desgaste por Abrasão Los Angeles foi realizado utilizando-se a Máquina de Abrasão Los Angeles, ilustrada na Figura 10, equipamento empregado em todos os ensaios desta pesquisa.

Figura 10 - Máquina de Abrasão Los Angeles



Fonte: Acervo do Autor (2025)

O equipamento, disponível no Laboratório de Mecânica dos Solos, Pavimentação e Materiais de Construção do Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, é destinado especificamente à avaliação da resistência ao desgaste de agregados graúdos. A máquina é composta por um tambor cilíndrico fabricado em aço reforçado, acompanhado de um conjunto de 12 esferas metálicas, que atuam como carga abrasiva durante o ensaio.

O sistema de funcionamento baseia-se na rotação contínua do tambor, acionada por um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade, contando ainda com um dispositivo automático de desligamento ao término do número de rotações previamente programado. As principais características técnicas do equipamento são apresentadas a seguir:

- **Alimentação elétrica:** Trifásica 220/380 V, modelo B 90S4 nº 8164 A;
- **Motor:** Potência de 2 cv, rotação de 1720 rpm, frequência de 60 Hz;
- **Dimensões:** 1300 × 1120 × 730 mm (largura × altura × profundidade);
- **Peso aproximado:** 455 kg.

Antes do início de cada ensaio, foi realizada a limpeza completa do interior do tambor, assegurando a ausência de resíduos de ensaios anteriores. Em seguida, o tambor foi carregado com a massa amostral seca (m) e com a respectiva carga abrasiva, composta pelas esferas de aço, conforme a faixa granulométrica analisada. Essas etapas são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 - a) Encaminhamento ao tambor e b) Incorporação das cargas abrasivas

(a) (b)



Fonte: Acervo do Autor (2025)

Após o correto acondicionamento do material, o tambor foi vedado de forma segura, prevenindo perdas de material durante a rotação. O ensaio foi então iniciado, com o tambor operando a uma velocidade controlada entre 30 e 33 rotações por minuto, conforme estabelecido em norma. O número total de rotações foi definido de acordo com a faixa de graduação do agregado ensaiado.

Ao término do número de rotações programado, o equipamento foi desligado, e o material ensaiado foi retirado do tambor e submetido ao peneiramento em peneira com abertura de 1,7 mm, e então, a fração retida na peneira foi novamente lavada. A Figura 12 ilustra essa etapa do procedimento.

Figura 12 - a) Peneiramento em malha de 1,7 mm e b) lavagem do material retido.

(a) (b)



Fonte: Acervo do Autor (2025)

Posteriormente à lavagem das porções retidas, as amostras foram submetidas a um novo ciclo de secagem em estufa, sob as mesmas condições anteriormente descritas. Após a secagem, os materiais foram pesados, sendo essa massa registrada como m_1. A Figura 13 apresenta visualmente essa etapa do procedimento.

Figura 13 - Ensaio de Abrasão Los Angeles: a) Secagem final em estufa e b) pesagem final

(a) (b)



Fonte: Acervo do Autor (2025)

3.2.6 Determinação do Índice de Abrasão

A determinação da perda de massa decorrente do processo de abrasão foi realizada por meio do cálculo do índice de Abrasão Los Angeles, expresso em percentual, conforme a equação a seguir:

$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100$$

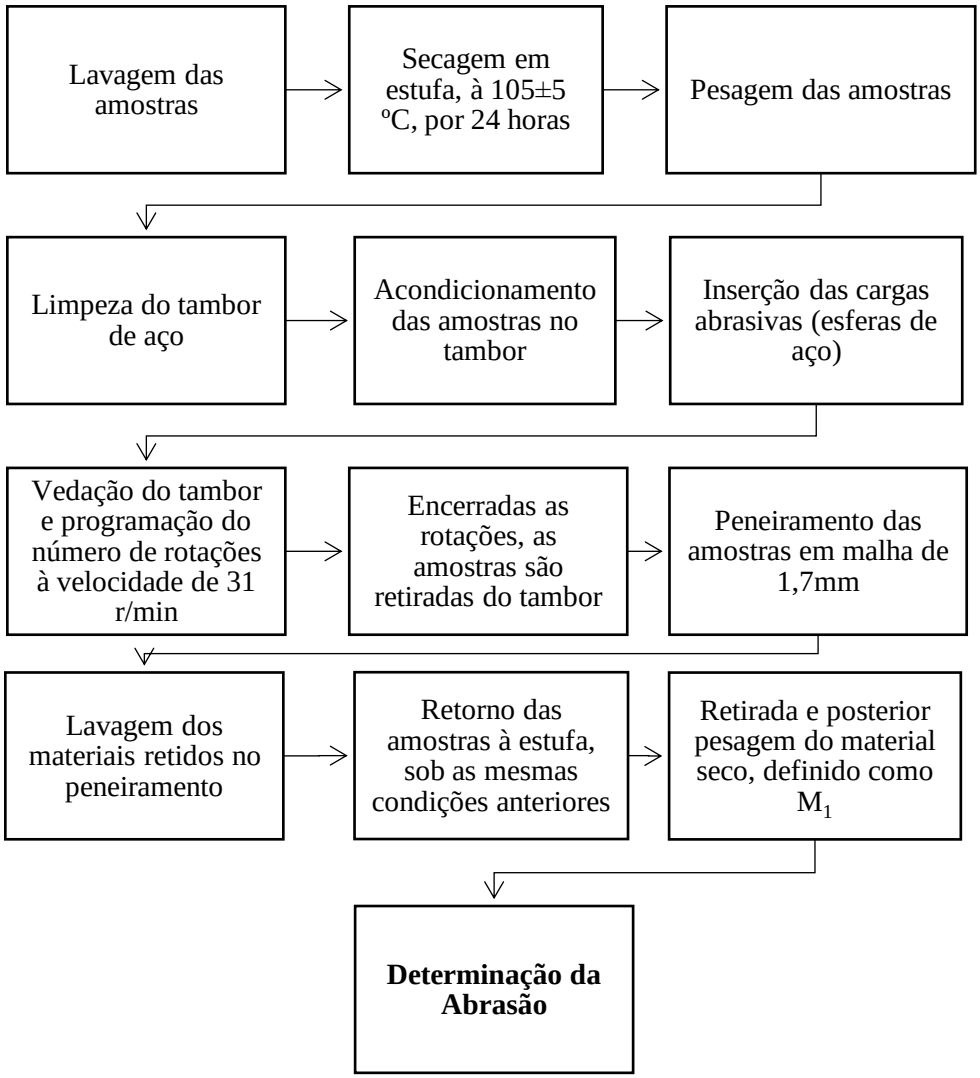
Onde:

- **P** representa a perda de massa do agregado, em porcentagem (%);
- **m** corresponde à massa inicial da amostra seca, em gramas (g);
- **m_1** refere-se à massa final da amostra retida na peneira de abertura 1,7 mm, após o ensaio.

Esse índice expressa quantitativamente a resistência do agregado ao desgaste mecânico, permitindo avaliar sua durabilidade frente às solicitações de atrito e impacto, conforme preconizado pelo método de Abrasão Los Angeles.

Com o intuito de facilitar a compreensão do procedimento experimental, foi elaborado um fluxograma representativo, apresentado na Figura 14, que sintetiza todas as etapas envolvidas no ensaio, desde a lavagem e secagem das amostras até o cálculo final do índice de abrasão.

Figura 14 - Fluxograma do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4. RESULTADOS

Concluídas as etapas de caracterização granulométrica e a execução do ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles, apresentam-se, neste capítulo, os resultados obtidos para os agregados graúdos analisados. Inicialmente, são discutidos os valores de referência normativos adotados como critérios de avaliação da resistência ao desgaste por abrasão, os quais serviram de base para a comparação com os resultados experimentais. Em seguida, são apresentados os resultados da caracterização granulométrica, utilizados para o enquadramento das amostras nas faixas de graduação e para a definição das condições de ensaio.

Os percentuais de perda por abrasão obtidos experimentalmente foram confrontados com os limites máximos admissíveis estabelecidos em normas técnicas nacionais, aplicáveis a materiais destinados à pavimentação rodoviária e à construção civil. Esses limites normativos encontram-se sistematizados no Quadro 3, permitindo uma análise comparativa direta entre os valores prescritos e os resultados obtidos nesta pesquisa.

4.1 Limites Normativos de Abrasão para Agregados Graúdos

O Quadro 3 apresenta os limites máximos de desgaste por abrasão estabelecidos por diferentes normas técnicas brasileiras, considerando distintas aplicações dos agregados graúdos, tais como pavimentação asfáltica, camadas de base e estabilização granulométrica, concretos betuminosos e concretos de cimento Portland. Esses valores normativos foram adotados como parâmetros de referência para a avaliação do desempenho dos materiais ensaiados nesta pesquisa.

Quadro 3 - Limites Normativos para o Ensaio de Abrasão Los Angeles

Norma	**Aplicação do agregado**	**Limite máximo de abrasão (%)**
DNER-EM 037/97	Agregado graúdo para concreto de cimento	< a 50%
DNIT 031/2024	Pavimentação-Concreto asfáltico	≤ a 50%
DNIT 147/2012	Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo	≤ a 40%
NBR 12948/1993	Materiais para concreto betuminoso usinado a quente	< a 40%
NBR 7211/2022	Agregados para concreto	< a 50%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2 Caracterização Granulométrica Aplicada ao Ensaio de Abrasão Los Angeles

O ensaio de granulometria realizado neste estudo teve como objetivo principal identificar a faixa de graduação correspondente a cada amostra de agregado graúdo, de modo a possibilitar seu correto enquadramento para a execução do ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles. O Quadro 4 apresenta o enquadramento granulométrico das amostras analisadas, bem como os parâmetros adotados para a realização do ensaio de abrasão, tais como número e massa das esferas que compõem a carga abrasiva, bem como o número de ciclos adotado no ensaio..

Quadro 4 - Definição de dados utilizados em etapa anterior ao ensaio de abrasão

Número da Amostra	Faixa de Graduação	Carga Abrasiva (número de esferas)	Massa das Esferas (g)	Número de Ciclos
01	B	11	4570	500
02	B	11	4596	500
03	B	11	4565	500
04	C	8	3325	500
05	C	8	3325	500
06	B	11	4575	500
07	B	11	4565	500
08	B	11	4596	500
09	B	11	4596	500
10	B	11	4565	500
11	B	11	4570	500
12	B	11	4565	500
13	B	11	4565	500
14	B	11	4575	500
15	B	11	4575	500

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O enquadramento das amostras nas faixas de graduação B e C está diretamente relacionado ao tamanho predominante das partículas constituintes dos agregados graúdos analisados. Conforme os critérios estabelecidos pelas normas técnicas que regem o ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles, a Faixa B é caracterizada por agregados de maior dimensão média, com predominância de partículas retidas em peneiras de abertura mais elevada, enquanto a Faixa C corresponde a agregados de menor dimensão média, com maior concentração de partículas em peneiras de menor abertura.

4.3 Apresentação dos Resultados de Abrasão Los Angeles

Neste tópico, serão inicialmente apresentados os dados brutos, contemplando, para cada amostra, a massa inicial seca, a massa retida na peneira de 1,7 mm, a massa passante nessa peneira e o percentual de perda por abrasão. Os dados completos de cada ensaio encontram-se organizados no Quadro 5. Destaca-se que todos os ensaios foram realizados em duplicata, sendo adotado, para fins de análise e comparação normativa, o valor correspondente

à média aritmética da porcentagem de abrasão obtida para cada amostra. Ressalta-se, por fim, que os resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles são expressos com aproximação de 1% (DNIT, 1998).

Quadro 5 - Dados brutos do resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles

Número da amostra	Massa inicial da amostra (g)	Massa retida na peneira 1,7 mm (g)	Massa que passa na peneira 1,7 mm (g)	Porcentagem de Abrasão (%)	Porcentagem Média (%)
01	5003	4269,00	734,00	14,7	14
	5000	4300,00	700,00	14,0	
02	5002	3539,00	1463,00	29,2	30
	5000	3446,00	1554,00	31,1	
03	5000	3759,00	1241,00	24,8	25
	5000	3692,00	1308,00	26,2	
04	5000	2629,00	2371,00	47,4	47
	5000	2672,00	2328,00	46,6	
05	5000	2730,00	2270,00	45,4	45
	5000	2760,00	2240,00	44,8	
06	5004	4260,08	743,92	14,9	15
	5003	4267,85	735,15	14,7	
07	5000	4470,00	530,00	10,6	10
	5000	4493,00	507,00	10,1	
08	5000	3493,00	1507,00	30,1	27
	5000	3759,00	1241,00	24,8	
09	5002	3446,00	1556,00	31,1	30
	5002	3539,00	1463,00	29,2	
10	5000	2433,00	2567,00	51,3	54
	5000	2178,00	2822,00	56,4	
11	5000	3812,00	1188,00	23,8	24
	5000	3749,00	1251,00	25,0	
12	5000	4125,00	875,00	17,5	18
	5000	4075,00	925,00	18,5	
13	5000	3550,00	1450,00	29,0	31
	5000	3400,00	1600,00	32,0	
14	5001	3557,00	1444,00	28,9	29
	5000	3567,21	1432,79	28,7	
15	5004	4025,03	978,97	19,6	20
	5003	4020,61	982,39	19,6	

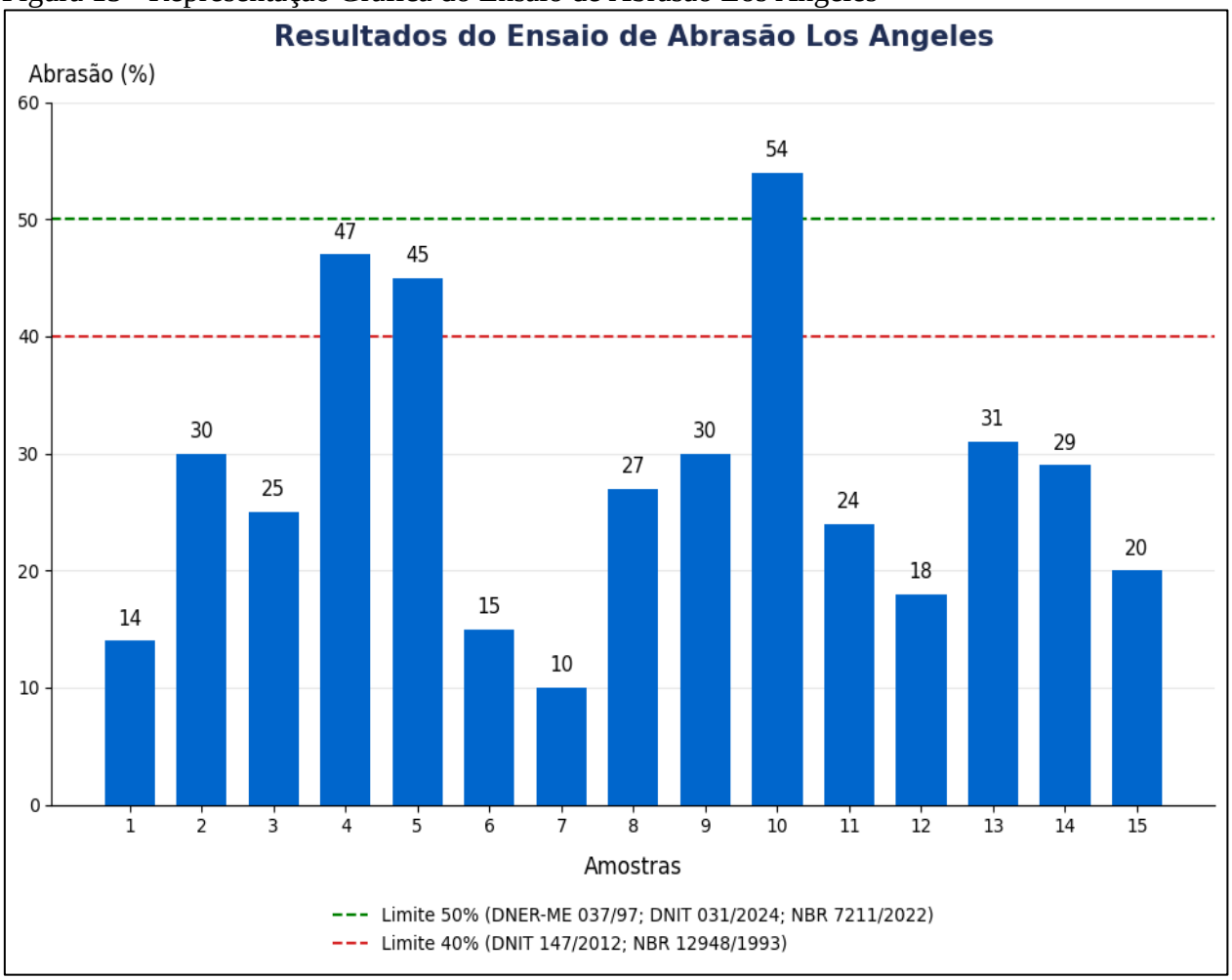
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com o objetivo de facilitar a interpretação comparativa dos resultados obtidos, os valores percentuais de desgaste por abrasão apresentados no Quadro 5 foram convertidos em representação gráfica, conforme ilustrado na Figura 15. Nessa representação, os resultados experimentais de cada amostra são comparados aos limites máximos admissíveis de abrasão estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis a agregados destinados à pavimentação e à construção civil.

Ressalta-se que os valores de referência indicados no gráfico correspondem àqueles previamente apresentados no Quadro 3, no item 4.1, no qual se encontram sintetizados os critérios normativos adotados neste estudo para a avaliação do desempenho dos agregados graúdos quanto à resistência ao desgaste por abrasão.

Considerando que os limites máximos de perda por abrasão estabelecidos pelas diferentes normas técnicas analisadas apresentam valores coincidentes ou muito próximos entre si, optou-se pela consolidação de todos os resultados experimentais em uma única representação gráfica. Dessa forma, o gráfico reúne, de maneira sintética, os percentuais médios de abrasão obtidos para as quinze amostras analisadas, bem como os respectivos valores de referência normativos. Essa abordagem possibilita uma visualização comparativa mais clara e objetiva do desempenho dos agregados avaliados, configurando-se como o principal instrumento para a interpretação dos resultados do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles.

Figura 15 - Representação Gráfica do Ensaio de Abrasão Los Angeles



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise dos resultados do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles indica que a maioria das amostras de agregados graúdos apresentou desempenho satisfatório, uma vez que os percentuais médios de perda por abrasão permaneceram abaixo dos limites máximos estabelecidos pelas normas técnicas adotadas neste estudo. Esse comportamento evidencia, de modo geral, a adequação dos materiais avaliados para aplicações em pavimentação, sob o ponto de vista do critério de resistência ao desgaste por abrasão.

Entretanto, verificou-se que três amostras (04, 05 e 10) ultrapassaram os valores de referência normativos conforme mostra o grafico da figura 15, sendo, portanto, não recomendadas para utilização em camadas de revestimento submetidas a elevadas solicitações mecânicas e abrasivas. Dentre essas, destaca-se a amostra 10, que apresentou o maior percentual médio de abrasão (54%), superando inclusive o limite mais permissivo de 50%, ja as demais superou apenas o limite de 40%.

A amostra 10 foi coletada na GO-568, trecho entre Indiara e Palmeiras de Goiás, sendo classificada como uma rocha metamórfica do tipo mármore, de coloração branca, com presença pontual de partículas cinza-claras e predominância de partículas alongadas. O elevado desgaste observado pode ser associado, principalmente, à baixa dureza da calcita, mineral dominante no mármore, a qual apresenta menor resistência à abrasão quando comparada a minerais silicáticos, como quartzo e feldspatos. Ademais, a textura orientada e o formato alongado das partículas favorecem planos de fraqueza, potencializando a fragmentação durante o ensaio. A presença de partículas de coloração distinta sugere ainda possíveis impurezas mineralógicas, que podem contribuir para a redução da resistência mecânica do agregado.

No caso das amostras 04 e 05, ambas classificadas como agregados de gnaisse com presença de micaxisto, os resultados também indicaram valores de abrasão superiores aos limites normativos. Essas amostras pertencem à Faixa Granulométrica C, caracterizada por agregados de menor dimensão máxima nominal em comparação à Faixa B. Embora agregados de menor dimensão máxima nominal possam, em determinados contextos, apresentar melhor acomodação e menor suscetibilidade a impactos pontuais, os resultados obtidos demonstram que a redução do tamanho das partículas, isoladamente, não constitui garantia de maior resistência ao desgaste.

O desempenho insatisfatório das amostras 04 e 05 pode estar associado à composição mineralógica do gnaisse, especialmente à presença significativa de minerais micáceos, como biotita e muscovita. Conforme destacado por Lagerblad et al. (2014), a ocorrência expressiva desses minerais tende a conferir menor resistência mecânica ao agregado, uma vez que promove

a formação de planos preferenciais de ruptura, facilitando a fragmentação e a desagregação do material quando submetido a esforços abrasivos.

Esse comportamento é corroborado pela análise da amostra 01, que, embora pertença ao mesmo grupo litológico das amostras reprovadas (04 e 05), apresentou o segundo melhor desempenho no ensaio de abrasão, possivelmente em razão da menor presença ou ausência significativa de minerais micáceos em sua composição. Assim, mesmo estando enquadradas em uma faixa granulométrica de menor dimensão (Faixa C), as amostras 04 e 05 apresentaram elevado desgaste, reforçando que a mineralogia e a textura da rocha de origem exercem influência mais determinante sobre a resistência ao desgaste do que o tamanho dos grãos.

Esse comportamento contrasta com o observado na amostra 10, enquadrada na Faixa Granulométrica B, composta por agregados de maior dimensão. Apesar do maior tamanho das partículas, o material apresentou o pior desempenho entre todas as amostras analisadas, evidenciando que agregados maiores não são necessariamente mais resistentes. Tal constatação reforça a importância de uma avaliação integrada, que considere não apenas a granulometria, mas também a natureza mineralógica, a forma das partículas e a estrutura interna da rocha.

Do ponto de vista de aproveitamento técnico, os agregados das amostras 04, 05 e 10 podem ter seu uso condicionado a estratégias mitigadoras, tais como: a redução da energia de compactação, mediante a utilização de rolos compactadores de menor peso e a diminuição do número de passadas, de modo a minimizar a degradação dos grãos durante a execução, o ajuste criterioso do teor de ligante betuminoso, visando aumentar a coesão da mistura e reduzir a exposição direta dos agregados às ações abrasivas, sem comprometer a estabilidade do revestimento, ou ainda, o direcionamento desses materiais para camadas menos solicitadas.

Observa-se que os agregados provenientes de rochas ígneas, como basaltos e granitos, bem como de determinadas rochas metamórficas, como gnaisses com menor teor de minerais micáceos, apresentaram menores percentuais de desgaste por abrasão. Destaca-se, nesse contexto, a amostra 07, composta por basalto, a qual apresentou o menor valor de perda por abrasão, configurando-se como o material de melhor desempenho mecânico. Segundo Schiavon (2007), o basalto é caracterizado por elevada dureza, alta resistência à abrasão e boa estabilidade frente a solicitações mecânicas intensas, sendo ideal para ser empregado em aplicações que exigem elevado desempenho, como pavimentação rodoviária, ferrovias e concretos estruturais.

Considerando os limites estabelecidos pelas normas técnicas adotadas neste estudo, a maioria das amostras apresentou desempenho satisfatório quanto à resistência ao desgaste por abrasão. Os resultados indicam o potencial de utilização dos agregados provenientes de

pedreiras regionais em pavimentos e concretos, desde que sua aplicação seja definida de acordo com o limite normativo correspondente e com os demais requisitos técnicos aplicáveis.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a maior parte dos agregados graúdos analisados apresentou desempenho satisfatório quanto à resistência ao desgaste por abrasão, com percentuais de perda de massa inferiores aos limites máximos estabelecidos pelas normas técnicas adotadas, compreendidos entre 40% e 50%, conforme o tipo de aplicação prevista.

Entretanto, verificou-se que as amostras 04, 05 e 10 apresentaram valores médios de abrasão superiores aos limites normativos, inviabilizando sua aplicação em camadas de revestimento submetidas a elevadas solicitações mecânicas, como o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

Os resultados também evidenciam que o enquadramento granulométrico, embora relevante para a definição das condições de ensaio, não constitui, isoladamente, um fator determinante da resistência ao desgaste, reforçando a necessidade de uma avaliação integrada que considere, além da granulometria, a mineralogia, a textura e a forma das partículas. Nesse contexto, agregados de origem ígnea, especialmente basaltos, apresentaram desempenho superior, confirmando sua reconhecida adequação para aplicações que exigem elevada resistência mecânica.

Apesar de algumas amostras não atenderem aos limites máximos de abrasão para aplicações mais exigentes, os resultados indicam que esses materiais não devem ser necessariamente descartados, podendo ser empregados de forma alternativa, como em camadas menos solicitadas de pavimentos, em bases e sub-bases, ou ainda como agregados provenientes de resíduos da construção civil (RCCs) devendo ser condicionado ao atendimento das especificações técnicas aplicáveis e à realização de ensaios complementares.

Por fim, o estudo reforça a importância do Ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles, analisado de forma integrada à granulometria e à mineralogia, como ferramenta fundamental na seleção de materiais para obras de infraestrutura. Os resultados contribuem para a ampliação do conhecimento técnico sobre os agregados graúdos de pedreiras regionais e fornecem subsídios para decisões mais seguras, eficientes e sustentáveis em obras de pavimentos, especialmente no contexto do Estado de Goiás.

REFERÊNCIAS

AGASNALLI, C. et al. Integrated assessment of granite and basalt rocks as building materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, n. 8, p. 5388-5391, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2024.

_____. **NBR 12948**: Materiais para concreto betuminoso usinado a quente. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 16915**: Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16974**: Agregados – Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR NM 26**: Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 27**: Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2022.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 812-1**: Methods for determination of particle size and shape. London: BSI, 1975.

CAVALCANTE, D. G. et al. Visual Survey of pathologies in city of Manaus-AM. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 19, p. 77-87, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 451/2024**: Agregados — determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento "Los Angeles". Brasília, 2024.

_____. **ME 037/97**: Agregado graúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **ME 196/98**: Agregados - determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **031/2024 – ES**: Pavimentação – Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2024.

_____. **147/2012 – ES**: Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo: Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

FARIAS, M. M. de; PALMEIRA, E. M. Agregados para a Construção Civil. *In*: **Materiais de Construção Civil 1**. Brasília: Universidade de Brasília (UnB), [s.d.]. Cap. 16.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas**. Rio de Janeiro: IBP, 2021. Disponível em: https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/2021-ebook-ibp-informacoes-basicas-sobre-materiais-asfalticos.pdf. Acesso em: 28 set. 2024.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para construção civil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008 . Acesso em: 30 set. 2024.

LAGERBLAD, B.; GRAM, H.-E.; WESTERHOLM, M. Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 121–126, 2014.

LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de (ed.). **Manual de agregados para construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

_____. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1971.

_____. **Concreto de cimento Portland**. 10. ed. atual. Porto Alegre: Globo, 1983.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, 1993.

SANTOS, W. E. **Propriedades mecânicas de concretos produzidos com areia natural e areia artificial com uso de aditivo polifuncional**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021.

SCHIAVON, M. A; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Cerâmica**, v. 53, p. 212-217, 2007.

TEIXEIRA, L. P.; CARVALHO, F. M. A. A construção civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, n. 109, 2005.