



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Hernane Junio de Sena Diniz

Caracterização mineralógica e tecnológica de agregados gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto

Ouro Preto

2026

Hernane Junio de Sena Diniz

Caracterização mineralógica e tecnológica de agregados gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto

Trabalho Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheiro Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Orientador: Dr. Marcelo Barbosa de Andrade

Coorientador: Dr. Guilherme J. Brigolini Silva

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D585c Diniz, Hernane Junio de Sena.

Caracterização mineralógica e tecnológica de agregados gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto. [manuscrito] / Hernane Junio de Sena Diniz. - 2026.

67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Barbosa de Andrade.

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Agregados (Materiais de construção) - Agregados graúdos. 2. Raios X - Difração. 3. Rietveld, Método de. 4. Rochas metamórficas - Gnaisse. 5. Rochas - Testes - Abrasivos. 6. Determinação mineralógica. I. Andrade, Marcelo Barbosa de. II. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 642

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Hernane Junio de Sena Diniz

Caracterização mineralógica e tecnológica de agregados gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 20 de julho de 2026

Membros da banca

Dr. Marcelo Barbosa de Andrade - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. José Agenor Carvalho Junior - Universidade Federal de Ouro Preto

O Dr. Marcelo Barbosa de Andrade, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Barbosa de Andrade, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/07/2026, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1147108** e o código CRC **D385ED13**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, de modo especial, ao meu orientador, professor Marcelo, por sua disponibilidade e atenção durante toda a minha trajetória acadêmica, e por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa científica.

Agradeço ao Laboratório de Crescimento e Caracterização de Materiais Cristalinos por possibilitar a realização dessa pesquisa e ao coordenador, professor Vinícius.

Agradeço ao Grupo de Pesquisa RECICLOS por possibilitar a realização de alguns ensaios e a utilização dos seus laboratórios.

Agradeço ao Instituto Tecnológico Vale pelo apoio à pesquisa e financiamento das ponteiros utilizadas, o que permitiu a realização dos ensaios de abrasividade.

De modo particular, agradeço aos meus pais. Sem eles, nada disso seria possível. Agradeço à Iane pelo companheirismo e suporte durante os momentos de dificuldade. Agradeço a Deus pela proteção contínua e pela fé, que dá sentido à vida.

RESUMO

Os agregados graúdos estão entre os materiais mais consumidos na construção civil e suas propriedades dependem diretamente das características mineralógicas e físicas da rocha de origem. Apesar de sua ampla utilização na região de Ouro Preto, ainda são limitadas as informações disponíveis sobre a caracterização tecnológica desses materiais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização mineralógica e tecnológica de agregados graúdos gnáissicos, relacionando sua composição mineralógica às propriedades físicas obtidas experimentalmente. Para isso, foram realizadas análises por difração de raios X de pó, incluindo a identificação e a quantificação de fases minerais por meio do refinamento pelo método de Rietveld, além de ensaios de abrasividade Cerchar, massa específica e absorção de água. Os resultados permitiram identificar a predominância de feldspatos, associados ao quartzo e à biotita, composição compatível com rochas gnáissicas. O refinamento dos dados confirmou as principais fases minerais identificadas e apresentou boa concordância entre os padrões experimental e calculado. Os ensaios tecnológicos indicaram elevada abrasividade do material, relacionada à sua composição mineralógica e à heterogeneidade característica da foliação gnáissica. Além disso, os resultados de massa específica e absorção de água mostraram-se compatíveis com os valores esperados para agregados dessa natureza. Pode-se afirmar que a composição mineralógica exerce influência significativa sobre o comportamento tecnológico do material, sendo possível correlacionar as fases minerais identificadas com as propriedades avaliadas. Os resultados obtidos contribuem para a ampliação do conhecimento sobre agregados gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto e fornecem subsídios para estudos futuros e aplicações em obras de engenharia.

Palavras-chave: agregados graúdos; gnaisse; difração de raios X; refinamento de Rietveld; abrasividade Cerchar; caracterização.

ABSTRACT

Coarse aggregates are among the most widely used materials in civil engineering, and their performance is directly related to the mineralogical and physical characteristics of the parent rock. Despite their extensive use in the Ouro Preto region, there is still limited publicly available information regarding the technological characterization of these materials. In this context, this study aimed to perform the mineralogical and technological characterization of gneiss coarse aggregates, relating their mineralogical composition to experimentally determined physical properties. To achieve this objective, powder X-ray diffraction analyses were carried out, including phase identification and quantification through Rietveld refinement, as well as Cerchar abrasivity, specific gravity, and water absorption tests. The results indicated a predominance of feldspars associated with quartz and biotite, a mineralogical assemblage consistent with gneissic rocks. The refinement confirmed the main identified mineral phases and showed good agreement between the experimental and calculated diffraction patterns. The technological tests revealed high abrasivity, which was associated with the mineralogical composition and the heterogeneity characteristic of gneissic foliation. In addition, the specific gravity and water absorption results were consistent with the expected values for aggregates of this nature. It was concluded that the mineralogical composition significantly influences the technological behavior of the material, making it possible to correlate the identified mineral phases with the evaluated properties. The results contribute to the understanding of gneiss aggregates used in the Ouro Preto region and provide support for future studies and engineering applications.

Keywords: coarse aggregates; gneiss; X-ray diffraction; Rietveld refinement; Cerchar abrasivity; technological characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrência de rochas passíveis de serem britadas em Minas Gerais.....	16
Figura 2: Representação da condição de umidade dos agregados.....	24
Figura 3: Geometria de reflexão de feixes paralelos de raios X.....	28
Figura 4: Geometria Bragg-Brentano.....	31
Figura 5: Aplicação de blocos de gnaiss em um dique de armazenamento de água.....	37
Figura 6: Aplicação de agregados em um sistema de drenagem de pilha de rejeito.....	37
Figura 7: Plano de trabalho.....	39
Figura 8: Algumas amostras de rocha cedidas pela pedreira.....	40
Figura 9: Características da rocha extraída pela pedreira.....	41
Figura 10: Amostra de pó da brita preparada para análise por difração de raios X e encaixe do porta amostras no equipamento.....	43
Figura 11: Dispositivo utilizado para a realização do ensaio.....	44
Figura 12: Microscópio óptico utilizado para medição da marca de desgaste.....	44
Figura 13: Exemplo de medição do diâmetro desgastado da ponteira após o risco.....	46
Figura 14: Equipamentos utilizados no ensaio.....	47
Figura 15: Sobreposição de picos nos difratogramas característicos dos minerais: anortita, albita, ortoclásio e microclínio.....	49
Figura 16: Resultado da identificação das fases pelo software QualX.....	50
Figura 17: Difratograma experimental da amostra de brita e identificação preliminar dos picos de difração.....	51
Figura 18: Resultado do refinamento de Rietveld obtido no software TOPAS.....	53
Figura 19: Difratograma de raios X da amostra com identificação das principais fases cristalinas.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação comercial das britas.....	22
Tabela 2: Classificação da abrasividade das rochas segundo o índice de abrasividade.....	32
Tabela 3: Valores médios do Índice de abrasividade Cerchar e correção.....	55
Tabela 4: Resultados de massa específica e absorção de água.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivos específicos.....	12
1.2 Justificativa.....	12
1.3 Estrutura do Trabalho.....	13
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 Contexto Geológico da Região de Ouro Preto.....	15
2.2 Rochas e Minerais.....	16
2.2.1 Classificação das Rochas Quanto à Gênese.....	18
2.2.2 Intemperismo e Alteração Mineralógica.....	19
2.3 Agregados Graúdos para Construção Civil.....	20
2.4 Índices Físicos dos Agregados.....	22
2.4.1 Massa Específica.....	23
2.4.2 Porosidade e Absorção de Água.....	23
2.5 Influência da Composição Mineralógica na Sanidade dos Agregados.....	25
2.6 Difração de Raios X.....	26
2.6.1 Difratorômetro de raios X.....	30
2.7 Índice de Abrasividade Cerchar (CAI).....	31
2.8 Aplicações de Agregados Graúdos em Obras de Engenharia.....	33
2.8.1 Agregados em Concreto de Cimento Portland.....	34
2.8.2 Aplicações em Sistemas de Filtros e Estruturas Geotécnicas.....	35
2.8.3 Aplicações em Ferrovias e Pavimentação.....	38
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 Origem e Características dos Agregados Utilizados.....	39
3.2 Difração de Raios X.....	41
3.2.1 Preparação das Amostras.....	42
3.3 Determinação da Abrasividade.....	43

3.4 Ensaio de Massa Específica e Absorção de Água.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 Difração de Raios X.....	48
4.2 Refinamento pelo Método de Rietveld.....	51
4.3 Abrasividade Cerchar.....	54
4.4 Massa Específica Aparente, Massa unitária e Absorção de água.....	55
5 CONCLUSÕES.....	58
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A relevância do setor de agregados para a sociedade é evidenciada pela ampla aplicação desses materiais em obras diretamente relacionadas à qualidade de vida da população. O seu consumo pode ser utilizado como um importante indicador do perfil socioeconômico de um país, uma vez que está associado à execução de grandes obras de infraestrutura como aeroportos, portos, hidrovias e ferrovias, além da construção de moradias, sistemas de saneamento básico e obras de pavimentação (Luz; Almeida, 2012).

Justamente por acompanhar o crescimento populacional e a expansão da demanda por bens e serviços na sociedade, os agregados graúdos são os insumos minerais mais produzidos e consumidos no mundo (Ferreira; Silva, 2004). Dessa forma, é necessário determinar suas propriedades, classificar e especificar limites de aceitação para maior controle e avaliação do seu desempenho em obras de engenharia. Entretanto, por ser um material de muita funcionalidade, propriedades relevantes para uma determinada aplicação de engenharia podem não ser importantes para outra, o que leva a variações nos limites de aceitação e necessidade de realização de diferentes ensaios de caracterização (Farias; Palmeira, 2010).

De acordo com (Bauer, 2019), apesar da grande quantidade de ensaios existentes, alguns são essenciais para a maioria das aplicações, enquanto outros são mais específicos. Sendo assim, cabe ao engenheiro selecionar os ensaios de caracterização mais adequados conforme a aplicação ou especificações das normas. Segundo o autor, o desempenho dos agregados depende diretamente de propriedades como estabilidade dimensional, resistência ao desgaste, estabilidade química, porosidade e área superficial. Tais características, assim como o comportamento do material, estão diretamente ligadas às propriedades da rocha de origem e às condições de extração.

Para (La Serna; Rezende, 2013), por se tratarem de materiais de baixo valor unitário, o principal fator limitante para sua comercialização em regiões mais distantes é o custo do transporte, o que resulta na formação de mercados regionalizados com alcance territorial restrito. Apesar da ampla disponibilidade de rochas aptas à britagem na natureza, a viabilidade de exploração está condicionada, principalmente, à proximidade entre a área de extração e o centro consumidor, além dos impactos ambientais associados à atividade, como poluição sonora e emissão de particulados, especialmente em áreas próximas aos centros urbanos. Diante disso, o elevado valor do transporte rodoviário, que chega a corresponder cerca de

66,7% (dois terços) do preço final do produto entregue, impõe que as minas se localizem nas proximidades dos grandes pólos de demanda, tornando o frete o principal componente na composição do seu custo final (Poletto, 2006).

1.1 Objetivos

Realizar a caracterização mineralógica e tecnológica dos agregados graúdos gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto, relacionando sua composição às propriedades físicas obtidas experimentalmente.

1.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar, qualitativamente e quantitativamente, as fases mineralógicas presentes nos agregados por meio de difração de raios X de pó;
- Determinar e analisar propriedades físicas como massa específica, absorção de água e abrasividade buscando relacioná-las à mineralogia e propriedades morfológicas;
- Discutir o potencial de aplicação dos agregados em obras de engenharia com base nos resultados obtidos.

1.2 Justificativa

Na região de Ouro Preto e municípios vizinhos, os agregados provenientes de rochas gnáissicas são amplamente utilizados em obras de infraestrutura, drenagem, pavimentação e contenção associadas à mineração e à construção civil. Portanto, essa elevada demanda regional torna esses materiais estratégicos para o abastecimento das atividades de engenharia, sendo que esses agregados são oriundos majoritariamente da mesma reserva de extração.

Apesar desse uso intensivo de agregados graúdos, ainda são escassos os estudos locais voltados à caracterização tecnológica e mineralógica desses materiais, além da ausência de informações relacionadas às suas propriedades. Embora existam estudos de agregados de outras regiões do país, a variabilidade geológica entre diferentes jazidas pode resultar em diferenças nas propriedades das rochas, mesmo que pertençam à mesma classificação litológica, tornando necessários estudos locais de caracterização (Oliveira et al., 2017).

Nesse sentido, o presente trabalho busca contribuir para a caracterização mineralógica e tecnológica dos agregados gnáissicos utilizados na região de Ouro Preto, por meio de ensaios de difração de raios X, abrasividade Cerchar, massa específica e absorção de água. Os resultados obtidos podem auxiliar na compreensão do comportamento desses materiais e fornecer subsídios técnicos para futuras aplicações e estudos relacionados ao uso de agregados na engenharia civil.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos principais. O Capítulo 1 apresenta a contextualização e as considerações iniciais relacionadas ao tema, abordando a relevância dos agregados graúdos para a engenharia civil, a motivação para a realização da pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos que dirigiram o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica, na qual são apresentados conceitos relacionados aos agregados utilizados na engenharia civil, às propriedades físicas das rochas, aos mecanismos de degradação e sanidade dos agregados, aos fundamentos da difração de raios X e ao índice de abrasividade Cerchar, além de uma contextualização sobre as aplicações dos agregados em engenharia.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia empregada na pesquisa, incluindo a coleta e preparação das amostras, a caracterização mineralógica por difração de raios X, os ensaios de abrasividade Cerchar e os ensaios de massa específica e absorção de água.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e suas respectivas discussões, relacionando a composição mineralógica identificada nas amostras às propriedades físicas e

abrasivas observadas experimentalmente, buscando compreender a influência da mineralogia no comportamento dos agregados estudados.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, destacando os principais resultados alcançados, as limitações da pesquisa e sugestões para o desenvolvimento de estudos futuros.

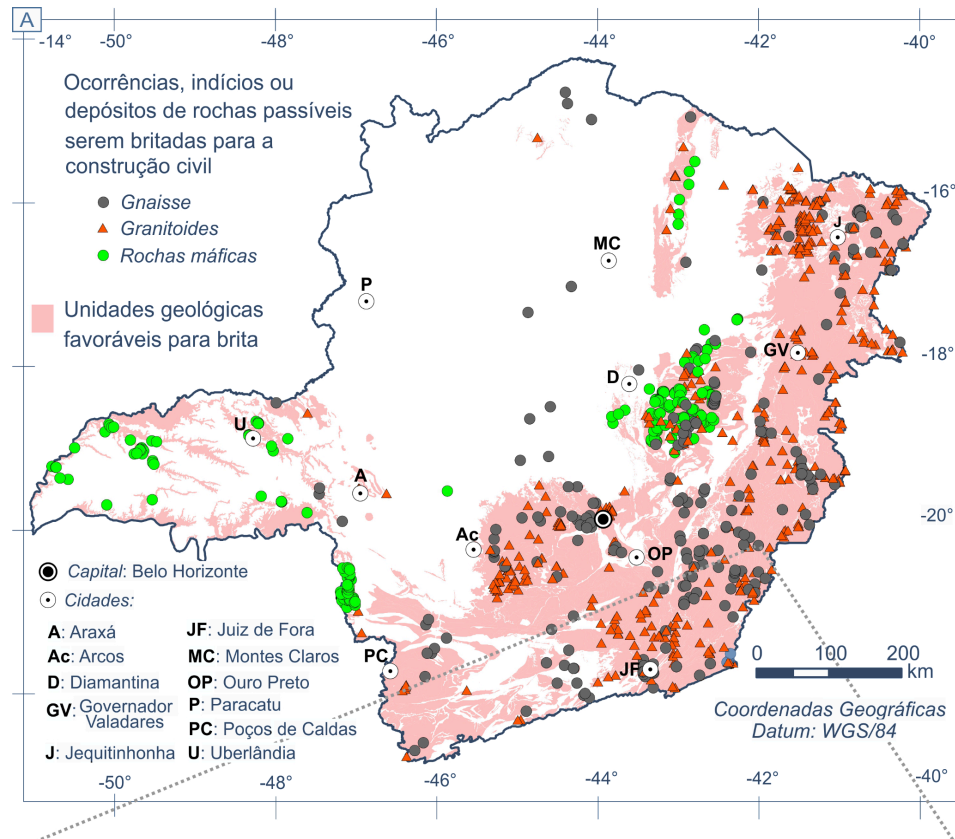
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Contexto Geológico da Região de Ouro Preto

A região de Ouro Preto está inserida no contexto do Quadrilátero Ferrífero, considerada a mais importante província mineral do estado de Minas Gerais (Ataíde, 2024). Embora esse reconhecimento esteja associado à mineração de ferro, pode-se dizer que a região também se destaca pelo potencial de fornecimento de recursos minerais voltados à construção civil. Do ponto de vista geológico, ela é caracterizada por um complexo metamórfico de rochas cristalinas arqueanas, constituído predominantemente por gnaisses polideformados de composição tonalítica e granítica, os quais apresentam características favoráveis à produção de agregados por britagem (De Azevedo *et al.*, 2012).

Embora rochas adequadas para britagem sejam relativamente abundantes, a viabilidade econômica de sua exploração depende da proximidade dos centros consumidores e das condições legais e ambientais que regulam sua extração (Valverde, 2001). Dessa forma, afloramentos rochosos podem se tornar potenciais pedreiras, desde que atendam às exigências técnicas, legais e comerciais para sua extração e comercialização (Victoria, 2017). O mapa representado na Figura 1 apresenta o registro de ocorrências, indícios ou depósitos de rochas suscetíveis a serem britadas, catalogados em Minas Gerais. Nele, é possível perceber a proximidade do município de Ouro Preto com depósitos de Gnaiss e a vasta unidade geológica favorável para brita no estado.

Figura 1: Ocorrência de rochas passíveis de serem britadas em Minas Gerais.



Fonte: Adaptado de Victoria (2017).

2.2 Rochas e Minerais

Conforme (Menezes, 2012), Mineral é uma substância sólida, com composição química e propriedades bem definidas, que ocorre naturalmente por meio de processos geológicos. Sendo assim, minerais podem ser definidos pela sua composição química única e propriedades cristalográficas. De acordo com o autor, os minerais se apresentam no estado cristalino, caracterizado pela homogeneidade, regularidade e periodicidade da sua estrutura interna. Portanto, esse ordenamento atômico se apresenta em uma escala que pode traduzir um padrão único de difração permitindo a sua identificação e caracterização. Isso acontece, mesmo que diferentes minerais apresentem o mesmo sistema cristalino já que possuem diferenças na composição química, dimensões de cela unitária e disposição dos seus átomos.

Para (Chiossi, 2025), as principais propriedades no estudo de minerais podem ser divididas em físicas, ópticas, morfológicas e químicas. Entre as propriedades físicas

destacam-se a dureza, o traço, a clivagem, a fratura, a tenacidade, a flexibilidade e o peso específico, enquanto as propriedades ópticas estão relacionadas a características como brilho, cor e aspectos observáveis por meio de microscopia óptica utilizando luz polarizada ou refletida. No entanto, no contexto dos agregados aplicados à engenharia civil, o interesse concentra-se principalmente em propriedades como dureza, fratura, tenacidade e peso específico, por sua influência direta no beneficiamento e desempenho dos materiais.

Dentre essas propriedades dos minerais, destaca-se a dureza que corresponde à sua capacidade de riscar ou ser riscado por outro material, sendo determinada pela escala empírica de Mohs, estabelecida a partir de dez minerais comuns, que varia de 1 a 10 (Pires e Luz, 2012). Essa propriedade depende da composição química e estrutura cristalina do mineral. O exemplo clássico é observado no diamante e na grafita, ambos constituídos por carbono. Apesar de possuírem a mesma composição química, o diamante apresenta dureza 10 na escala de Mohs, enquanto a grafita possui dureza entre 1 e 2 em razão das suas estruturas cristalinas distintas (Chiossi, 2025).

Rocha é um material sólido e consolidado, formado pela associação de um ou mais minerais resultantes de processos geológicos específicos (Luz; Almeida, 2012). Um dos critérios de classificação de rochas é o processo que levou à sua origem, sendo divididas em três grupos: ígneas, magmáticas e metamórficas (Silva; Tadra, 2024). Para agregados destinados à construção civil, a gênese das rochas é relevante, uma vez que os materiais extraídos herdam a mineralogia e diversas propriedades físicas e mecânicas da rocha de origem. Tais propriedades, por sua vez, estão ligadas tanto aos processos de formação da rocha quanto aos efeitos do intemperismo ao longo do tempo (Farias; Palmeira, 2010).

Dentre os minerais mais comuns nas rochas, destacam-se o quartzo, os feldspatos e as micas, apresentados no Quadro 1 conforme (Chiossi, 2025). Segundo o autor, o quartzo pode ser encontrado em praticamente todos os tipos de rochas, com maior ocorrência em rochas ígneas e sedimentares. Trata-se de um mineral com dureza 7 na escala de Mohs, podendo variar de incolor a cinza-escuro. Os feldspatos, por sua vez, constituem um grupo mineral formado principalmente por ortoclásio (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), sendo amplamente presentes em rochas ígneas e metamórficas e menos comuns em rochas sedimentares. Já o grupo das micas inclui minerais como muscovita ($\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$) e biotita

$((\text{H,K})_2(\text{Mg,Fe})_2(\text{Al,Fe})_2(\text{SiO}_4)_3)$, que ocorrem frequentemente em granitos, pegmatitos, gnaisses, micaxistos e filitos.

Quadro 1: Ordem dos minerais mais comuns encontrados em rochas.

1. Quartzo	6. Zircão	11. Topázio	16. Amianto
2. Feldspatos	7. Magnetita	12. Calcita	17. Talco
3. Micas	8. Hematita	13. Dolomita	18. Zeólitas
4. Anfibólios	9. Pirita	14. Caulim	19. Fluorita
5. Piroxênios	10. Turmalina	15. Clorita	

Fonte: Chiossi (2025).

2.2.1 Classificação das Rochas Quanto à Gênese

Segundo (Silva; Tadra, 2024), as rochas ígneas, também chamadas de magmáticas, são formadas pelo resfriamento e cristalização do magma proveniente do manto superior e da crosta terrestre inferior. Podem ser classificadas em intrusivas, quando o resfriamento ocorre no interior da crosta terrestre, ou extrusivas, quando o resfriamento ocorre após chegar à superfície. No interior da crosta, onde a temperatura é mais alta, o resfriamento lento do magma favorece o desenvolvimento de cristais com maiores dimensões, resultando em rochas mais resistentes, como observado nos granitos. Por outro lado, nas rochas extrusivas, o resfriamento rápido na superfície, devido às temperaturas mais baixas, resulta em texturas e granulação mais finas como ocorre nos basaltos.

De acordo com (Farias; Palmeira, 2010), as rochas sedimentares detríticas ou clásticas formam-se principalmente por meio da deposição de sedimentos provenientes da erosão de outras rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares. Alternativamente, podem ser formadas pela precipitação e deposição de substâncias em solução, originando as rochas sedimentares químicas. De modo geral, a resistência dessas rochas é inferior à das rochas ígneas, enquanto a sua coesão depende diretamente do material cimentante. Além disso, apresentam planos de sedimentação, que influenciam suas propriedades físicas e mecânicas, dependendo da direção em que são medidas. Como exemplos, destacam-se o arenito e o siltito entre as rochas

sedimentares detríticas, e o calcário, entre as químicas, formado pela precipitação de sais em soluções aquosas saturadas.

Ainda, de acordo com (Silva; Tadra, 2024), rochas metamórficas, assim como as sedimentares, originam-se a partir da transformação de outras rochas sob condições de altas pressões e temperaturas, que promovem a recristalização dos minerais. Uma vez que não se atinge o seu ponto de fusão, os minerais não se fundem e a rocha não retorna ao estado de magma. A maior parte das rochas metamórficas se formam pela colisão de placas tectônicas podendo cobrir áreas de milhares de quilômetros quadrados. Esse processo de formação origina rochas que possuem foliações, relacionadas à disposição em placas ou camadas onduladas, como se percebe nos gnaisses, ardósias e filitos.

2.2.2 Intemperismo e Alteração Mineralógica

Para (Almeida, 2021), o processo de intemperismo compreende as alterações físicas e químicas que ocorrem quando as rochas interagem com a atmosfera e a hidrosfera. Esse processo fragiliza sua estrutura e reduz a coesão, levando à decomposição e desintegração do material. Como consequência, há a intensificação dos processos erosivos, com o transporte e deposição de sedimentos que podem dar origem a novas rochas. Nesse contexto, o estudo do intemperismo em materiais rochosos utilizados na construção civil torna-se fundamental, uma vez que esse fenômeno afeta propriedades geomecânicas, como a dureza e a sua estrutura, influenciando diretamente o desempenho desses materiais.

De acordo com (Jaques, 2014), a ação dos agentes intempéricos, principais responsáveis pela alteração das rochas no ambiente exógeno, promove mudanças nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais, resultando na redução da resistência mecânica, no aumento da deformabilidade e em alterações na porosidade e permeabilidade. Além disso, o autor afirma que considerando a relação direta entre o grau de alteração dos maciços rochosos e sua estabilidade, é fundamental conhecer o grau de alteração em projetos de engenharia, especialmente em obras como escavações subterrâneas.

Outro ponto relevante é que o intemperismo provoca alterações significativas nos índices físicos das rochas. No caso do gnaise, (Menezes Filho, 1993) observou-se que, à

medida que o gnaiss evolui do estado fresco para altamente alterado, ocorre aumento progressivo da porosidade e do teor de umidade de saturação, indicando maior capacidade de retenção de água. Em contrapartida, há redução do peso específico aparente seco, indicando perda de densidade com o avanço do grau de alteração.

Paralelamente, o mesmo autor demonstrou que em estágios iniciais de alteração, os feldspatos e biotitas apresentam-se sãos, com cor e brilho preservados, enquanto o quartzo permanece pouco alterado. Com o avanço do intemperismo, surgem sinais de fraturamento do quartzo, caulínização dos feldspatos e decomposição das biotitas, associada à perda de ferro. Em estágios mais avançados, os feldspatos encontram-se intensamente caulinizados, as micas bastante alteradas e o quartzo fortemente fraturado (Menezes Filho, 1993).

De forma complementar, (Goldich, 1938) analisou como o intemperismo modifica a composição química e mineralógica de um gnaiss granítico, propondo uma ordem de estabilidade dos minerais frente a esse processo. Segundo o autor, os minerais menos resistentes são plagioclásio, epidoto, hornblenda, titanita e apatita. Em seguida, encontram-se minerais de resistência intermediária como ilmenita-magnetita, biotita, microclina e ortoclásio. Por fim, os minerais mais resistentes são o zircão e o quartzo. Essa ordem foi determinada observando quais minerais desapareceram e quais permaneceram nos materiais alterados. O estudo também mostra que o intemperismo afeta principalmente a composição química da rocha, a mineralogia e algumas propriedades físicas, como a densidade e a estrutura interna.

2.3 Agregados Graúdos para Construção Civil

A indústria de agregados constitui um segmento do setor mineral responsável pela produção de matérias-primas, beneficiadas ou em estado bruto, destinadas à construção civil (Valverde, 2001). De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregado é definido como um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto. No entanto, esse termo abrange tanto agregados miúdos quanto graúdos. Os agregados miúdos correspondem, em geral, à areia de origem natural ou artificial, constituída por partículas que passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidas na peneira de 150 μ m. Por outro lado, agregados graúdos são definidos como pedregulho ou brita

passante pela peneira de 75 mm e retidos na peneira de 4,75 mm. Especificamente, a NBR 9935 (ABNT, 2011) define a brita como o agregado graúdo obtido pela cominuição de rochas.

Conforme (Valverde, 2001), rochas para britagem são encontradas facilmente e com abundância na natureza. No entanto, apesar do baixo valor unitário, o custo do transporte, predominantemente rodoviário, encarece o produto para os consumidores finais. Por essa razão, boa parte dos recursos minerais disponíveis na natureza se tornam antieconômicos. Além disso, restrições ambientais, leis de zoneamento municipais e ocupação de morros e várzeas também podem impedir o aproveitamento desses recursos e inviabilizam a abertura de novas pedreiras.

De modo geral, fragmentos de rochas utilizados na construção apresentam uma ampla faixa granulométrica que varia desde blocos de enrocamento, com dezenas de centímetros, até partículas milimétricas (Farias; Palmeira, 2010). Esses fragmentos de rocha com dimensões superiores e propriedades adequadas podem ser usados em outras aplicações em obras civis além da produção de argamassa e concreto. Nesse contexto, a NBR 6502 (ABNT, 1995) classifica fragmentos com diâmetro entre 60 mm e 200 mm como pedra de mão, enquanto aqueles com dimensões superiores a 200 mm são denominados matacões.

No caso dos agregados graúdos, é comum a utilização de misturas de diferentes tamanhos, o que proporciona melhor distribuição granulométrica e redução de vazios (Melo; Gomes; Moraes, 2021). Como resultado, obtêm-se benefícios como a economia de pasta de cimento, a melhoria da trabalhabilidade e o aumento da resistência mecânica do concreto (Mehta; Monteiro, 2008). Embora esses agregados sejam classificados de acordo com sua granulometria, comercialmente são divididos por numerações, como brita nº 1, brita nº 2, brita nº 3 e assim por diante, conforme apresentado na Tabela 1 (Lara, 2013).

Tabela 1: Classificação comercial das britas.

Nº	Dimensão (mm)
Brita 0	9,5 - 12,5
Brita 1	19 - 25
Brita 2	32 - 38
Brita 3	50 - 76
Brita 4	76 - 152

Fonte: Adaptado de Lara (2013).

As propriedades dos agregados estão diretamente relacionadas à microestrutura da rocha de origem, sendo influenciadas pela porosidade, massa específica e composição mineralógica, além do grau de intemperismo e das condições de produção, como o uso de explosivos e o tipo de britagem (Mehta; Monteiro, 2008). De modo geral, essas propriedades dos agregados podem ser agrupadas em três categorias. A primeira reúne as características associadas à porosidade, como massa específica aparente, absorção de água, resistência, módulo de elasticidade e durabilidade. A segunda está relacionada à composição química e mineralógica, que influencia a resistência, o módulo de elasticidade e a presença de substâncias deletérias. Por fim, a terceira refere-se às condições de fabricação, que determinam o tamanho, a forma e a textura das partículas (Farias; Palmeira, 2010; Mehta; Monteiro, 2008). Uma forma de avaliar quantitativamente essas características é por meio da determinação dos índices físicos dos agregados.

2.4 Índices Físicos dos Agregados

Para (Farias; Palmeira, 2010), índices físicos são parâmetros obtidos por ensaios normalizados que caracterizam e quantificam propriedades inerentes de um dado material ou o seu estado atual. Com base nesses valores, pode-se estabelecer limites de aceitação ou rejeição. Os principais índices físicos dos agregados graúdos são: porosidade, absorção de água, teor de umidade e massa específica.

Rigorosamente, os conceitos e definições desses índices podem ser aplicados a partículas de diferentes tamanhos, a um único fragmento de rocha ou a uma massa uniforme de partículas. Entretanto, quando considerados em conjunto, os valores dessas propriedades passam a representar, na prática, uma média representativa das características dos diversos fragmentos individuais (Farias; Palmeira, 2010). Diante disso, são estabelecidas, para um conjunto de partículas, massas mínimas de amostra para realização dos ensaios de acordo com as dimensões máximas características dos fragmentos (ABNT, 2009).

2.4.1 Massa Específica

As normas NBR 9935 (ABNT, 2011) e NM 53 (ABNT, 2009) definem três tipos de massa específica para agregados: massa específica na condição saturada superfície seca (SSS), massa específica aparente e massa específica na condição seca. A massa específica SSS relaciona a massa do agregado saturado ao seu volume, excluindo os vazios permeáveis. A massa específica aparente segue o mesmo princípio, porém utiliza a massa do agregado seco em estufa. Já a massa específica na condição seca considera a massa do agregado seco em relação ao volume total do material, incluindo os vazios permeáveis.

De acordo com (Neville, 2016), a massa específica real de um agregado está relacionada à massa específica de seus minerais e ao seu teor de vazios. Em vista disso, a massa específica das britas é utilizada, costumeiramente, para o cálculo de quantidades, não sendo considerada um indicador de qualidade, exceto em situações críticas. Segundo o autor, para utilização do agregado em concreto, considera-se a massa específica do agregado na condição SSS, pois a água no interior dos poros não participa das reações químicas com o cimento imediatamente, podendo ser considerada parte do agregado e evita que o agregado absorva água de amassamento. Sendo assim, a presença dessa água interna auxilia no processo de cura contínua, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do concreto.

2.4.2 Porosidade e Absorção de Água

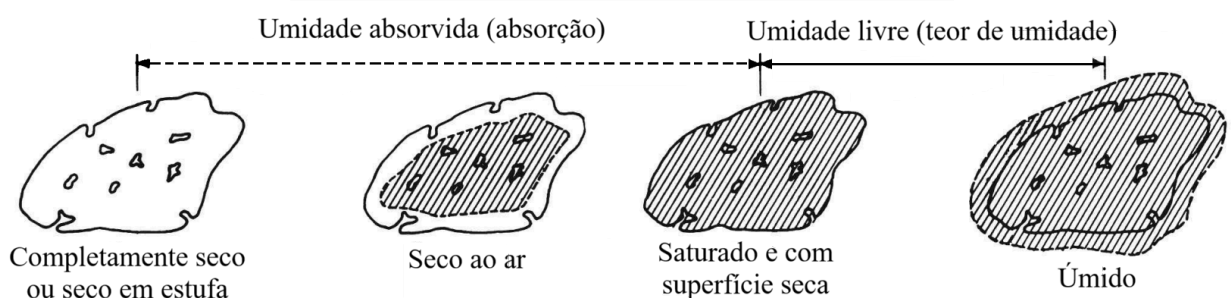
A porosidade, expressa em porcentagem, corresponde à razão entre o volume de vazios e o volume total da rocha. Em vista disso, esse parâmetro pode ser confundido com o

índice de vazios, apresentado como um número decimal, que se diferencia por relacionar o volume de vazios e o volume ocupado pelas partículas sólidas, ao invés do volume total (Farias; Palmeira, 2010). Desse modo, a avaliação da porosidade é de extrema importância pois influencia outras propriedades e características das rochas como permeabilidade, absorção de água e umidade (Luz; Almeida, 2012).

A absorção de água, por sua vez, corresponde essencialmente à diferença de massa entre o agregado na condição saturada com superfície seca e o agregado seco em estufa, indicando a quantidade de água contida no interior da amostra (Luz; Almeida, 2012). A relação percentual entre essa diferença, e a massa na condição seca define o valor da absorção de água conforme especificado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). Dessa forma, a absorção considera o agregado na condição saturada, representando um limite de absorção, enquanto a umidade corresponde à quantidade real de água presente no material, incluindo tanto a água interna quanto a superficial (Farias; Palmeira, 2010).

Quanto à umidade, o agregado pode se encontrar em quatro estágios diferentes, esquematizados na Figura 2: úmido ou saturado, saturado e com superfície seca, seco ao ar e seco em estufa.

Figura 2: Representação da condição de umidade dos agregados.



Fonte: Adaptado de Neville (2016).

De acordo com (Neville, 2016), o agregado se encontra na condição saturada com superfície seca quando todos os seus poros estão preenchidos, mas a sua superfície está seca. Ao ser exposto ao ar, parte dessa água evapora, levando o material à condição de seco ao ar,

na qual ainda há umidade retida nos poros internos. Por fim, para que o agregado esteja completamente seco, deve ser submetido à secagem prolongada em estufa até a condição de completamente seco. Em condições ambientes, uma amostra seca sempre irá absorver alguma quantidade de umidade, no entanto essa quantidade de água não é suficiente para saturar a amostra e preencher completamente seus vazios (Farias; Palmeira, 2010).

Conforme observado por (Carrijo, 2005), ao avaliar a influência da massa específica, da porosidade e da absorção de água de agregados reciclados nas propriedades do concreto, esses índices estão diretamente relacionados entre si. Os agregados podem apresentar poros de diferentes tamanhos, interconectados ou não, permitindo a penetração e retenção de água. Com isso, pode-se dizer que a quantidade de água presente nos agregados varia de acordo com sua área superficial, capacidade de retenção de umidade e densidade do material. A autora verificou ainda que agregados de menor densidade apresentam absorções significativamente maiores, reduzindo à medida que a massa específica aumenta.

2.5 Influência da Composição Mineralógica na Sanidade dos Agregados

Agregados constituem cerca de 60% a 75% de volume do concreto convencional utilizado na construção civil (American Concrete Institute, 2007). Dessa forma, conhecer as propriedades e composição desse material é imprescindível para o controle tecnológico e desempenho do concreto, que é bastante durável, mas pode apresentar rápida deterioração em condições específicas (Neville, 2016). Diante disso, uma das propriedades mais relevantes a ser considerada é a sanidade, definida como a capacidade do material de resistir a processos de deterioração ao longo do tempo, relacionados a fenômenos físicos e químicos que comprometam sua integridade (Mehta; Monteiro, 2008).

O principal mecanismo que pode comprometer a sanidade dos agregados é a reação álcali-agregado (RAA) definida pela NBR 15577-1 (ABNT, 2008) como sendo uma reação química entre componentes alcalinos (sódio e potássio) dissolvidos nos poros do concreto e alguns constituintes potencialmente reativos presentes nos agregados na presença de umidade e álcalis. Portanto, as composições mineralógica e química do agregado, apesar de ser visto costumeiramente como material inerte, apresentam grande influência sobre a durabilidade e resistência do concreto, além da durabilidade do material em outras aplicações de engenharia.

Um dos tipos de reação álcali-agregado (RAA) é a reação álcali-sílica, que envolve a sílica reativa presente nos agregados (Macioski et al., 2024). Esse processo ocorre quando os álcalis do cimento reagem com a sílica na presença de hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento, formando um gel expansivo (ABNT, 2008). Esse gel possui alta capacidade de absorver água e, ao inchar devido à incorporação de umidade proveniente dos poros do concreto e do ambiente, provoca fissuras e expansões anormais distribuídas de forma aleatória no concreto, o que pode levar à deterioração da estrutura e à perda de resistência (American Concrete Institute, 2007).

De acordo com (Lima, 2016), que analisou a reatividade e a formação de fases cristalinas em agregados após 28 dias de exposição a soluções alcalinas, agregados contendo mica devem ser evitados. Isso ocorre porque, na presença de agentes químicos ativos provenientes da hidratação do cimento, esse mineral pode sofrer transformações em outras fases. Além disso, a mica apresenta elevada demanda de água, o que pode alterar o traço do concreto e comprometer sua resistência final. No estudo, também foi evidenciado o aparecimento dos minerais *illita* e *manganofilita*, pertencentes ao grupo das micas, os quais apresentam composição semelhante à dos produtos formados na reação álcali-agregado (RAA).

Outro estudo (Macioski et al., 2024) empregou a técnica de difração de raios X como ensaio complementar para a identificação de possíveis alterações estruturais associadas à reação álcali-agregado. Os resultados permitiram confirmar a intensa alteração da biotita, pertencente ao grupo das micas, para clorita em decorrência do contato com fluidos intersticiais. Entretanto, o trabalho ressalta a necessidade de complementação com análises petrográficas, a fim de possibilitar a identificação de feições como quartzo deformado e microestruturas associadas a maiores níveis de reatividade.

2.6 Difração de Raios X

A difração de raios X de pó (DRX) é uma técnica analítica e não destrutiva, muito utilizada na ciência dos materiais e engenharias para a investigação da estrutura cristalina e da composição de materiais inorgânicos. Ela se baseia no princípio de que cada material

cristalino possui um padrão único de picos de difração que reflete sua organização atômica (Pecharsky; Zavalij, 2009).

O método consiste em expor uma amostra na forma de pó a um feixe de raios X. Ao interagir com os átomos presentes no cristal, este feixe sofre difração, gerando um padrão de interferência dos raios X espalhados característico do material que é capturado por um detector (Connolly, 2005). Esse padrão é representado por um difratograma, no qual o eixo das abscissas corresponde ao ângulo de difração e o das ordenadas representam a intensidade dos raios X difratados.

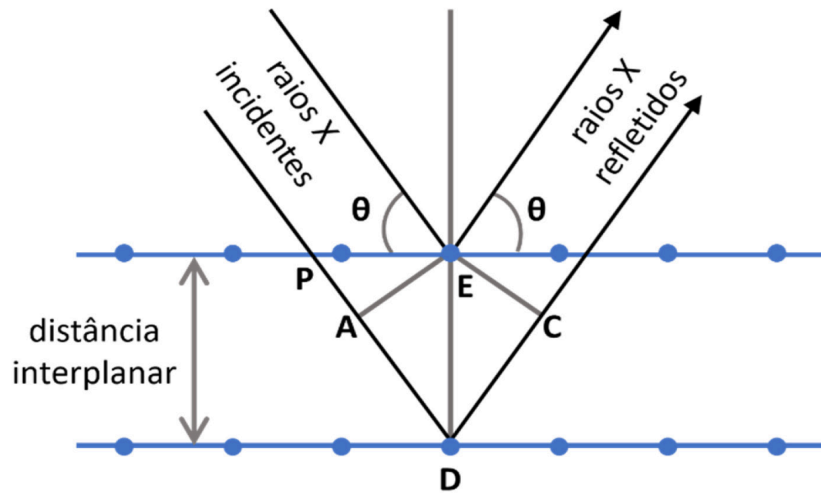
Assim, é por meio da interação entre a radiação incidente e a estrutura cristalina do material que são produzidos os feixes espalhados de raios X, posteriormente detectados pelo equipamento. Nesse contexto, a relação entre os raios difratados e os espaçamentos entre os planos cristalinos é descrita pela chamada “Lei de Bragg” (Schiels, 2004). Essa lei estabelece que, para haver interferência construtiva, a diferença de caminho óptico entre dois raios refletidos pelos planos cristalinos deve ser igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda da radiação incidente, sendo expressa pela equação (1).

$$n\lambda = 2d \times \text{sen}(\theta) \quad (1)$$

Na relação, n representa a ordem de difração, assumindo valores inteiros, d corresponde ao espaçamento entre os planos cristalinos, λ representa o comprimento de onda da radiação incidente e θ corresponde ao ângulo de incidência entre o feixe de raios X e o plano cristalino.

Em um cristal, os átomos encontram-se organizados em diversos planos paralelos e periodicamente espaçados. Quando um feixe incide sobre o material sólido, uma fração desse feixe será dispersa em todas as direções pelos elétrons de cada átomo ou íon, que se encontra na trajetória do feixe (Callister; Rethwisch, 2016). Assim, para que ocorra a difração é necessário que as ondas refletidas pelos diferentes planos sofram interferência construtiva, produzindo uma onda maior que a de origem, o que forma um pico de difração forte (Schiels, 2004).

Figura 3: Geometria de reflexão de feixes paralelos de raios X.



Fonte: Machado; Doriguetto (2025).

Conforme ilustrado na Figura 3 (Machado; Doriguetto, 2025), a interferência construtiva ocorre quando o caminho adicional percorrido por uma das ondas refletidas, representado pelos segmentos AD e DC, corresponde a um múltiplo inteiro do comprimento de onda λ . Caso contrário, a interferência seria destrutiva. Sabendo que o caminho adicional é dado pela soma dos segmentos congruentes AD e DC, tem-se que:

$$AD + DC = 2AD = n\lambda \quad (2)$$

Entretanto, esse valor pode ser expresso em função da distância entre os planos atômicos (d) e o ângulo de difração (θ), da seguinte forma:

$$\text{sen}\theta = \frac{AD}{DE} \quad (3)$$

Considerando que o segmento DE corresponde à distância entre os planos cristalinos (d), é possível substituir essa relação na Equação 2. Dessa forma, obtém-se novamente a expressão conhecida como Lei de Bragg, apresentada anteriormente:

$$n\lambda = 2d \times \text{sen}(\theta) \quad (4)$$

Sabendo disso, é importante destacar que as rochas são, em sua essência, agregados de minerais. Cada mineral, por sua vez, é uma substância inorgânica, de ocorrência natural, composição química definida e com estrutura cristalina específica (Mehta; Monteiro, 2008). Dessa maneira, a difração de raios X se torna um método eficaz na determinação da estrutura e da composição mineralógica de rochas.

Quando uma amostra composta por mais de uma fase mineral é submetida à análise por difração de raios X, o padrão obtido no difratograma corresponde à superposição dos padrões individuais de todos os minerais presentes. Posteriormente, esse padrão pode ser comparado com bancos de dados mineralógicos por meio de softwares especializados. Essa comparação, realizada de maneira correta, permite a identificação das fases cristalinas e, conseqüentemente, a determinação da composição mineralógica da rocha analisada (Nascimento-Dias, 2021).

Entretanto, em função das variações da geologia local e das características intrínsecas das amostras, a composição mineralógica pode apresentar diferenças significativas, incluindo a presença de minerais acessórios, óxidos ou minerais argilosos. No entanto, o reconhecimento das fases dominantes geralmente apresenta similaridades entre amostras pertencentes à mesma litologia (Klein; Dutrow, 2012). Em estudos voltados para a caracterização mineralógica de rochas gnáissicas, (Yagob, 2023) empregou a técnica para analisar a estrutura cristalina de um gnaiss hornblêndico.

Os resultados do trabalho indicaram que a amostra é composta essencialmente por quartzo, albita, microclínio e minerais do grupo das micas, configurando uma associação mineral típica desse tipo de rocha. Dessa forma, observa-se que, apesar das variações mineralógicas específicas, há um padrão consistente na composição de gnaisses que podem

ser utilizados como agregados, marcado pela predominância de quartzo e feldspatos. Tais minerais controlam propriedades importantes dos agregados, como resistência mecânica, durabilidade e potencial reativo em matrizes cimentícias (Diógenes, 2018).

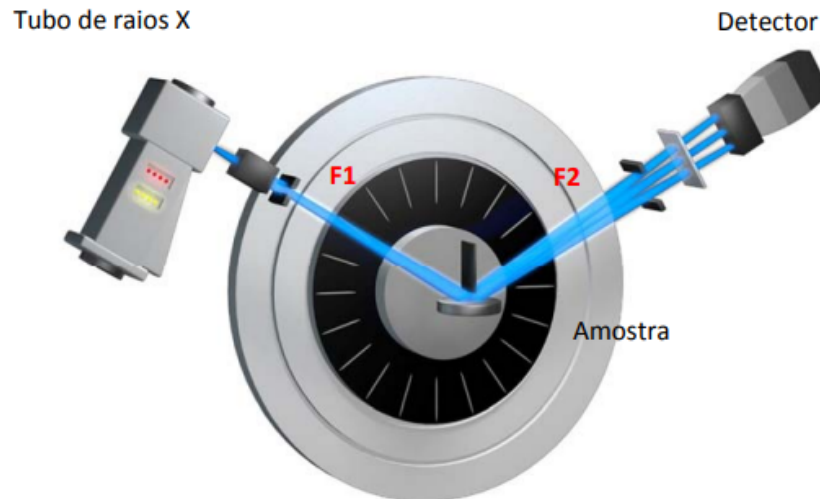
No que se refere à composição mineralógica de agregados graúdos provenientes de rochas gnáissicas da região Nordeste do Brasil, (Almeida, 2021) também aponta uma predominância clara de minerais característicos desse tipo de rocha. Destacou-se a presença de quartzo, feldspatos (como albita, microclínio, ortoclásio, oligoclásio e labradorita, uma variedade de anortita) e micas (muscovita e biotita), além da ocorrência de minerais acessórios como hornblenda, calcita e dolomita. A distribuição mineralógica evidenciou o caráter dominante do quartzo nas amostras, o que foi associado à sua elevada estabilidade frente aos processos intempéricos. A autora também ressalta dificuldades inerentes à análise por DRX em rochas policristalinas, como a sobreposição de picos entre diferentes feldspatos, o que exige o uso de técnicas complementares, como o refinamento pelo método de Rietveld, para quantificação das fases.

2.6.1 Difratorômetro de raios X

O equipamento utilizado para coleta e análise de dados de difração de pó é o difratômetro de raios X. O difratômetro é composto por três partes principais: a fonte de radiação (tubo de raios X), o suporte para posicionamento da amostra e o sistema de detecção, responsável por registrar os raios X difratados e convertê-los em uma taxa de contagem. O processo começa em um tubo selado à vácuo, onde elétrons de um cátodo aquecido são acelerados e bombardeiam um ânodo metálico geralmente de cobre, como é o caso do equipamento utilizado nas medições, gerando raios X de comprimentos de onda característicos, com radiação $\text{CuK}\alpha$ de 1,5418 Å (Silva, 2020).

Em seguida, os raios X, assim que são produzidos, atingem a amostra que permanece estática durante toda a medida enquanto a fonte e o detector realizam um movimento angular em torno do material. A geometria de difração mais comumente empregada em difratômetros é a configuração Bragg-Brentano, a qual requer uma amostra com superfície plana e espessura suficiente para que a radiação incidente seja adequadamente difratada e posteriormente detectada. Esse arranjo experimental está representado na Figura 4 (Silva, 2020).

Figura 4: Geometria Bragg-Brentano.



Fonte: Silva (2020).

2.7 Índice de Abrasividade Cerchar (CAI)

O ensaio de abrasividade Cerchar é um método padrão para determinação do índice de abrasividade Cerchar (CAI) de rochas. O ensaio consiste em medir o desgaste de pontas cônicas de metal com dureza conhecida, após riscar a superfície de rochas preferencialmente em estado natural (ASTM International, 2022). De modo geral, o método fornece uma medida relativa da abrasividade da rocha a partir do desgaste produzido na ponta metálica após o risco.

A ponteira utilizada deve ser usinada e apresentar um ângulo de ponta de 90° além de ser posicionada de modo que fique perpendicular à superfície da rocha. O risco é realizado paralelo à superfície por uma distância de 10 mm com variação de $\pm 0,5$ mm, utilizando uma força normal constante de 70 N. Para cada amostra de rocha considerada, deve-se realizar cinco ensaios individuais (CAI) para determinar o valor médio do desgaste, levando em consideração preferências como cores diferentes, foliações e planos de fraqueza (ASTM International, 2022).

O índice CAI, que quantifica o desgaste abrasivo, é obtido pela multiplicação do diâmetro desgastado por 10. Com base nesse resultado, as rochas podem ser classificadas em:

Tabela 2: Classificação da abrasividade das rochas segundo o índice de abrasividade.

Classificação da Abrasividade	Valor Médio do CAI
Extremamente Baixa	0.1-0.4
Muito Baixa	0.5-0.9
Baixa	1.0-1.9
Média	2.0-2.9
Alta	3.0-3.9
Muito Alta	4.0-4.9
Extremamente Alta	≥ 5

Fonte: Alber *et al.* (2014).

A dureza da ponteira influencia os resultados, sendo assim, o valor padrão de dureza HRC (Hardness Rockwell C) deve ser de 55 para cada teste. Entretanto, há situações em que ponteiros com diferentes durezas podem ser utilizadas, desde que sejam realizadas normatizações para o valor de dureza padrão (ASTM International, 2022). Quando isso ocorre, recomenda-se que os resultados sejam apresentados na forma CAI_x , em que X corresponde ao valor de dureza da ponteira (Alber et al., 2014). Uma das maneiras de realizar esse ajuste é por meio do método de (Jacobs; Hagan, 2009) utilizando a equação (5).

$$CAI' = \frac{0,415 \times CAI_x}{1 - 0,0107 \times X} \quad (5)$$

Diferentemente da abrasão, que é o desgaste sofrido pelo contato entre a rocha e seus fragmentos, a abrasividade mede o efeito causado por impacto, atrito ou pressão de materiais rochosos em ferramentas e equipamentos (Fiorentini, 2002). O ensaio de abrasividade Cerchar

parte da relação entre o atrito de uma ponta metálica e a rocha. Sendo assim, pode-se considerar que o desgaste da ponteira representa o efeito abrasivo em equipamentos metálicos, como dentes de escavadeiras e mandíbulas de britadores, o que faz desse ensaio um ótimo recurso para medir consumo e performance de equipamentos em operações de escavações e britagem.

De acordo com (Yarali *et al.*, 2008), o conteúdo mineral das rochas é a principal causa do desgaste de ferramentas na indústria de mineração. Dessa forma, os autores estabelecem uma relação matemática entre o índice CAI e o consumo de ferramentas “*Tool Consumption*” (TC) de modo que o aumento de um implica o aumento do outro. Além disso, destacam que o desconhecimento da quantidade dos principais minerais presentes na rocha, bem como da dimensão dos grãos abrasivos, pode dificultar a obtenção de benefícios econômicos na escavação mecânica e até inviabilizar operações em função da elevada taxa de desgaste.

De acordo com (Piazzetta, 2018), além da influência da composição mineralógica, o grau de alteração da rocha também apresenta relação direta com o índice de abrasividade Cerchar. Observa-se uma tendência de redução do CAI com o aumento do grau de alteração, indicando menor potencial abrasivo em rochas mais alteradas. Entretanto, em rochas muito alteradas, ainda podem existir porções localizadas contendo minerais resistentes que podem gerar valores localmente altos de CAI. Entretanto, esses valores não são suficientes para impedir a redução do CAI médio da rocha como um todo.

2.8 Aplicações de Agregados Graúdos em Obras de Engenharia

Desde a Antiguidade, as rochas são utilizadas pelo homem como material de construção, embora inicialmente em estado bruto e com pouco beneficiamento. Com o passar do tempo e o avanço das técnicas construtivas, esses materiais passaram a ser empregados de forma mais elaborada e de forma mais diversificada (Luz; Almeida, 2012). A partir dessa evolução tecnológica, a caracterização dessas rochas tornou-se fundamental para garantir o desempenho, a durabilidade e a segurança das estruturas em que são utilizadas (Mehta; Monteiro, 2008).

De acordo com (Valverde, 2001), os agregados consolidaram-se como os insumos minerais mais consumidos mundialmente na indústria da construção. Esse destaque está associado, principalmente, à sua ampla disponibilidade e baixo custo, o que reduz significativamente a possibilidade de substituição por outros materiais naturais ou industrializados. No Brasil, o consumo de agregados atingiu valores da ordem de 600 milhões de toneladas nos anos de 2010 e 2011, tendo sido a região Sudeste responsável por aproximadamente 48% desse total (ABDI, 2012). Nesse cenário, as principais aplicações concentram-se nos setores de pavimentação e na produção de concreto.

2.8.1 Agregados em Concreto de Cimento Portland

O concreto é um material obtido pela mistura de água, cimento e agregados. Possivelmente utiliza-se adições e aditivos como microssilica, escória de alto forno, polímeros e produtos químicos a fim de controlar suas propriedades para diferentes tipos de concreto (Mehta; Monteiro, 2008). Agregados graúdos constituem a maior parte do volume do concreto, dessa forma influenciam suas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Além disso, seu principal objetivo é reduzir custos sem prejudicar a qualidade do material já que o cimento possui elevado valor econômico em comparação com os outros constituintes do concreto (Carvalho; Pinheiro, 2013).

Pode-se dizer que os agregados graúdos estão diretamente relacionados a propriedades do concreto como consistência, homogeneidade, resistência à compressão e durabilidade, além de possibilitarem a economia de pasta, que possui maior valor econômico na mistura (Mehta; Monteiro, 2008). A consistência refere-se à capacidade de deformação do concreto no estado fresco, estando associada às etapas de transporte, lançamento e adensamento. Desse modo, agregados com formas angulares, alongadas e com granulometria mais grosseira tendem a resistir ao movimento e demandar mais pasta. A homogeneidade, por sua vez, está ligada à distribuição dos agregados graúdos na massa, sendo influenciada por características como densidade e dimensão dos grãos, que também comprometem o comportamento do concreto no estado fresco (Carvalho; Pinheiro, 2013).

De acordo com (Mehta; Monteiro, 2008), para os concretos no estado endurecido, a resistência à compressão e a durabilidade também podem ser afetadas pelas propriedades das

britas, especialmente quando apresentam alta porosidade, elevada absorção de água e maior superfície específica. Agregados mais angulosos ou de menor tamanho, por exemplo, possuem maior área superficial, o que exige uma quantidade maior de pasta e de água para o envolvimento das partículas, resultando no aumento do fator água/cimento, no aumento da porosidade do concreto e na redução da sua resistência mecânica, comprometendo a durabilidade. Além disso, a utilização de britas com baixa resistência ou com fraca aderência à pasta de cimento também contribui para essa diminuição.

Conforme discutido por (Carrijo, 2005), a condição de umidade dos agregados grãos exerce influência significativa no comportamento do concreto. Quando utilizados secos, esses materiais tendem a absorver parte da água de amassamento, reduzindo a água livre disponível na mistura e, conseqüentemente, prejudicando a trabalhabilidade e a hidratação do cimento. Além disso, pode ocorrer o envolvimento inicial das partículas por uma película de pasta de cimento, dificultando a absorção de água pelo agregado, impactando o desempenho mecânico do concreto. Dessa forma, a capacidade de absorção de água e condição das britas interfere diretamente na quantidade efetiva de água da mistura, devendo ser considerada na definição do traço dos concretos.

De acordo com (Mehta; Monteiro, 2008), quando o agregado e a pasta de cimento atuam de maneira conjunta, há ocorrência de uma zona de transição entre os dois materiais, considerada um dos principais pontos de fragilidade do concreto. Essa região se forma em decorrência do acúmulo de água de exsudação em torno de partículas de agregado alongadas, achatadas e grandes. Como consequência, ocorre o aumento do volume de vazios, da porosidade e de microfissuras após a evaporação dessa água, o que compromete o desempenho mecânico. Essa interface é frequentemente considerada o elo mais fraco do concreto pois possui resistência e rigidez inferiores. No entanto, pode haver minimização dos seus efeitos com o uso de adições minerais e melhorias do traço, além de maior controle do processo de concretagem (Paiva, 2016).

2.8.2 Aplicações em Sistemas de Filtros e Estruturas Geotécnicas

Em sistemas de filtragem, muito utilizados em estruturas de contenção, os agregados desempenham a função de reter partículas finas de sólido, ao mesmo tempo em que permitem

a passagem da água. Nesse tipo de aplicação, a brita é comumente utilizada em conjunto com outros materiais como areia, pedrisco e mantas de geotêxtil para formação do sistema filtrante. Por estarem, em geral, localizados em regiões internas das estruturas, se encontram parcialmente protegidas do intemperismo, apesar de ainda estarem suscetíveis à degradação por reações químicas (Cavalcanti; Parahyba, 2011).

Por sua vez, blocos de maiores dimensões, como pedras de mão, são utilizadas principalmente em obras de contenção, diques, barragens, dissipadores de energia e para proteção de áreas erodidas (Diógenes, 2018). De acordo com (Gaioto, 1982), Para essas aplicações, recomenda-se que os materiais sejam submetidos a ensaios de desagregabilidade, que simulam condições de intempéries e ciclagem por meio de imersão em soluções de sulfatos e posterior secagem em estufa, além de análises petrográficas e mineralógicas.

Adicionalmente, deve-se ter controle quanto às dimensões dos blocos, a fim de evitar o seu carreamento pela água ou o descalçamento das peças em decorrência da desagregação dos aterros (Gaioto, 1982). A Figura 5 ilustra a aplicação desse tipo de material em um dique de contenção de água utilizada em processos de mineração e a Figura 6 mostra a aplicação de pedras de mão e agregados graúdos em um sistema de drenagem superficial de uma pilha de rejeito.

Figura 5: Aplicação de blocos de gnaiss em um dique de armazenamento de água.



Fonte: Acervo do Autor.

Figura 6: Aplicação de agregados em um sistema de drenagem de pilha de rejeito.



Fonte: Acervo do Autor.

2.8.3 Aplicações em Ferrovias e Pavimentação

Agregados graúdos são utilizados em ferrovias na composição de lastros que são camadas de material granular responsáveis por suportar a grade ferroviária (Pires et al., 2017). Apesar de não serem o componente mais caro da ferrovia, a vida útil de outros elementos pode ser reduzida com a deterioração dos lastros, além de poderem causar bloqueios das linhas pela frequente necessidade de manutenção. Dentre os parâmetros mais importantes que influenciam as respostas mecânicas do material utilizado, destacam-se a granulometria, a litologia e a morfologia (Rosa, 2019).

As principais funções do agregado no lastro são: absorver as tensões verticais e distribuí-las de forma homogênea ao solo, garantir o nivelamento e a estabilidade dos dormentes e dos trilhos, permitir a drenagem da via e amortecer vibrações e ruídos (Diógenes, 2016). Dessa forma, a camada de lastro deve ser constituída por agregados resistentes, com pouca alteração por agentes atmosféricos e agentes químicos, permeáveis, estáveis, com grande volume disponível, fácil obtenção e custo viável (Diógenes, 2016). Em função da disponibilidade e das suas propriedades, a rocha gnaisse está entre as mais adequadas para serem utilizadas em lastros ferroviários (Nabais, 2014).

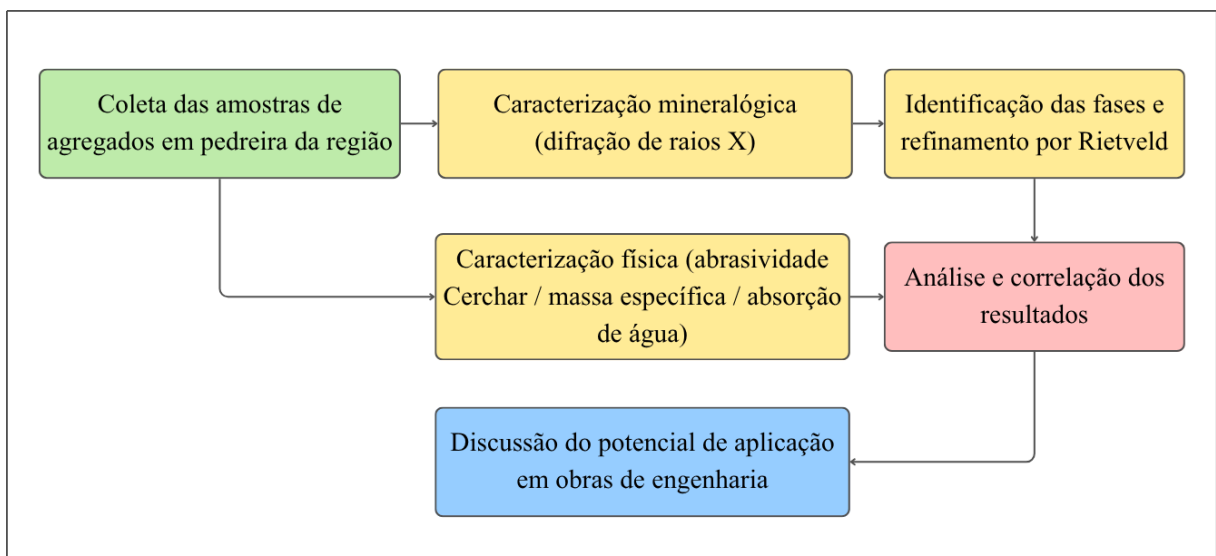
De acordo com (Farias; Palmeira, 2010), pavimentos rodoviários e aeroportuários apresentam um conjunto de camadas constituídas com a finalidade de resistir e distribuir esforços ao subleito, superfície abaixo do terrapleno, considerada a fundação do pavimento. Os agregados constituem a base, um dos principais componentes estruturais do pavimento, responsável por absorver e transmitir esses esforços, além de estarem presentes também na camada de revestimento. Nesse sentido, o desempenho dos pavimentos está diretamente relacionado às características dos agregados empregados, uma vez que esses materiais devem suportar elevados níveis de tensão e apresentar alta resistência à deformação em situações de uso contínuo, como no caso das rodovias. Adicionalmente, a estrutura granular dos agregados auxilia na dissipação das vibrações induzidas pelo tráfego, devido ao atrito entre as partículas e à presença de vazios, fatores que favorecem a perda de energia mecânica e o rearranjo interno dos grãos (Farias; Palmeira, 2010).

3 METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho consistiu em analisar quantitativamente e qualitativamente a composição mineralógica das amostras de rocha com a utilização a técnica de difração de raios X. Posteriormente, realizaram-se ensaios de caracterização física da rocha. O fluxograma apresentado na Figura 7 mostra as etapas metodológicas adotadas para atender aos objetivos específicos da pesquisa.

Ressalta-se que o trabalho possui caráter preliminar de caracterização mineralógica e tecnológica dos agregados estudados, não tendo como finalidade a certificação do material. Dessa forma, os resultados obtidos permitem discutir o potencial de utilização desses agregados em diferentes obras de engenharia, porém, sem substituir programas completos de caracterização previstos em normas específicas.

Figura 7: Plano de trabalho.



Fonte: Autor.

3.1 Origem e Características dos Agregados Utilizados

Foram coletadas amostras, ilustradas na Figura 8, de diferentes classes de brita, incluindo as britas 0, 1 e 3, além de pedra de mão e pó de brita, por meio de uma visita à

pedreira localizada no distrito histórico de Amarantina pertencente ao município de Ouro Preto.

Figura 8: Algumas amostras de rocha cedidas pela pedreira.



Fonte: Acervo do Autor.

O agregado graúdo que foi utilizado neste estudo é proveniente da britagem da rocha gnaisse, caracterizada por sua estrutura foliada e pela presença de bandas alternadas claras, ricas em quartzo e feldspatos, e escuras, compostas por outros minerais de acordo com (King, [S.d.]). A composição mineralógica e a distribuição desses minerais podem influenciar diretamente propriedades importantes, como resistência mecânica e abrasividade. Além disso, a alternância entre bandas com diferentes composições mineralógicas confere à rocha um comportamento anisotrópico, fazendo com que determinadas propriedades possam variar em função da direção analisada. Essa característica do material é ilustrada na Figura 9.

Figura 9: Características da rocha extraída pela pedreira.



Fonte: Acervo do Autor.

3.2 Difração de Raios X

A difração de raios X em pó (DRX) foi realizada no Equipamento Malvern PANalytical X'Pert PRO, do Laboratório de Crescimento e Caracterização de Materiais Cristalinos da UFOP. O difratograma obtido foi coletados e analisados por meio dos softwares QualX e TOPAS (*Total Pattern Analysis Software*), com o objetivo de identificar as fases mineralógicas presentes e realizar o refinamento pelo método de Rietveld, possibilitando, assim, a análise qualitativa e quantitativa das amostras.

As medidas foram realizadas no intervalo angular de 5° a 50° em 2θ , utilizando passo de varredura de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 0,3 s por passo. A identificação preliminar das fases cristalinas foi conduzida no software QualX por meio da comparação dos picos experimentais com os padrões cristalográficos disponíveis no banco de dados Crystallography Open Database (COD-Inorganic), versão 2022-05-06. Posteriormente, as fases identificadas

foram utilizadas como base para o refinamento dos difratogramas pelo método de Rietveld no software TOPAS.

3.2.1 Preparação das Amostras

O preparo das amostras é determinante na qualidade dos resultados da medida, uma vez que partículas com granulometria grosseira podem prejudicar a acomodação adequada do pó no porta-amostras e reduzir a resolução dos picos de difração. Diante disso, o material foi submetido a um processo de moagem em almofariz até a obtenção de um pó fino, em ponto de talco, e acomodação no porta amostras logo em seguida (University of Alberta, [S.d.]). Utilizaram-se fragmentos de brita 1 triturados e macerados manualmente no almofariz, no entanto, é mais conveniente utilizar o pó de brita obtido em moinho de bolas quando houver necessidade de maiores quantidades da amostra.

O porta-amostras utilizado consistiu em um suporte de vidro com cavidade central, projetado para ser acoplado diretamente ao equipamento durante o ensaio. O pó foi depositado na cavidade em pequenas quantidades e distribuído uniformemente com o auxílio de uma espátula. Em seguida utilizou-se uma lâmina de vidro para preencher completamente o suporte sem deixar espaços vazios, relevos ou fissuras deixando a superfície completamente plana, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10: Amostra de pó da brita preparada para análise por difração de raios X e encaixe do porta amostras no equipamento.

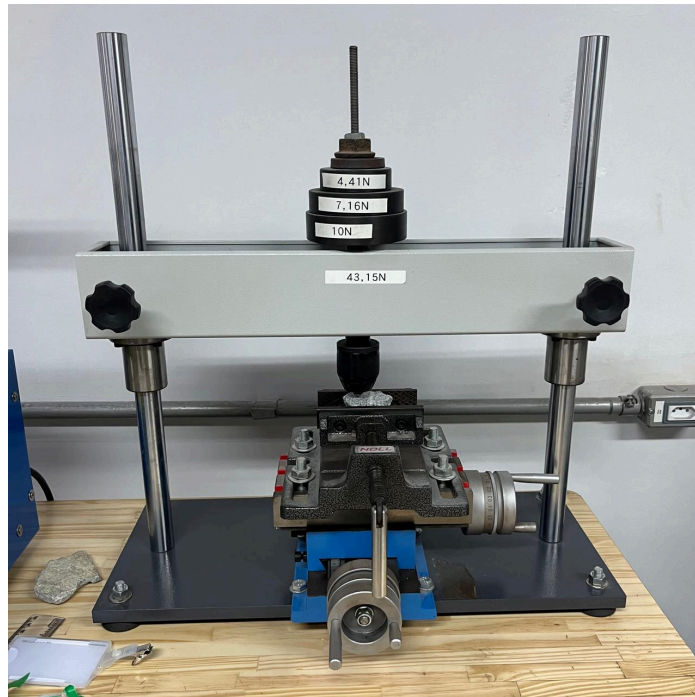


Fonte: Acervo do autor.

3.3 Determinação da Abrasividade

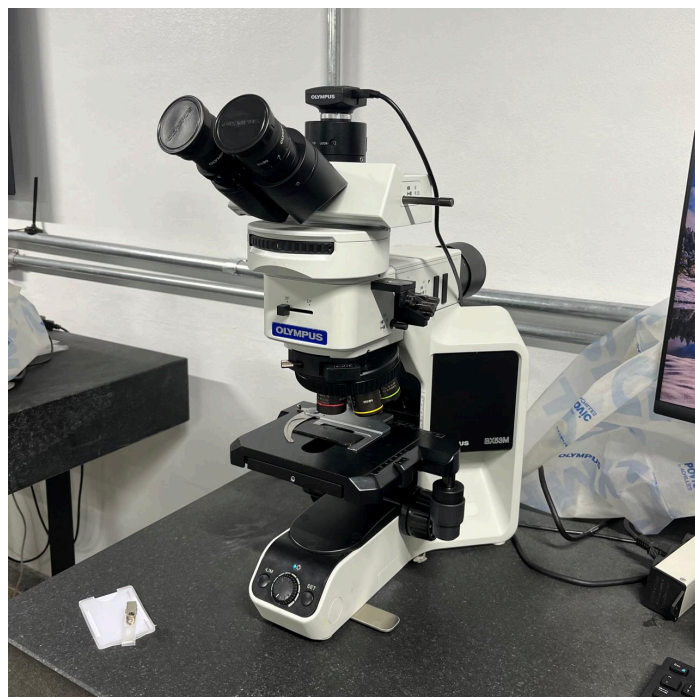
Para a determinação do índice de abrasividade, utilizou-se o método Cerchar seguindo os parâmetros da norma ASTM D7625-22. O equipamento empregado no ensaio possui um sistema de manivela com deslocamento constante a cada revolução para a realização do risco e uma morsa para posicionamento seguro da amostra, como ilustra a Figura 11. O diâmetro da ponta desgastada foi medido por meio de um microscópio metalográfico, Olympus BX53M com câmera digital acoplada, indicado na Figura 12, permitindo a captura das imagens e medição do diâmetro com o uso de software.

Figura 11: Dispositivo utilizado para a realização do ensaio.



Fonte: Acervo do Autor.

Figura 12: Microscópio óptico utilizado para medição da marca de desgaste.

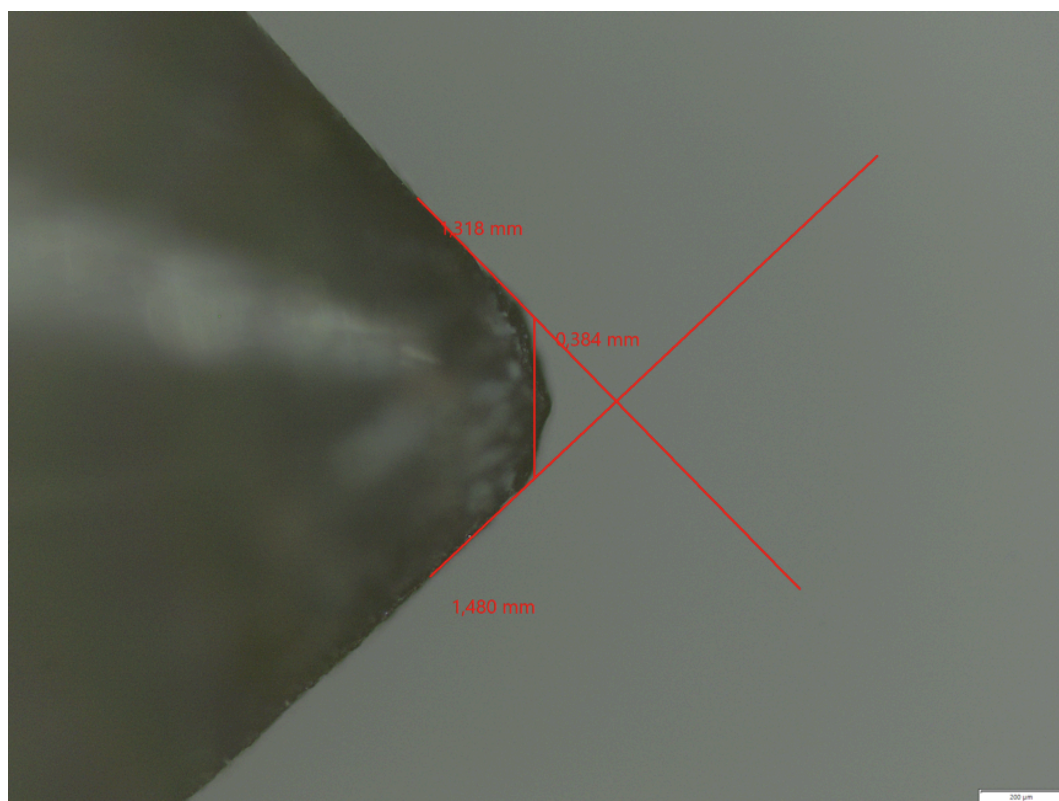


Fonte: Acervo do Autor.

Foram realizados três ensaios de acordo com as características geológicas da amostra. Por apresentarem bandas alternadas com cores claras e escuras, realizaram-se cinco riscos paralelos às bandas claras, cinco riscos paralelos às bandas escuras e cinco riscos perpendiculares às bandas, com o objetivo de comparar os três resultados encontrados e entender possíveis variações de valores. Em seguida, para cada um dos três casos distintos, obtém-se a média dos cinco valores encontrados a fim de encontrar os três índices CAI, sendo necessário uma quantidade de 15 ponteiras para obtenção dos resultados. As ponteiras foram usinadas de modo a apresentar um ângulo de ponta cônica de 90° , respeitando a especificação da norma.

A Figura 13 ilustra o procedimento de medição do diâmetro da ponteira desgastada. Entretanto, durante o risco, o desgaste pode ocorrer de forma irregular. Por esse motivo, torna-se necessário realizar quatro medições em direções distintas, sendo cada medição a aproximadamente 90° da medição anterior, a fim de obter o valor médio correspondente a um único risco.

Figura 13: Exemplo de medição do diâmetro desgastado da ponteira após o risco.



Fonte: Acervo do Autor.

3.4 Ensaios de Massa Específica e Absorção de Água

Para a determinação da massa específica e da absorção de água, adotou-se o procedimento estabelecido pela norma NBR NM 53, utilizando-se brita 1 na execução dos ensaios. O procedimento consistiu na obtenção das massas da amostra nas diferentes condições especificadas pela norma. Para a determinação dos resultados, as amostras foram previamente submersas em água por um período de 24 horas, sendo posteriormente aferidas nas condições: submersa e saturada com superfície seca. Além disso, para a obtenção da massa na condição seca, as amostras foram mantidas em estufa por cerca de 24 horas. Foram realizados dois ensaios para a mesma amostra, com o objetivo de avaliar a conformidade e as variações entre os resultados, conforme os critérios estabelecidos pela norma.

A Figura 14 mostra a aparelhagem utilizada no ensaio, sendo um recipiente constituído de um cesto de arame, uma balança hidrostática e um recipiente estanque para conter a água.

Figura 14: Equipamentos utilizados no ensaio.



Fonte: Acervo do Autor.

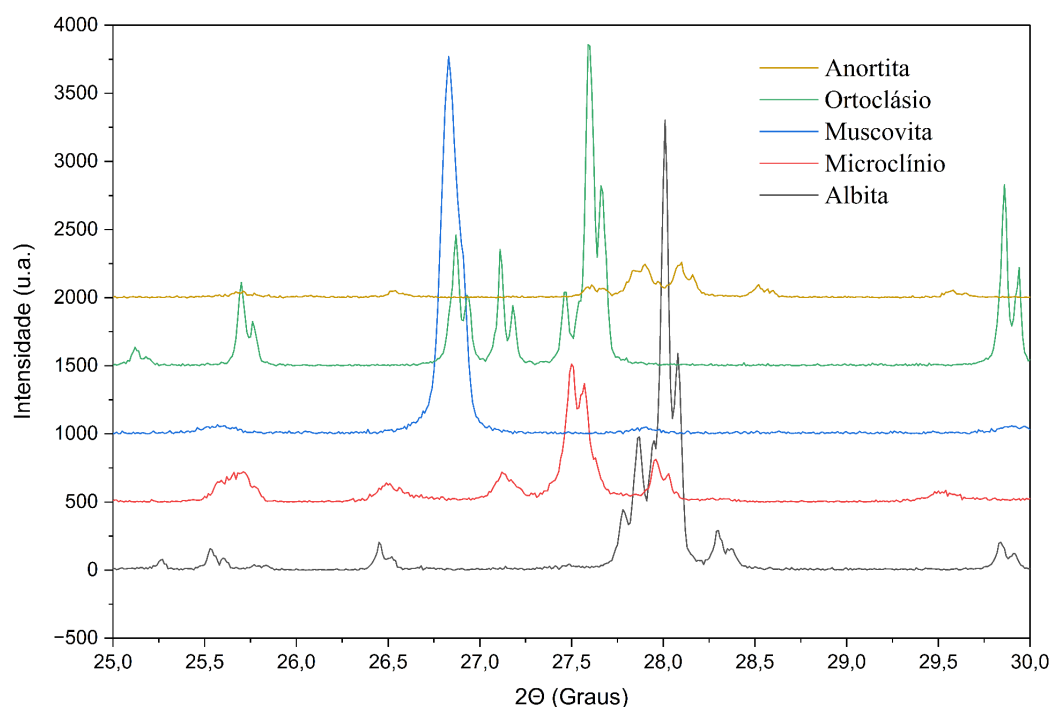
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Difração de Raios X

A identificação mineralógica preliminar da amostra foi realizada com o auxílio do software QualX a partir do difratograma obtido experimentalmente. Por meio do programa, o padrão de difração medido pode ser comparado com os registros de referência disponíveis no banco de dados utilizado. Isso permitiu a associação dos picos observados às respectivas fases minerais seguindo uma seleção manual dos picos e comparação com as fases sugeridas pelo software. Com base nessa análise, foram identificados como principais constituintes da amostra os minerais dos grupos dos feldspatos, das micas e o quartzo pertencente ao grupo das sílicas.

Entretanto, a identificação precisa das fases associadas a cada pico utilizando esse software apresenta limitações, tornando-se, em certa medida, especulativa. Isso ocorre porque minerais do grupo dos feldspatos possuem estruturas cristalinas muito semelhantes, o que resulta em sobreposição de picos em seus difratogramas, conforme ilustrado na Figura 15 no intervalo entre 20° e 30° . Além disso, minerais de outros grupos, como as micas e o quartzo, também podem apresentar picos nessas mesmas regiões de sobreposição, o que aumenta a incerteza na distinção entre as fases e identificação manual dos seus picos no padrão medido.

Figura 15: Sobreposição de picos nos difratogramas característicos dos minerais: anortita, albita, ortoclásio e microclínio.



Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 16, o programa indicou a presença predominante de feldspatos, com destaque para albita (14,1%), ortoclásio (21,8%), oligoclásio (2,9%) e anortita (16,9%). Além desses, foram identificadas micas, como muscovita (18,2%), biotita (4,0%) e flogopita (15,0%), bem como quartzo (7,1%). A Figura 16 também apresenta a numeração dos registros cristalográficos utilizados na identificação das fases. O QualX organiza essas fases com base no grau de compatibilidade entre os picos experimentais e os padrões cristalográficos presentes no banco de dados Crystallography Open Database (COD), considerando parâmetros como posição, intensidade e correspondência entre os picos, sugerindo assim as fases mais compatíveis com a amostra analisada.

Figura 16: Resultado da identificação das fases pelo software QualX.

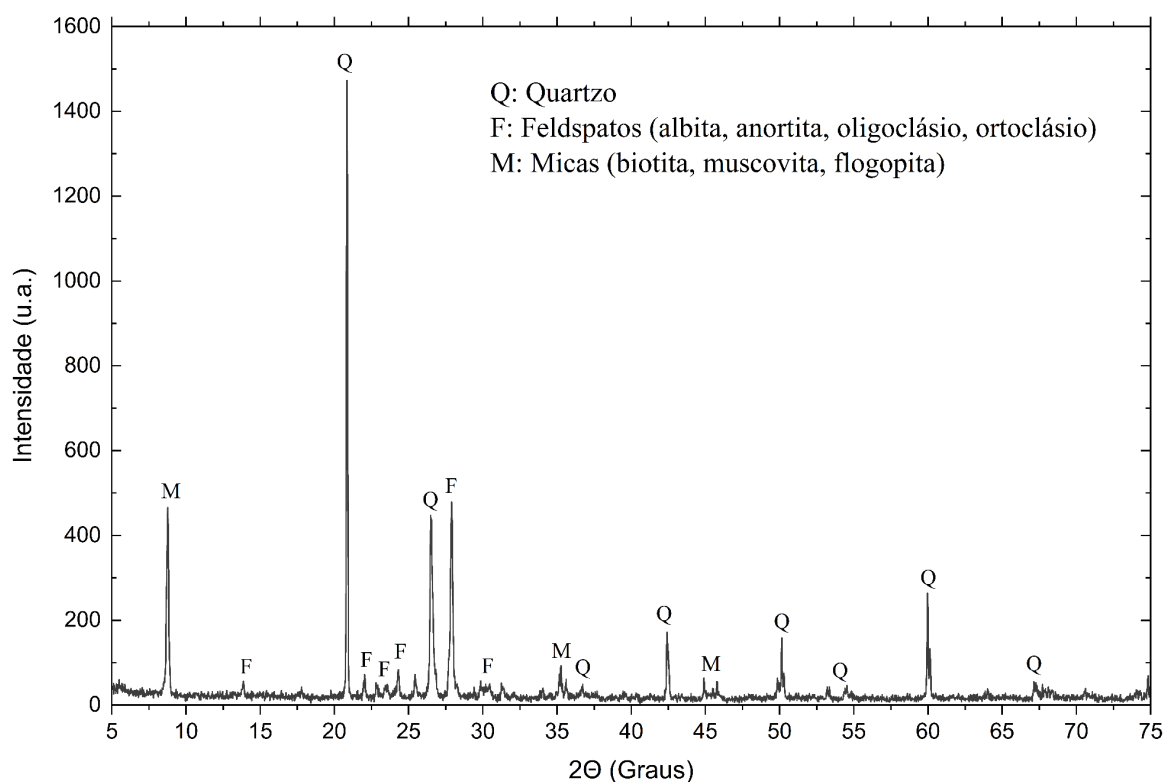
No.	CARD	Compound Name	Chemical Formula	S-Quant.
P.1	00-900-9663	[Albite]	Al1.02 Ca0.02 Na0.98 O8 Si2.98	14.1%
P.2	00-900-6347	[Orthoclase]	Al K O8 Si3	21.8%
P.3	00-901-1422	[Oligoclase]	Al1.179 Ca0.179 Na0.821 O8 Si2.821	2.9%
P.4	00-901-5970	[Muscovite]	H5.76 Al10.92 Ba0.04 K1.86 N1.44 Na0.12 O44.94 Si12.51	18.2%
P.5	00-900-2302	[Biotite]	Al1.9 Ba0.01 Ca0.03 F0.32 Fe1.38 K Mg0.73 Na0.02 O11.68 Si2.68 Ti0.14	4.0%
P.6	00-900-9666	[Quartz]	O2 Si	7.1%
P.7	00-900-5153	[Phlogopite]	Al1.46 Ba0.04 Ca0. F0.02 Fe0.88 K0.88 Mg1.85 Mn0.01 Na0.08 O12 Si2.65 Ti0.14	15.0%
P.8	00-900-0362	[Anorthite]	Al2 Ca O8 Si2	16.9%

Fonte: Autor.

Ressalta-se que os valores percentuais fornecidos pelo QualX representam apenas uma estimativa semiquantitativa da composição mineralógica, calculada a partir dos fatores de intensidade relativa (I/I_c) dos padrões cristalográficos identificados. Dessa forma, esses valores foram empregados como referência inicial para a composição mineralógica da amostra, enquanto a quantificação final das fases foi obtida posteriormente por meio do refinamento pelo método de Rietveld realizado no software TOPAS.

A partir da Figura 17, é possível observar o difratograma obtido experimentalmente, bem como a posição dos picos identificados, contudo não há distinção exata entre as fases, com exceção do quartzo, cujos picos são bem característicos e de fácil identificação. Dessa forma, os picos associados aos feldspatos, especialmente nas regiões de sobreposição, podem corresponder à albite, anortita, ortoclásio ou oligoclásio, e o mesmo se aplica aos picos atribuídos a algum tipo de mica. Embora seja possível identificar picos e suas fases correspondentes fora dessas regiões com o auxílio do software, torna-se difícil justificar essa classificação e quantificação com segurança sem a realização de um refinamento por Rietveld, como o efetuado no software TOPAS.

Figura 17: Difratoograma experimental da amostra de brita e identificação preliminar dos picos de difração.



Fonte: Autor.

4.2 Refinamento pelo Método de Rietveld

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos na caracterização mineralógica pelo software QualX, foi realizado o refinamento dos dados de difração e quantificação das fases utilizando o software TOPAS. O refinamento confirmou a presença da maior parte das fases identificadas preliminarmente pelo QualX, exceto muscovita, anortita e flogopita. Essas fases foram desconsideradas em razão da ausência de picos suficientemente definidos ou compatíveis com o difratograma. O método de Rietveld utilizado para o refinamento leva em consideração a sobreposição dos picos e diversos parâmetros para a aproximação do padrão experimental com o padrão calculado. Entre eles estão os fatores de escala, os parâmetros de

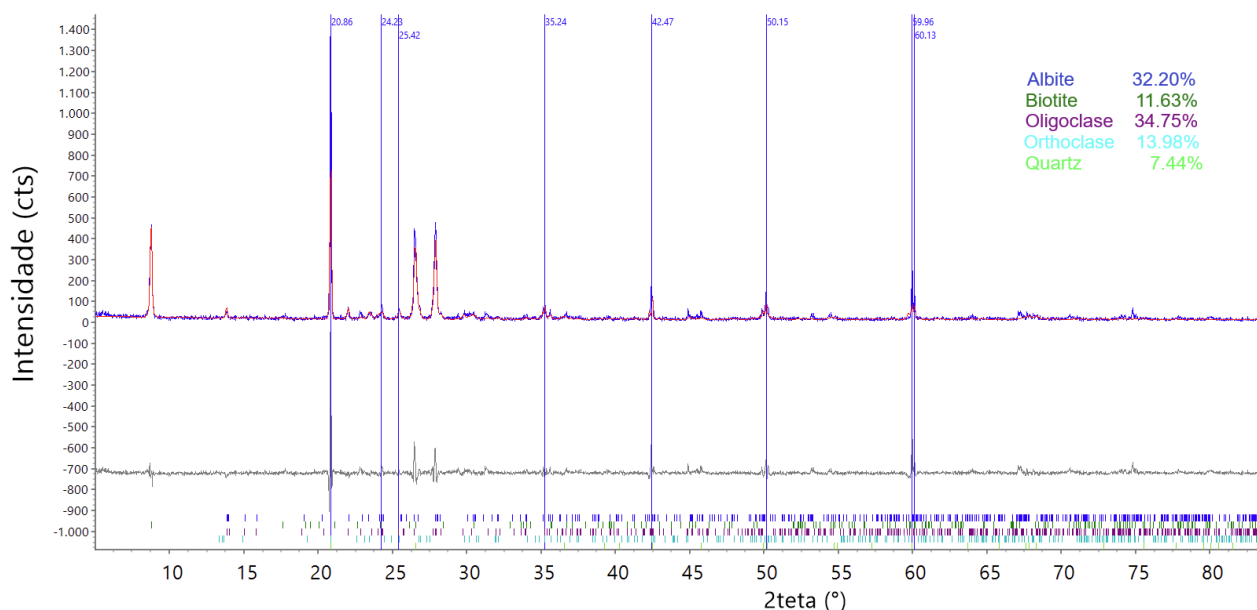
rede, o deslocamento angular, a linha de fundo, o perfil dos picos, o tamanho de cristalito e as correções de orientação preferencial.

O refinamento foi realizado de forma gradual, iniciando pelas fases com maior quantidade estimada na identificação preliminar e, em seguida, pelas fases presentes em menores proporções. Foram inseridas no modelo as fases cristalográficas previamente identificadas e seguiram-se as etapas de refinamento. Na primeira etapa, foram refinados os fatores de escala de todas as fases, bem como os parâmetros de fundo (*background*) e o deslocamento da amostra (*specimen displacement*).

Posteriormente, foram refinados os parâmetros da célula unitária de cada fase cristalina, segundo a ordem determinada, incluindo os parâmetros de rede (a , b e c) e os ângulos cristalográficos (α , β e γ). Isso permite corrigir pequenas variações estruturais em relação aos modelos de referência. Durante o refinamento desses parâmetros, analisou-se os padrões de difração e correspondência entre os picos o que levou a remoção das fases anortita, muscovita e flogopita do modelo. Em seguida, foi possível refinar o parâmetro relacionado ao alargamento dos picos de difração, associado ao tamanho médio dos cristalitos.

Por fim, foram aplicadas correções de orientação preferencial para fases que apresentaram desvios de intensidade ligados à textura da amostra. A orientação preferencial ocorre quando os cristais não estão distribuídos aleatoriamente no porta-amostras após a moagem, prensagem e acomodação da amostra. Isso resulta em intensidades difratadas maiores para determinados planos cristalinos e menores para outros, em comparação com uma distribuição aleatória dos grãos. Esse fenômeno é particularmente comum em minerais lamelares, como a biotita por possuir cristais em forma de lâminas que tendem a se acomodar. Dessa forma, o resultado do refinamento obtido pode ser observado na Figura 18 apresentada a seguir.

Figura 18: Resultado do refinamento de Rietveld obtido no software TOPAS.



Fonte: Autor.

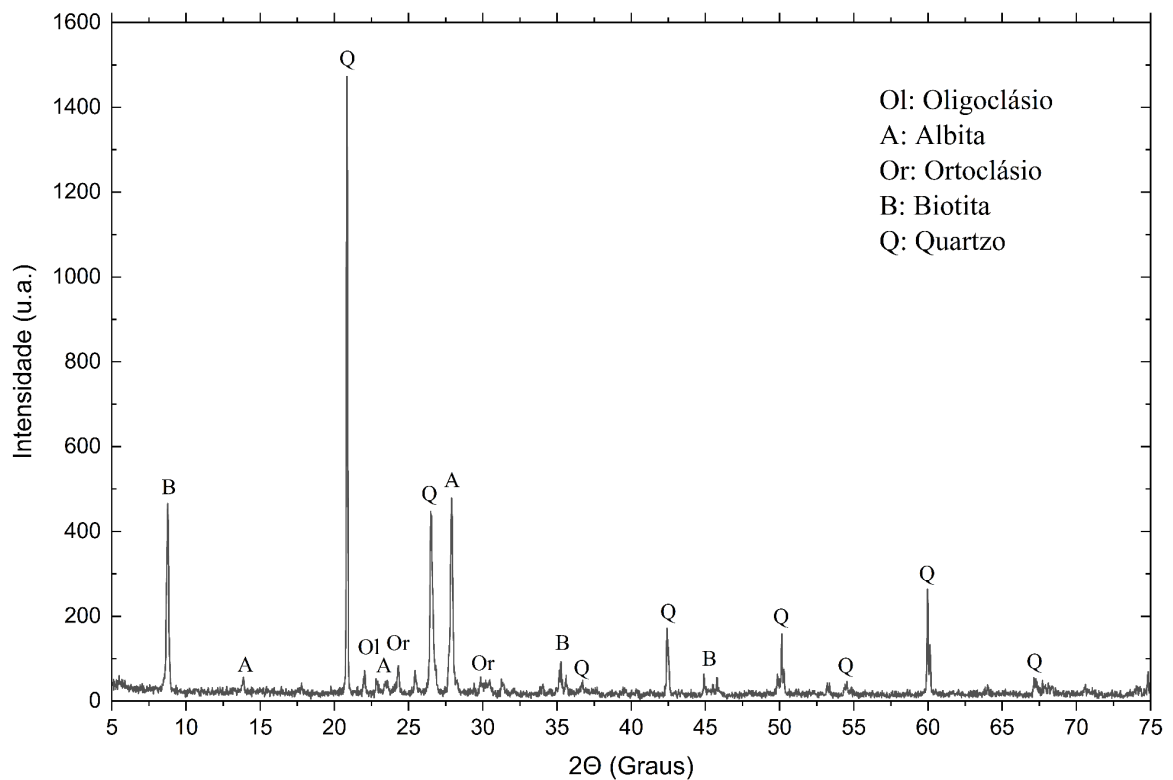
Com relação à orientação preferencial, para a biotita foi utilizado o modelo de *March-Dollase*, adequado para minerais com orientação predominante em uma direção específica. Já para o quartzo foi empregado o modelo de Harmônicos Esféricos (*Spherical Harmonics*), que permite descrever distribuições de orientação mais complexas. A aplicação dessas correções possibilitou melhor ajuste das intensidades observadas e calculadas para a biotita. No entanto, apesar da aplicação de correções e da avaliação de diferentes modelos estruturais para o quartzo, disponíveis na literatura, a intensidade de um dos principais picos dessa fase permaneceu subestimada em relação aos dados experimentais. Isso pode ter ocorrido por características da amostra ou por limitações dos dados obtidos no ensaio (Carezzato, 2019). Como os demais picos do quartzo foram bem ajustados, foi mantido o modelo que apresentou o melhor resultado geral.

A qualidade do refinamento pode ser avaliada por meio do índice GOF (*Goodness of Fit*), que expressa a razão entre o resíduo ponderado do perfil (R_{wp}) e o resíduo esperado (R_{exp}). Valores próximos de 1 indicam que o refinamento se aproxima do ajuste estatisticamente ideal para o conjunto de dados analisado. No refinamento realizado, foi obtido $GOF = 1,57$, indicando boa concordância entre os perfis experimental e calculado.

Além disso, os demais indicadores estatísticos obtidos foram R_p (resíduo do perfil) = 24,27%, R_{wp} (resíduo ponderado do perfil) = 31,26% e R_{exp} (resíduo esperado) = 19,91%, corroborando a qualidade do ajuste obtido para a amostra analisada.

Por fim, após o refinamento, foi possível confirmar com maior confiabilidade a correspondência dos principais picos às fases minerais identificadas, conforme a Figura 19.

Figura 19: Difratoograma de raios X da amostra com identificação das principais fases cristalinas.



Fonte: Autor.

4.3 Abrasividade Cerchar

Os resultados do ensaio de abrasividade Cerchar mostraram que a rocha utilizada como agregado gráudo apresenta alta abrasividade, com valores indicados na tabela 3 e classificados

de acordo com a Tabela 2. Além disso, como os pinos utilizados no ensaio foram de 50 HRC houve a necessidade de ajustar os valores por meio da equação (5) apresentada anteriormente. Esse valor encontrado, está relacionado ao conteúdo mineral da rocha evidenciando a presença de minerais mais resistentes como o quartzo e minerais do grupo dos feldspatos.

Tabela 3: Valores médios do Índice de abrasividade Cerchar e correção.

Orientação do risco	CAI medido	CAI corrigido
Paralelo às bandas claras	3,615	3,23
Paralelo às bandas escuras	3,570	3,19
Perpendicular às bandas	4,425	3,95

Fonte: Autor.

Os resultados indicam maior valor de abrasividade das bandas claras do que das bandas escuras. Isso se deve à presença de minerais mais resistentes e duros como o quartzo e feldspatos. Por outro lado, obteve-se valores mais altos em riscos perpendiculares às bandas, apesar do esperado serem valores intermediários. Isso pode acontecer devido às mudanças bruscas de resistência na interface de contato entre os minerais das diferentes bandas, podendo gerar valores mais dispersos.

4.4 Massa Específica Aparente, Massa unitária e Absorção de água

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a determinação da massa específica e da absorção de água da brita. As diferenças observadas entre os dois ensaios realizados individualmente para a mesma amostra encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). Para a massa específica, a norma estabelece que a diferença entre os resultados não deve ultrapassar $0,02 \text{ g/cm}^3$, enquanto para a absorção de água o limite admissível é de 0,3%. Dessa forma, os valores obtidos estão dentro dos limites.

Tabela 4: Resultados de massa específica e absorção de água.

Identificação	Ensaio 1	Ensaio 2	Valor médio
A - Massa da amostra seca em estufa (g)	1548,4	1494,9	1521,6
B - Massa da amostra (SSS) (g)	1558,3	1504,6	1531,4
C - Massa da amostra em água (g)	973,2	942,9	1916,1
Massa específica na condição (SSS) (kg/cm ³)	2,66	2,68	2,67
Massa específica do agregado seco (kg/cm ³)	2,69	2,71	2,70
Massa específica aparente (kg/cm ³)	2,65	2,66	2,65
Absorção de água (%)	0,64	0,65	0,64

Fonte: Autor.

Considerando apenas os limites estabelecidos para esses dois índices pela ABNT NBR 5564 (ABNT, 2021), que define os ensaios obrigatórios para agregados utilizados em lastros ferroviários, as britas apresentaram resultados satisfatórios. A norma estabelece valor mínimo de 2,50 g/cm³ para a massa específica aparente e valor máximo de 0,8% para a absorção de água. Sendo assim, os ensaios realizados apresentaram valores médios de 2,65 g/cm³ para a massa específica aparente e 0,64% para a absorção de água, atendendo aos critérios. Certamente, a norma traz diversos outros valores de parâmetros que devem ser satisfeitos, no entanto, apenas os dois índices considerados podem ser tomados como referência em um estudo preliminar.

Por meio dos resultados, percebe-se valores da massa específica do agregado seco (incluindo-se os vazios permeáveis) maiores que os valores de massa específica aparente (excluindo-se vazios permeáveis). Isso acontece, pois, na primeira condição o volume é dado pela diferença entre as massas seca e submersa, enquanto, na segunda condição, o volume é dado pela diferença entre as massas na condição SSS e submersa. Como o volume se encontra no denominador, o maior valor resultará em uma menor massa específica.

Ao comparar os índices físicos obtidos para o gnaiss deste estudo com a caracterização realizada por Diógenes (2016) em agregados de matriz granítica destinados a lastro ferroviário, verifica-se forte convergência no comportamento físico dos materiais. A autora

registrou massa específica aparente média de 2597,4 kg/m³ (2,60 g/cm³) e absorção de água de 0,7% a 0,8%, valores muito próximos aos determinados experimentalmente neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

A análise por difração de raios X permitiu identificar qualitativamente e quantitativamente as principais fases minerais presentes na amostra. O refinamento pelo método de Rietveld proporcionou maior confiabilidade à identificação e quantificação das fases cristalinas, confirmando a predominância de feldspatos, representados pelos minerais albita, oligoclásio e ortoclásio, além da presença de quartzo e biotita. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com a composição mineralógica descrita na literatura desse tipo de rocha. Além disso, o refinamento dos dados pelo método de Rietveld apresentou resultados satisfatórios de acordo com o índice GOF, indicando boa concordância entre os padrões experimental e calculado.

Os valores médios de massa específica e absorção de água obtidos também foram compatíveis com valores normalmente encontrados para rochas gnáissicas utilizadas como agregados graúdos. Esses resultados sugerem que o material apresenta características físicas adequadas para aplicações que demandam boa integridade estrutural e durabilidade, além de atender, por exemplo, aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 5564 para agregados destinados à lastros ferroviários.

Os ensaios de abrasividade Cerchar indicaram valores corrigidos de CAI entre 3,19 e 3,95, classificando a rocha como de alta abrasividade. Observou-se a influência da heterogeneidade mineralógica nos resultados obtidos, sendo os maiores valores associados à presença de minerais mais resistentes, como quartzo e feldspatos nas bandas claras. Destaca-se que o ensaio realizado na direção perpendicular às bandas registrou o valor mais elevado de abrasividade (CAI de 3,95), resultado impulsionado possivelmente pela mudança brusca na interface de contato entre os minerais das diferentes camadas, o que pode gerar maior dispersão nos valores, comportamento comum em rochas com granulometria mais grosseira.

A correlação entre os resultados mineralógicos e os ensaios tecnológicos demonstrou que a composição mineralógica da rocha exerce influência direta sobre suas propriedades físicas e mecânicas. Em especial, a presença de quartzo e feldspatos contribui para a resistência e durabilidade do material, enquanto a presença de minerais do grupo das micas, por exemplo, pode influenciar aspectos relacionados à sanidade e ao comportamento do agregado em matrizes cimentícias. De maneira geral, os resultados demonstram que os

agregados estudados apresentam características mineralógicas e tecnológicas adequadas para diversas aplicações em obras de engenharia. Entretanto, o presente estudo não substitui programas de caracterização específicos para cada aplicação.

Por fim, a metodologia empregada foi adequada para a caracterização preliminar dos agregados estudados, permitindo atingir os objetivos propostos e fornecer informações relevantes para sua utilização em obras de engenharia. O trabalho visou contribuir para a ampliação do conhecimento a respeito dos agregados graúdos utilizados na região de Ouro Preto, fornecendo informações mineralógicas e tecnológicas que podem servir de base para estudos futuros e para a avaliação do potencial desses materiais.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade, recomenda-se a realização de estudos complementares voltados à caracterização mais abrangente do agregado, como:

- Determinação do índice de forma das partículas (NBR 7809), teor de material pulverulento (NBR NM 46) e resistência à abrasão por meio do ensaio Los Angeles (NBR NM 51), visando a aplicação em obras de pavimentação, ferrovias e concreto;
- Realização de ensaios de resistência à compressão e resistência ao choque, utilizando métodos específicos adotados por concessionárias ferroviárias, com o objetivo de avaliar o potencial de utilização dos materiais como lastro ferroviário;
- Avaliação da sanidade dos agregados por meio de ensaios com sulfato de sódio ou magnésio, conforme a NBR 5564, para análise da resistência ao intemperismo e identificação de possíveis alterações mineralógicas com o tempo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Agregados minerais para obras de construção civil e infraestrutura nas principais regiões metropolitanas do Brasil: diagnóstico e cenários da cadeia produtiva, com seus desafios e oportunidades.** Brasília: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), 2012.

ALBER, Michael *et al.* ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 47, n. 1, p. 261–266, 1 jan. 2014.

ALMEIDA, Ana Natália Fragoso de. **Aplicação do método Rietveld para análise quantitativa e refinamento estrutural de agregados graúdos do Nordeste brasileiro.** Dissertação (Mestrado)—João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Aggregates for Concrete (ACI Education Bulletin E1-07).** Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15577-1:2008: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados - Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564: Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Abrasiveness Index Method**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ATAÍDE, Emily. **O Quadrilátero Ferrífero: Pilar da Mineração em Minas Gerais**. Disponível em: <https://acadmin.com.br/2024/07/o-quadrilatero-ferrifero-pilar-da-mineracao-em-minas-gerais/> >. Acesso em: 23 jan. 2025.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v. 1

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

CAREZZATO, Geraldo de Lima. **Desenvolvimento, construção e aplicação de acessórios para difratometria de raios X**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais)—São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2019.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.

CAVALCANTI, Vanessa Maria Mamede; PARAHYBA, Ricardo Eudes Ribeiro. **A indústria de agregados para construção civil na Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza, Brasil: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2011.

CHIOSSI, Nivaldo. **Geologia de engenharia**. 3. ed. Porto Alegre: Oficina de Textos, 2025.

CONNOLLY, James R. **Introduction to X-ray Powder Diffraction**. Disponível em: <<https://www.xray.cz/xray/csca/kol2011/kurs/dalsi-cteni/connolly-2005/01-xrd-intro.pdf>>.

DE AZEVEDO, Úrsula Ruchkys *et al.* Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. *In: Geoparques do Brasil: propostas*. [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 2012. v. 1.

DIÓGENES, Daianne Fernandes. **Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do processamento digital de imagens**. Dissertação de Mestrado—Fortaleza, Brasil: Universidade Federal do Ceará, 2016.

DIÓGENES, Lara Marques. **Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem**. Dissertação (Mestrado)—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018.

FARIAS, Márcio Muniz de; PALMEIRA, Ennio Marques. Agregados para a construção civil. *In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010.

FERREIRA, Gilson Ezequiel; SILVA, Valesca da Silveira. Mercado brasileiro de agregados minerais e o estudo do CETEM para obtenção de areia manufaturada. *In: Tegucigalpa, Honduras: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)*, 2004. Disponível em: <<https://www.gov.br/cetem>>

FIORENTINI, João Alberto. **Avaliação da durabilidade, abrasividade e dureza das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

GAIOTO, Nélcio. **Barragens de terra e enrocamento**. São Carlos, Brasil: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1982.

GOLDICH, Samuel S. A Study in Rock-Weathering. **The Journal of Geology**, v. 46, n. 1, p. 17–58, 1938.

JACOBS, N.; HAGAN, Paul. The Effect of Stylus Hardness and Some Test Parameters on the CERCHAR Abrasivity Index. *In: Asheville, North Carolina, USA: American Rock Mechanics Association (ARMA)*, jun. 2009.

JAIQUES, Daniel Silva. **Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2014.

KING, Hobart M. **Gneiss: Metamorphic Rock - Pictures, Definition & More.** , [S.d.]. Disponível em: <<https://geology.com/rocks/gneiss.shtml>>

KLEIN, Cornelis; DUTROW, Barbara. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

LA SERNA, Humberto Almeida de; REZENDE, Márcio Marques. Agregados para a Construção Civil. In: **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2013. p. 601–616.

LARA, Luiz Alcides Mesquita. **Materiais de Construção**. Ouro Preto: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), 2013.

LIMA, Mayanny Rodrigues de Moraes. **Efeito do grau de cristalinidade da sílica na reatividade de agregados em ambiente alcalino**. Dissertação de Mestrado—João Pessoa, PB, Brasil: Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2016.

LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz M. de (ORGS.). **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MACHADO, Rafael P.; DORIGUETTO, Antonio C. Conceitos em cristalografia estrutural: uma abordagem compreensiva da Lei de Bragg e do fator de estrutura. **Química Nova**, v. 48, n. 1, p. e-20250064, 2025.

MACIOSKI, Gustavo *et al.* Reação álcali-sílica: ensaios complementares na identificação do potencial reativo de agregados. In: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2024.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, Cássia Vanessa Albuquerque de; GOMES, Paulo César Correia; MORAES, Karoline Alves de Melo. Avaliação de composições de concreto autoadensável a partir da distribuição

granulométrica e de parâmetros de graduação de agregados. **Revista Matéria**, v. 26, n. 4, 2021.

MENEZES FILHO, A. P. **Aspectos geológico-geotécnicos de um perfil de alteração de gnaiss facoidal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1993.

MENEZES, Sebastião de Oliveira. **Minerais comuns e minerais de importância econômica: um manual fácil**. 2. ed. São Paulo: Grupo A, 2012.

NABAIS, R. J. S. **Manual básico de engenharia ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NASCIMENTO-DIAS, Bruno Leonardo do. Aplicação da difração de Raios X para caracterização mineralógica de meteoritos: conceitos físicos e os processos experimentais. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 8, n. 2, p. 1–15, 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, Glenda Aparecida Rodrigues de *et al.* Caracterização tecnológica de alguns litotipos do Espírito Santo e do Nordeste e sua aplicabilidade como rochas ornamentais. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 14, n. 2, p. 125–132, 2017.

PAIVA, Danyel Flávio Lopes de. **A influência do agregado graúdo na resistência mecânica e propriedades de fratura de um concreto para pavimentação rígida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

PECHARSKY, Vitalij K.; ZAVALIJ, Peter Y. **Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials**. New York: Springer, 2009.

PIAZZETTA, Gabriela Reis. **Abrasividade de rochas pelo ensaio Cerchar e a identificação dos regimes de desgaste da ponteira de aço**. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória)—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2018.

PIRES E LUZ, Vinícius Soares. **Uma revisão sintética sobre minerais, o processamento mineral e mineralogia aplicada**. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais)—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

PIRES, José *et al.* Degradação do lastro ferroviário – principais aspectos e estudos de caso. **Transportes**, v. 25, n. 3, 2017.

POLETTTO, Cleide. **A exploração de pedreiras na Região Metropolitana de São Paulo no contexto do planejamento e gestão do território**. Tese (Doutorado em Geografia Humana)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

ROSA, André Fardin. **Efeito da granulometria e da litologia no comportamento de lastros ferroviários em laboratório e por análise computacional**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

SCHIELDS, Paul. **Bragg's Law and Diffraction**. Disponível em: <<http://skuld.bmsc.washington.edu/~merritt/bc530/bragg/>>. Acesso em: 6 set. 2025.

SILVA, Narali Marques da; TADRA, Rafaela Marques da Silva. **Geologia e pedologia**. 2. ed. Curitiba: Intersaberes, 2024.

SILVA, Renato F. da. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 73, n. Jan/Jun de 2020, p. 73–80, 2020.

UNIVERSITY OF ALBERTA. **Sample Preparation**. Disponível em: <<https://cms.eas.ualberta.ca/xrd/sample-preparation/>>. Acesso em: 9 mar. 2026.

VALVERDE, Fernando Mendes. Agregados para construção civil. In: **Balanço Mineral Brasileiro 2001**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2001.

VICTORIA, Anderson Magalhães. **Recursos para construção civil**. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/recursos-construcao-civil/>>. Acesso em: 1 maio. 2026.

YAGOB, Arafah Ahmed Mohamed. Characterization of Crystalline Hornblende Gneiss by X-Ray Diffraction Technique. **arXiv:2310.18095**, 2023.

YARALI, O. *et al.* A study of rock abrasivity and tool wear in Coal Measures Rocks. **International Journal of Coal Geology**, v. 74, n. 1, p. 53–66, 2008.