



UNIVERSIDADE DE UBERABA
PEDRO HENRIQUE ARDUINI GUEDES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DE AREIAS PARA
AVALIAÇÃO PREVENTIVA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO

UBERABA, MG
2026

PEDRO HENRIQUE ARDUINI GUEDES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DE AREIAS PARA
AVALIAÇÃO PREVENTIVA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO

Dissertação de Mestrado Profissional
apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química da Universidade
de Uberaba.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Teixeira Fernandes

UBERABA, MG

2026

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

G934c Guedes, Pedro Henrique Arduini.
Caracterização física, química e mineralógica de areias para avaliação preventiva da reação álcali-agregado em estruturas de concreto / Pedro Henrique Arduini Guedes. – Uberaba (MG), 2026.
56 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. André Luís Teixeira Fernandes.

1. Engenharia química. 2. Reações químicas. 3. Agregados (Materiais de construção) – Análise. 4. Areia – Ouro Preto (MG) – Análise. 5. Raios X – Difração. I. Fernandes, André Luís Teixeira. II. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. IV. Título.

CDD 660.2

Tatiane da Silva Viana – Bibliotecária – CRB-6/3171

PEDRO HENRIQUE ARDUINI GUEDES

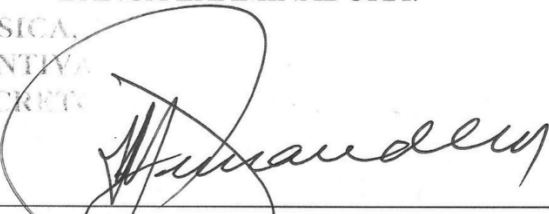
**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA DE AREIAS PARA
AVALIAÇÃO PREVENTIVA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química - Mestrado Profissional da Universidade de
Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos
Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 14/09/2026

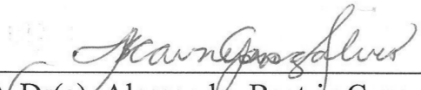
BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). André Luís Teixeira Fernandes – Orientador(a)
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo amor incondicional e por terem sido o alicerce da minha formação. A base educacional que me proporcionaram foi o que me permitiu trilhar este caminho e alcançar mais esta etapa em minha vida.

À **Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)**, pela excelência na graduação, que me conferiu o suporte técnico e humano necessário para o exercício da minha vida profissional e despertou em mim o desejo pela continuidade acadêmica.

Aos meus colegas e amigos da **Prefeitura Municipal de Uberaba** e da **CODAU**, que compartilharam comigo as angústias e vitórias desta jornada. Um agradecimento especial aos companheiros de mestrado: **Amanda Miguel, Helenice Sallum, Giovani Molinero, Armandino Chaves de Carvalho e Fernando Pierre Massa**, pela parceria, pelo incentivo mútuo e pelos momentos de valiosa troca de conhecimentos.

Aos professores do Programa de Mestrado da **Uniube**, pela dedicação ao ensino e pela partilha de experiências que tanto contribuíram para o meu crescimento intelectual.

Em especial, expresso minha gratidão:

Ao **Prof. Dr. André Luis Teixeira**, pela orientação, paciência e pelos ensinamentos fundamentais para a realização deste trabalho;

Ao **Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer**, pelo suporte acadêmico e rigor técnico;

Ao **Prof. Dr. Adriano Dawison de Lima**, pelas valiosas contribuições.

À **Profa. Dra. Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves** por aceitar compor a banca examinadora como membro externo, e à **Profa. Dra. Simone Cristina de Jesus**, por integrá-la na condição de suplente;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, o meu muito obrigado.

RESUMO

A reação álcali-agregado (RAA) constitui uma das principais manifestações patológicas em estruturas de concreto, provocando expansão, fissuração e perda de durabilidade, com custos de recuperação que podem superar o custo original da obra. Como os ensaios normativos de expansão demandam de 30 dias a um ano para conclusão, cresce o interesse por métodos de triagem capazes de fornecer indicativos preliminares em prazo reduzido. Este trabalho teve por objetivo caracterizar física, química e mineralogicamente uma areia natural da região de Fonseca, em Ouro Preto (MG), e avaliar seu potencial reativo frente à RAA, por meio de ensaios normativos e técnicas instrumentais. Foram realizados os ensaios físicos normativos de granulometria, massa unitária, massa específica, absorção de água, teor de materiais pulverulentos, torrões de argila e impurezas orgânicas, além da caracterização química por fluorescência de raios X (FRX) e mineralógica por difração de raios X (DRX). A areia apresentou módulo de finura de 2,61, sendo classificada como areia média, massa específica de 2,63 g/cm³, massa unitária de 1460 kg/m³, absorção de água de 0,37%, teor de materiais pulverulentos de 2,84% e torrões de argila de 2,20%, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 7211. A FRX indicou composição predominantemente silicosa, com 80,4% de SiO₂, 7,4% de Fe₂O₃, 7,2% de Al₂O₃ e 1,4% de K₂O, resultando em equivalente alcalino de 0,89%. O sódio não foi alcançado pela rotina analítica empregada, embora a ausência de fases sódicas na análise mineralógica indique contribuição reduzida desse elemento. A DRX confirmou o predomínio de quartzo, identificando ainda caulinita e pequena proporção de cristobalita, polimorfo da sílica mais suscetível ao ataque alcalino do que o quartzo bem cristalizado. Com base nesses resultados, propôs-se um protocolo de triagem preventiva que integra os ensaios físicos normativos, a FRX e a DRX aos critérios da ABNT NBR 15577. A presença de cristobalita constitui indício que, isoladamente, não permite classificar o agregado quanto à reatividade potencial, mas justifica a realização dos ensaios de expansão em barras de argamassa e em prismas de concreto previstos na referida norma. Verifica-se, dessa forma, que a caracterização físico-química e mineralógica permite sinalizar, em prazo reduzido, a necessidade de ensaios complementares, sem substituí-los.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Caracterização físico-química. Agregado miúdo. Fluorescência de raios X. Difração de raios X.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction (AAR) is one of the main pathological manifestations in concrete structures, causing expansion, cracking and loss of durability, with repair costs that may exceed the original cost of the structure. Since standardised expansion tests require from 30 days to one year to be completed, there is growing interest in screening methods capable of providing preliminary indications within a shorter timeframe. This study aimed to characterise a natural sand from the Fonseca region, in Ouro Preto (MG, Brazil), from a physical, chemical and mineralogical standpoint, and to assess its potential reactivity to AAR by means of standardised tests and instrumental techniques. The standardised physical tests of particle size distribution, bulk density, specific gravity, water absorption, fine material content, clay lumps and organic impurities were carried out, in addition to chemical characterisation by X-ray fluorescence (XRF) and mineralogical characterisation by X-ray diffraction (XRD). The sand presented a fineness modulus of 2.61, being classified as medium sand, a specific gravity of 2.63 g/cm³, a bulk density of 1460 kg/m³, water absorption of 0.37%, fine material content of 2.84% and clay lumps of 2.20%, thus meeting the requirements of ABNT NBR 7211. XRF indicated a predominantly siliceous composition, with 80.4% SiO₂, 7.4% Fe₂O₃, 7.2% Al₂O₃ and 1.4% K₂O, resulting in an alkali equivalent of 0.89%. Sodium was not covered by the analytical routine employed, although the absence of sodic phases in the mineralogical analysis indicates a reduced contribution from this element. XRD confirmed the predominance of quartz, also identifying kaolinite and a small proportion of cristobalite, a silica polymorph more susceptible to alkaline attack than well-crystallised quartz. Based on these results, a preventive screening protocol was proposed, integrating the standardised physical tests, XRF and XRD with the criteria of ABNT NBR 15577. The presence of cristobalite constitutes an indication that, on its own, does not allow the aggregate to be classified with respect to potential reactivity, but justifies carrying out the mortar-bar and concrete-prism expansion tests set out in that standard. It is therefore observed that physicochemical and mineralogical characterisation can indicate, within a short period, the need for complementary tests, without replacing them.

Keywords: Alkali-aggregate reaction. Physicochemical characterisation. Fine aggregate. X-ray fluorescence. X-ray diffraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do mecanismo da reação álcali-silica no concreto.....	15
Figura 2: Fluxo metodológico adotado para caracterização e triagem preventiva da areia estudada.....	27
Figura 3: Fluxograma do protocolo proposto para triagem preventiva de agregados miúdos quanto ao potencial de reação álcali-agregado.....	36
Figura 4: Curva granulométrica da areia de Fonseca.....	38
Figura 5: Comparação colorimétrica após 24 horas: solução com a areia de Fonseca (à esquerda) e solução padrão (à direita).....	41
Figura 6: Composição elementar da areia de Fonseca determinada por FRX.....	42
Figura 7: Composição em óxidos da areia de Fonseca determinada por FRX.....	43
Figura 8: Difratoograma da areia de Fonseca.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fases mineralógicas do clínquer Portland e teores usuais.....	7
Tabela 2: Comparação entre a reação álcali-sílica e a reação álcali-carbonato.....	16
Tabela 3: Critérios de diagnóstico da reação álcali-agregado.....	19
Tabela 4: Interpretação do teor de sílica.....	32
Tabela 5: Interpretação do teor de álcalis.....	32
Tabela 6: Reatividade potencial das fases minerais identificáveis por DRX.....	33
Tabela 7: Largura a meia altura do pico principal do quartzo como indicador de triagem.....	33
Tabela 8: Critérios normativos de avaliação da reatividade potencial.....	34
Tabela 9: Desfechos do protocolo de triagem.....	35
Tabela 10: Composição granulométrica da areia de Fonseca.....	36
Tabela 11: Massa unitária da areia de Fonseca.....	37
Tabela 12: Massa específica e absorção de água da areia de Fonseca.....	38
Tabela 13: Síntese da caracterização física da areia de Fonseca.....	40
Tabela 14: Composição química da areia de Fonseca determinada por FRX.....	45
Tabela 15: Fases identificadas por DRX na areia de Fonseca.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C-A-S-H	Silicato de Cálcio e Alumínio Hidratado
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
NBR	Norma Brasileira
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAC	Reação Álcali-Carbonato
RAS	Reação Álcali-Sílica
RASS	Reação Álcali-Silicato
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

SUMÁRIO

1.	1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	PROBLEMÁTICA	2
1.3	JUSTIFICATIVA	4
1.3.1	Relevância técnica e econômica	4
1.3.2	Contribuição científica	4
1.3.3	Aderência à Engenharia Química e ao mestrado profissional	5
2	OBJETIVOS.....	6
2.1	OBJETIVO GERAL.....	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
3.1	QUÍMICA DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	7
3.1.1	Cimento Portland: composição e hidratação	7
3.1.2	Álcalis no cimento Portland	8
3.1.3	Solução dos poros do concreto	9
3.1.4	Reações pozolânicas	10
3.2	AGREGADOS PARA CONCRETO	10
3.2.1	Definição e classificação	10
3.2.2	Propriedades físicas	11
3.2.3	Composição química e mineralógica.....	12
3.2.4	Requisitos normativos	12
3.3	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	13
3.3.1	Histórico e ocorrência.....	13
3.3.2	Mecanismos químicos	13
3.3.3	Fatores que influenciam a reação	17
3.3.4	Manifestações e diagnóstico	18

3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO INSTRUMENTAL.....	20
3.4.1 Fluorescência de raios X.....	20
3.4.2 Difração de raios X.....	21
3.5 PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DA REAÇÃO.....	22
3.6 DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE.....	23
3.6.1 Limites dos métodos de predição por caracterização	23
3.6.2 Alternativas aos ensaios normativos de expansão	24
3.6.3 Ampliação do conjunto instrumental.....	24
3.6.4 Desenvolvimentos normativos recentes	24
3.6.5 Síntese e delimitação da lacuna	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 MATERIAIS	27
4.1.1 Origem e amostragem.....	27
4.1.2 Preparação das amostras	28
4.2 ENSAIOS FÍSICOS	28
4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	30
4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X	30
4.5 TRATAMENTO DOS DADOS	31
4.6 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	32
4.6.1 Critérios de composição química	32
4.6.2 Critérios mineralógicos.....	33
4.6.3 Critérios normativos de expansão.....	34
4.7 PROTOCOLO DE TRIAGEM PROPOSTO	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	37
5.1.1 Composição granulométrica	37
5.1.2 Massa unitária e índice de vazios	38
5.1.3 Massa específica e absorção de água.....	39

5.1.4 Teor de materiais pulverulentos	40
5.1.5 Teor de torrões de argila e materiais friáveis	40
5.1.6 Impurezas orgânicas	40
5.1.7 Síntese da caracterização física	41
5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	42
5.2.1 Sílica	43
5.2.2 Alumina e razões entre óxidos.....	44
5.2.3 Óxidos de ferro	44
5.2.4 Enxofre	44
5.2.5 Álcalis e equivalente alcalino	44
5.2.6 Alcalino-terrosos e minerais acessórios	46
5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X	47
5.3.1 Fases relevantes para a reatividade alcalina	48
5.3.2 Considerações sobre a identificação de fases	49
5.4 AVALIAÇÃO INTEGRADA DO POTENCIAL REATIVO.....	49
5.5 SÍNTESE E LIMITAÇÕES	50
6 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	53

1. 1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O concreto é o material confeccionado mais consumido no planeta, com produção anual da ordem de 14 bilhões de metros cúbicos (GCCA, 2021), sustentada por uma produção mundial de cimento próxima de 4 bilhões de toneladas (USGS, 2025). Trata-se de uma mistura formada por cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, água e, eventualmente, adições minerais e aditivos químicos, cuja ampla utilização decorre da versatilidade, da resistência mecânica e do custo reduzido em relação a outros materiais estruturais (Neville, 2016).

Os agregados constituem cerca de 60% a 80% do volume total do concreto e exercem influência significativa sobre suas propriedades nos estados fresco e endurecido (Mehta; Monteiro, 2014). Foram, historicamente, considerados materiais inertes, cuja função seria atuar como enchimento de baixo custo. Estudos desenvolvidos ao longo do século XX demonstraram, contudo, que determinados agregados participam ativamente de reações químicas deletérias no interior do concreto, comprometendo sua durabilidade e seu desempenho estrutural (Stanton, 1940; Hobbs, 1988).

Entre os mecanismos de degradação que afetam estruturas de concreto, a reação álcali-agregado (RAA) tem recebido atenção especial da comunidade técnico-científica nas últimas décadas. Essa reação química trata-se de uma reação expansiva entre os hidróxidos alcalinos de sódio e potássio presentes na solução dos poros do concreto e determinados constituintes mineralógicos reativos dos agregados, com formação de gel higroscópico cuja expansão gera tensões internas na matriz cimentícia (Hasparyk, 2005).

O primeiro estudo científico do fenômeno foi realizado por Thomas E. Stanton, em 1940, na Califórnia, ao investigar a deterioração prematura de estruturas de concreto (Stanton, 1940). Desde então, casos foram identificados em diversos países (Fournier; Bérubé, 2000; Hasparyk, 2005). Os primeiros relatos, no Brasil, datam da década de 1960, com destaque para obras hidráulicas na região Nordeste, tendo sido posteriormente documentados casos em praticamente todas as regiões do país, com obras, especialmente, de grande porte, como barragens, pontes, viadutos, pavimentos, edificações e obras de saneamento (Hasparyk, 2005; Munhoz, 2007).

A caracterização adequada dos agregados, sob os aspectos físico, químico e mineralógico, constitui ação preventiva fundamental para evitar a ocorrência da RAA (ABNT,

2018). Técnicas instrumentais como a fluorescência de raios X (FRX) e a difração de raios X (DRX) têm sido empregadas para determinar a composição química e identificar as fases minerais dos agregados, fornecendo subsídios para a avaliação de seu potencial reativo (Munhoz, 2007; Valduga, 2007), e pesquisas recentes ampliam esse conjunto instrumental com técnicas de maior resolução espacial (Kumar et al., 2024).

Os procedimentos sugeridos por normas consolidadas para avaliação da reatividade potencial baseiam-se, entretanto, em ensaios de expansão que demandam de 30 dias, no método acelerado de barras de argamassa, a um ano ou mais, no método de prismas de concreto. Esse intervalo é incompatível com a dinâmica de aprovação de materiais em obra, na qual a decisão sobre o fornecimento de areia frequentemente precisa ser tomada em poucos dias. Essa limitação é reconhecida internacionalmente e tem motivado o desenvolvimento de procedimentos alternativos (Bavasso et al., 2020), bem como o interesse por metodologias de triagem preliminar capazes de sinalizar rapidamente quais fontes exigem investigação aprofundada.

Embora estudos que empregam FRX e DRX isoladamente sejam frequentes na literatura, são escassas as propostas que integrem essas técnicas aos ensaios físicos convencionais e aos critérios da ABNT NBR 15577 em um protocolo sistematizado de avaliação preventiva. É nesse vácuo que o presente trabalho se insere, tomando como objeto de estudo a areia natural da região de Fonseca, em Ouro Preto, em Minas Gerais, material de emprego corrente na construção civil da região.

1.2 PROBLEMÁTICA

A reação álcali-agregado figura entre os principais problemas de durabilidade em estruturas de concreto em todo o mundo, gerando custos elevados de manutenção, reabilitação e, em casos extremos, demolição e reconstrução (Fournier; Bérubé, 2000). A formação do gel expansivo produz fissuração em padrão de mapa, que compromete a integridade estrutural e facilita a penetração de agentes agressivos (Hasparyk, 2005). Em concretos afetados, foram registradas reduções de até 50% na resistência à compressão, 70% na resistência à tração e 60% no módulo de elasticidade (Swamy, 1992; Munhoz, 2007). Nos casos em que a recuperação é viável, o custo do conjunto de diagnóstico, projeto, intervenção e monitoramento pode superar o custo original da obra (Fournier; Bérubé, 2000).

Duas características do fenômeno agravam esse quadro. A primeira é o longo período de latência: por ser uma reação lenta, a RAA manifesta seus sintomas ao longo de anos ou décadas, de modo que a inadequação do agregado se revela quando a estrutura já está construída e em serviço (Fournier; Bérubé, 2000). A segunda é a variabilidade mineralógica regional, pois agregados considerados seguros em uma região podem apresentar potencial reativo em outra, o que impede a extrapolação de resultados e exige caracterização específica por fonte de material (Valduga, 2007).

No contexto brasileiro somam-se fatores específicos. A diversidade geológica do território implica grande variedade de litologias, muitas ainda não caracterizadas quanto ao potencial reativo, e o clima predominantemente quente e úmido favorece a cinética das reações no interior do concreto (Hasparyk, 2005; Munhoz, 2007). Parte dos cimentos Portland produzidos no país apresenta equivalente alcalino superior a 0,6%, valor adotado internacionalmente como referência de segurança (Hasparyk, 2005). Soma-se a isso a ausência de controle tecnológico sistemático sobre os agregados, sobretudo em obras de pequeno porte, nas quais a areia é frequentemente adquirida sem qualquer ensaio de caracterização (Hasparyk, 2005).

O problema, na prática, não reside na inexistência de métodos normativos de avaliação, mas no descompasso entre o prazo que esses métodos exigem e o prazo em que as decisões de compra e aplicação são efetivamente tomadas. Disso decorre a questão que orienta esta pesquisa:

Em que grau a integração entre ensaios físicos normativos, fluorescência de raios X e difração de raios X permite estabelecer uma triagem preliminar confiável do potencial reativo de agregados miúdos frente à reação álcali-agregado, capaz de orientar a decisão sobre a necessidade de ensaios de expansão?

Responder a esse questionamento exige delimitar os limites da inferência instrumental, que não são triviais: índices derivados da difração de raios X, como o índice de cristalinidade do quartzo, tiveram sua correlação com o comportamento expansivo questionada de forma consistente na literatura (Marinoni; Broekmans, 2013). A classificação normativa da reatividade permanece condicionada aos ensaios de expansão, cabendo à caracterização instrumental o papel de triagem que os antecede e os orienta.

1.3 JUSTIFICATIVA

1.3.1 RELEVÂNCIA TÉCNICA E ECONÔMICA

A identificação prévia de agregados potencialmente reativos permite evitar sua utilização ou adotar medidas mitigadoras adequadas, e a ABNT NBR 15577 (ABNT, 2018) estabelece requisitos que tornam essa caracterização obrigatória em determinadas situações. Dados confiáveis sobre as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do agregado fundamentam a seleção de materiais, a dosagem do concreto e a definição de estratégias preventivas.

A dimensão econômica dessa antecipação confere ao trabalho seu caráter aplicado, uma vez que a relação entre os custos envolvidos é fortemente assimétrica: a caracterização por FRX e DRX é realizada em poucos dias, com custo da ordem de centenas de reais por amostra; o ensaio acelerado de barras de argamassa demanda 30 dias; e a recuperação de uma estrutura afetada pode superar o custo original da obra (Fournier; Bérubé, 2000). A triagem preliminar atua, nesse arranjo, como filtro de baixo custo que direciona o recurso caro do ensaio de expansão apenas às fontes que apresentem indícios de reatividade.

Dessa lógica decorrem três efeitos de interesse em relação a gestão de obras. A redução de custos resulta de se evitar o passivo de manutenção associado a estruturas comprometidas. A otimização de recursos decorre da possibilidade de aproveitar jazidas locais de qualidade comprovada, com redução das distâncias de transporte e dos custos correspondentes. A minimização de desperdícios resulta da identificação precoce de materiais inadequados, antes de sua aplicação à estrutura. Em obras públicas, nas quais o custo de recuperação recai sobre o orçamento municipal e a interdição de uma estrutura tem repercussão social imediata, essa antecipação assume especial relevância.

1.3.2 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

A caracterização de agregados de proveniência regional amplia a base de dados disponível sobre materiais brasileiros e reduz a dependência de parâmetros obtidos em contextos geológicos distintos. A avaliação combinada de FRX e DRX permite ainda examinar o alcance e as limitações de cada técnica, questão pouco explorada na literatura nacional, na qual predominam estudos que as empregam isoladamente. A principal contribuição pretendida

é de natureza metodológica e consiste na proposição de um protocolo que organize, em sequência decisória explícita, os ensaios físicos normativos, a caracterização química e a identificação mineralógica, articulando-os aos critérios da ABNT NBR 15577.

1.3.3 ADERÊNCIA À ENGENHARIA QUÍMICA E AO MESTRADO PROFISSIONAL

O objeto deste trabalho situa-se no campo da Engenharia Química em seus fundamentos e em seus métodos, onde contribui de forma concreta na construção civil. A reação álcali-agregado é, em essência, um processo de dissolução da sílica em meio fortemente alcalino, com pH da solução dos poros superior a 13, seguido da formação de um gel de silicato alcalino de comportamento higroscópico, cuja compreensão mobiliza equilíbrio químico em meio aquoso, cinética de dissolução, química de superfície e termodinâmica de fases. As técnicas empregadas pertencem ao domínio da química analítica instrumental, e a avaliação de agregados como matéria-prima cujas propriedades impactam no desempenho do produto final corresponde ao problema clássico de controle de qualidade de insumos em processos produtivos.

Quanto à natureza profissional do programa, o trabalho não se encerra na caracterização de uma amostra: esse procedimento é aplicável em rotina laboratorial e industrial, formulado para execução com equipamentos disponíveis em laboratórios de médio porte e em prazo compatível com a dinâmica de aprovação de materiais em obra. O compartilhamento desse estudo a profissionais da construção civil e a órgãos públicos responsáveis por controle tecnológico constitui resultado que é esperado da pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar física, química e mineralogicamente a areia natural da região de Fonseca, próximo a Ouro Preto, Minas Gerais, e avaliar seu potencial reativo frente à reação álcali-agregado, mediante a proposição de um protocolo de triagem que integra ensaios normativos, fluorescência de raios X e difração de raios X aos critérios da ABNT NBR 15577.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar fisicamente a areia por meio de ensaios normativos de composição granulométrica, massa unitária, massa específica, absorção de água, teor de materiais pulverulentos, teor de torrões de argila e materiais friáveis e impurezas orgânicas, verificando sua conformidade com os requisitos da ABNT NBR 7211;
- b) Determinar a composição química da areia por fluorescência de raios X (FRX), com identificação dos teores dos óxidos majoritários e do equivalente alcalino;
- c) Identificar as fases mineralógicas presentes na areia por difração de raios X (DRX), com atenção aos polimorfos da sílica associados à reatividade alcalina;
- d) Confrontar os resultados físicos, químicos e mineralógicos com os critérios da ABNT NBR 15577 e com estudos recentes da literatura, delimitando o alcance e as limitações da inferência obtida por caracterização instrumental;
- e) Propor um protocolo de triagem preventiva de agregados miúdos que integre, em sequência decisória explícita, os ensaios físicos normativos, a FRX e a DRX, indicando as condições em que se faz necessária a realização dos ensaios de expansão previstos na norma.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 QUÍMICA DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

3.1.1 CIMENTO PORTLAND: COMPOSIÇÃO E HIDRATAÇÃO

O cimento Portland é o principal aglomerante hidráulico empregado na produção de concreto. Sua fabricação envolve a calcinação de uma mistura de calcário e argila a temperaturas próximas de 1450 °C, da qual resulta o clínquer, posteriormente moído com adição de gesso para controle do tempo de pega (Taylor, 1997; Mehta; Monteiro, 2014).

O clínquer é constituído essencialmente por quatro fases mineralógicas, cuja composição é convencionalmente expressa pela notação de óxidos da química do cimento, na qual C representa CaO, S representa SiO₂, A representa Al₂O₃, F representa Fe₂O₃ e H representa H₂O. As proporções usuais são apresentadas na Tabela 1. Os silicatos de cálcio predominam e determinam as principais características do material hidratado, cabendo aos aluminatos papel relevante no controle da pega e no comportamento frente a sulfatos.

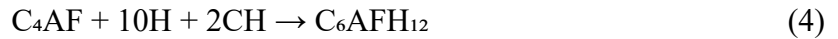
Tabela 1: Fases mineralógicas do clínquer Portland e teores usuais.

Fase	Notação	Designação	Teor (%)
Silicato tricálcico	C ₃ S	Alita	50 a 70
Silicato dicálcico	C ₂ S	Belita	15 a 30
Aluminato tricálcico	C ₃ A	Celita	5 a 10
Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF	Ferrita	5 a 15

A hidratação consiste em uma sequência de reações exotérmicas entre os compostos anidros do clínquer e a água, das quais resultam os produtos hidratados responsáveis pela resistência mecânica e pela durabilidade do concreto (Taylor, 1997). As reações dos silicatos, que interessam diretamente a este trabalho por gerarem a alcalinidade da matriz, são representadas pelas Equações 1 e 2:



Em ambas, a hidratação dos silicatos de cálcio produz silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio. As reações dos aluminatos, descritas pelas Equações 3 e 4, contribuem para o controle da pega e para o comportamento frente a sulfatos:



O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) representa de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta endurecida e é o principal responsável pelas propriedades mecânicas do concreto, apresentando estrutura amorfa a semicristalina e composição variável (Taylor, 1997). O hidróxido de cálcio, ou portlandita, corresponde a 20% a 25% do volume de sólidos, cristaliza em placas hexagonais e, por sua elevada solubilidade, é o principal responsável pela alcalinidade da solução dos poros, com pH entre 12,5 e 13,5. Essa alcalinidade tem duplo caráter: protege as armaduras contra corrosão, mas fornece os íons hidroxila que viabilizam o ataque a minerais reativos dos agregados (Mehta; Monteiro, 2014). Completam o conjunto os aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados, entre 15% e 20% do volume de sólidos, dos quais a etringita e o monossulfoaluminato são os representantes principais.

3.1.2 ÁLCALIS NO CIMENTO PORTLAND

O sódio e o potássio presentes no cimento Portland provêm das matérias-primas e dos combustíveis empregados na clínquerização. Durante a queima, volatilizam-se parcialmente e, em seguida, condensam sobre a superfície do clínquer ou incorporam-se às fases mineralógicas, sobretudo ao C_3A e ao C_4AF , ocorrendo ainda como sulfatos alcalinos (Mehta; Monteiro, 2014).

Durante a hidratação, esses álcalis são liberados para a solução dos poros, onde permanecem predominantemente na forma de hidróxidos de sódio e de potássio. As concentrações alcançam valores entre 0,2 mol/L e 1,0 mol/L, o que eleva o pH da fase líquida intersticial para a faixa de 12,5 a 14,0 (Diamond, 1989). É essa condição que caracteriza o interior do concreto como meio fortemente alcalino.

O teor total de álcalis do cimento é convencionalmente expresso como equivalente de sódio (Na_2Oeq), conforme a Equação 5:

$$\text{Na}_2\text{Oeq} (\%) = \text{Na}_2\text{O} (\%) + 0,658 \times \text{K}_2\text{O} (\%) \quad (5)$$

O coeficiente 0,658 corresponde à razão entre as massas molares de Na_2O e K_2O , e permite expressar o potássio em termos equivalentes de sódio. Historicamente, cimentos com $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ inferior a 0,6% foram considerados de baixo teor de álcalis e adequados ao emprego com agregados potencialmente reativos. Esse limite, todavia, não é absoluto: há registros de RAA em concretos produzidos com cimentos de baixo álcali, quando associados a agregados de reatividade elevada, a condições ambientais favoráveis ou ao aporte de álcalis de fontes externas (Fournier; Bérubé, 2000).

Cabe distinguir, desde já, os álcalis do cimento dos álcalis contidos nos agregados. Os primeiros solubilizam-se durante o amassamento e determinam diretamente a concentração de OH^- na solução dos poros, constituindo o reagente efetivamente disponível para a reação. Os segundos encontram-se imobilizados na estrutura cristalina de feldspatos e micas, com liberação lenta e apenas parcial ao longo do tempo. Trata-se, portanto, de grandezas distintas, que não admitem comparação com um mesmo valor de referência.

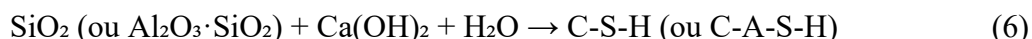
3.1.3 SOLUÇÃO DOS POROS DO CONCRETO

A fase líquida intersticial do concreto é uma solução alcalina concentrada, constituída principalmente pelos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- e SO_4^{2-} (Diamond, 1989; Lothenbach et al., 2008). Sua composição evolui ao longo do processo de hidratação. Nas primeiras vinte e quatro horas, predominam elevadas concentrações de álcalis e sulfatos, decorrentes da dissolução rápida dos sulfatos alcalinos, e o pH situa-se entre 13,5 e 14,0. Entre o dia um e o vinte e oito, a concentração de álcalis decresce gradualmente por incorporação aos produtos de hidratação, ao mesmo tempo em que aumenta a de Ca^{2+} pela dissolução da portlandita, com pH entre 12,5 e 13,5. Após os vinte e oito dias, a solução estabiliza-se saturada em hidróxido de cálcio, com pH em torno de 12,5 a 13,0 e concentração de álcalis dependente do teor do cimento e do fator água/cimento.

Essa alcalinidade cumpre funções distintas e, em parte, contraditórias. Ela promove a formação da camada passivadora sobre as armaduras e mantém a estabilidade termodinâmica do C-S-H e dos demais hidratos. Simultaneamente, fornece o meio necessário à dissolução dos minerais reativos eventualmente presentes nos agregados, condição inicial da reação álcali-agregado. A durabilidade do concreto depende, assim, de um equilíbrio no qual a mesma propriedade que protege o aço pode comprometer o agregado.

3.1.4 REAÇÕES POZOLÂNICAS

Pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, isoladamente, apresentam pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, na presença de água e de hidróxido de cálcio, reagem à temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes (Mehta; Monteiro, 2014). A reação pode ser representada, de forma simplificada, pela Equação 6:



Empregam-se como pozolanas naturais as cinzas e os tufos vulcânicos e as terras diatomáceas, e como pozolanas artificiais a cinza volante, a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz, além da escória granulada de alto-forno, de comportamento predominantemente hidráulico. No que interessa nesse estudo, a relevância dessas adições reside no fato de a reação pozolânica consumir hidróxido de cálcio e fixar álcalis nos produtos formados, reduzindo a disponibilidade de íons OH^- para o ataque a agregados reativos (Thomas, 2011). A esse efeito somam-se o refinamento da estrutura de poros, o ganho de resistência em idades avançadas, a menor liberação de calor durante a hidratação e a redução do consumo de clínquer, com os benefícios ambientais correspondentes.

3.2 AGREGADOS PARA CONCRETO

3.2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Agregados são materiais granulares, sem forma ou volume definidos, cujas dimensões e propriedades os tornam adequados ao emprego em obras de engenharia civil (Mehta; Monteiro, 2014). Ocupando de 60% a 80% do volume do concreto, exercem influência determinante sobre o comportamento do material, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Quanto à dimensão, a ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009) define como agregado miúdo o material que passa na peneira de abertura 4,75 mm e fica retido na peneira de 75 μm , e como agregado gráúdo aquele retido na peneira de 4,75 mm. As areias subdividem-se, conforme o módulo de finura, em finas, quando inferior a 2,4, médias, entre 2,4 e 3,3, e grossas, quando superior a 3,3. Os agregados grádus são designados por faixas granulométricas, da brita 0, entre 4,75 mm e 9,5 mm, à brita 3, entre 25 mm e 37,5 mm.

Quanto à origem, distinguem-se os agregados naturais, obtidos diretamente de depósitos com ou sem beneficiamento, como as areias de rio, de cava e marinhas e os seixos rolados; os britados, produzidos através de rochas como granito, basalto, gnaiss, calcário e dolomito; e os artificiais, provenientes de subprodutos industriais ou de materiais reciclados. Quanto à massa específica, classificam-se em leves, abaixo de 2000 kg/m³, normais, entre 2000 kg/m³ e 3000 kg/m³, e pesados, acima de 3000 kg/m³. A areia objeto deste estudo enquadra-se, segundo essas classificações, como agregado miúdo natural de massa específica normal.

3.2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

A distribuição granulométrica condiciona a trabalhabilidade do concreto fresco, a demanda de água e de pasta, a resistência mecânica, a durabilidade e o acabamento superficial (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016). É determinada por peneiramento e sintetizada pelo módulo de finura, obtido pela Equação 7:

$$MF = \Sigma (\% \text{ retidas acumuladas nas peneiras da série normal}) / 100 \quad (7)$$

A massa unitária expressa a massa de agregado que ocupa uma unidade de volume, incluídos os vazios entre partículas, e presta-se às conversões entre massa e volume necessárias à dosagem. A massa específica, por sua vez, relaciona massa e volume excluídos os poros permeáveis, situando-se tipicamente entre 2,60 g/cm³ e 2,75 g/cm³ para agregados naturais, valores próximos ao do quartzo puro (Neville, 2016).

A absorção de água decorre da porosidade acessível das partículas e determina as condições de umidade em que o agregado se apresenta, desde a condição seca em estufa até a condição úmida, passando pela condição saturada com superfície seca, que serve de referência nos cálculos de dosagem. A forma e a textura superficial, variando da esférica à lamelar e da lisa à porosa, influenciam a demanda de água e a aderência entre pasta e agregado (Mehta; Monteiro, 2014).

As substâncias nocivas constituem categoria de particular interesse para a caracterização preventiva, para mitigar as possibilidades de patologias. Os materiais pulverulentos, com dimensão inferior a 75 µm, elevam a demanda de água; os torrões de argila desagregam-se no interior do concreto; as impurezas orgânicas podem retardar a pega; os materiais carbonosos provocam manchamento; e a presença de cloretos ou sulfatos pode induzir corrosão das armaduras ou expansão por ataque sulfático (ABNT, 2009; Neville, 2016).

3.2.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

A composição química dos agregados naturais reflete sua origem geológica. A sílica constitui a fração majoritária, variando de 40% a 99%, seguida da alumina, de 0% a 30%, dos óxidos de ferro, de 0% a 20%, do óxido de cálcio, de 0% a 50%, do óxido de magnésio, de 0% a 10%, e dos álcalis, de 0% a 10%, além de teores traço de titânio, manganês e fósforo (Mehta; Monteiro, 2014).

Sob a ótica mineralógica, o quartzo é o constituinte mais frequente dos agregados silicosos, seguido dos feldspatos, das micas, dos minerais de argila e dos piroxênios e anfibólios. Nos agregados carbonáticos predominam a calcita e a dolomita. Interessam particularmente à avaliação da reatividade alcalina as fases de sílica de baixa ordem estrutural, entre as quais a opala e o vidro vulcânico, no grupo amorfo, e a calcedônia, a cristobalita e a tridimita, no grupo microcristalino, além dos minerais argilosos expansivos e dos carbonatos dolomíticos argilosos (Hobbs, 1988; Hasparyk, 2005).

Importante ressaltar que a composição química, isoladamente, não permite inferir a reatividade. Dois agregados com teores semelhantes de SiO_2 podem apresentar comportamentos distintos conforme a forma mineralógica em que essa sílica se encontra, o que justifica a associação entre a análise química e a identificação de fases (Valduga, 2007; Marinoni; Broekmans, 2013).

3.2.4 REQUISITOS NORMATIVOS

A ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece os requisitos exigíveis dos agregados destinados ao concreto. No que se refere às substâncias nocivas em agregado miúdo, o teor de materiais pulverulentos é limitado a 3,0% para concretos submetidos a desgaste superficial e a 5,0% para os demais, o teor de torrões de argila e materiais friáveis a 3,0%, e as impurezas orgânicas são avaliadas por comparação colorimétrica com solução padrão. Para agregado graúdo, os limites correspondentes são de 1,0% para materiais pulverulentos e 2,0% para torrões de argila.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo deve enquadrar-se nas zonas utilizável ou ótima definidas pela norma. Quanto à absorção de água, não há limite normativo estabelecido, embora valores superiores a 4% possam indicar agregados porosos ou alterados.

Finalmente, a norma remete à ABNT NBR 15577 (ABNT, 2018) a avaliação da reatividade potencial álcali-agregado, objeto das seções seguintes.

3.3 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

3.3.1 HISTÓRICO E OCORRÊNCIA

A reação álcali-agregado foi identificada por Thomas E. Stanton em 1940, na Califórnia, ao investigar a deterioração prematura de pavimentos e estruturas de concreto (Stanton, 1940). Publicado nos Proceedings of the American Society of Civil Engineers, o trabalho descreveu os elementos que permanecem centrais na compreensão do fenômeno: a formação de gel expansivo a partir da reação entre os álcalis do cimento e a sílica reativa do agregado, a influência do teor de álcalis, a dependência do tipo mineralógico do agregado e o caráter progressivo da expansão.

Desde então, casos foram documentados em mais de cinquenta países, entre os quais Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Austrália, África do Sul, China, Japão e Brasil (Fournier; Bérubé, 2000). Barragens figuram entre as estruturas mais afetadas, em razão da conjugação de grandes volumes de concreto, contato permanente com a água e forte restrição ao movimento, condições que favorecem simultaneamente o desenvolvimento das reações, e a manifestação dos seus efeitos.

No Brasil, o primeiro relato data de 1963, na Barragem de Acarape, no Ceará. Seguiram-se registros em diversas obras hidráulicas, entre as quais as barragens de Moxotó, em Pernambuco, de Joanes II, na Bahia, e de Paulo Afonso IV, na divisa entre Bahia e Alagoas, além do monitoramento de expansão residual na Usina Hidrelétrica de Furnas, em Minas Gerais (Hasparyk, 2005). A ocorrência não se restringe a barragens. Há casos documentados em pontes e viadutos, pavimentos rodoviários, edificações em ambiente marinho e obras de saneamento, com custos de recuperação elevados (Fournier; Bérubé, 2000).

3.3.2 MECANISMOS QUÍMICOS

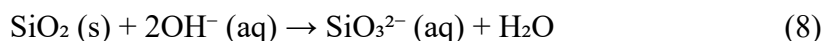
A expressão reação álcali-agregado designa um conjunto de reações expansivas entre os álcalis presentes no concreto e determinados constituintes mineralógicos dos agregados.

Distinguem-se três tipos, cujas siglas são adotadas de modo uniforme ao longo deste texto: a reação álcali-sílica (RAS), a reação álcali-silicato (RASS) e a reação álcali-carbonato (RAC).

3.3.2.1 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

A reação álcali-sílica é a mais frequente e a mais deletéria das três. Ocorre entre os íons hidroxila da solução dos poros e minerais silicosos amorfos ou mal cristalizados presentes no agregado, entre os quais a opala e o vidro vulcânico, no grupo da sílica amorfa, e a calcedônia, a cristobalita e a tridimita, no grupo da sílica microcristalina. Incluem-se ainda o quartzo deformado, tensionado ou microfissurado, e silicatos hidratados como filitos e xistos alterados (Hobbs, 1988; Hasparyk, 2005).

O mecanismo desenvolve-se em três etapas (Dent Glasser; Kataoka, 1981; Hasparyk, 2005). Na primeira, os íons hidroxila atacam a sílica reativa, rompendo as ligações siloxano e produzindo silicatos solúveis, conforme as Equações 8 e 9:



A velocidade de dissolução depende da estrutura cristalina do mineral, sendo maior nas formas amorfas do que nas microcristalinas e, nestas, maior do que nas bem cristalizadas. Depende ainda do pH, elevando-se acentuadamente acima de 12, da temperatura e da área superficial específica das partículas. Essa dependência da ordem estrutural explica por que a identificação das fases da sílica, e não apenas a determinação do teor total de SiO_2 , é decisiva na avaliação do potencial reativo de um agregado (Marinoni; Broekmans, 2013).

Na segunda etapa, os íons silicato reagem com os cátions disponíveis na solução dos poros, formando um gel álcali-silicato de composição variável, expressa genericamente como $(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}) \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, no qual o número de moléculas de água pode variar de um a dez conforme a disponibilidade de umidade (Hasparyk, 2005), de acordo com a Equação 10:



Na terceira etapa manifesta-se o efeito deletério. O gel formado é higroscópico e absorve água do meio, aumentando de volume, e consequentemente aumentando as tensões internas. As pressões de expansão geradas podem atingir de 10 MPa a 30 MPa, valores muito superiores à

resistência à tração do concreto, situada entre 2 MPa e 5 MPa. Das tensões internas, surgem a fissuração ao redor das partículas reativas, propagação das fissuras pela matriz e, em estágios avançados, exsudação do gel pelas fissuras (Hasparyk, 2005; Munhoz, 2007).

A natureza física da expansão foi objeto de duas formulações clássicas. Powers e Steinour (1955) atribuíram-na à pressão osmótica decorrente da diferença de concentração iônica entre o gel e a solução dos poros, atuando o gel como membrana semipermeável que atrai água para seu interior. Dent Glasser e Kataoka (1981) propuseram, alternativamente, que a expansão resulta da pressão de cristalização de compostos formados a partir do gel, particularmente sob condições de umidade variável.

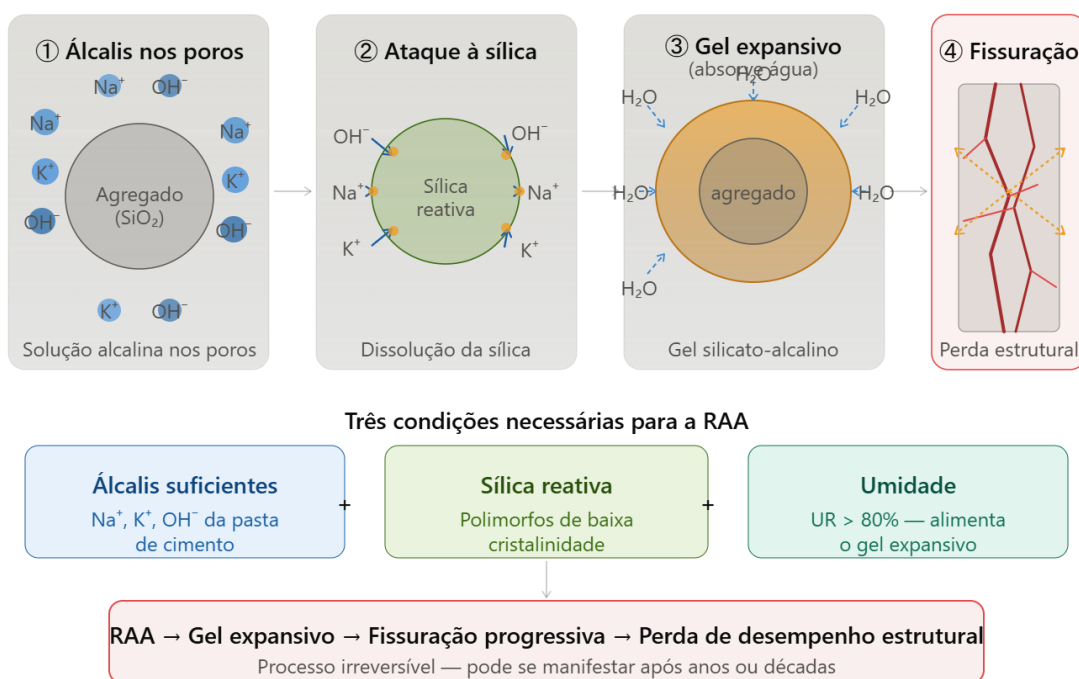


Figura 1: Representação esquemática do mecanismo da reação álcali-silica no concreto. O processo envolve o ataque alcalino às fases silicosas reativas do agregado, a formação de gel higroscópico, a absorção de água, a expansão volumétrica e o desenvolvimento de tensões internas que podem culminar em fissuração e deterioração do concreto. Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Dent Glasser e Kataoka (1981) e Hasparyk (2005).

3.3.2.2 REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO

A reação álcali-silicato envolve minerais silicatados de estrutura cristalina mais ordenada que os da RAS, porém ainda suscetíveis ao ataque alcalino. Os exemplos são os filitos e xistos, que contêm quartzo microcristalino e micas alteradas, as grauvas, de matriz argilosa,

os quartzitos com quartzo tensionado ou recristalizado e os gnaisses com feldspatos alterados (Hasparyk, 2005; Valduga, 2007).

O mecanismo é análogo ao da RAS, com dissolução do silicato em meio alcalino e posterior formação de gel expansivo, porém a velocidade de reação é significativamente menor em razão da maior cristalinidade dos minerais envolvidos. Enquanto a RAS pode manifestar sintomas visíveis em poucos anos, a RASS frequentemente requer décadas, o que dificulta tanto o diagnóstico precoce quanto a atribuição de causa em estruturas antigas. Essa distinção é particularmente relevante no contexto brasileiro, dada a ampla ocorrência de gnaisses e quartzitos como fonte de agregados (Hasparyk, 2005; Munhoz, 2007).

3.3.2.3 REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO

A reação álcali-carbonato é menos frequente e ocorre com rochas carbonáticas dolomíticas que contenham argila, tais como calcários dolomíticos argilosos e dolomitos com inclusões argilosas. Seu mecanismo difere substancialmente dos anteriores, pois envolve a desdolomitização em meio alcalino (Fournier; Bérubé, 2000), descrita pela Equação 11:



A reação converte dolomita em calcita e brucita, liberando íons carbonato. A expansão resulta da combinação de três efeitos: a formação da brucita, mineral expansivo; a liberação da argila anteriormente encapsulada, que se expande por absorção de água; e a recristalização dos carbonatos. Diferentemente do que ocorre na RAS, não há formação de gel, o que tem consequência prática relevante: as adições pozolânicas, eficazes na mitigação da RAS, mostram-se pouco efetivas contra a RAC (Fournier; Bérubé, 2000; Mehta; Monteiro, 2014). A Tabela 2 sintetiza as diferenças entre os dois mecanismos.

Tabela 2: Comparação entre a reação álcali-sílica e a reação álcali-carbonato.

Característica	RAS	RAC
Minerais reativos	Sílica e silicatos	Dolomita associada a argila
Produto expansivo	Gel álcali-silicato	Brucita e argila liberada
Velocidade	Lenta a moderada	Rápida
Manifestação	Fissuração em mapa	Expansão uniforme
Mitigação por pozolanas	Eficaz	Pouco eficaz

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A REAÇÃO

A ocorrência e a severidade da RAA resultam da interação entre características do agregado, composição do concreto e condições ambientais. A reação somente se desenvolve quando os três conjuntos de condições coexistem, o que tem implicação direta sobre as estratégias de prevenção: a supressão de qualquer um deles é suficiente para inibir o processo (Fournier; Bérubé, 2000).

No que se refere ao agregado, o fator determinante é o tipo e a quantidade de minerais reativos. Apresentam reatividade elevada a opala, o vidro vulcânico, a cristobalita, a tridimita e a calcedônia; reatividade moderada o quartzo tensionado, o quartzo microcristalino e os filitos e xistos alterados; e reatividade baixa ou nula o quartzo bem cristalizado, os feldspatos não alterados e os carbonatos puros. A quantidade necessária para provocar expansão deletéria varia de 1% a 3% para os minerais de reatividade elevada e de 10% a 20% para os de reatividade moderada (Hobbs, 1988; Fournier; Bérubé, 2000).

A granulometria das partículas reativas apresenta um comportamento não monotônico, conhecido como efeito pessimum (Hobbs, 1988). Partículas muito finas, inferiores a 100 µm, reagem rapidamente, mas o gel dispersa-se pela matriz sem gerar expansão significativa. Partículas grossas, superiores a 5 mm, reagem lentamente e produzem expansão localizada. A expansão máxima ocorre na faixa intermediária, entre 0,1 mm e 5 mm, na qual o gel permanece confinado nas proximidades da partícula. Como essa faixa coincide com a granulometria característica dos agregados miúdos, a areia merece atenção específica na avaliação preventiva, ainda que a literatura sobre RAA tenha se concentrado historicamente nos agregados graúdos.

Soma-se a isso o efeito da textura, já que agregados porosos podem acomodar parte do gel em seus poros, ao passo que agregados densos o confinam e intensificam a pressão gerada (Hasparyk, 2005).

Quanto ao concreto, o teor de álcalis do cimento é o fator preponderante, classificando-se convencionalmente como baixo o $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ inferior a 0,6%, médio o compreendido entre 0,6% e 1,0% e alto o superior a 1,0%. A ABNT NBR 15577 (ABNT, 2018) estabelece limites variáveis conforme o nível de reatividade do agregado, o que reconhece o caráter relativo dessa classificação. O consumo de cimento amplia a quantidade total de álcalis disponíveis, ainda que o aglomerante seja de baixo teor, e o fator água/cimento atua em duplo sentido, pois relações menores reduzem a permeabilidade e dificultam o transporte de água, mas concentram os álcalis na solução dos poros. As adições minerais, por sua vez, atuam favoravelmente pelo consumo de hidróxido de cálcio, pela fixação de álcalis nos produtos da reação pozolânica, pela redução da permeabilidade e pela diluição do teor total de álcalis (Thomas, 2011).

A umidade é o fator mais crítico entre os fatores ambientais. Abaixo de 80% de umidade relativa a reação praticamente não progride; entre 80% e 95% desenvolve-se lentamente; acima de 95% ou em condição de saturação, progride rapidamente (Fournier; Bérubé, 2000). Estruturas em contato permanente com água são, por isso, as mais suscetíveis. A temperatura acelera o processo, com a taxa de reação aproximadamente dobrando a cada acréscimo de 10 °C, o que torna as regiões de clima tropical particularmente suscetíveis. Álcalis de origem externa, provenientes de água do mar, de sais de degelo, de solos contaminados ou de água subterrânea, podem desencadear a reação mesmo em concretos produzidos com cimento de baixo álcali. Por último, a restrição ao movimento, presente em fundações, estruturas enterradas e elementos com elevada taxa de armadura, converte a expansão em tensão interna e agrava a fissuração resultante (Hasparyk, 2005).

3.3.4 MANIFESTAÇÕES E DIAGNÓSTICO

A fissuração em mapa é a característica mais comum da RAA, padrão multidirecional de fissuras que delimitam polígonos irregulares, com aberturas entre 0,1 mm e 10 mm e espaçamento entre 50 mm e 500 mm, cuja orientação pode ser aleatória ou condicionada pelo posicionamento das armaduras. Associam-se a ela a exsudação de material gelatinoso branco a amarelado pelas fissuras, a expansão dos elementos estruturais, com fechamento de juntas de dilatação e desalinhamentos, o destacamento de fragmentos cônicos junto à superfície,

conhecido como pop-out, e o escurecimento de regiões por migração de umidade (Hasparyk, 2005; Fournier; Bérubé, 2000).

Do ponto de vista estrutural, a reação reduz a resistência à compressão em 10% a 50%, a resistência à tração em 30% a 70% e o módulo de elasticidade em 20% a 60% (Swamy, 1992; Munhoz, 2007). A maior sensibilidade das propriedades associadas à tração decorre do próprio mecanismo do dano, uma vez que a expansão do gel atua por fissuração da matriz. Além da perda de capacidade, registram-se comprometimentos funcionais e aumento da permeabilidade, com facilitação do ingresso de cloretos, sulfatos e dióxido de carbono e consequente risco de corrosão das armaduras (Hasparyk, 2005).

O diagnóstico exige abordagem multidisciplinar. Inicia-se pela inspeção visual, com identificação dos sintomas, mapeamento de fissuras e avaliação das condições de exposição, seguida da extração de testemunhos em locais representativos, sobre os quais se realizam ensaios físicos e análises químicas do teor de álcalis do concreto. A confirmação, contudo, depende das análises microscópicas: a petrografia por microscopia óptica permite identificar o tipo e a quantidade de agregados reativos, a presença de gel e o padrão de fissuração; a microscopia eletrônica de varredura possibilita observar a morfologia do gel e a interface entre pasta e agregado; e a microanálise por espectroscopia de energia dispersiva determina as razões entre sódio, potássio, cálcio e silício nos produtos de reação. Complementarmente, ensaios de expansão residual avaliam o potencial de expansão futura (RILEM, 2016; Hasparyk, 2005). A Tabela 3 apresenta os critérios de diagnóstico recomendados.

Tabela 3: Critérios de diagnóstico da reação álcali-agregado

Evidência observada	Diagnóstico
Gel típico, fissuração e expansão	RAA confirmada
Gel típico e fissuração	RAA provável
Gel atípico e fissuração	RAA possível
Ausência de gel	RAA improvável

Fonte: Adaptada de RILEM AAR-6.1 (2016).

Cabe diferenciar esse conjunto de procedimentos, voltado ao diagnóstico de estruturas já deterioradas, da avaliação preventiva de agregados que constitui o objeto deste trabalho. No primeiro caso, investiga-se um dano existente; no segundo, procura-se estimar, antes do

emprego do material, a probabilidade de que esse dano venha a ocorrer. São finalidades distintas, que mobilizam técnicas e critérios igualmente distintos.

3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO INSTRUMENTAL

Os ensaios físicos normativos aplicáveis a agregados miúdos, descritos nas normas brasileiras correspondentes, são apresentados no próximo capítulo, junto aos procedimentos efetivamente adotados nesta pesquisa. Esta seção trata dos fundamentos das duas técnicas instrumentais empregadas e, sobretudo, do alcance e das limitações de cada uma delas.

3.4.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva destinada à determinação da composição química elementar de materiais. Seu princípio consiste na irradiação da amostra com raios X de alta energia, capazes de ejetar elétrons das camadas internas dos átomos. As vacâncias assim criadas são preenchidas por elétrons das camadas mais externas, e cada transição emite radiação de energia característica do elemento, o que permite sua identificação e quantificação.

Os equipamentos dividem-se em dois tipos: os espectrômetros por dispersão de energia realizam análise simultânea de todos os elementos, com menor resolução espectral. Os espectrômetros por dispersão de comprimento de onda operam sequencialmente e oferecem resolução superior. A preparação da amostra envolve moagem abaixo de 75 µm, homogeneização e secagem, seguidas de prensagem em pastilha ou de fusão em pérola de vidro. A pastilha prensada é mais simples e rápida, porém sujeita a efeitos de matriz; a pérola de vidro elimina esses efeitos, a o custo de diluição da amostra e de perda de constituintes voláteis (Munhoz, 2007).

A quantificação pode ser realizada pelo método dos parâmetros fundamentais, que calcula as concentrações a partir de grandezas físicas, ou por curvas de calibração construídas com padrões de composição conhecida. Os resultados são convencionalmente expressos em óxidos, acompanhados da perda ao fogo correspondente aos constituintes voláteis.

Quanto à avaliação da reatividade alcalina, a contribuição da FRX é indireta e sujeita a limitação essencial: a técnica informa a composição química, mas não a forma mineralógica em que os elementos se encontram. Um teor elevado de SiO₂ pode corresponder tanto a quartzo

bem cristalizado, de baixa reatividade, quanto a opala ou cristobalita, de reatividade elevada. Por isso, os critérios químicos funcionam como indicadores preliminares que orientam a investigação subsequente, e não como classificadores. Teores de SiO₂ superiores a 95% sugerem material predominantemente quartzoso, cuja cristalinidade deve ser verificada; teores de álcalis acima de 3% indicam presença significativa de feldspatos alcalinos; e a razão entre SiO₂ e Al₂O₃ permite estimar o grau de silicificação, com valores acima de 10 apontando predomínio de quartzo e abaixo de 3 predomínio de minerais argilosos (Valduga, 2007; Marinoni; Broekmans, 2013).

3.4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X fundamenta-se na interferência construtiva da radiação espalhada por planos cristalinos periodicamente espaçados, fenômeno descrito pela lei de Bragg, apresentada na Equação 12:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (12)$$

Nessa expressão, n é a ordem de difração, λ o comprimento de onda da radiação incidente, d a distância interplanar e θ o ângulo de incidência. Como cada fase cristalina possui um conjunto único de distâncias interplanares e intensidades relativas, o difratograma permite a identificação do mineral (Marinoni; Broekmans, 2013).

A instrumentação compreende um tubo gerador de raios X, comumente de cobre, com radiação K α de comprimento de onda 1,5418 Å, um monocromador, um goniômetro que controla a geometria de incidência e detecção, e um detector acoplado a sistema de aquisição. A preparação da amostra segue procedimento análogo ao da FRX, com moagem abaixo de 75 μ m e montagem em porta-amostra de modo a assegurar orientação aleatória dos cristalitos. As condições usuais de varredura abrangem faixa angular de 5° a 70° em 2θ , com passo entre 0,02° e 0,05° (Munhoz, 2007; Valduga, 2007).

A identificação das fases é realizada por comparação do difratograma experimental com padrões de bancos de dados cristalográficos. Convém observar que os algoritmos de busca automática podem propor fases geologicamente incompatíveis com a origem do material, razão pela qual a atribuição exige validação crítica à luz do contexto geológico da amostra (Marinoni; Broekmans, 2013).

A difração de raios X é frequentemente apontada como a técnica mais adequada à avaliação do potencial reativo, por identificar diretamente as fases de sílica associadas à reatividade. Essa capacidade, contudo, encontra limite reconhecido quando se pretende passar da identificação qualitativa à predição do comportamento expansivo. O índice de cristalinidade do quartzo, proposto originalmente por Murata e Norman (1976) e derivado da largura dos picos de difração, foi amplamente empregado com essa finalidade. Marinoni e Broekmans (2013), em revisão crítica do método, demonstraram que o índice não corresponde a nenhuma característica cristalográfica definida e que a correlação entre seus valores e o comportamento expansivo dos agregados não se encontra estabelecida, propondo o abandono do procedimento em favor da análise do perfil das linhas de difração, capaz de extrair parâmetros microestruturais como tamanho de cristalito e microdeformação.

Essa constatação delimita o alcance da caracterização instrumental na avaliação preventiva. Nem a composição química determinada por FRX, nem a identificação de fases obtida por DRX, isoladamente ou em conjunto, substituem a medida direta da expansão. O que essas técnicas oferecem é a identificação de indícios que justificam ou dispensam o encaminhamento do material aos ensaios normativos, função que, embora mais modesta que a classificação, tem valor prático considerável em razão da diferença de prazo e de custo entre uma e outra abordagem (Bavasso et al., 2020).

3.5 PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO DA REAÇÃO

Para que ocorra a RAA, devem coexistir agregado reativo, álcalis disponíveis e umidade; assim, as estratégias preventivas atuam sobre a supressão de ao menos um desses fatores. A seleção de agregados é primordial para buscar agregados não reativos, conferindo a caracterização preventiva sua justificativa prática. Quando o emprego de agregado reativo é inevitável, por indisponibilidade de jazidas, de alternativa economicamente viável, recorre-se ao controle do teor de álcalis, seja pela especificação de cimento de baixo $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, seja pela limitação do teor total de álcalis do concreto expresso em massa por metro cúbico.

As adições minerais com atividade pozolânica são medidas mitigadoras amplamente aplicadas, atuando pelos mecanismos descritos na seção 3.1.4. Sua eficácia depende do tipo e do teor de substituição, requerendo a sílica ativa teores da ordem de 5% a 10%, o metacaulim de 10% a 15%, a cinza volante de 20% a 40% e a escória granulada de alto-forno de 40% a 70% (Thomas, 2011). Importante observar que essas adições são eficazes contra a RAS e a RASS,

mas pouco efetivas contra a RAC, cujo mecanismo não envolve formação de gel. Complementarmente, o controle da umidade por impermeabilização e drenagem reduz a disponibilidade de água necessária à expansão do gel, medida aplicável sobretudo a estruturas expostas.

A NBR 15577 (ABNT, 2018) estabelece o procedimento normativo para essa avaliação, articulando a análise petrográfica, os ensaios acelerados de expansão em barras de argamassa e os ensaios em prismas de concreto, e associando as medidas preventivas exigíveis ao nível de reatividade determinado e à classe de risco da estrutura. Nas estruturas já afetadas, as intervenções de recuperação envolvem o controle da umidade, o alívio de tensões por corte de juntas, o reforço estrutural e o monitoramento da expansão residual, procedimentos que fogem ao escopo deste trabalho e que evidenciam, pelo custo que implicam, o valor da abordagem preventiva.

3.6 DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE

As seções anteriores apresentaram os fundamentos consolidados da reação álcali-agregado e das técnicas de caracterização. Examinam-se, a seguir, os avanços mais recentes na avaliação da reatividade, com atenção particular aos trabalhos que empregam técnicas instrumentais e àqueles que discutem os limites dos procedimentos estabelecidos.

3.6.1 LIMITES DOS MÉTODOS DE PREDIÇÃO POR CARACTERIZAÇÃO

A tentativa de prever o comportamento expansivo a partir de parâmetros obtidos por caracterização instrumental constitui linha de investigação de longa data, cujo balanço recente é menos favorável do que se poderia supor. A revisão conduzida por Marinoni e Broekmans (2013) sobre o índice de cristalinidade do quartzo é ilustrativa: após examinar a fundamentação do método originalmente proposto por Murata e Norman (1976) e sua aplicação a agregados de diferentes procedências, os autores concluíram pela ausência de relação demonstrada entre os valores do índice e a expansão observada, apontando ainda deficiências no procedimento original quanto à descrição do preparo de amostra e do material de referência empregado na calibração. A alternativa sugerida, baseada na análise do perfil das linhas de difração, desloca o problema da construção de índices empíricos para a determinação de parâmetros microestruturais com significado cristalográfico definido.

O resultado dessa avaliação tem consequência metodológica direta para trabalhos de caracterização preventiva: técnicas instrumentais são adequadas à identificação de constituintes e à sinalização de risco, mas a classificação normativa da reatividade permanece dependente da medida direta da expansão.

3.6.2 ALTERNATIVAS AOS ENSAIOS NORMATIVOS DE EXPANSÃO

A duração dos ensaios normativos motiva investigações voltadas à sua abreviação. Bavasso et al. (2020) propuseram método acelerado de expansão em prismas de concreto conduzido a 38 °C, no qual os corpos de prova são imersos em soluções alcalinas de composição projetada para simular a solução dos poros do concreto endurecido, adotando como referência o ensaio tradicional de prismas para a definição do critério de expansão limite. Os autores avaliaram agregados naturais de desempenho em campo conhecido e discutiram a formulação das soluções a partir da hipótese de dissolução total dos álcalis do cimento.

A limitação prática é reconhecida internacionalmente, pois o prazo dos procedimentos do controle tecnológico de agregados é incompatível com a necessidade do mercado da construção.

3.6.3 AMPLIAÇÃO DO CONJUNTO INSTRUMENTAL

O avanço das técnicas de caracterização com resolução espacial tem ampliado a compreensão dos mecanismos de dano. Kumar et al. (2024) associaram o índice de classificação de dano à microfluorescência de raios X para a caracterização quantitativa da deterioração em concretos afetados pela reação, demonstrando que a combinação de informação espacial e composicional permite avaliar a extensão e a progressão do dano de modo mais preciso do que o obtido por técnicas isoladas.

3.6.4 DESENVOLVIMENTOS NORMATIVOS RECENTES

A partir de 2018, foram observados avanços significativos na normalização internacional relativa à reação álcali-agregado, conduzido pelo comitê técnico RILEM TC 258-AAA, voltado ao desenvolvimento de um conceito de ensaio baseado em desempenho.

O guia RILEM AAR-0, em sua versão de 2021, consolida o conjunto de métodos disponíveis e explicita a articulação entre eles. Ao lado dos procedimentos já estabelecidos em 2016 — exame petrográfico (AAR-1.1 e 1.2), barras de argamassa pelo método acelerado (AAR-2), prismas de concreto a 38 °C (AAR-3.1 e 3.2) e a 60 °C (AAR-4.1) e triagem de agregados carbonáticos (AAR-5) —, incorporam-se cinco métodos publicados em 2021: a determinação de álcalis liberáveis pelos agregados (AAR-8), os ensaios de prismas de concreto a 38 °C (AAR-10.1 e 10.2) e a 60 °C (AAR-11.1 a 11.3), o ensaio a 60 °C com suprimento externo de álcalis (AAR-12.1 a 12.3) e a aplicação de envolvimento alcalino em prismas (AAR-13). O conjunto evidencia o deslocamento da avaliação de reatividade do agregado isolado para a avaliação de desempenho de combinações de agregado e aglomerante.

Entre esses métodos, o AAR-8 apresenta relevância particular para a avaliação de agregados miúdos. O procedimento determina a quantidade potencial de álcalis liberáveis pelo agregado no concreto em longo prazo, mediante a medida dos íons sódio e potássio liberados pela fração inferior a 4 mm quando imersa em soluções de hidróxido de potássio e de hidróxido de sódio a 0,7 mol/L, em temperatura elevada e na presença de excesso de hidróxido de cálcio. Os autores da recomendação advertem, que o método fornece indicação do potencial máximo de liberação, não constituindo quantificação apropriada ao cálculo do inventário de álcalis do concreto. A existência de um procedimento normativo dedicado a essa determinação confirma que os álcalis contidos na estrutura mineral do agregado não são diretamente comparáveis aos álcalis do cimento, disponíveis na solução dos poros desde as primeiras idades.

O método foi submetido a ensaio interlaboratorial coordenado por Menéndez et al. (2022), que reuniu laboratórios de diversos países na avaliação da liberação de álcalis por agregados associada à análise petrográfica. Foi conduzido, pelos autores, o exame crítico do procedimento e, com base nos dados obtidos, propuseram alterações à versão original do método, o que evidencia que a determinação de álcalis liberáveis por agregados permanece em consolidação metodológica. Registre-se, ainda, que um novo comitê técnico foi constituído para o período de 2021 a 2025, dedicado à avaliação de risco de composições de concreto que empreguem agregados reativos.

Esses desenvolvimentos delimitam o contexto normativo em que se insere o presente trabalho. A tendência internacional aponta para procedimentos de desempenho cada vez mais elaborados, o que expande a pertinência de etapas preliminares de triagem capazes de indicar, a custo reduzido, quais materiais justificam o encaminhamento a ensaios dessa natureza.

3.6.5 SÍNTESE E DELIMITAÇÃO DA LACUNA

A literatura examinada converge em três pontos relevantes para este trabalho. O primeiro é o reconhecimento de que as técnicas instrumentais de caracterização, embora indispensáveis à identificação dos constituintes potencialmente reativos, não substituem os ensaios de expansão na classificação normativa da reatividade (Marinoni; Broekmans, 2013). O segundo é a constatação de que o prazo desses ensaios constitui limitação prática reconhecida, o que sustenta o interesse por procedimentos de triagem preliminar (Bavasso et al., 2020; Menéndez; Silva; Duchesne, 2021). O terceiro é a predominância, nos estudos disponíveis, de agregados graúdos como objeto de investigação, apesar de a faixa granulométrica associada à expansão máxima coincidir com a dos agregados miúdos (Hobbs, 1988).

Da articulação desses pontos decorre a lacuna que este trabalho procura preencher. Embora existam estudos consolidados sobre a aplicação isolada da fluorescência e da difração de raios X à caracterização de agregados (Munhoz, 2007; Valduga, 2007; Kumar et al., 2024), são escassas as propostas que integrem essas técnicas aos ensaios físicos normativos e aos critérios da ABNT NBR 15577 em um procedimento de triagem estruturado, explicitamente formulado como etapa anterior aos ensaios de expansão e voltado a agregados miúdos de procedência regional.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental foi estruturada em etapas sucessivas e complementares, compreendendo a obtenção e preparação da amostra, a caracterização física por ensaios normativos, a caracterização química por fluorescência de raios X (FRX), a caracterização mineralógica por difração de raios X (DRX) e, por fim, a integração dos resultados no protocolo de triagem proposto. A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, o fluxo metodológico adotado neste trabalho.



Figura 2: Fluxo metodológico adotado para caracterização e triagem preventiva da areia estudada. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1 MATERIAIS

4.1.1 ORIGEM E AMOSTRAGEM

A areia utilizada neste estudo é material natural de origem quartzosa, proveniente de depósito residual explorado em barranco, na região de Fonseca, em Minas Gerais, nas proximidades de Ouro Preto. Trata-se de material de emprego corrente na construção civil da região, comercializado como agregado miúdo para concreto.

A coleta foi realizada pelo autor, em agosto de 2014, diretamente na área da jazida, obtendo-se porção única de aproximadamente 50 kg. Cabe registrar que a amostragem consistiu em uma única retirada, e não no conjunto de incrementos previsto pela ABNT NBR NM 26 (ABNT, 2009), então vigente, para composição de amostra de campo representativa, procedimento posteriormente substituído pela ABNT NBR 16915 (ABNT, 2021).

Trata-se, portanto, de amostra pontual, adequada à caracterização exploratória a que este trabalho se propõe. Os resultados apresentados referem-se ao material efetivamente

caracterizado, e a ampliação da amostragem, com observância do procedimento normativo de incrementos múltiplos, é indicada entre as sugestões para trabalhos futuros.

4.1.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A amostra de campo foi seca ao ar livre por 48 horas para remoção da umidade superficial e submetida a quarteamento sucessivo, conforme a ABNT NBR NM 27 (ABNT, 2001), até a obtenção das porções de ensaio requeridas por cada procedimento. As frações foram acondicionadas em recipientes plásticos vedados, identificados e mantidos em ambiente seco até a realização dos ensaios.

Para as análises instrumentais, porção da amostra quarteada foi seca em estufa a 105 °C por 24 horas, resfriada em dessecador e cominuída até granulometria integralmente passante na peneira de 75 µm. Todas as operações de preparo foram conduzidas com limpeza dos equipamentos entre etapas e com utilização de recipientes e utensílios de material inerte, de modo a evitar contaminação cruzada.

4.2 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos foram executados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Ouro Preto, seguindo integralmente os procedimentos das normas brasileiras aplicáveis, cujas prescrições não são aqui reproduzidas. Registram-se, em cada caso, a norma adotada, a massa de ensaio e os parâmetros determinados.

A composição granulométrica foi determinada por peneiramento de amostra de 500 g, previamente seca em estufa a 105 °C até massa constante e resfriada em dessecador, utilizando-se a série normal de peneiras de 9,5 mm a 150 µm. O conjunto foi submetido a agitação mecânica por 10 minutos, complementada manualmente até que a massa retida em cada peneira em um minuto de agitação fosse inferior a 1% da massa retida naquela peneira. A partir das porcentagens retidas e retidas acumuladas foram determinados o módulo de finura, conforme a Equação 13, e a dimensão máxima característica.

$$MF = \Sigma (\% \text{ retidas acumuladas nas peneiras da série normal}) / 100 \quad (13)$$

A massa unitária no estado solto foi determinada pelo preenchimento de recipiente de volume conhecido em três camadas, cada uma adensada com 25 golpes de haste, seguido de

rasamento da superfície e pesagem, aplicando-se a Equação 14. O índice de vazios foi calculado pela Equação 15, a partir da massa unitária e da massa específica.

$$\gamma = m / V \quad (14)$$

$$I_v (\%) = [(\rho - \gamma) / \rho] \times 100 \quad (15)$$

Na fórmula, γ é a massa unitária, em kg/m³, m a massa de agregado, em kg, V o volume do recipiente, em m³, ρ a massa específica, em kg/m³, e I_v o índice de vazios.

A massa específica foi determinada pelo método do frasco Chapman, conforme a ABNT NBR 9776 (ABNT, 1987), em duas determinações com 500 g de amostra cada. O frasco foi preenchido com água até a marca de 200 cm³ e a areia introduzida em pequenas porções, com agitação para eliminação das bolhas de ar aderidas aos grãos. Após repouso para sedimentação das partículas finas, procedeu-se à leitura final do volume, obtendo-se a massa específica pela Equação 16. Admite-se diferença máxima de 0,05 kg/dm³ entre as duas determinações.

$$\rho = m_1 / (m_2 - m_3) \quad (16)$$

$$A (\%) = [(m_2 - m_1) / m_1] \times 100 \quad (17)$$

Na fórmula, m_1 é a massa da amostra seca em estufa, m_2 a massa na condição saturada com superfície seca, m_3 a massa determinada em picnômetro e A a absorção de água.

O teor de materiais pulverulentos foi obtido por lavagem da amostra seca sobre peneira de 75 μ m até a completa clarificação da água, com posterior secagem e pesagem do material retido, conforme a Equação 18. O teor de torrões de argila e materiais friáveis foi determinado pela separação manual das partículas identificáveis visualmente, sua desagregação sob pressão dos dedos e o peneiramento subsequente, conforme a Equação 19.

$$P (\%) = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100 \quad (18)$$

$$T (\%) = [(m_1 - m_2) / M] \times 100 \quad (19)$$

A presença de impurezas orgânicas foi avaliada por comparação colorimétrica entre a solução resultante do contato da amostra com hidróxido de sódio a 3%, em repouso por 24 horas, e a solução padrão de referência.

4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A composição química da areia foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva, em equipamento Shimadzu EDX-720, pertencente à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A amostra, previamente cominuída abaixo de 75 µm, homogeneizada e seca, foi analisada na forma de pó.

A quantificação foi realizada pelo método dos parâmetros fundamentais, mediante o qual as concentrações são calculadas a partir de grandezas físicas do processo de fluorescência, sem necessidade de curva de calibração construída com padrões. Os resultados foram expressos na forma de óxidos, tendo sido determinados os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, K₂O, TiO₂, CaO e Cr₂O₃, além de óxidos em concentração inferior a 0,1%. Os elementos leves, entre os quais o sódio e o magnésio, não são alcançados pela rotina analítica empregada, cuja faixa de determinação abrange elementos de número atômico igual ou superior ao do alumínio. O equivalente alcalino foi calculado conforme a Equação 20, a partir dos álcalis efetivamente determinados.

$$Na_2O_{eq} (\%) = Na_2O (\%) + 0,658 \times K_2O (\%) \quad (20)$$

Cabe registrar a natureza semiquantitativa da técnica quando empregada sem calibração com materiais de referência certificados de matriz equivalente. Os teores obtidos por parâmetros fundamentais são adequados à identificação da composição predominante e à comparação relativa entre óxidos, mas comportam incerteza superior à das determinações por via úmida ou por espectrometria com curva de calibração, sobretudo para os elementos leves, cuja radiação característica é fortemente atenuada. Os resultados são apresentados e discutidos como indicativos da composição química, e não como determinações analíticas de precisão certificada.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A identificação das fases cristalinas foi realizada no Laboratório de Difractometria de Raios X do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, em difratômetro Panalytical Empyrean, equipado com tubo cerâmico compacto de anodo de cobre e detector X'Celerator com tecnologia RTMS. A amostra, cominuída abaixo de 75 µm, foi montada em

porta-amostra de modo a assegurar orientação aleatória dos cristalitos, tendo o tempo de moagem sido controlado para evitar amorfização das fases.

A identificação das fases foi conduzida com o programa X'Pert HighScore Plus, mediante busca comparativa nos bancos de dados cristalográficos PDF-2 e PDF-4 do International Centre for Diffraction Data. O procedimento compreendeu a subtração da linha de base, a identificação das posições angulares dos picos, o cálculo das distâncias interplanares pela lei de Bragg e a comparação com as fichas cristalográficas dos bancos consultados. As fases propostas pela busca automática foram submetidas a verificação quanto à compatibilidade com a composição química determinada por FRX e quanto à plausibilidade geológica, dado que algoritmos de busca podem sugerir fases incompatíveis com a origem do material.

A estimativa das proporções relativas entre as fases identificadas foi realizada por comparação das intensidades dos picos principais, procedimento de natureza semiquantitativa que não considera efeitos de orientação preferencial nem sobreposição de reflexões, comportando incerteza da ordem de 10% a 20%. Não foi realizado refinamento pelo método de Rietveld, o que constitui limitação reconhecida deste trabalho e é indicado entre as sugestões para estudos futuros.

4.5 TRATAMENTO DOS DADOS

O tratamento dos resultados restringiu-se à estatística descritiva, compatível com o delineamento experimental adotado, que contemplou a caracterização de uma única fonte de agregado. Para os ensaios executados com repetição, calcularam-se a média aritmética, o desvio padrão amostral e o coeficiente de variação, conforme as Equações 21, 22 e 23.

$$\bar{x} = (\sum x_i) / n \quad (21)$$

$$s = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]} \quad (22)$$

$$CV (\%) = (s / \bar{x}) \times 100 \quad (23)$$

Não foram aplicados testes de inferência estatística. A análise de correlação entre parâmetros químicos, mineralógicos e físicos, bem como a análise de variância e os testes de comparação múltipla de médias, requerem conjuntos de dados provenientes de múltiplas amostras ou de grupos experimentais distintos, condição não atendida por um delineamento

voltado à caracterização de uma fonte única. A aplicação desses procedimentos a um único conjunto de determinações produziria resultados carentes de significado estatístico.

Essa restrição delimita o alcance das conclusões deste trabalho, que se referem à amostra caracterizada e não admitem generalização estatística para a jazida ou para areias de procedência semelhante.

4.6 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Os critérios adotados para a interpretação dos resultados são apresentados a seguir, organizados segundo a técnica que os origina. Convém explicitar que esses critérios orientam a triagem preliminar e indicam a necessidade de investigação complementar, não constituindo classificação normativa de reatividade, a qual permanece condicionada aos ensaios de expansão previstos na ABNT NBR 15577.

4.6.1 CRITÉRIOS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química determinada por FRX é interpretada segundo os teores de sílica e de álcalis e segundo as razões entre óxidos, conforme as Tabelas 4 e 5. Reitera-se que a análise química não distingue as formas mineralógicas em que a sílica se apresenta, razão pela qual esses critérios cumprem função orientadora da interpretação mineralógica subsequente.

Tabela 4: Interpretação do teor de sílica

Teor de SiO ₂	Interpretação
Superior a 95%	Agregado predominantemente quartzoso; verificar cristalinidade por DRX
Entre 70% e 95%	Composição intermediária, com quartzo, feldspatos e micas
Inferior a 70%	Baixo teor de sílica, com carbonatos ou minerais máficos

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5: Interpretação do teor de álcalis

Na₂O + K₂O	Interpretação
Inferior a 0,5%	Baixo teor de minerais alcalinos
Entre 0,5% e 3,0%	Teor moderado, com feldspatos em quantidade significativa
Superior a 3,0%	Teor elevado, com predominância de feldspatos alcalinos

Fonte: Elaborada pelo autor.

Adicionalmente, a razão entre SiO₂ e Al₂O₃ indica o grau de silicificação do material, com valores superiores a 10 apontando predomínio de quartzo, valores entre 3 e 10 indicando presença importante de feldspatos e micas, e valores inferiores a 3 sugerindo predomínio de minerais argilosos. A razão entre os álcalis e a alumina, por sua vez, aproxima-se da unidade em feldspatos estequiométricos, sendo inferior quando há excesso de alumina associado a minerais argilosos.

4.6.2 CRITÉRIOS MINERALÓGICOS

A identificação de fases por DRX é interpretada segundo a reatividade reconhecida de cada mineral, conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Reatividade potencial das fases minerais identificáveis por DRX

Mineral	Reatividade	Encaminhamento
Opala, vidro vulcânico	Muito alta	Ensaio de expansão indispensável
Cristobalita, tridimita	Alta	Ensaio de expansão indispensável
Calcedônia	Moderada a alta	Avaliar proporção; ensaio recomendado
Quartzo tensionado	Moderada	Avaliar cristalinidade
Quartzo bem cristalizado	Baixa a nula	Sem indício na triagem

Fonte: Elaborada pelo autor.

A cristalinidade do quartzo é avaliada pela largura a meia altura do pico principal, situado em distância interplanar de 3,34 Å, correspondente a aproximadamente 26,6° em 2θ,

conforme a Tabela 7. Esse parâmetro é adotado neste trabalho como indicador de triagem, e não como critério de classificação. Marinoni e Broekmans (2013) demonstraram que os índices de cristalinidade do quartzo derivados da largura dos picos não apresentam correlação estabelecida com o comportamento expansivo dos agregados, tendo proposto sua substituição pela análise do perfil das linhas de difração. A largura a meia altura é aqui utilizada, portanto, como indicação de que o material merece investigação complementar, sem que dela se extraia inferência sobre a magnitude da expansão.

Tabela 7: Largura a meia altura do pico principal do quartzo como indicador de triagem

FWHM (°2θ)	Ordem estrutural	Indicação para a triagem
Inferior a 0,12	Elevada	Sem indício
Entre 0,12 e 0,15	Boa	Sem indício
Entre 0,15 e 0,20	Moderada	Investigação complementar recomendada
Superior a 0,20	Baixa	Investigação complementar indispensável

Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Marinoni e Broekmans (2013).

4.6.3 CRITÉRIOS NORMATIVOS DE EXPANSÃO

Os critérios que efetivamente classificam a reatividade potencial de um agregado são os estabelecidos pela ABNT NBR 15577 e fundamentam-se na medida direta da expansão, conforme a Tabela 8. Esses ensaios não foram realizados no presente trabalho, sendo sugeridos para estudos futuros, aqui reproduzidos por constituírem a referência à qual a triagem proposta se destina a encaminhar o material.

Tabela 8: Critérios normativos de avaliação da reatividade potencial

Ensaio	Norma	Duração	Limite de expansão
Barras de argamassa, método acelerado	ABNT NBR 15577-4	30 dias	0,19%
Prismas de concreto	ABNT NBR 15577-6	1 ano	0,04%
Prismas de concreto, avaliação de adições	ABNT NBR 15577-6	2 anos	0,04%

Fonte: Elaborada pelo autor, com base na ABNT NBR 15577 (ABNT, 2018).

4.7 PROTOCOLO DE TRIAGEM PROPOSTO

A contribuição metodológica deste trabalho consiste na organização dos ensaios físicos normativos e das técnicas instrumentais em uma sequência decisória explícita, destinada a estabelecer, em prazo reduzido, se determinada fonte de agregado miúdo deve ou não ser encaminhada aos ensaios de expansão. O protocolo é formulado como etapa anterior aos procedimentos normativos, não como substituto deles.

A primeira etapa consiste na verificação de conformidade com os requisitos físicos da ABNT NBR 7211. O material que não atende aos limites de materiais pulverulentos, torrões de argila e distribuição granulométrica é rejeitado ou encaminhado a beneficiamento, hipótese em que a triagem é reiniciada sobre o material beneficiado. Essa etapa antecede as demais por envolver os ensaios de menor custo.

A segunda etapa compreende a caracterização química por FRX. Diferentemente do que propõem esquemas que condicionam a continuidade da avaliação a um teor mínimo de sílica, o protocolo aqui adotado não estabelece critério de exclusão nesta etapa. A composição química não permite inferir a forma mineralógica da sílica, de modo que teores intermediários de SiO_2 não autorizam presumir baixo risco. A FRX cumpre, nesta sequência, função orientadora: identifica a composição predominante, quantifica os álcalis intrínsecos e fornece as razões entre óxidos que subsidiarão a interpretação do difratograma.

A terceira etapa consiste na identificação das fases cristalinas por DRX e concentra a decisão do protocolo. A identificação de qualquer fase de sílica reconhecidamente reativa, como opala, cristobalita, tridimita ou calcedônia, determina o encaminhamento do material ao ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa, independentemente da proporção estimada,

dado que os teores necessários para provocar expansão deletéria são reduzidos e que a estimativa semiquantitativa comporta incerteza elevada.

Não sendo identificadas fases reativas, procede-se à quarta etapa, na qual se avalia a ordem estrutural do quartzo pela largura a meia altura do pico principal. Larguras superiores a $0,15^\circ$ em 2θ , indicativas de quartzo microcristalino ou tensionado, determinam igualmente o encaminhamento ao ensaio de expansão.



Figura 3: Fluxograma do protocolo proposto para triagem preventiva de agregados miúdos quanto ao potencial de reação álcali-agregado. O protocolo organiza sequencialmente a avaliação da conformidade física, a caracterização química por FRX, a identificação mineralógica por DRX e a integração dos indícios obtidos, direcionando o material aos ensaios normativos de expansão quando identificadas condições que justifiquem investigação complementar. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O protocolo admite dois desfechos, sintetizados na Tabela 9. O primeiro é a triagem positiva, na qual foram identificados indícios que tornam indispensável o ensaio de expansão previsto na ABNT NBR 15577- 4. O segundo é a triagem sem indícios, na qual as técnicas empregadas não detectaram fases reativas nem quartzo de baixa ordem estrutural. Cabe destacar que este segundo desfecho não equivale à classificação do agregado como inócuo, uma vez que a caracterização instrumental não mede expansão: trata-se de ausência de indício, e a decisão sobre a liberação do material deve considerar a análise petrográfica prevista na ABNT NBR 15577-3 e a classe de risco da estrutura a que se destina.

Tabela 9: Desfechos do protocolo de triagem

Desfecho	Condição	Encaminhamento
Rejeição na triagem física	Não conformidade com a ABNT NBR 7211	Rejeitar ou beneficiar
Triagem positiva	Fase reativa identificada por DRX ou FWHM superior a $0,15^\circ$	Ensaio de expansão conforme ABNT NBR 15577-4
Triagem sem indícios	Ausência de fase reativa e quartzo de ordem estrutural elevada	Análise petrográfica e decisão conforme a classe de risco da estrutura

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

5.1.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Os resultados do ensaio de peneiramento, realizado em duas amostras de aproximadamente 1000 g, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Composição granulométrica da areia de Fonseca

Peneira (mm)	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)	Média (g)	Retida (%)	Acumulada (%)
9,5	0,00	0,00	0,00	0	0
6,3	0,00	0,00	0,00	0	0
4,75	42,38	32,81	37,60	4	4
2,36	56,18	49,40	52,79	5	9
1,18	138,63	117,71	128,17	13	22
0,60	241,67	231,00	236,34	24	45
0,30	362,87	403,98	383,43	38	84
0,15	128,92	134,04	131,48	13	97
0,075	24,83	27,55	26,19	3	100
Fundo	7,20	6,42	6,81	1	100
Total	1002,68	1002,91	1002,80	100	—

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal obteve-se módulo de finura de 2,61 e dimensão máxima característica de 4,75 mm. O valor do módulo de finura classifica o material como areia média, conforme a ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009), e situa-se na faixa usualmente indicada para concretos estruturais.

A distribuição concentra-se nas frações intermediárias: as peneiras de 0,60 mm e 0,30 mm retiveram, somadas, 62% do material. Todo o material passou na peneira de 4,75 mm,

confirmando tratar-se integralmente de agregado miúdo, e a fração passante na peneira de 0,075 mm limitou-se a 3%. A curva granulométrica é apresentada na Figura 4, sobreposta aos limites das zonas ótima e utilizável definidas pela norma.

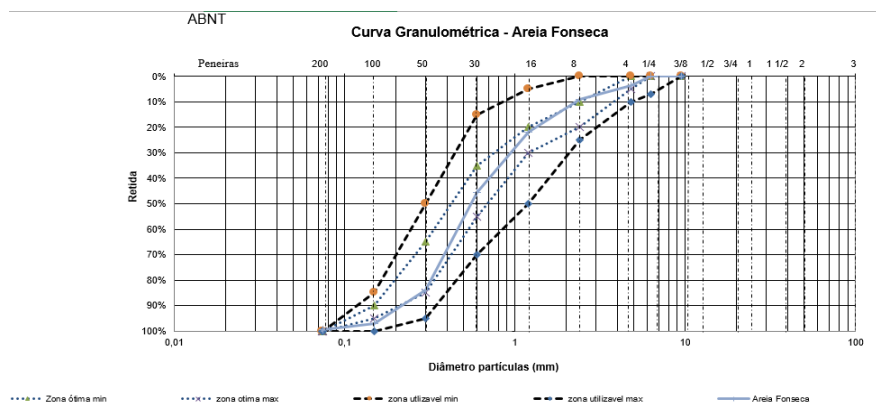


Figura 4: Curva granulométrica da areia de Fonseca. Fonte: Elaborada pelo autor.

A curva enquadra-se integralmente na zona utilizável em toda a sua extensão, sem deficiência ou excesso em qualquer fração, o que dispensa correção granulométrica por mistura com outras areias. Cabe registrar, contudo, que o enquadramento na zona utilizável e não na zona ótima indica material adequado, porém não ideal, sob o critério normativo.

5.1.2 MASSA UNITÁRIA E ÍNDICE DE VAZIOS

A massa unitária no estado solto foi determinada em três repetições, cujos resultados constam da Tabela 11.

Tabela 11: Massa unitária da areia de Fonseca

Determinação	Volume do recipiente (cm ³)	Massa de agregado (g)	Massa unitária (g/cm ³)
1	109,80	180,10	1,46
2	111,20	181,90	1,46
3	109,80	177,90	1,46
Média	—	—	1,46

Fonte: Elaborada pelo autor.

As três determinações resultaram em 1,46 g/cm³, equivalente a 1460 kg/m³, com coeficiente de variação de 0,18%. A dispersão situa-se muito abaixo do limite de 1% admitido pela norma, o que indica homogeneidade da amostra e repetibilidade do procedimento. O valor obtido insere-se na faixa característica de areias naturais não compactadas.

Combinando a massa unitária com a massa específica determinada na subseção seguinte, obteve-se índice de vazios de 44,5%. O resultado é compatível com areias de granulometria média e com partículas de morfologia arredondada a subarredondada, característica de depósitos fluviais, e implica que aproximadamente 45% do volume aparente do agregado deverá ser preenchido por pasta de cimento na dosagem do concreto.

5.1.3 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

A massa específica, determinada em frasco de Chapman com duas amostras de 500 g, resultou em 2,63 g/cm³. O valor aproxima-se do valor teórico do quartzo puro, de 2,65 g/cm³, o que constitui a primeira indicação, entre os ensaios físicos, da natureza predominantemente quartzosa do material. Indicação posteriormente confirmada pelas análises química e mineralógica.

A absorção de água resultou em 0,37%, valor que classifica o agregado na faixa de absorção muito baixa. Absorções inferiores a 1% correspondem a partículas densas, com reduzido volume de poros acessíveis, e praticamente não exigem correção da água de amassamento no controle de dosagem. Os dois resultados são mutuamente coerentes: densidade próxima à do quartzo e porosidade acessível reduzida descrevem o mesmo material.

Tabela 12: Massa específica e absorção de água da areia de Fonseca

Parâmetro	Resultado
Massa específica	2,63 g/cm ³
Massa na condição saturada com superfície seca	1000,0 g
Massa seca em estufa	996,3 g
Absorção de água	0,37%

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.4 TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS

O teor de materiais pulverulentos, determinado por lavagem sobre peneira de 75 μm a partir de amostra de 500 g, resultou em 2,84%. A ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece limite de 3,0% para concretos submetidos a desgaste superficial e de 5,0% para os demais casos.

O resultado atende a ambos os limites, mas convém observar que a margem em relação ao limite mais restritivo é estreita, de 0,16 ponto percentual. Considerando a variabilidade inerente ao material de jazida e a incerteza do próprio ensaio, o emprego desta areia em concretos sujeitos a desgaste superficial recomenda verificação lote a lote, hipótese em que uma variação modesta na fração fina poderia levar à não conformidade. Para as demais aplicações, a margem é confortável.

5.1.5 TEOR DE TORRÕES DE ARGILA E MATERIAIS FRIÁVEIS

O ensaio, conduzido sobre amostra de 200 g, resultou em teor de 2,20% de torrões de argila e materiais friáveis, atendendo ao limite normativo de 3,0%. Observação análoga à do item anterior aplica-se aqui: a margem de 0,80 ponto percentual, embora maior, não é ampla.

Os dois resultados guardam relação com a mineralogia posteriormente identificada. A presença de caulinita detectada por DRX é compatível tanto com a fração pulverulenta quanto com os torrões observados, tratando-se de mineral de argila resultante da alteração intempérica de feldspatos, o que é consistente com a origem geológica atribuída ao depósito.

5.1.6 IMPUREZAS ORGÂNICAS

A avaliação foi realizada por comparação colorimétrica entre a solução obtida com a amostra e a solução padrão, após 24 horas de contato com hidróxido de sódio, conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5: Comparação colorimétrica após 24 horas: solução com a areia de Fonseca (à esquerda) e solução padrão (à direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

A solução em contato com a areia apresentou coloração mais clara que a solução padrão, resultado que classifica o material como aprovado e dispensa o ensaio complementar de verificação do efeito sobre o tempo de pega. O resultado indica ausência de matéria orgânica em teores capazes de interferir na hidratação do cimento, condição esperada em areias de leito de rio ativo, nas quais o fluxo contínuo de água promove a lixiviação de compostos orgânicos.

5.1.7 SÍNTESE DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 13 reúne os resultados dos ensaios físicos e sua conformidade com os requisitos normativos aplicáveis.

Tabela 13: Síntese da caracterização física da areia de Fonseca

Propriedade	Resultado	Requisito	Conformidade
Módulo de finura	2,61	Areia média (2,4 a 3,3)	Conforme
Dimensão máxima característica	4,75 mm	$\leq 9,5$ mm	Conforme
Massa unitária	1460 kg/m ³	Faixa típica: 1400 a 1700 kg/m ³	Conforme
Índice de vazios	44,5%	Faixa típica: 38% a 48%	Conforme
Massa específica	2,63 g/cm ³	Faixa típica: 2,60 a 2,70 g/cm ³	Conforme
Absorção de água	0,37%	Sem limite normativo	Muito baixa

Propriedade	Resultado	Requisito	Conformidade
Materiais pulverulentos	2,84%	≤ 3,0% (desgaste); ≤ 5,0% (demais)	Conforme
Torrões de argila e materiais friáveis	2,20%	≤ 3,0%	Conforme
Impurezas orgânicas	Mais clara que o padrão	ABNT NBR NM 49	Aprovado

Fonte: Elaborada pelo autor, com base na ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009).

O conjunto dos ensaios físicos indica material conforme aos requisitos normativos, sem necessidade de beneficiamento. Cabe ressaltar, entretanto, que a conformidade física não fornece qualquer informação sobre o potencial reativo do agregado: os requisitos da ABNT NBR 7211 tratam de granulometria, densidade e substâncias nocivas, sendo a avaliação da reatividade álcali-agregado objeto de norma distinta. As seções seguintes destinam-se a essa avaliação.

5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A análise foi realizada em espectrômetro Shimadzu EDX-720, com quantificação pelo método dos parâmetros fundamentais. Os resultados foram fornecidos pelo equipamento em duas formas: composição elementar, apresentada na Figura 6, e composição em óxidos, apresentada na Figura 7.

```

Sample : Areia de Fonseca
Operator:
Comment : Metal, Vac, 2chan
Group : easy-Vac-Metal
Date : 2014-11-13 09:56:28

```

Qualitative Result

Element: Si, S, Rh, K, Ca, Ba, Ti, Cr, Mn, Fe, Zr, Ag, Al, V, Sm

Quantitative Result

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Si	71.850 %	[0.236]	Quan-FP	SiKa	18.8458
Fe	13.999 %	[0.070]	Quan-FP	FeKa	71.0760
Al	6.109 %	[0.094]	Quan-FP	AlKa	0.5076
K	2.698 %	[0.042]	Quan-FP	K Ka	0.6434
S	2.339 %	[0.025]	Quan-FP	S Ka	0.8907
Ca	1.008 %	[0.018]	Quan-FP	CaKa	0.3510
Ti	0.860 %	[0.022]	Quan-FP	TiKa	1.5637
Cr	0.592 %	[0.014]	Quan-FP	CrKa	1.9664
Ba	0.218 %	[0.115]	Quan-FP	BaLa	0.1300
Mn	0.147 %	[0.016]	Quan-FP	MnKa	0.5843
Zr	0.103 %	[0.004]	Quan-FP	ZrKa	2.7802
Ag	0.076 %	[0.013]	Quan-FP	AgKa	0.7763

Figura 6: Composição elementar da areia de Fonseca determinada por FRX. Fonte: Relatório do equipamento.

Quantitative Result					
Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
SiO2	80.391 %	[0.271]	Quan-FP	SiKa	18.0107
Fe2O3	7.387 %	[0.037]	Quan-FP	FeKa	72.6480
Al2O3	7.178 %	[0.116]	Quan-FP	AlKa	0.4966
SO3	2.071 %	[0.025]	Quan-FP	S Ka	0.7533
K2O	1.350 %	[0.021]	Quan-FP	K Ka	0.6576
TiO2	0.637 %	[0.017]	Quan-FP	TiKa	1.7688
CaO	0.408 %	[0.017]	Quan-FP	CaKa	0.2552
Cr2O3	0.336 %	[0.008]	Quan-FP	CrKa	1.9845
MnO	0.075 %	[0.008]	Quan-FP	MnKa	0.6248
ZrO2	0.042 %	[0.002]	Quan-FP	ZrKa	2.6216
Ag2O	0.038 %	[0.004]	Quan-FP	AgKa	1.1075
V2O5	0.026 %	[0.013]	Quan-FP	V Ka	0.0935
Au2O	0.022 %	[0.005]	Quan-FP	AuLa	0.3218
ZnO	0.016 %	[0.003]	Quan-FP	ZnKa	0.3683
CuO	0.016 %	[0.003]	Quan-FP	CuKa	0.3076
SrO	0.009 %	[0.001]	Quan-FP	SrKa	0.5280

Figura 7: Composição em óxidos da areia de Fonseca determinada por FRX. Fonte: Relatório do equipamento.

Convém registrar que as duas apresentações correspondem ao mesmo conjunto de dados, expresso em bases distintas: a composição elementar normaliza os teores dos elementos entre si, ao passo que a composição em óxidos considera o oxigênio combinado. Assim, os 14,0% de ferro elementar e os 7,39% de Fe_2O_3 não constituem determinações independentes, mas a mesma medida em duas convenções. A discussão que segue adota a expressão em óxidos, convencional na caracterização de agregados.

5.2.1 SÍLICA

O teor de SiO_2 , de 80,39%, é o mais elevado entre os constituintes e confirma a natureza predominantemente silicosa do material. O valor situa-se na faixa intermediária de composição, característica de areias derivadas do intemperismo de rochas graníticas e gnáissicas, nas quais o quartzo predomina acompanhado de feldspatos, e é inferior ao intervalo de 95% a 99% típico de areias quartzosas de alta pureza.

Cabe explicitar o alcance dessa informação. O teor de sílica indica a quantidade de silício presente, mas não a forma mineralógica em que se encontra, e é justamente a ordem estrutural da sílica que determina sua suscetibilidade ao ataque alcalino. Um teor intermediário de SiO_2 não autoriza, portanto, presumir baixo potencial reativo, do mesmo modo que um teor elevado não o indicaria por si só. A definição desse ponto cabe à análise mineralógica apresentada na seção 5.3.

5.2.2 ALUMINA E RAZÕES ENTRE ÓXIDOS

O teor de Al_2O_3 , de 7,18%, evidencia a presença de minerais aluminossilicáticos, compatível com feldspatos e, em menor proporção, micas. A razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ resulta em 11,2, valor superior a 10 e portanto indicativo de predomínio de quartzo com contribuição acessória de feldspatos, coerente com o teor de sílica determinado.

5.2.3 ÓXIDOS DE FERRO

O teor de Fe_2O_3 , de 7,39%, é relativamente elevado para areias quartzosas e justifica a coloração amarelada do material. Está associado a minerais ferruginosos como hematita e goethita, comuns em areias fluviais submetidas a oxidação superficial, e é compatível com o contexto geológico regional. Teores de óxido de ferro dessa ordem não comprometem a estabilidade química do agregado nem participam dos mecanismos da reação álcali-agregado.

5.2.4 ENXOFRE

O teor de SO_3 , de 2,07%, merece registro por ser superior ao usualmente observado em areias fluviais. A presença de enxofre pode estar associada a sulfatos naturais originados do intemperismo local. Embora não se relacione à reação álcali-agregado, o enxofre em agregados constitui fator de atenção quanto ao ataque por sulfatos, mecanismo de deterioração distinto e igualmente expansivo.

5.2.5 ÁLCALIS E EQUIVALENTE ALCALINO

Os óxidos alcalinos presentes em agregados naturais provêm majoritariamente de feldspatos e micas, minerais nos quais o sódio e o potássio integram a estrutura cristalina. A análise determinou teor de K_2O de 1,350%. O Na_2O não consta do relatório fornecido pelo laboratório, resultado consistente com a limitação reconhecida da fluorescência de raios X por energia dispersiva na determinação de elementos leves, cuja radiação característica de baixa energia é fortemente atenuada. Registra-se, portanto, que o sódio não foi determinado, o que não equivale a afirmar sua ausência no material.

Considerando os álcalis determinados, o equivalente alcalino calculado pela Equação 20 resulta no valor apresentado na Equação 24:

$$Na_2O_{eq} = 0,658 \times 1,350 = 0,888\% \quad (24)$$

Cabe registrar que o sódio não integrou o conjunto de elementos alcançados pela rotina analítica empregada, cuja faixa de determinação abrange elementos de número atômico igual ou superior ao do alumínio, de modo que o valor obtido reflete exclusivamente a contribuição do potássio. A análise mineralógica apresentada na seção 5.3, entretanto, não identificou fases portadoras de sódio, não tendo sido detectados plagioclásio ou albita entre os constituintes, o que indica contribuição sódica reduzida e sustenta a adoção do valor calculado como representativo do equivalente alcalino do material.

Cabe precisar, contudo, o estatuto desse parâmetro na avaliação da reatividade potencial. Os limites de equivalente alcalino estabelecidos pela normalização referem-se ao cimento e ao teor total de álcalis do concreto, grandezas que determinam a concentração de íons hidroxila na solução dos poros desde as primeiras idades. Os álcalis contidos no agregado encontram-se imobilizados em fases minerais e são liberados de forma lenta e apenas parcial ao longo do tempo, não correspondendo ao reagente efetivamente disponível. Essa distinção é reconhecida internacionalmente. A RILEM publicou, em 2021, método específico destinado à determinação dos álcalis potencialmente liberáveis pelos agregados, mediante lixiviação da fração inferior a 4 mm em soluções de hidróxido de potássio e de hidróxido de sódio, na presença de excesso de hidróxido de cálcio. Os autores da recomendação advertem que mesmo esse resultado deve ser tomado como indicação do potencial máximo de liberação, e não como quantificação apropriada ao cálculo do inventário de álcalis do concreto (Menéndez; Silva; Duchesne, 2021). A existência de procedimento dedicado a essa determinação evidencia que o teor de álcalis obtido por análise química global não substitui a medida da fração efetivamente liberável.

O equivalente alcalino aqui determinado é interpretado, por conseguinte, como informação de composição, e não como critério de classificação de reatividade. Associado ao teor de Al_2O_3 de 7,18% e à razão SiO_2/Al_2O_3 de 11,2, o teor de potássio indica a presença de feldspatos potássicos e micas em proporção acessória, hipótese coerente com a identificação de caulinita por difração de raios X, produto de alteração intempérica desses minerais.

Associado ao teor de Al_2O_3 de 7,18% e à razão SiO_2/Al_2O_3 de 11,2, indica a presença de feldspatos potássicos e micas em proporção acessória, hipótese coerente com a identificação de caulinita por difração de raios X, produto de alteração intempérica desses minerais.

5.2.6 ALCALINO-TERROSOS E MINERAIS ACESSÓRIOS

O teor de CaO, de 0,41%, é reduzido, e o magnésio, à semelhança do sódio, não integrou o conjunto de elementos alcançados pela rotina analítica empregada. A ausência de fases carbonáticas no difratograma confirma, por via independente, que a amostra não é carbonática, o que exclui o mecanismo da reação álcali-carbonato e restringe a avaliação de reatividade aos mecanismos que envolvem a sílica. Esse resultado exclui a possibilidade de reação álcali-carbonato, cujo mecanismo depende da presença de dolomita associada a argila, e restringe a avaliação de reatividade aos mecanismos que envolvem a sílica.

Os teores de TiO₂, de 0,637%, e de Cr₂O₃, de 0,336%, associam-se a minerais acessórios como rutilo, ilmenita e cromita, característicos de origem ígnea e metamórfica. Os demais óxidos detectados, todos abaixo de 0,1%, correspondem a elementos-traço sem influência sobre o comportamento do agregado. Registre-se que algumas das espécies indicadas pelo equipamento em teores dessa ordem, como Ag₂O e Au₂O, devem ser interpretadas com reserva, dado que sobreposições espectrais e artefatos de fundo são comuns na análise por dispersão de energia em concentrações próximas ao limite de detecção. A Tabela 14 sintetiza a composição química determinada por FRX.

Tabela 14: Composição química da areia de Fonseca determinada por FRX

Óxido	Teor (%)	Observação
SiO ₂	80,39	Composição predominantemente silicosa
Fe ₂ O ₃	7,39	Minerais ferruginosos; sem relação com a RAA
Al ₂ O ₃	7,18	Feldspatos e micas
SO ₃	2,07	Verificar limite normativo
K ₂ O	1,350	Álcali intrínseco
TiO ₂	0,637	Mineral acessório
CaO	0,408	Material não carbonático
Cr ₂ O ₃	0,336	Mineral acessório
Demais óxidos	< 0,1	Elementos-traço

Fonte: Elaborada pelo autor, com base no relatório do equipamento.

5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O difratograma obtido é apresentado na Figura 8, e as fases identificadas com as respectivas proporções estimadas constam da Tabela 15.

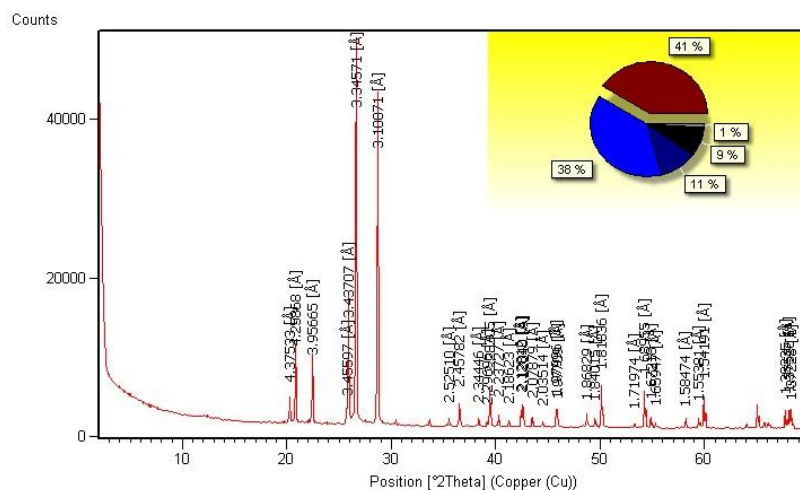


Figura 8: Difratograma da areia de Fonseca. Fonte: Relatório do laboratório.

Tabela 15: Fases identificadas por DRX na areia de Fonseca

Fase	Proporção estimada (%)
Quartzo de baixa cristalinidade	41
Quartzo de alta cristalinidade	38
Coesita	11
Caulinita	9
Cristobalita	1

Fonte: Elaborada pelo autor, com base no relatório do laboratório.

A predominância de fases silicosas, que somadas ultrapassam 90% do material, corrobora o teor de SiO_2 determinado por FRX e confirma a natureza quartzosa da areia. A caulinita identificada é compatível com a fração pulverulenta e com os torrões de argila quantificados nos ensaios físicos, e sua presença associada ao teor de Al_2O_3 determinado por FRX sustenta a hipótese de alteração intempérica de feldspatos: o alumínio e os álcalis

originalmente contidos nos feldspatos permanecem no material, ainda que a fase feldspática original não tenha sido identificada no difratograma.

Registre-se que todas as fases identificadas são silicosas ou aluminossilicáticas, não tendo sido detectada qualquer fase portadora de sódio, magnésio ou carbonato. A ausência de plagioclásio e de albita é coerente com o baixo teor de álcalis determinado por FRX, e a ausência de calcita e dolomita confirma, por via independente da análise química, que o material não é carbonático.

5.3.1 FASES RELEVANTES PARA A REATIVIDADE ALCALINA

Dois resultados da análise mineralógica são diretamente relevantes para a avaliação do potencial reativo, e ambos apontam na mesma direção. O primeiro é a identificação de cristobalita. Ainda que a proporção estimada seja de apenas 1%, trata-se de polimorfo da sílica reconhecidamente mais suscetível ao ataque alcalino que o quartzo bem cristalizado, e a literatura registra que teores entre 1% e 3% de minerais de reatividade elevada podem ser suficientes para provocar expansão deletéria. Isso não significa que, em razão da baixa proporção, a fase possa ser desconsiderada, tanto mais que a estimativa semiquantitativa por intensidades relativas comporta incerteza da ordem de 10% a 20%.

O segundo é a proporção de quartzo de baixa cristalinidade, estimada em 41% e correspondente à maior fração individual identificada. A ordem estrutural do quartzo condiciona sua velocidade de dissolução em meio alcalino, e formas de menor cristalinidade dissolvem-se mais rapidamente. A coexistência de quartzo com graus distintos de cristalinidade sugere história geológica que envolveu processos de deformação ou recrystalização, compatível com o contexto metamórfico regional.

Salienta-se, quanto a este segundo ponto, a ressalva metodológica apresentada na seção 3.4.2: a classificação da cristalinidade não constitui critério de classificação da reatividade, uma vez que a correlação entre índices derivados da difração e o comportamento expansivo não se encontra estabelecida (Marinoni; Broekmans, 2013). A proporção elevada de quartzo de baixa cristalinidade é aqui interpretada como indício que recomenda investigação complementar, e não como medida de reatividade.

5.3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A IDENTIFICAÇÃO DE FASES

A atribuição de 11% de coesita requer exame crítico. A coesita é polimorfo de sílica formado sob pressões da ordem de 2 GPa, ocorrendo essencialmente em estruturas de impacto e em rochas metamórficas de ultra-alta pressão, contextos geológicos que não correspondem ao de um depósito aluvionar. Suas reflexões principais situam-se em posições próximas às de outras fases silicosas, o que favorece atribuições equivocadas em rotinas automáticas de busca.

Observa-se, no difratograma da Figura 5, reflexão de intensidade comparável à do pico principal do quartzo em posição distinta deste, circunstância que merece verificação, dado que o material é declarado predominantemente quartzoso. Recomenda-se, por essa razão, a revisão manual da identificação de fases, com validação das fichas cristalográficas propostas à luz do contexto geológico do depósito, e o refinamento pelo método de Rietveld, disponível no laboratório onde a análise foi conduzida. O refinamento forneceria proporções quantitativas com incerteza inferior à da estimativa por intensidades relativas, além de parâmetros microestruturais de tamanho de cristalito e microdeformação, indicados pela literatura em substituição aos índices de cristalinidade (Marinoni; Broekmans, 2013).

5.4 AVALIAÇÃO INTEGRADA DO POTENCIAL REATIVO

Aplicando-se o protocolo proposto na seção 4.7 aos resultados obtidos, tem-se o percurso descrito a seguir.

Na primeira etapa, referente à conformidade física, o material atende a todos os requisitos da ABNT NBR 7211 verificados, conforme a Tabela 13, com a ressalva relativa à margem estreita no teor de materiais pulverulentos para concretos sujeitos a desgaste superficial. A triagem prossegue.

Na segunda etapa, a caracterização química indica composição predominantemente silicosa, com 80,39% de SiO_2 , razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 11,2 e ausência de constituintes carbonáticos, o que exclui o mecanismo da reação álcali-carbonato. O equivalente alcalino determinado, de 0,89%, indica participação acessória de feldspatos, informação que orienta a leitura do difratograma sem, por si, condicionar a continuidade da triagem.

Na terceira etapa, decisiva no protocolo, a análise mineralógica identificou cristobalita, fase de reatividade reconhecidamente elevada. Essa identificação, por si só, determina o

encaminhamento do material ao ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa previsto na ABNT NBR 15577-4, independentemente da proporção estimada.

A quarta etapa, relativa à ordem estrutural do quartzo, não pôde ser aplicada de forma quantitativa por não se dispor do valor de largura a meia altura. A proporção de 41% de quartzo de baixa cristalinidade constitui, entretanto, indício qualitativo convergente com o da etapa anterior.

O desfecho do protocolo é, portanto, o de triagem positiva: foram identificados indícios que justificam a realização dos ensaios de expansão. Ele não classifica o agregado como reativo, classificação que depende da medida direta da expansão e que nenhuma das técnicas empregadas neste trabalho é capaz de fornecer. Tampouco o classifica como inócuo. O que os resultados estabelecem é que a areia de Fonseca não pode ser liberada para emprego em concreto sem que se verifique, por ensaio de expansão, o comportamento das fases silicosas identificadas.

Registre-se que esse desfecho constitui, em si, evidência do funcionamento do protocolo. Um procedimento de triagem cumpre sua função quando detecta, em prazo reduzido e a custo baixo, indícios que justificam investigação mais onerosa. A identificação de cristobalita em teor de 1%, que uma avaliação restrita à composição química não teria detectado, ilustra a pertinência de associar a análise mineralógica à química na avaliação preventiva.

5.5 SÍNTESE E LIMITAÇÕES

A caracterização realizada permitiu estabelecer o perfil físico, químico e mineralógico da areia de Fonseca e submetê-lo ao protocolo de triagem proposto. Do ponto de vista físico, o material é conforme aos requisitos normativos e apresenta parâmetros mutuamente coerentes: a massa específica de 2,63 g/cm³, a absorção de 0,37% e o índice de vazios de 44,5% descrevem, de forma consistente, areia quartzosa densa e pouco porosa, e essa leitura é confirmada pelos 80,39% de SiO₂ da análise química e pelos mais de 90% de fases silicosas da análise mineralógica. A convergência entre técnicas independentes confere confiabilidade ao conjunto dos resultados.

Do ponto de vista da reatividade, o resultado é o encaminhamento aos ensaios normativos de expansão, motivado pela identificação de cristobalita e reforçado pela proporção elevada de quartzo de baixa cristalinidade.

Três limitações delimitam o alcance desses resultados. A primeira decorre do delineamento: caracterizou-se uma amostra de uma fonte, de modo que os resultados não admitem generalização estatística para a jazida nem para areias de procedência semelhante. A segunda refere-se à precisão das determinações instrumentais, uma vez que a quantificação por FRX sem materiais de referência certificados e a estimativa mineralógica por intensidades relativas comportam incertezas que restringem o uso dos valores a comparações relativas. A terceira, e mais importante, é a ausência dos ensaios de expansão, sem os quais nenhuma conclusão sobre reatividade pode ser estabelecida. Limitação que não é contornável por refinamento das técnicas empregadas, por decorrer da natureza do que cada uma delas mede.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho caracterizou física, química e mineralogicamente a areia natural da região de Fonseca, em Ouro Preto (MG), e avaliou seu potencial frente à reação álcali-agregado (RAA) mediante a integração de ensaios físicos normativos, fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX) em um protocolo de triagem preventiva.

A caracterização física demonstrou conformidade com os requisitos avaliados da ABNT NBR 7211, com módulo de finura de 2,61, massa específica de 2,63 g/cm³, absorção de água de 0,37%, teor de materiais pulverulentos de 2,84% e teor de torrões de argila de 2,20%. Essa conformidade, contudo, não informa sobre a suscetibilidade à RAA, uma vez que fases mineralógicas potencialmente reativas podem ocorrer em agregados que atendem integralmente aos requisitos físicos normativos.

A FRX indicou composição predominantemente silicosa, com 80,39% de SiO₂, acompanhada de Fe₂O₃ e Al₂O₃ em proporções acessórias. O reduzido teor de CaO, associado à ausência de fases carbonáticas no difratograma, afastou a hipótese de reação álcali-carbonato. O equivalente alcalino de 0,89% foi interpretado como informação composicional, e não como critério de classificação da reatividade. A DRX confirmou o predomínio de fases silicosas, com quartzo, caulinita e pequena proporção de cristobalita, cuja presença constituiu o principal indício para o encaminhamento do material aos ensaios normativos de expansão.

A aplicação do protocolo resultou em triagem positiva. Esse desfecho não classifica a areia como reativa nem como inócua, pois a classificação normativa depende da medida direta da expansão. A contribuição central do estudo está em organizar as técnicas de caracterização em uma sequência decisória capaz de identificar, em prazo reduzido, os materiais que demandam investigação complementar, sem substituir os métodos normativos. Os resultados limitam-se a uma única amostra de uma única fonte e às incertezas inerentes às determinações instrumentais. Recomenda-se, como continuidade, a realização dos ensaios de expansão previstos na ABNT NBR 15577, o refinamento quantitativo do difratograma e a ampliação da amostragem a outras fontes, o que permitiria avaliar o desempenho do protocolo em um conjunto mais representativo de agregados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados — determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: agregados — determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1**: agregados — reatividade álcali-agregado — parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-3**: agregados — reatividade álcali-agregado — parte 3: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4**: agregados — reatividade álcali-agregado — parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-5**: agregados — reatividade álcali-agregado — parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-6**: agregados — reatividade álcali-agregado — parte 6: determinação da expansão em prismas de concreto. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915**: agregados — amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: agregados — amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados — redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: agregado miúdo — determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

BAVASSO, I.; COSTA, U.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E. Assessment of alkali-silica reactivity of aggregates by concrete expansion tests in alkaline solutions at 38 °C. **Materials**, v. 13, n. 2, art. 288, 2020. DOI: 10.3390/ma13020288.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 11, n. 1, p. 1-9, 1981.

DIAMOND, S. ASR: another look at mechanisms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 8., 1989, Kyoto. **Proceedings**. Kyoto, 1989.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 167-191, 2000.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Concrete future**: the GCCA 2050 cement and concrete industry roadmap for net zero. London: GCCA, 2021.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HOBBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete**. London: Thomas Telford, 1988.

KUMAR, D.; TROTTIER, C.; STEWART, L.; SANCHEZ, L.; KURTIS, K. E. Combined DRI and μ XRF for quantitative characterization of damage in ASR-affected concrete: a proof-of-concept investigation. In: SANCHEZ, L. F.; TROTTIER, C. (ed.). **Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**. RILEM Bookseries, v. 49. Cham: Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-59419-9_74.

MARINONI, N.; BROEKMANS, M. A. T. M. Microstructure of selected aggregate quartz by XRD, and a critical review of the crystallinity index. **Cement and Concrete Research**, v. 54, p. 215-225, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.007

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENÉNDEZ, E.; SANTOS-SILVA, A.; FERNANDES, I.; DUCHESNE, J.; BERRA, M.; DE WEERDT, K.; SALEM, Y.; GARCÍA-ROVÉS, R.; SOARES, D.; FOURNIER, B.; MANGIALARDI, T.; LINDGÅRD, J. RILEM TC 258-AAA round robin test: alkali release from aggregates and petrographic analysis. Critical review of the test method AAR-8. **Materiales de Construcción**, v. 72, n. 346, e279, 2022. DOI: 10.3989/mc.2022.17021.

MENÉNDEZ, E.; SILVA, A. S.; DUCHESNE, J. Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-8 — determination of potential releasable alkalis by aggregates in concrete. **Materials and Structures**, v. 54, art. 205, 2021. DOI: 10.1617/s11527-021-01682-1.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MURATA, K. J.; NORMAN, M. B. An index of crystallinity for quartz. **American Journal of Science**, v. 276, n. 9, p. 1120-1130, 1976. DOI: 10.2475/ajs.276.9.1120.

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

POWERS, T. C.; STEINOUR, H. H. An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 26, n. 6, 1955.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 219-ACS. **AAR-6.1**: diagnosis and assessment of alkali-aggregate reaction in existing structures. RILEM Recommended Test Method, 2016.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 258-AAA. Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-0 — outline guide to the use of RILEM methods in the assessment of the alkali-reactivity potential of aggregates. **Materials and Structures**, 2021. DOI: 10.1617/s11527-021-01687-w.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, v. 66, n. 10, p. 1781-1811, 1940.

SWAMY, R. N. (ed.). **The alkali-silica reaction in concrete**. Glasgow: Blackie, 1992.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: a review. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1224-1231, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2025: cement**. Reston: USGS, 2025.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.