

Análise petrográfica e microscopia eletrônica de varredura na reação álcalis agregado no concreto

Petrographic analysis and scanning electron microscopy on alkali-aggregate reaction in concrete

Análisis petrográfico y microscopía electrónica de barrido de la reacción álcali-árido en el hormigón

Edson Luiz Ávila

Doutor em Ciência e Tecnologia Ambiental

Instituição: Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI)

Endereço: Itajaí – Santa Catarina, Brasil

E-mail: edson.laborgeo@gmail.com

Gabriel Allebrandt Thomas

Graduado em Geologia

Instituição: Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Endereço: São Leopoldo – Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: gabriel.athomas@hotmail.com

Mauricio Oliveira Righi da Silva

Mestre em Sensoriamento Remoto

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: mauricio.o.righi@gmail.com

RESUMO

A ampla diversidade do trato rochoso do Brasil fornece agregados de diferentes origens para o concreto, variando de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Essa heterogeneidade mineralógica pode favorecer a reação álcali-agregado (RAA), em especial a reação álcali-sílica (RAS), reconhecida como a mais deletéria às estruturas. O objetivo deste estudo foi avaliar a suscetibilidade de diferentes litotipos à RAS, por meio de análises petrográficas em luz transmitida e refletida e da microscopia eletrônica de varredura (MEV), em conformidade com normas ABNT e ASTM. Foram examinadas amostras de gnaiss, granito, migmatito, basalto e sedimento arenoso. Os resultados indicaram maior potencial reativo em gnaisses, granitos e migmatitos, relacionados à presença de quartzo deformado e feldspatos alterados. Basaltos vítreos mostraram potencial moderado devido à instabilidade de plagioclásios e fases amorfas. Areias quartzosas exibiram reações de bordo com formação de etringita e gel. Conclui-se que o controle petrográfico e a aplicação de ensaios normativos são essenciais para prevenir reações álcali-agregado e assegurar a durabilidade do concreto em diferentes condições de exposição.

Palavras-chave: petrografia de agregados, Reação Álcalis-Agregado (RAA), Reação Álcali-Sílica (RAS), durabilidade do concreto.

ABSTRACT

The wide diversity of Brazil's rock formations provides aggregates of different origins for concrete, from igneous to metamorphic and sedimentary rocks. This mineralogical heterogeneity can favor the alkali-aggregate reaction (AAR), especially the alkali-silica reaction (ASR), recognized as the most detrimental to structures. The objective of this study was to evaluate the susceptibility of different lithotypes to ASR through petrographic analyses in transmitted and reflected light and scanning electron microscopy (SEM), in accordance with ABNT and ASTM standards. Samples of gneiss, granite, migmatite, basalt, and sand sediment were examined. The results indicated greater reactive potential in gneisses, granites, and migmatites, related to the presence of deformed quartz and altered feldspars. Vitreous basalts showed moderate potential due to the instability of plagioclase and amorphous phases. Quartz sands exhibited edge reactions with the formation of ettringite and gel. It is concluded that petrographic control and the application of normative tests are essential to prevent alkali-aggregate reactions and ensure concrete durability under different exposure conditions.

Keywords: aggregate petrography, Alkali-Aggregate Reaction (AAR), Alkali-Silica Reaction (ASR), concrete durability.

RESUMEN

La amplia diversidad de formaciones rocosas de Brasil proporciona agregados de diferentes orígenes para el hormigón, que abarcan desde rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Esta heterogeneidad mineralógica puede favorecer la reacción álcali-agregado (RAA), especialmente la reacción álcali-sílice (RAS), reconocida como la más perjudicial para las estructuras. El objetivo de este estudio fue evaluar la susceptibilidad de diferentes litotipos a la RSA mediante análisis petrográficos en luz transmitida y reflejada y microscopía electrónica de barrido (MEB), de acuerdo con las normas ABNT y ASTM. Se examinaron muestras de gneis, granito, migmatita, basalto y sedimento arenoso. Los resultados indicaron un mayor potencial reactivo en gneis, granitos y migmatitas, relacionado con la presencia de cuarzo deformado y feldespatos alterados. Los basaltos vítreos mostraron un potencial moderado debido a la inestabilidad de las fases plagioclasa y amorfa. Las arenas de cuarzo exhibieron reacciones de borde con etringita y formación de gel. Se concluye que el control petrográfico y la aplicación de ensayos normativos son esenciales para prevenir reacciones álcali-agregado y asegurar la durabilidad del hormigón bajo diferentes condiciones de exposición.

Palabras clave: petrografía de agregados, Reacción Álcali-Agregado (AAR), Reacción Álcali-Sílice (ASR), durabilidad del hormigón.

1 INTRODUÇÃO

O concreto se consolidou no Brasil ao longo do século XX como insumo essencial da construção civil, inicialmente introduzido como produto patentado por filiais estrangeiras e difundido após a instalação das primeiras cimenteiras, em meados da década de 1920 (Santos,

2008). Desde os anos 1940, sua utilização está normalizada pela ABNT e regulamentada pelo sistema CONFEA/CREA. Atualmente, o setor mantém trajetória de crescimento: em 2022, a produção nacional atingiu 43 milhões de m³ (ABESC, 2022) e, em 2024, as vendas de cimento alcançaram 64,7 milhões de toneladas, representando aumento de 3,9% em relação ao ano anterior (SNIC, 2024). Essa dinâmica está associada à demanda habitacional, dado que o país apresenta déficit de 6,2 milhões de moradias (Fundação João Pinheiro, 2024).

No concreto, os agregados correspondem a aproximadamente 70% do volume total e exercem papel determinante nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade (Luz; Almeida, 2012; Mehta; Monteiro, 2014; Ribeiro; Pinto; Starling, 2013; ABNT, 2019). A diversidade geológica do território brasileiro disponibiliza ampla gama de rochas para uso como agregados graúdos, principalmente ígneas e metamórficas, além de areias como agregados miúdos. Contudo, as variações geoquímicas e mineralógicas desses materiais influenciam diretamente a estabilidade química e estrutural da matriz cimentícia, podendo favorecer reações deletérias. Ainda que normas e métodos consolidados estejam disponíveis, a avaliação sistemática dos agregados brasileiros permanece insuficiente, em especial quanto às reações álcalis-agregado (RAA).

A reação álcalis-sílica (RAS) é a manifestação mais recorrente da RAA, resulta da interação entre sílica reativa em agregados e íons hidroxila da solução de poros, originando gel expansivo higroscópico (Forster *et al.*, 1998; Malvar, 2002; Latifee, 2016). Enquanto formas estáveis de quartzo tendem a ser inertes, variedades microcristalinas ou deformadas, como calcedônia, opala, vidro vulcânico e quartzo com extinção ondulante, apresentam alta suscetibilidade (Fanijo; Kolawole; Almakrab, 2021). A reação álcalis-carbonato (RAC), embora menos frequente, também pode comprometer a durabilidade do concreto. A avaliação preventiva inclui ensaios normativos (ABNT NBR 15577 [s.d.]; ASTM, 2016; Rilem, 2000), sendo a análise petrográfica etapa inicial e obrigatória para triagem de agregados (Rhoades; Mielenz, 1946; Hasparyk; Monteiro, 2000).

Estudos indicam maior risco de reatividade em rochas ígneas ácidas, basaltos vítreos, quartzitos e gnaisses com quartzo microcristalino ou cataclasado (Hobbs, 1988; Wenk *et al.*, 2008; Leemann, 2024). Nesse cenário, a caracterização petrográfica representa ferramenta essencial para a identificação de minerais reativos, estruturas deformacionais e microfissuras. Justifica-se, portanto, investigar de forma sistemática as rochas empregadas como agregados no

Brasil, correlacionando suas feições mineralógicas e texturais com a propensão a RAA. No contexto brasileiro, estes tipos de análises são importantes, pois o país apresenta dimensões continentais e grande diversidade climática. Esses fatores resultam em interações distintas em fases e intensidades, que impactam diretamente a durabilidade do concreto.

Assim, este estudo tem por objetivo avaliar como tais características influenciam a durabilidade do concreto, fornecendo subsídios técnicos para seleção de agregados e estratégias de mitigação.

2 MATERIAIS A MÉTODOS

Foram analisados agregados graúdos de gnaiss, granito, mármore e basalto, além de areia como agregado miúdo. As amostras foram obtidas diretamente em campo, por sondagem rotativa, e não possuem rastreabilidade quanto às pedreiras de origem. Ainda assim, representam litotipos amplamente empregados na construção civil brasileira.

No laboratório, os corpos de prova foram seccionados e preparados em aproximadamente 300 lâminas petrográficas delgadas, seguindo a ABNT NBR 15845-1 (2020) e a ASTM C856/C856M (2020). As lâminas, de 30 µm de espessura, permitiram observação em microscopia óptica de luz transmitida e refletida. A análise contemplou identificação modal de minerais, observação de texturas, microfraturas e alteração mineralógica, conforme critérios da ABNT NBR 7389/1992 e diretrizes da American Society for Testing and Materials (ASTM).

Adicionalmente, empregou-se Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em amostras selecionadas, metalizadas com prata segundo ASTM C1723-16. Essa etapa visou caracterizar a morfologia, microfissuração e produtos de reação na interface agregado–pasta de cimento, incluindo portlandita, etringita e fases C-S-H.

3 RESULTADOS

Os resultados derivam da análise petrográfica de agregados naturais empregados em concretos. Embora as amostras não apresentem rastreabilidade direta quanto à origem das pedreiras ou usinas de produção, os litotipos identificados, gnaiss, granito, mármore, basalto e areia, correspondem a materiais amplamente utilizados na construção civil brasileira.

A Tabela 1 sintetiza minerais constituintes, feições petrográficas, potenciais de reatividade (RAA, incluindo RAS e RAC) e implicações para a durabilidade.

O referencial teórico em um estudo compreende uma análise crítica e organizada da literatura pertinente ao tema, fornecendo uma contextualização teórica e definindo os conceitos-chave. Deve conter de maneira abrangente as teorias, modelos e pesquisas anteriores, identificando lacunas, contradições e consensos na literatura que são importantes para o foco do trabalho que está sendo desenvolvido.

Tabela 1. Minerais constituintes e feições petrográficas das rochas.

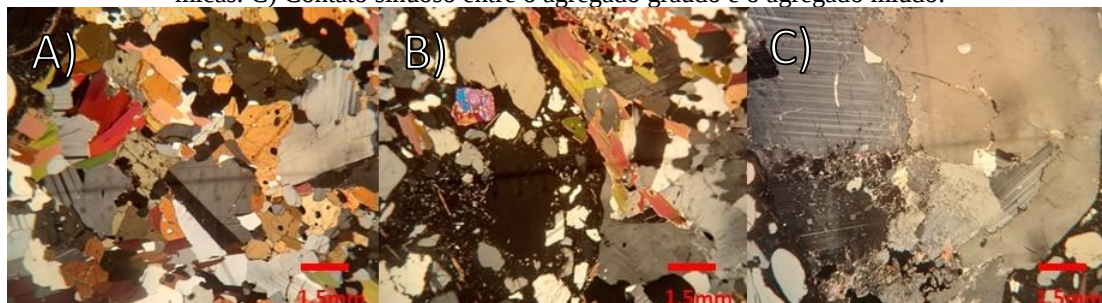
Litotipo	Minerais principais	Feições petrográficas	Potencial de reatividade (RAA)
Gnaisse	Quartzo, feldspatos, biotita, muscovita	Quartzo com extinção ondulante, microfraturas, feldspatos alterados	Alto (RAS)
Granito	Quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, biotita	Quartzo deformado, feldspatos caulinizados, microfissuras	Alto (RAS)
Mármore/Calcário metamorizado	Calcita, dolomita, quartzo acessório	Textura granoblástica, microfraturas preenchidas por carbonatos	Moderado (RAC)
Basalto	Plagioclásio, piroxênio, vidro vulcânico, opacos	Plagioclásio saussuritizado, piroxênios uralitizados, vidro alterado	Moderado (RAS em condições específicas)
Areia	Quartzo, feldspatos, micas, fragmentos carbonáticos	Quartzo policristalino, extinção ondulante, microfissuras locais	Baixo a moderado (RAS em quartzo deformado)

Fonte: Dados obtidos pelos autores, 2025.

3.1 AGREGADO GRAÚDO (MIGMATITOS E GNAISSES)

Os agregados graúdos de migmatitos e gnaisses apresentaram mineralogia composta por quartzo, feldspatos e micas (Figura 1). O quartzo ocorre em formas mono e policristalinas, exibindo extinção ondulante e microfraturas, feições reconhecidas como potenciais indicadores de suscetibilidade à RAS (Wenk *et al.*, 2008; Hasparyk, 1999). Em função dessas feições, o quartzo presente nesses agregados graúdos é potencialmente reativo à RAS. Feldspatos revelaram alteração intensa, com sericitização e saussuritização nos plagioclásios e caulinização em microclínio. As micas, sobretudo biotita, aparecem orientadas segundo foliação e parcialmente cloritizadas, evidenciando instabilidade mineral (Fernandes, 2005; Fernandes; Noronha, 2007).

Figura 1. A) Biotita orientada, plagioclásio e quartzo. B) Quartzo e plagioclásio sericitizados, com inclusões de micas. C) Contato sinuoso entre o agregado graúdo e o agregado miúdo.



Fonte: Acervo dos autores, 2025.

Relações de contato interdigitadas, recristalização de quartzo e orientação de micas confirmam deformação dúctil-rúptil (Swamy, 1998; Alexander; Mindess, 2010). Na interface agregado–pasta, foram observados gel e etringita em poros, além de indícios de carbonatação, confirmando reatividade incipiente (Glinicki *et al.*, 2016; Power; Hammersley, 1978). Assim, os migmatitos devem ser classificados como potencialmente reativos, demandando ensaios complementares.

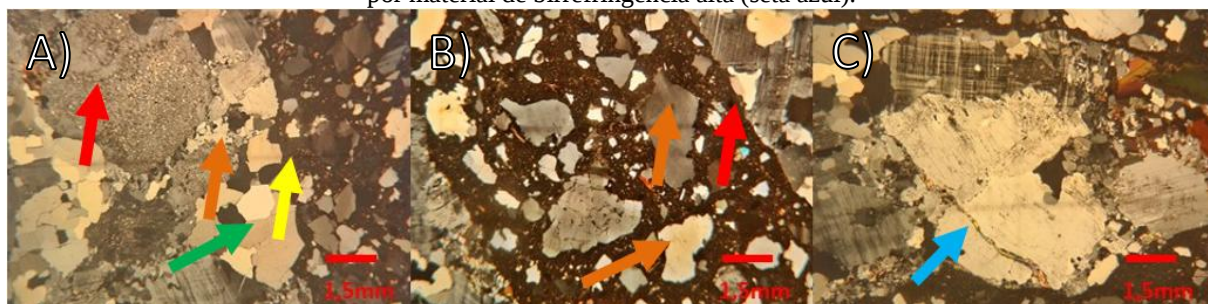
3.2 GRANITOS METAMORFIZADOS

Esses agregados exibiram feições texturais típicas de deformação dinâmica, aproximando-se de gnaisses cataclásticos (Passchier; Trouw, 2005; Vernon, 2004). Macroscopicamente, são fragmentos angulosos a subangulosos, com dimensões entre 5 e 35 mm e orientação planar local. No microscópio (Figura 2), a mineralogia é dominada por quartzo, feldspato potássico (microclínio e ortoclásio), plagioclásio, biotita e hornblenda, além de acessórios como opacos, apatita e zircão. O quartzo mostra extinção ondulante, contatos lobulados e microfraturas (Wenk *et al.*, 2008). Tais características indicam que o quartzo presentes nesses agregados graúdos é potencialmente reativo à RAS. Os feldspatos estão intensamente alterados: microclínio sericitizado, plagioclásio saussuritizado e bordas caulinizadas. A biotita aparece dobrada, cloritizada e alinhada à foliação, enquanto a hornblenda está parcialmente epidotizada (Yardley, 1989).

As relações de contato revelam recristalização e atuação de fluidos hidrotermais (Spray, 1969). Na interface agregado–pasta, observaram-se bordas reativas claras, gel em microfraturas e etringita acicular. Também foram identificados carbonatos de alta birrefringência, confirmando

carbonatação incipiente (Hasparyk, 1999; Glinicki *et al.*, 2016). Em síntese, trata-se de agregados potencialmente reativos, cuja instabilidade mineral e deformações tectônicas aumentam o risco de RAA.

Figura 2. A) Grãos de plagioclásio essencialmente alterados por sericitização (seta vermelha); Quartzo recristalizado (seta laranja), contato em junção tríplice (seta verde) e contato sinuoso (seta amarela). B) Quartzo de distintas granulometrias (seta laranja) e contato reto entre os grãos (seta vermelha). C) Microfraturas preenchidas por material de birrefringência alta (seta azul).



Fonte: Acervo dos autores, 2025.

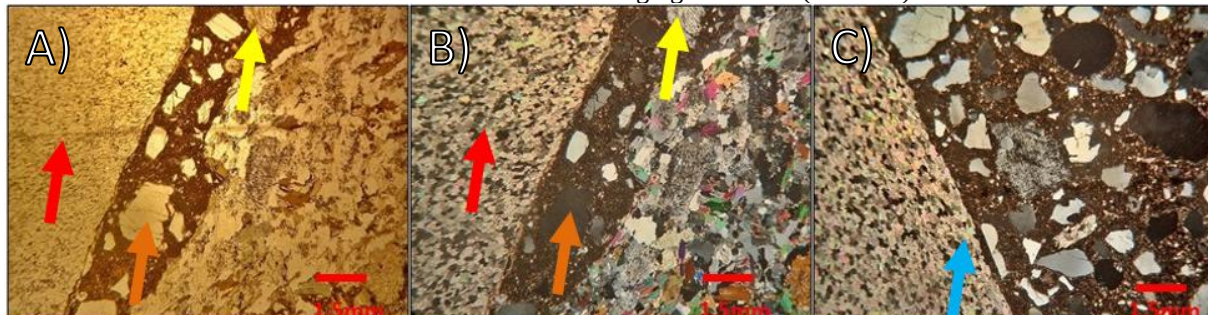
3.3 CALCÁRIOS METAMORFIZADOS

Constituídos por calcita e dolomita recristalizadas, apresentaram textura granoblástica fina a média, com contatos lobulados e arranjo inequigranular típico (Yardley, 1989; Vernon, 2004). A calcita ocorre em cristais anédricos a subédricos, com extinção ondulante e microfraturas preenchidas por carbonatos secundários. A dolomita aparece subordinada, substituindo parcialmente a calcita (Figura 3).

Evidências de dissolução incipiente originam microporosidade secundária. Minerais acessórios incluem opacos, quartzo e fragmentos micáceos. Alterações secundárias incluem preenchimento de poros e fraturas por carbonatos microcristalinos de alta birrefringência (Lea, 1998; Glinicki *et al.*, 2016).

Na interface com a pasta, há boa aderência, mas também bordas reativas, etringita acicular e depósitos de carbonatos em fraturas (Swamy, 1998; Hasparyk, 1999). Assim, os calcários metamorfizados exibem potencial de RAC, distinto da RAS, demandando monitoramento em condições específicas (Fernandes, 2005; Alexander; Mindess, 2010).

Figura 3. A) calcita/dolomita, com presença de quartzo (seta laranja) e feldspato alcalino (seta amarela). B) Lâmina com calcita/dolomita (seta vermelha), quartzo (seta laranja) e feldspato alcalino (seta amarela). C) Contato reto entre calcita/dolomita e o agregado miúdo (seta azul).



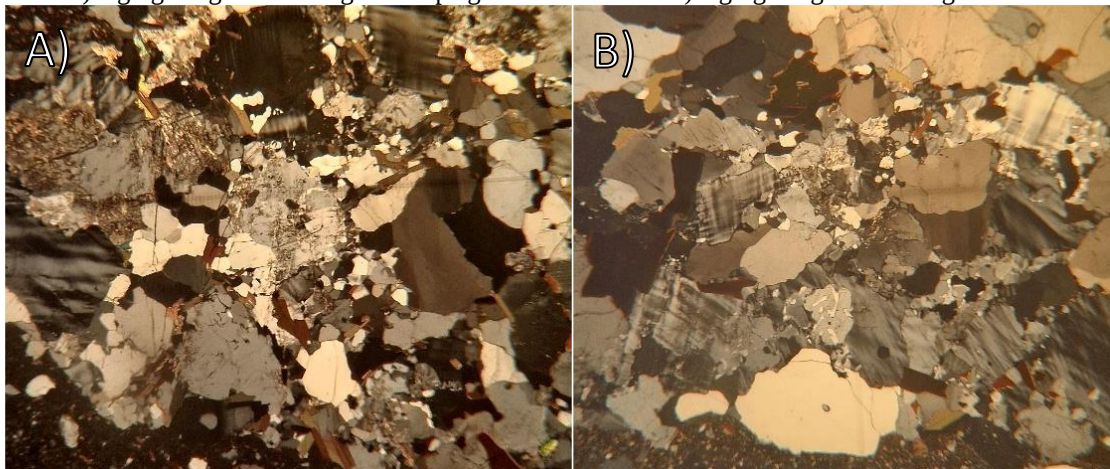
Fonte: Acervo dos autores, 2025.

3.4 GRANITO

Os agregados graníticos mostraram textura holocristalina fanerítica inequigranular, com quartzo monocristalino e policristalino deformado, apresentando extinção ondulante, contatos lobulados e fraturamento (Figura 4). Assim, o quartzo presente nesses agregados graúdos deve ser considerado potencialmente reativo à RAS. Feldspatos alcalinos (microclínio e ortoclásio) exibem geminações preservadas, mas intensa alteração hidrotermal (sericitização e caulínização). Plagioclásios, geralmente oligoclásio a andesina, estão saussuritizados. Biotita ocorre em lamelas cloritizadas e acessórios incluem zircão, apatita e opacos (Fernandes, 2005; Fernandes; Noronha, 2007).

As relações de contato evidenciam deformação tectônica, com biotitas dobradas, feldspatos fraturados e intercrescimentos gráficos tipo mirmequita (Swamy, 1998). Alterações hidrotermais são pervasivas, associadas à atuação de fluidos (Alexander; Mindess, 2010; Brito; Santos, 2008). Na interface agregado pasta, bordas reativas, gel amorfo e etringita acicular confirmam interação química. Microfraturas em quartzo e feldspatos apresentam produtos secundários e carbonatação incipiente foi observada em pastas adjacentes (Glinicki *et al.*, 2016; Power; Hammersley, 1978). Em conjunto, essas feições classificam o granito como agregado potencialmente reativo.

Figura 4. A) Agregado graúdo com grãos de plagioclásio alterado. B) Agregado graúdo com grãos de microclínio.



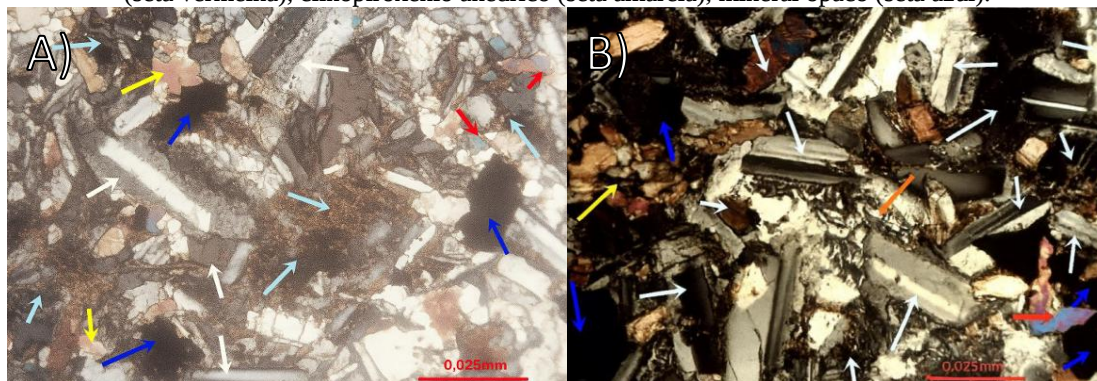
Fonte: Acervo dos autores, 2025.

3.5 BASALTO

Os basaltos são compostos por plagioclásio cálcico-sódico (labradorita a andesina), clinopiroxênio (augita), minerais opacos (magnetita, ilmenita) e vidro vulcânico residual. O plagioclásio encontra-se saussuritizado e os piroxênios uralitizados, revelando instabilidade mineral (Carmichael; Turner; Verhoogen, 1974; Deer; Howie; Zussman, 1997). Texturas intergranulares a subofíticas, microfraturas em plagioclásio e piroxênio e vidro alterado para argilominerais reforçam a suscetibilidade (Wilson, 1989; Nesbitt; Young, 1982) (Figura 5).

Na interface com a pasta, bordas reativas, gel amorfo e etringita confirmam reatividade incipiente. Estudos prévios destacam a participação de basaltos alterados em reações expansivas, especialmente associados a quartzo residual ou vidro devitrificado (Hobbs, 1988; Ichikawa; Miura, 2007). Assim, basaltos devem ser classificados como agregados de risco moderado à RAA.

Figura 5. A) Plagioclásio com saussuritização (seta branca), clinopiroxênio com borda de reação e alterando para uralita (seta vermelha), presença do argilomineral vinculado à alteração do vidro vulcânico. B) Bordas corrosivas (seta branca), textura mimerquítica (seta laranja), seta vermelha clinopiroxênio com borda e alteração para uralita (seta vermelha), clinopiroxênio anédrico (seta amarela), mineral opaco (seta azul).



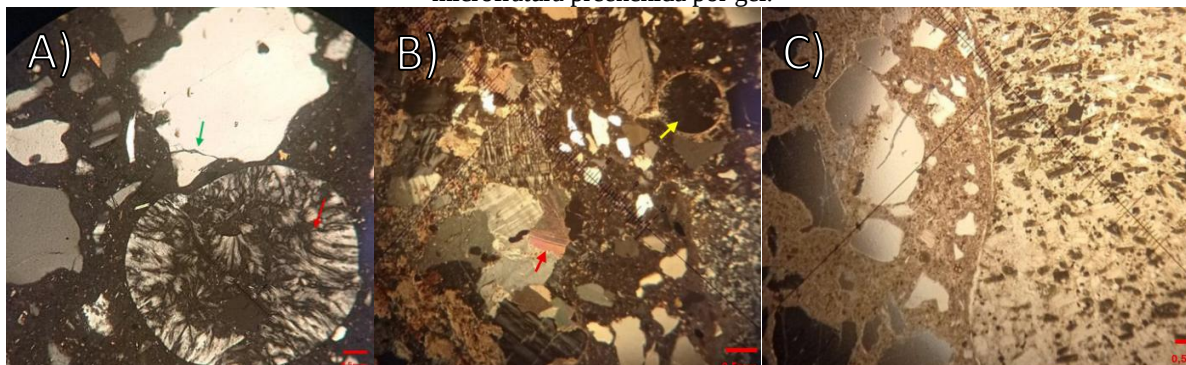
Fonte: Acervo dos autores, 2025.

3.6 AGREGADO MIÚDO (AREIA)

As areias são constituídas principalmente por quartzo (95% monocristalino, 5% policristalino) e proporções subordinadas de feldspatos, micas, anfibólios e fragmentos carbonáticos. O quartzo apresenta-se hialino a leitoso, com extinção ondulante, microfraturas e contatos lobulados em alguns grãos (Wenk *et al.*, 2008). Essas feições indicam que o quartzo mono e policristalino presentes na areia quartzosas é potencialmente reativo à reação álcali-sílica. Feldspatos estão sericitizados, caulinizados ou saussuritizados, enquanto biotita e muscovita aparecem em pequenas lamelas os líticos apresentam eventualmente bordas reativas (Figura 6).

As interfaces quartzo-pasta revelam halos claros submilimétricos preenchidos por gel e etringita (Swamy, 1998; Alexander; Mindess, 2010). Microfraturas em quartzo e plagioclásio apresentam preenchimento por pasta ou minerais secundários, evidenciando avanço de reação. Cristais carbonáticos de alta birrefringência indicam carbonatação incipiente (Lea, 1998; Glinicki *et al.*, 2016). A ocorrência de quartzo deformado confere o potencial de baixo a médio risco de reatividade (RAS).

Figura 6. A) Microfissuras preenchidas pela massa de cimento (Seta verde), etringita (seta vermelha). B) Massa do cimento em contato sinuoso com o agregado graúdo (quartzo-feldspato e calcita (seta vermelha); presença de vazios preenchida parcialmente por etringita (seta amarela). C) contato sinuoso com agregado miúdo, presença de microfratura preenchida por gel.



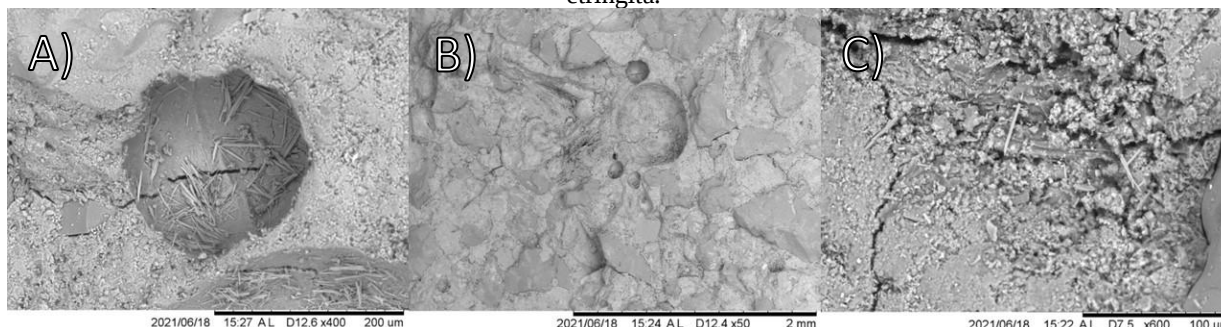
Fonte: Acervo dos autores, 2025.

3.7 PASTA DE CIMENTO

A análise petrográfica revelou bordas de reação entre os grãos minerais e a matriz cimentícia, associadas a processos de alteração e reatividade (Silveira, 2006; Henriques, 2022). Foram observados espaços vazios esféricos e elipsoidais, alguns preenchidos por material microcristalino ou gel de reação, o que indica dissolução e posterior precipitação de fases secundárias (Henriques, 2022). A presença de quartzo com extinção ondulante e feldspatos alterados reforça o potencial reativo dos agregados (Silveira, 2006). A microscopia eletrônica de varredura (MEV) detalhou cristais aciculares compatíveis com etringita encontrados em poros e microfissuras, com crescimento direcionado das paredes em direção ao centro (Mizumoto, 2009), além da ocorrência de gel amorfo criptocristalino preenchendo vazios ou recobrindo agregados (Figura 7). Fragmentos mostram fissuras parcialmente preenchidas, sugerindo expansão associada à reação álcali-agregado (RAA) (Mizumoto, 2009).

De forma integrada, petrográfico e MEV revelam que a pasta de cimento participa ativamente da RAA, contrariando sua suposta inércia e evidenciando seu papel na deterioração progressiva do concreto, fenômeno amplamente documentado como especialmente deletério em infraestrutura de concreto (Nogueira, 2010).

Figura 7. A) Poros de diversas dimensões, os maiores estão microfraturados e preenchidos por etringita tardia. Seta amarela mostra a presença de gel. B) Pasta de cimento com distribuição homogênea de cor, presença de poros vazios e parcialmente preenchidos, presença de portlandita (círculo amarelo). C) Pasta de cimento microfraturada, porosa, contato nítido com agregado miúdo (seta vermelha), formação de portlandita (placas hexagonais) e etringita.



Fonte: Acervo dos autores, 2025.

4 DISCUSSÕES

A análise comparativa confirma que gnaisses, granitos metamorfizados e granitos ígneos apresentam maior suscetibilidade à RAS, devido à abundância de quartzo deformado e feldspatos alterados (Tabela 2).

Basaltos exibem risco moderado, associado à instabilidade de plagioclásios, piroxênios e vidro vulcânico. Calcários metamorfizados estão sujeitos a RAC em condições específicas, enquanto areias quartzosas apresentam baixo risco, salvo quando contêm quartzo deformado.

A integração entre petrografia óptica e MEV permitiu correlacionar texturas e mineralogia com manifestações reativas, reforçando a necessidade de controle petrográfico sistemático e ensaios normativos para prevenção de RAA e aumento da durabilidade do concreto (Hobbs, 1988; Wenk *et al.*, 2008; Hasparyk, 1999; Ichikawa; Miura, 2007).

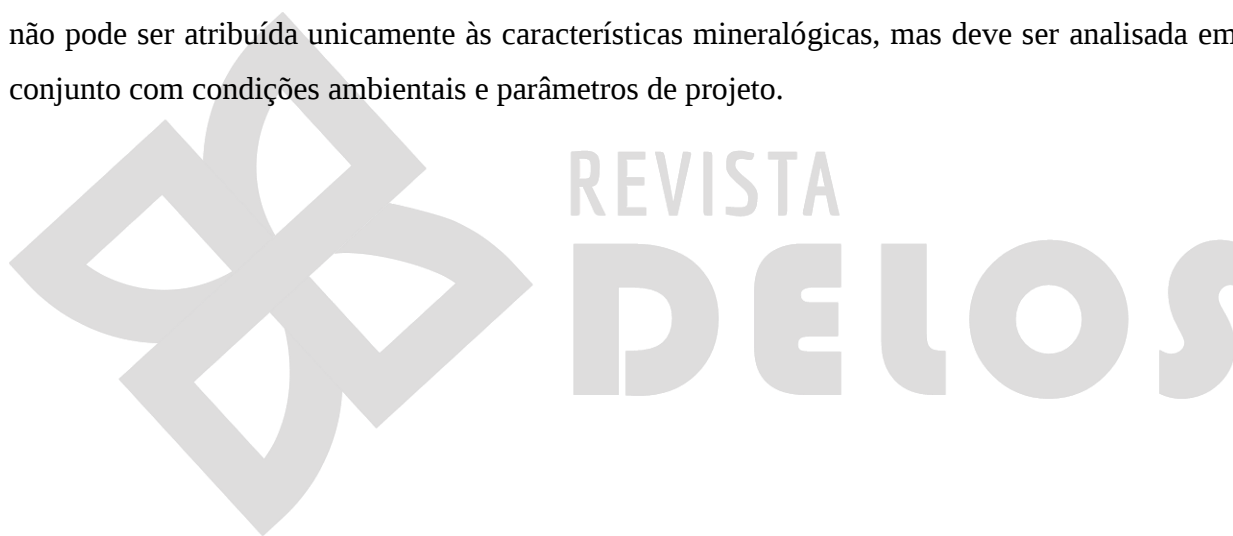
Tabela 2. Evidências e grau de reatividade das rochas.

Litotipo	Evidências petrográficas	Evidências MEV	Grau de reatividade
Gnaisse	Quartzo ondulante, feldspatos alterados, bordas de reação	Cristais de etringita em poros, gel amorfo	Alto
Granito	Quartzo deformado, feldspatos caulinizados, microfraturas	Etringita acicular, gel criptocristalino	Alto
Mármore/Calcário metamorfizado	Microfissuras preenchidas por carbonatos, dissolução incipiente	Etringita e carbonatos secundários	Moderado
Basalto	Vidro alterado, plagioclásio instável, microfissuras	Etringita e gel em bordas reativas	Moderado
Areia	Quartzo policristalino, microfissuras preenchidas	Halos claros com gel e etringita em interfaces	Baixo a moderado

Fonte: Dados obtidos pelos autores, 2025.

5 CONCLUSÃO

A caracterização petrográfica mostrou que gnaisses, granitos e migmatitos apresentam maior suscetibilidade à reação álcalis-sílica, devido à presença de quartzo deformado e feldspatos alterados. Basaltos revelaram risco moderado, devido à instabilidade dos plagioclásios e do vidro vulcânico, enquanto as areias quartzosas apresentam potencial reativo. As análises por MEV confirmaram produtos secundários típicos, como gel amorfo e etringita. Esses resultados evidenciam a relevância do controle petrográfico sistemático e da aplicação de ensaios normativos. Ressalta-se ainda que a pasta de cimento foi avaliada de forma integrada por análise petrográfica e MEV, evidenciando que ambas as técnicas se complementam na identificação das feições texturais e microestruturais decorrentes da RAA. No entanto, a durabilidade do concreto não pode ser atribuída unicamente às características mineralógicas, mas deve ser analisada em conjunto com condições ambientais e parâmetros de projeto.



REFERÊNCIAS

- ABESC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. Produção de concreto no Brasil atinge 43 milhões de m³ em 2022. **Veja**, São Paulo, 10 jan. 2024. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/coluna/radar-economico/mercado-do-concreto-movimenta-r-30-bilhoes-no-ano/>. Acesso em: 3 set. 2025.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto – Especificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7389-1: Concreto – Análise petrográfica de agregado — Parte 1: **Método de análise**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 (partes 1–6): Agregados – **Reatividade álcali-agregado (diagnóstico petrográfico; barras; prismas; diretrizes de prevenção)**. Rio de Janeiro: ABNT, [s.d.].
- ALEXANDER, M.; MINDESS, S. Aggregates in concrete. **London**: CRC Press, 2010.
- ALEXANDER, Mark; BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. Durability of concrete: design and construction. **Boca Raton**: CRC Press, 2017.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy — **Designation: C1723-16**. **West Conshohocken**, PA: ASTM International, 2016.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods: C1260, C1567, C1293 (barras aceleradas; barras com adições; prismas). **West Conshohocken**, PA: ASTM International, [s.d.].
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C856/C856M-20: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. **West Conshohocken**, PA: ASTM International, 2020.
- BRITO, J.; SANTOS, M. B. O panorama nacional das reações álcali-sílica em betões. **Engenharia Civil UM**, n. 32, p. 57-71, 2008.
- CARMICHAEL, I. S. E.; TURNER, F. J.; VERHOOGEN, J. Igneous Petrology. **New York: McGraw-Hill**, 1974.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. Rock-forming minerals. Vol. 4A: **Framework Silicates – Feldspars**; Vol. 2A: **Single-chain Silicates – Pyroxenes**. 2. ed. London: The Geological Society, 1997.
- FANJIJO, E. O.; KOLAWOLE, J. T.; ALMAKRAB, A. Reação álcali-sílica (RAS) em estruturas de concreto: mecanismos, efeitos e métodos de ensaios de avaliação adotados nos Estados Unidos. **Estudos de Caso em Materiais de Construção**, v. 15, e00563, dez. 2021.

FERNANDES, I. Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em concreto, estudo de casos de obra. 2005. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil)** – Universidade do Porto, Porto, 2005.

FERNANDES, I.; NORONHA, F. Alkali-aggregate reactions in granitic rocks from Northern Portugal. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 66, p. 181-191, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0057-1>. Acesso em: 8 set. 2025.

FERNANDES, P.; NUMMER, A. V. Controle tecnológico de agregados minerais em diferentes pedreiras do Rio Grande do Sul. In: **SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UNIPAMPA: SALÃO DE EXTENSÃO**, 10., 2018, Santana do Livramento. Anais. Santana do Livramento: UNIPAMPA, 2018.

FORSTER, Stephen W. *et al.* Relatório de última geração sobre reatividade álcali-agregado. **American Concrete Institute (ACI)**, v. 221, p. 1-23, 1998.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). Déficit habitacional no Brasil atinge 6,2 milhões de domicílios em 2022. **Fundação João Pinheiro**, 2024. Disponível em: <https://www.fjp.mg.gov.br/deficit-habitacional-no-brasil/>. Acesso em: 3 set. 2025.

GLINICKI, M. A. *et al.* Influence of blended cements with calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures. **Materials**, v. 9, n. 1, p. 18, 2016.

HASPARYK, N. P. Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa. 1999. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M. The alkali–silica reaction in concrete. In: **Materials Science of Concrete**, v. 6, p. 217-266, 2000.

HENRIQUES, G. F. Caracterização da microestrutura de concretos estruturais afetados pela reação álcali-agregado. 2022. Disponível em: **Repositório UFPB**. Acesso em: 9 set. 2025.

HOBBS, D. W. Alkali-Silica Reaction in Concrete. London: **Thomas Telford**, 1988.

ICHIKAWA, T.; MIURA, M. Modified model of alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1291–1297, 2007.

LATIFEE, Enamur R. Relatório de última geração sobre a eficácia da mitigação da reatividade da sílica alcalina usando diferentes tipos de cinzas volantes. **Journal of Materials**, v. 2016, n. 1, p. 7871206, 2016.

LEA, F. M. The Chemistry of Cement and Concrete. 4. ed. London: **Edward Arnold**, 1998.

LEEMANN, A. Alkali-silica reaction — the mechanism leading to concrete deterioration. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 2024.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MALVAR, L. J.; CLINE, G. D.; BURKE, D. F.; ROLLINGS, R.; SHERMAN, T. W.; GREENE, J. L. Mitigação da reação álcali-sílica: estado da arte e recomendações. **Materials Journal**, v. 99, n. 5, p. 480–489, 2002. DOI: 10.14359/12327.

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

MIZUMOTO, C. Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes. 2009. 162 f. **Dissertação (Mestrado em Estruturas)** – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, v. 299, p. 715–717, 1982.

NOGUEIRA, K. A. Reação álcali-agregado. 2010. **Monografia (Graduação em Engenharia Civil)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

POWER, T. O.; HAMMERSLEY, G. P. Practical concrete petrography. **Concrete**, v. 12, n. 8, p. 27–31, 1978.

RHOADES, R.; MIELENZ, R. C. Petrography of concrete aggregate. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 17, n. 6, p. 581–600, 1946.

RIBEIRO, C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

SANTOS, R. E. dos. A armação do concreto no Brasil: história da difusão do sistema construtivo concreto armado e da construção de sua hegemonia. 2008. 327 f. **Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVEIRA, A. L. Z. Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas. 2006. Disponível em: **repositório UNB**. Acesso em: 9 set. 2025.

SPRAY, A. **Metamorphic textures**. Oxford: Pergamon Press, 1969.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório setorial – dezembro + balanço anual de 2024**. Brasília, 2025.

SWAMY, R. N. The alkali-silica reaction in concrete. London: **Taylor & Francis**, 1998.

VERNON, R. H. **A practical guide to rock microstructure**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

YARDLEY, B. W. D. **An introduction to metamorphic petrology**. Harlow: Longman, 1989.

WENK, H. R. *et al.* Quartz microstructures and crystallographic preferred orientation. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 63, p. 469–502, 2008.

WILSON, M. **Igneous petrogenesis**. London: Unwin Hyman, 1989.