

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E SUSCETIBILIDADE À REAÇÃO POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO DO GRANITO SÃO VICENTE – MT

PETROGRAPHIC CHARACTERIZATION AND SUSCEPTIBILITY TO POTENTIAL ALKALI-AGGREGATE REACTION OF SÃO VICENTE GRANITE - MT

Douglas Macena de Carvalho¹, Albéria Cavalcanti de Albuquerque², Gabrielle Aparecida de Lima¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso. Rua Quarenta e Nove, 2367 - Boa Esperança, Cuiabá – MT.

²Instituto Federal de Mato Grosso. Avenida Senador Filinto Müller, 953 – Quilombo. Cuiabá - MT.

E-mails: douglas.macena@ifmt.edu.br; alberia.albuquerque@ifmt.edu.br; gabrielle.lima@ufmt.br.

Introdução
Fundamentação teórica
Agregados rochosos
Reação álcali-agregado (RAA)
Ocorrência de RAA no Brasil e em Cuiabá-MT
Contexto geológico
Localização da área de estudo
Métodos
Fase preparatória
Aquisição de dados em campo
Aquisição de dados em laboratório
Cimento padrão
Preparação dos agregados
Ensaios de expansão
Análises petrográficas
Técnicas analíticas
Resultados
Dados de campo
Análises petrográficas
Avaliação do potencial reativo em argamassa e concreto
Resultados da Difração de Raios-x (DRX)
Resultados da Espectroscopia de Raios-x por Energia Dispersiva (EDX)
Correlação dos resultados
Discussões e conclusões

RESUMO – O Granito São Vicente, situado na porção sudeste de Mato Grosso, representa um corpo ígneo com mais de 400 km² de extensão. Esta pesquisa objetiva relacionar as características mineralógicas com a suscetibilidade à reação potencial álcali-agregado, a partir das variações faciológicas deste batólito, nos locais de exploração de agregados para concreto. A partir da pesquisa de campo foram individualizadas quatro fácies, classificadas através do diagrama QAP de Streckeisen, como Monzogranitos e Sienogranitos. Preliminarmente procedeu-se a realização dos ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Nesta primeira fase, as amostras apresentaram comportamento potencialmente inócuo. Para a verificação de possíveis resultados falso-negativos, foram realizados ensaios de expansão em prismas de concreto pelo método acelerado, constatou-se então, comportamentos potencialmente reativos. Foram aplicadas técnicas analíticas de Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX). Os resultados indicam a liberação de álcalis por parte dos agregados, de forma lenta, para a solução intersticial do concreto, provenientes do feldspato alcalino (KAlSi₃O₈) e do plagioclásio (NaAlSi₃O₈) presentes na rocha, de modo a caracterizar a reação como álcali-silicato.

Palavras-chave: Agregados rochosos. Variabilidade faciológica. Patologia do concreto.

ABSTRACT – The São Vicente Granite, located in the southeastern portion of Mato Grosso, represents an igneous body measuring more than 400 km² in length. This research aims to relate the mineralogical characteristics with the susceptibility to the potential alkali-aggregate reaction, based on the faciological variations of this batholith, in sites where aggregates for concrete are exploited. From the field research, four facies were identified and classified using Streckeisen's QAP diagram, as Monzogranites and Syenogranites. Preliminarily, expansion tests were carried out on mortar bars using the accelerated method. In this first phase, the samples showed potentially innocuous behavior. To check for possible false-negative results, expansion tests were carried out on concrete prisms using the accelerated method, which revealed potentially reactive behavior. Analytical techniques of X-ray Diffraction (XRD) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) were applied. The results indicate the release of alkali by the aggregates, slowly, into the interstitial solution of the concrete, coming from alkali feldspar (KAlSi₃O₈) and plagioclase (NaAlSi₃O₈) present in the rock, in order to characterize the reaction as alkali-silicate.

Keywords: Rock aggregates. Facial variability. Concrete pathology.

INTRODUÇÃO

O Granito São Vicente, com aproximadamente 400 km² de extensão e localizado a sudeste de Cuiabá, capital de Mato Grosso, foi descrito

inicialmente por Almeida (1954), como um corpo de carácter tardí-cinemático, e por Godoy et al. (2007) como parte da Província Granítica Brasi-

liana, intrudido nas rochas metassedimentares do Grupo Cuiabá. Godoy et al. (2007) e Trivelli (2017), investigaram em detalhe determinadas regiões do Granito São Vicente, classificando a maioria das amostras como rocha ácida. O padrão global das fácies é característico de magmas fél-sicos de afinidade cálcio-alcalina de alto potássio, ou seja, identifica-se além do teor de sílica superior a 65%, o alto teor de feldspato potássico e sódico.

Ramos et al. (2016), em estudos de reatividade potencial de granitos de Portugal, identificaram que estas rochas, são normalmente consideradas como reação lenta ou até como não reativas. Contudo, diversos casos de reação álcali-agregado (RAA) foram diagnosticados em estruturas de concreto nas quais foram utilizadas rochas graníticas, como as Barragens de Cabril Norte e Cabril Sul (Fernandes, 2005) e de Fagilde (Sousa, 2016; Almeida & Sousa, 2016).

Segundo Hasparyk & Kuperman (2021), a Reação Álcali-Agregado (RAA), e mais especificamente o tipo álcali-sílica (RAS), ocorre a partir de uma interação química entre alguns minerais silicosos considerados reativos, contidos nos agregados (miúdos e graúdos), e os hidróxidos alcalinos presentes na solução dos poros do concreto (envolvendo o elemento químico potássio, K, e o sódio, Na), cuja origem é geralmente o cimento. Os álcalis podem ser fornecidos também a partir de outras fontes, como as adições minerais, o próprio agregado e a água. Na presença de umidade, quando dessa interação química, são formados no interior do concreto produtos com caráter expansivo que, dependendo da intensidade, levam o concreto à fissuração e deterioração.

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é considerada um fenômeno patológico irreversível, que ocorre no concreto e que pode desencadear problemas graves, tanto em nível estrutural como operacional. Dependendo das condições em que a estrutura de concreto está exposta, esta gera expansões intensas que podem ser observadas em diferentes idades, a partir da sua instalação, dependendo do grau de reatividade do agregado (Hasparyk, 2005). Já para Mielich & Reinhardt (2016), basicamente, a RAA diz respeito a uma reação química no concreto entre a solução de poro altamente alcalina, e certas modificações de SiO₂ de agregados rochosos e água.

A partir das características de ocorrência da RAA, e presença de álcalis na rocha, aliados à crescente utilização de concretos com maior consumo de cimento para aplicações em obras de

infraestrutura e elementos de fundação em edifícios, torna-se imprescindível a investigação do comportamento químico e físico dos seus minerais em contato com o cimento, considerando as possíveis condições de exposição da estrutura de concreto. Os setores mais preocupados com a RAA são: construções de barragens, obras viárias como pontes e viadutos, fundações de edifícios e pavimentos rígidos de concreto, por utilizarem grande volume de material em constante contato com umidade (Gomes Neto & Barreto, 2013).

Em estudos preliminares que motivaram esta pesquisa, identificou-se o crescimento exponencial da demanda e da exploração e consumo do Granito São Vicente, sendo empregado como agregado britado para concreto. O granito é empregado em larga escala como agregado graúdo, como exemplo a construção da pequena central hidrelétrica (PCH) São Tadeu em 2009 e da duplicação da rodovia BR 163, construída em pavimento de concreto de cimento Portland e concluída em 2020, localizadas na Serra de São Vicente, além de inúmeras obras de arte especiais e edifícios de médio e grande porte construídos na região Metropolitana de Cuiabá-MT.

Estes agregados são considerados um dos bens minerais de maior importância para o crescimento e desenvolvimento das três maiores cidades do estado e circundantes, visto que o concreto é o material de maior consumo para a construção civil e que o consumo de agregados em sua composição chega a 80% (Neville, 2016). Mato Grosso, por sua vez, possui uma das maiores estimativas de crescimento populacional do país na projeção para o ano de 2065 (IBGE, 2018), além de deter a atual liderança nacional de produção agrícola com projeção até 2026 (SEDEC-MT, 2016), sendo consequente a necessidade de construção de barragens, obras de infraestrutura viária e edificações para suprir as necessidades da população mato-grossense.

O agregado em estudo é uma rocha britada, produzida a partir do desmonte e redução por moagem, este material recebe o nome comercial de “brita granítica”, uma associação entre a forma de beneficiamento e sua classificação litológica. No contexto regional, quando do início da produção destes agregados, criou-se a cultura e um paradigma de que apenas o calcário (cinza), produzido até então, seria adequado para uso em concreto (BritaMAX, 2014). Atualmente com a descoberta de RAA em importantes obras locais, e apesar de existirem estudos geológicos destas

rochas graníticas, ainda há ausência de publicações de estudos detalhados relacionados aos aspectos tecnológicos e de comportamento frente ao emprego em misturas com cimento Portland.

O objetivo geral desta pesquisa baseou-se em relacionar as características mineralógicas, a partir das variações faciológicas do Granito São Vicente, encontradas nos locais de exploração de agregados para construção civil, com o comportamento frente ao uso em concreto estrutural, especificamente quanto à suscetibilidade à reação potencial álcali-agregado. Para tanto, foram

necessários os seguintes procedimentos: identificar as fácies nos locais de extração e beneficiamento mineral (pedreiras); identificar características mineralógicas das amostras, através de análises petrográficas; realizar ensaios físicos de expansão em barras de argamassa e em prismas de concreto; realizar ensaios complementares de análise por difração de raios-X (DRX) e análise de raios-X por energia dispersiva (EDX), para identificação das fases cristalinas e caracterização química das amostras; e por fim, identificar a correlação entre os resultados obtidos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Agregados rochosos

Agregados Rochosos, conhecidos também como materiais rochosos, são materiais naturais provenientes de maciços rochosos, particulados por processos de britagem e moagem e comercialmente nomeado de rocha britada, pedra britada ou simplesmente brita, podendo ser seguido de nomenclatura correspondente ao tipo de rocha, como neste caso, brita granítica ou até agregado granítico. Em geologia emprega-se o termo “agregados” para os minerais que compõem uma determinada rocha e que podem estar envoltos de um material cimentante (Oliveira & Monticeli, 2018), da mesma maneira, a engenharia utiliza-se deste termo para o material que fará composição do concreto, que estarão envoltos por uma matriz cimentícia artificial, neste caso o cimento Portland.

Até pouco tempo os agregados eram considerados como inertes na literatura da tecnologia do concreto. Contudo, ao longo dos anos e de muitas pesquisas, foram descobertas e definidas características que podem desencadear manifestações patológicas e comprometer as estruturas de concreto, levando-se em consideração as condições endógenas e exógenas ao qual o elemento estrutural estará exposto (Neville, 2016).

Como características endógenas, pode-se considerar a composição mineralógica dos agregados naturais, sendo estas propriedades intrínsecas à rocha. As características exógenas podem ser descritas como aquelas de exposição do material, como as características ambientais nas quais o elemento está inserido. A reunião destas características pode, em um dado momento, estabelecer as condições necessárias para o desencadeamento de manifestações patológicas de cunho irreparável ou de custo elevado para recuperação (Silva Filho, 1994; Frazão, 2012).

Segundo Curtis Neto (2019), a exploração de pedreiras de agregados rochosos, além de envolver os processos de desmonte e moagem da rocha, deve-se levar em consideração as características tecnológicas necessárias para a aplicação em obras de engenharia, sendo estas, propriedades ligadas intimamente em consonância com a composição mineralógica e variações estruturais de maciços. Corroborando, para Sbrighi Neto et al. (2018), é de suma importância a representatividade da amostragem, em face das variações que os maciços rochosos podem apresentar. Sendo assim, a análise petrográfica permite conhecer a natureza faciológica do agregado, identificar os minerais constituintes na procura de fases deletérias, e assim, avaliar a potencialidade reativa do agregado.

Considerando ensaios físicos de expansão em conjunto à análise petrográfica, a NBR 15577-1 (ABNT, 2018) define os termos aplicados aos agregados em relação ao comportamento frente a RAA:

- Agregado potencialmente inócuo: agregado que resulta em informações petrográficas que indicam a ausência ou presença pouco expressiva de fases (minerais) reativas e valores de expansão menores que os limites estabelecidos.

- Agregado potencialmente reativo: agregado que resulta em informações petrográficas que indicam a presença de fases (minerais) reativas e valores de expansão maiores ou iguais aos limites estabelecidos.

- Agregado reativo/agregado deletério: agregado que reage quimicamente com a solução alcalina contida nos poros do concreto, proveniente de fontes externas ou internas.

Reação Álcali-Agregado (RAA)

A RAA faz parte de um grupo de reações descritas como “Reações Expansivas no Concreto”.

No Brasil destacam-se dentro deste grupo: a RAA com a derivações denominadas Reação Álcali-Sílica, Álcali-Silicato e Álcali-Carbonato; Ataque por Sulfatos Interno ao Concreto; a Formação de Etringita Tardia – DEF (Delayed Ettringite Formation) relacionada a elevação adiabática com altas temperaturas durante o processo de hidratação do cimento, principalmente em estruturas massivas; e ataque por Sulfatos Interno – ISA (Internal Sulphate Attack) em que são considerados como principais agentes causadores os sulfatos e/ou sulfetos presentes nos agregados, como a pirita, pirrotita, calcopirita, marcassita e outros (Hasparyk, 2020).

Para ocorrência de RAA, não basta apenas ter um agregado com potencialidade reativa, mas a reunião de três fatores necessários, que são os álcalis presente no cimento Portland, agregado com potencial reativo, umidade e determinadas condições de exposição.

A RAA, consiste em reações químicas que ocorrem entre agregados reativos (minerais silicosos reativos) e os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto, gerados na fase de hidratação do cimento Portland (Sbrighi Neto et al., 2018). Como resultado da reação álcali-agregado forma-se um gel higroscópico expansivo, podendo gerar expansão, fissuração, exsudação de gel e pipocamentos (*pop-out*) no concreto, com redução de resistência e módulo de deformação, além de movimentações diferenciais nas estruturas (Pereira et al., 2018). Para os pesquisadores Pianezzer et al. (2019), essa reação específica ocorre quando há agregado reativo, juntamente com a disponibilidade de álcalis provenientes do cimento Portland, além de muita umidade. Esta umidade é responsável por tornar disponíveis os álcalis e hidroxilos que por sua vez quebram as ligações do tipo siloxano e silanol que estão presentes no agregado reativo. Essa quebra leva à formação de um gel que absorve água e expande.

Segundo Neville (2016), a reação inicia com o ataque aos materiais silicosos dos agregados pelos hidróxidos alcalinos da água dos poros, derivados dos álcalis (Na_2O e K_2O) do cimento. Como resultado, forma-se, nos planos de clivagem ou nos poros dos agregados, ou na superfície das partículas, um gel álcali-silicato. Na última situação é produzida uma alteração de superfície, e a aderência entre o agregado e a pasta de cimento circundante é destruída.

De acordo com a mineralogia composicional

da rocha, a RAA pode ser identificada como Reação Álcali-Sílica (RAS) ou Álcali-Carbonato (RAC). A NBR 15577 (ABNT, 2018) apresenta ainda a reação álcali-silicato (RASS), como uma especificidade da RAS, nas quais as consequências são: fissuras em formato de mapa, bordas escuras nos agregados e a formação de um gel expansivo sílico-alcalino, este último não ocorre na reação álcali-carbonato (Couto, 2008).

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) define que a reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila (OH^-) associados com os componentes alcalinos sódio e potássio, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, com certas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos (opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico, calcedônia, quartzo micro e criptocristalino, quartzo microgranular fraturado, e/ou deformado, podendo conter agregados de quartzo microcristalino no contato do grão - textura mortar), que sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa. Os dois tipos principais de reação álcali-agregado são: a reação álcali-sílica e a reação álcali-carbonato. A chamada reação álcali-silicato é reconhecida atualmente como um tipo lento de reação álcali-sílica.

Ramos et al. (2016), após pesquisas com agregados graníticos em Portugal, afirma que, embora sejam comumente considerados como inócuo ou improvável de ser reativo a álcalis no concreto, há um número de relatórios publicados em todo o mundo mostrando que, sob algumas circunstâncias, tais tipos de rocha podem reagir com álcalis causando uma lenta reação deletéria em estruturas de concreto.

Ocorrência de RAA - Brasil e em Cuiabá- MT

A Reação Álcali-Agregado tem sido uma preocupação constante para pesquisadores e construtores, como pode ser identificado na International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), que ocorre a cada quatro anos, desde 1974. Na edição realizada no ano de 2016 em São Paulo - SP, Brasil, foram abordados os temas: Mecanismos de RAA, Fatores que afetam a RAA, Teste para potencial RAA, Medidas preventivas, diagnóstico e avaliação, Casos de deterioração, Efeitos estruturais do RAA, Monitoramento e modelagem, Reparação e medidas corretivas, concreto danificado devido aos mecanismos RAA e DEF acoplados (Bernardes & Hasparyk, 2016).

Apesar dos agregados graníticos serem geral-

mente considerados como inócuos ou de reatividade pouco provável aos álcalis, existem na literatura diversos artigos que demonstram que as rochas graníticas podem comportar-se, em algumas regiões do mundo, como reativas. Em Portugal, são produzidas diariamente grandes quantidades de agregados graníticos que têm sido aplicados na construção de importantes estruturas em concreto, e foram identificados vários casos de RAS, envolvendo estes agregados. Por este motivo, sua a investigação e a caracterização se revelam de grande importância (Ramos et al. 2014).

No Brasil muitas obras não realizam testes em laboratório para verificar a ocorrência de RAA, e como resultado cresce o número de obras jovens com cinco a dez anos que apresentam a manifestação patológica.

O que ocorre na maioria dos casos, é que para uma eficaz determinação e compreensão dos resultados, se faz necessário além de ensaios tecnológicos, também estudos geológicos dos agregados (Holanda, 2019).

Segundo Hasparyk (2005), treze anos após a construção da Usina Hidrelétrica (UHE) Furnas, em 1976, foram observadas e identificadas as primeiras manifestações de RAA, com a fissuração nos pilares do vertedouro, nos blocos de ancoragem dos condutos forçados e na casa de força.

Os estudos sequenciais indicaram a presença de poros com material branco, porcelânico ou cristalizado no seu interior, bordas claras e vítreas, frentes de reação em torno dos agregados e gel preenchendo algumas fissuras na argamassa. A autora relata que além desta, outras UHE's também foram diagnosticadas com RAA, como ocorrido em Moxotó - PE (UHE Apolônio Sales), construída em 1975.

Segundo Couto (2008), no Brasil, a partir de 1997, a comunidade técnico-científica demonstra a preocupação em buscar soluções para as obras que apresentavam manifestações patológicas de expansão ocasionadas por RAA, visto que, tal ocorrência se dava particularmente em obras

CONTEXTO GEOLÓGICO

O Granito São Vicente ocorre intrudido nas rochas metassedimentares do Grupo Cuiabá, ocupa uma área de aproximadamente 400 km² e está situado a aproximados 70 km sentido sudeste de Cuiabá, capital de Mato Grosso.

Segundo Almeida (1954, 1964), esta unidade representa uma intrusão batólítica de caráter tardí-cinemático. Almeida & Mantovani (1975)

hidráulicas, como barragens por exemplo, mas que se constatava então, que também poderia ser encontrada em obras residenciais e comerciais de grandes centros.

Francklin Jr et al. (2019, 2021), em pesquisas com rejeitos de exploração de quartzitos para uso em concretos de pós reativos (CPRs) e diagnóstico da reação álcali-agregado, no estado de Minas Gerais, destacam a importância dos estudos detalhados relativos à RAA, previamente ao emprego do agregado em concretos estruturais. Após as análises detalhadas dos resultados, constatou que o agregado pode ser utilizado em CPRs, contribuindo então para a minimização de impactos ambientais negativos da mineração de quartzitos naquele estado, eliminando dúvidas relativas ao emprego deste material de construção.

O colapso do Edifício Areia Branca em Recife - PE em 2004, provocou grande impacto na sociedade e principalmente para os engenheiros, pois verificou-se que os conceitos de vida útil e durabilidade deveriam ser reconsiderados. Antes do acidente não havia inspeção nas fundações, sendo este o local em que a união de agregados reativos, teor de álcalis do cimento e o contato com a umidade, propiciam o ambiente ideal para a propagação da reatividade (Oliveira & Monteceli, 2018).

Na capital de Mato Grosso, Cuiabá, no Ginásio Poliesportivo Professor Aecim Tocantins com capacidade para 11 mil pessoas, construído em 2007, observou-se que os quatro pilares principais apresentaram fissuras já nos primeiros meses após conclusão da obra. A suspeita se deu à existência de um material depositado sobre algumas fissuras, e que estudos detalhados confirmaram a ocorrência de RAA (Valin Jr & Ribeiro, 2014).

Existem ainda muitos estudos realizados por laboratórios particulares demonstrando que há ocorrência de RAA em concretos estruturais na cidade Cuiabá, com resultados não divulgados no meio científico, devido ao sigilo comercial de informações detalhadas.

GEOLÓGICO

descreveram uma assinatura diápírica para essa intrusão e associa sua idade ao primeiro tectonismo que provocou o metamorfismo regional nas rochas do Grupo Cuiabá.

Segundo Godoy et al. (2007), os granitoides da parte norte, que ocorrem no sudeste mato-grossense e que integram a Província Granítica Brasiliiana (São Vicente, Araguaiana e Lajinha)

são classificados do Tipo I, cálcico-alcalino potásico a alto potássio, peraluminosos a metaluminosos, gerados em ambiente de colisão continental e/ou de descompressão pós-colisional.

Manzano, Godoy & Araújo (2008) descrevem o Batólito São Vicente, assim como o Ara-

guaiana e Lajinha, como parte norte do evento magmático norte da Província Granitoide Neoproterozoica localizado no sudeste de Mato Grosso. Os granitoides Rio Negro, Taboco, Sonora e Coxim compõem o evento magmático sul e tem sua ocorrência no Mato Grosso do Sul (Figura 1).

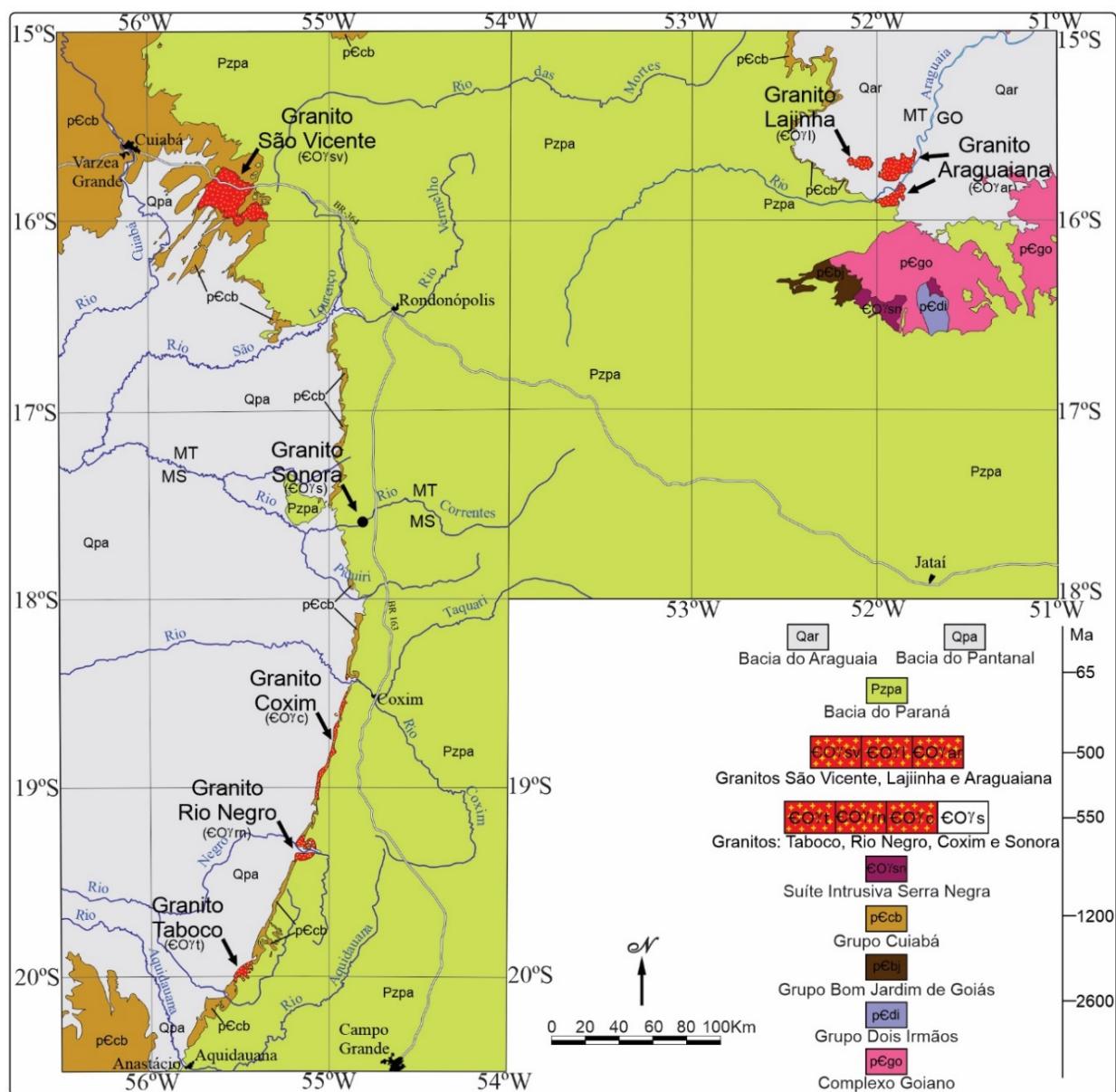


Figura 1 – Mapa geológico simplificado com a localização dos corpos granitoides neoproterozoicos (modificado de Lacerda Filho 2004; 2006 segundo Manzano 2008).

Para Manzano (2009), os litotipos são predominantemente representados por biotita-granitos e muscovita-biotita-granitos, sendo possível a individualização inicial de quatro fácies texturais: a fácie equigranular grossa a porfirítica, tendo a sua maior expressão em faixa circunscrita às bordas de contato; a fácie porfirítica de matriz média a equigranular média, ocupando a zona central do corpo; a fácie equigranular fina a porfirítica, distribuída na região sudeste do batólito e a fácie pegmatítica restrita à zona noroeste do maciço.

Trivelli et al. (2017) reconheceram e caracterizaram quatro fácies petrográficas distintas, todas de natureza isotrópica, nas rochas do Granito São Vicente na região do Parque Estadual de Águas Quentes, sendo elas: Sienogranito Grosso (textura equigranular a inequigranular, leucocrática); Aplito Porfirítico (textura inequigranular fina a média com fenocristais, leucocrática, sienogranítica); Microgranito (textura microporfirítica com micro fenocristais em matriz faneítica muito fina, textura micrográfica frequente, sienogranítica); e Riolito Porfirítico (textura por-

fírica e glomeroporfírica em matriz afanítica a fanerítica muito fina).

Abreu Filho & Albuquerque (2016) cartografaram três corpos de *hornfels*, um no contato entre rochas metassedimentares/granito e dois sobrepostos ao corpo granítico sob a forma de “*roofs pendants*”, que podem ser compreendidos como as rochas do Grupo Cuiabá em contato com a intrusão batólítica.

As rochas do Granito São Vicente foram classificadas como monzogranitos e sienogranitos róseos e cinzas, finos a grossos e porfiríticos, leucocráticos, com textura inequigranular porfirítica e com evidências de processos hidrotermais.

Localização da área de estudo

Com localização estratégica e proximidade aos

grandes centros do estado, incluindo a capital mato-grossense, além de rota de transporte da produção agrícola, as ocorrências das rochas do Granito São Vicente, que compõem a serra homônima, situam-se a aproximadamente 70 km de Cuiabá, sentido sudeste, e estão cortados pela rodovia BR 163/364 no município de Santo Antônio do Leverger-MT. Comercializado com o nome de “brita granítica”, o granito utilizado como agregado graúdo proveniente da região da Serra de São Vicente, é obtido a partir do desmonte de rochas, moagem, e seleção através de peneiras. A figura 2 apresenta os quatro pontos de coleta das amostras, propositalmente escolhidas em função das instalações de pedreiras de produção agregados.

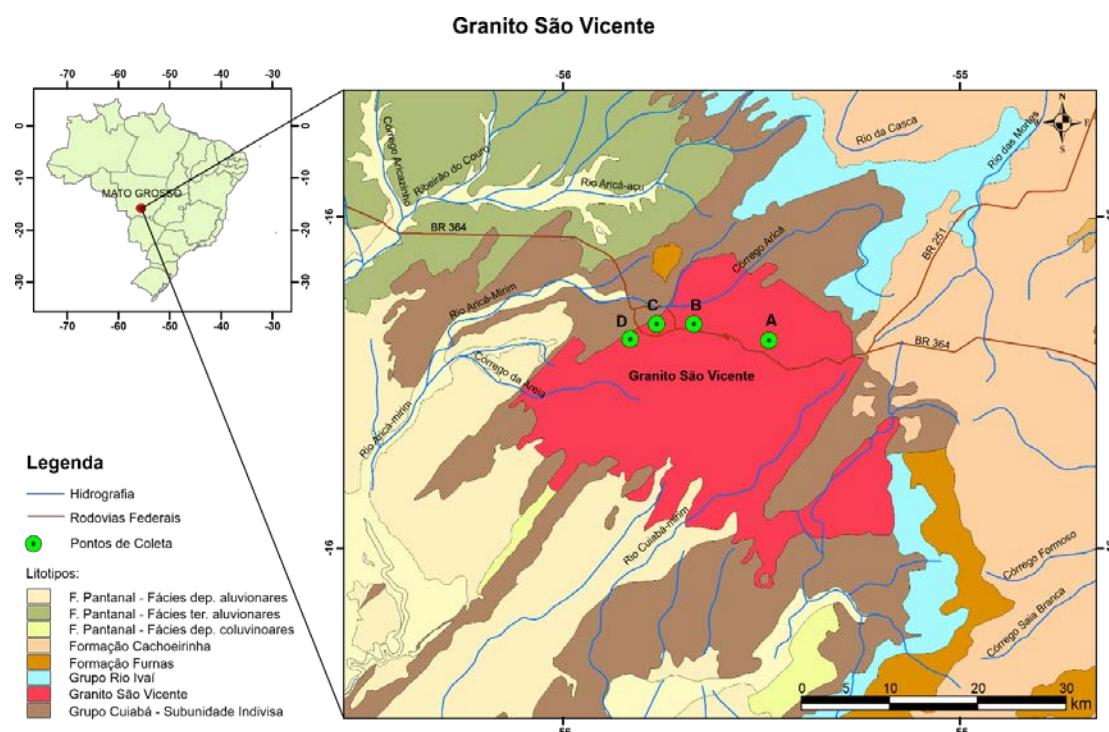


Figura 2 – Localização dos pontos de coleta das amostras (modificado de Lacerda Filho et al., 2004).

MÉTODOS

Fase preparatória

A etapa preparatória constituiu-se na revisão bibliográfica de literatura disponível e de domínio público sobre o contexto referente ao tema, tais como: trabalhos de mapeamento regional, livros e artigos científicos, além de identificar os locais de exploração de agregados na região da Serra de São Vicente. Foram então selecionadas quatro pedreiras, sendo estas responsáveis por atender as grandes demandas da capital de Mato Grosso, além de outras regiões circundantes.

Aquisição de dados em campo

Os trabalhos de campo foram realizados para identificação litológica e coleta de amostras. A

visita *in loco* ocorreu no dia 11 de fevereiro de 2020. Nas quatro pedreiras foram coletadas sete amostras, representando fácies distintas, considerando os aspectos macroscópicos visualizados em campo.

Aquisição de dados em laboratório

A fase de aquisição de dados em laboratório, foi subdividida em quatro etapas. Primeira Etapa: Aquisição e classificação do cimento-padrão para ensaio de RAA. Segunda Etapa: preparação dos agregados a partir da redução e moagem dos blocos de rochas amostradas, e ensaios físicos de expansão em barras de argamassa e em prismas de concreto. Terceira Etapa: preparação das lâminas e análises petrográficas. Quarta Etapa:

ensaios complementares, denominados como métodos analíticos, de Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Raios-X (EDX).

Cimento padrão

Durante a primeira etapa, adquiriu-se o cimento-padrão para a avaliação do grau de reatividade dos agregados, a partir das recomendações da NBR 15577 (ABNT, 2018) partes 04 e 06. O aglomerante hidráulico utilizado é um Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI, cuja classificação e ensaios foram realizados no Laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) na cidade de São Paulo-SP.

Justifica-se também o uso CP V-ARI, pela crescente utilização em âmbito local atual, com construções de grandes obras de infraestrutura e edificações, principalmente no emprego em blocos de fundações, elementos pré-moldados de grande e médio porte, como vigas e lajes protendidas, postes de concreto, e peças de concreto para pavimentação e proteção de vias. Estas obras

necessitam de altas resistências iniciais, seja para movimentação das peças, como para liberação rápida das etapas da construção.

Os resultados com o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP-V ARI apresentaram-se satisfatórios, e que atendem aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018), além de possuir finura de (4900 ± 200) cm²/g, determinados de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015), equivalente ao alcalino total expresso em Na₂Oeq ($0,658\text{ K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\%$) de $(0,90 \pm 0,10)\%$, determinado de acordo com a NBR NM 17 (ABNT, 2012) e expansão em autoclave inferior a 0,20%, determinada pelo método descrito na ASTM C 151, conforme se apresenta na tabela 2. Os resultados dos ensaios de caracterização química, em % de massa, dos ensaios de caracterização física e caracterização mecânica, foram classificados dentro dos limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), conforme apresenta-se nas tabelas 1, 2, e 3, respectivamente.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de caracterização química pelos métodos estabelecidos nas normas NBR NM 17, NBR 16372 e ASTM C 151. Fonte: Laudo ABCP Nº 127821.

Ensaios	Método de ensaio	Resultados (% em massa)	Limites da NBR 16697/18
Óxido de sódio - (Na₂O)	NBR NM 17	0,35%	0,02%
Óxido de potássio - (K₂O)	NBR NM 17	0,79%	0,04%
Equivalente alcalino em Na₂O	-	0,87%	-
Perda ao fogo - PF	NBR NM 18/12	5,89	$\leq 6,5\%$
Dióxido de silício total - SiO₂	NBR NM 11-2/12	18,76	-
Óxido de alumínio - Al₂O₃	NBR NM 11-2/12	4,15	-
Óxido de ferro - Fe₂O₃	NBR NM 11-2/12	3,56	-
Óxido de cálcio total - CaO	NBR NM 11-2/12	63,00	-
Óxido de magnésio - MgO	NBR NM 11-2/12	0,51	$\leq 6,5\%$
Anidrido sulfúrico - SO₃	NBR NM 16/12	2,79	$\leq 4,5\%$
Anidrido carbônico - CO₂	NBR NM 20/12	4,72	$\leq 5,5\%$
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15/12	1,34	$\leq 3,5\%$
Óxido de cálcio livre - CaO (livre)	NBR NM 13/12	1,88	-

Tabela 2 – Resultados dos ensaios caracterização física. Fonte: Laudo ABCP Nº 127821.

Ensaios	Método de ensaio	Resultados	Limites da NBR 16697/18
Finura - resíduo na peneira de 75µm (%)	NBR 11579/12	1,8	$\leq 6,0$
Finura - resíduo na peneira de 45µm (%)	NBR 12826/14	2,0	-
Massa específica (g/cm³)	NBR 16605/17	3,03	-
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR 16606/17	29,2	-
Início de pega (min)	NBR 16607/18	165	≥ 60
Fim de pega (min)	NBR 16607/18	210	≤ 600
Expansibilidade Le Chatelier-a quente (mm)	NBR 11582/16	0,0	≤ 5
Área específica - Blaine	NBR 16372	4900 cm ² /g	60 cm ² /g
Expansibilidade em autoclave	ASTM C 151	0,02%	0,004%

Tabela 3 – Resultados dos ensaios caracterização mecânica. Fonte: Laudo ABCP N° 127821.

	Resistência à compressão (MPa) - NBR 7215/19						
	Corpo-de-prova (nº)				Média	Desvio relativo máx. (%)	Limites da NBR 16697/18
Idade (dias)	1	2	3	4			
	28,1	27,9	26,1	28,4	27,6	5,4	≥ 14,0
	37,8	37,4	36,9	38,8	37,7	2,9	≥ 24,0
	40,9	42,0	42,1	41,8	41,7	1,9	≥ 34,0
	50,1	46,2	48,1	49,4	48,4	4,5	-

Preparação dos agregados

Durante a segunda etapa, realizou-se a preparação dos agregados, a partir da redução e moagem dos blocos de rocha de dimensões iniciais de aproximadamente 40 cm, com o emprego de martelo, e posterior moagem em moinho de mandíbulas para a fração grosseira e moinho de disco para a fração miúda. Para a separação granulométrica do agregado graúdo, utilizou-se o material passante na peneira 19 mm e retido na 4,80 mm, e como agregado miúdo, o material passante na peneira 4,80 mm e retido na 0,150 mm. Posteriormente classificou-se as frações granulométricas necessárias, sendo o

agregado miúdo utilizado para os ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, e o agregado graúdo para ensaios de expansão em prismas de concreto pelo método acelerado, conforme procedimentos de ensaio descritos na NBR 15577 (ABNT, 2018) partes 4 e 6 respectivamente. A figura 3 apresenta uma das amostras, antes e após redução granulométrica, passando-se pelas etapas de moagem do bloco de rocha em moinho de mandíbulas e de discos, posterior classificação granulométrica e equipamento dotado de disco diamantado empregado no processo de confecção de lâminas delgadas.



Figura 3 – Redução dos blocos de rocha para ensaio de determinação da Reatividade Álcali Agregado. (a) Bloco de rocha amostrado; (b) Moinho de mandíbulas; (c) Moinho de discos e acessórios para limpeza interna; (d) Aspecto da rocha após processo de moagem em britador de mandíbulas e classificação granulométrica, passante na peneira 19 mm; (e) Aspecto da rocha após processo de moagem em moinho de discos e classificação granulométrica passante na peneira 4,8 mm e subsequentes; (f) Equipamento dotado de disco diamantado para confecção das lâminas delgadas.

Ensaios de expansão

Os ensaios físicos de expansão foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Infraestrutura, do Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), câmpus Cuiabá - Cel. Octayde Jorge da Silva.

Os ensaios de expansão em barras de argamassa foram realizados utilizando o material moído (Figura 3e) a partir de cada um dos quatro pontos de coleta identificados na figura 2.

Para os ensaios em prismas de concreto (método acelerado), foram utilizados os agregados graúdos particulados e reduzidos na fração granulométrica exemplificada na figura 3(d), obtidos a partir de cada um dos quatro pontos de coleta identificados na figura 2, em combinação com areia natural do Rio Cuiabá.

Para tais testes, procedeu-se previamente o teste de expansão em barras de argamassa com uso da areia natural, e como resultado, o agregado miúdo apresentou-se com comportamento potencialmente inócuo para RAA. A amostra de areia natural foi coletada em uma mineradora situada na divisa das cidades de Cuiabá e Várzea Grande, com coordenadas geográficas: Latitude GD - 15.634515283136 e Longitude GD - 56.085363781416, Datum WGS 84.

Análises petrográficas

A terceira etapa, configurou-se nas análises petrográficas, com a confecção das lâminas delgadas e análise com o auxílio de microscópio petrográfico marca OLYMPUS, modelo BX 41 e capturas fotomicrográficas com câmera digital, a

fim de identificar as características mineralógicas das amostras, realizada no Laboratório de Laminatura e no Laboratório Microscopia da Faculdade de Geociências da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), conforme descreve a NBR 15577-3 (ABNT, 2018), para verificar a presença dos minerais considerados potencialmente reativos.

Técnicas analíticas

Durante a quarta etapa, empregaram-se técnicas analíticas de difração de raios-X (DRX) para identificação das fases cristalinas, realizadas utilizando-se o porta-amostras de preenchimento frontal, conforme o procedimento de Bührke et al. (1998), e com emprego do equipamento denominado LAB XRD-6000 (Tensão 4000 V, Corrente no tubo 30 mA), equipado com tubo de cobre e monocromador de grafite, em geometria de Bragg-Brentano.

As análises dos padrões de difração foram desenvolvidas através do software DIFRAC.EVA - Versão 2.1, pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT), unidade de pesquisa vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), localizado na cidade de Rio de Janeiro-RJ.

As análises químicas foram realizadas por Espectroscopia de Raio X por Dispersão em Energia – EDX segundo Jenkins (1999), com emprego do equipamento SHIMADZU EDX-700HS2, do Laboratório Multusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA), instalado na Faculdade de Geociências - Universidade Federal do Mato Grosso.

RESULTADOS

Dados de Campo

Foram coletadas duas amostras nos pontos de A, C e D, representando as variações faciológicas identificadas, conforme apresenta-se na figura 4,

e apenas uma amostra no ponto B.

A tabela 4 apresenta os dados da localização dos pontos de coleta das amostras, obtidas em Datum WGS84.

Tabela 4 – Localização e classificação das amostras e respectivos pontos de coleta.

Ponto de Coleta	Amostra	Classificação	Latitude GD	Longitude GD
A	A.1	Sienogranito porfírtico	-15.808680	-55.511589
	A.2	Sienogranito médio a grosso	-15.791948	-55.588402
B	B.1	Sienogranito médio a grosso		
	C.1	Monzogranito grosso	-15.791972	-55.625964
C	C.2	Monzogranito aplítico		
	D.1	Sienogranito médio a grosso	-15.807217	-55.652981
D	D.2	Sienogranito médio a grosso		

Análises petrográficas

A pesquisa de campo e os estudos macro- e microscópicos possibilitaram a diferenciação das sete amostras coletadas em quatro fácies petrográficas, todas isotrópicas, identificadas a

partir de diferenças mineralógicas e texturais, denominadas de: Fácies Sienogranito Porfirítico (A.1); Fácies Sienogranito médio a grosso (A.2, B.1, D.1 e D.2), Fácies Monzogranito grosso (C.1) e Fácies Monzogranito Aplítico (C.2).



Figura 4 – A) Vista frontal de pedreira produtora de agregados do ponto de coleta A, em que se demonstra a diferenciação do maciço, divididas pela linha tracejada, acima a granulação média e abaixo porfirítica; **B)** bloco de rocha que representa a amostra A-1 – Sienogranito Porfirítico; **C)** bloco de rocha que representa a amostra A-2 – Sienogranito Médio a Grosso.

As amostras foram classificadas pelo diagrama QAP de Streckeisen (1976) como Monzogranitos à Sienogranitos (Figura 5).

A classificação petrográfica das amostras, a partir do modelo sugerido pela NBR 15577-3 (ABNT, 2018), apresentou como resultado comum para todas as amostras a ausência de feições indicativas de deformação, ausência de microfissu-

ração e para os feldspatos. Apenas a amostra B.1 apresenta textura pertítica, caracterizada pelo intercrescimento de feldspato rico em sódio, tipicamente albita (hóspede) em feldspato potássico, tipicamente microclínio (hospedeiro), porém não indica potencial reativo, sendo considerada potencialmente reativa apenas a “pertita em chama”, não identificada nas amostras (Figuras 6A e 6B).

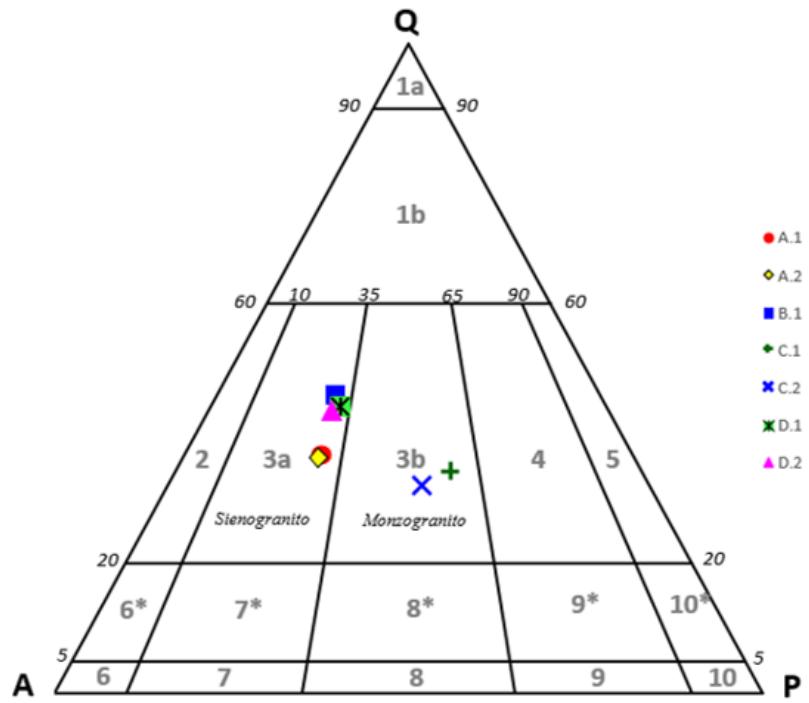


Figura 5 – Classificação das amostras de rocha segundo diagrama QAP (Streckeisen, 1976).

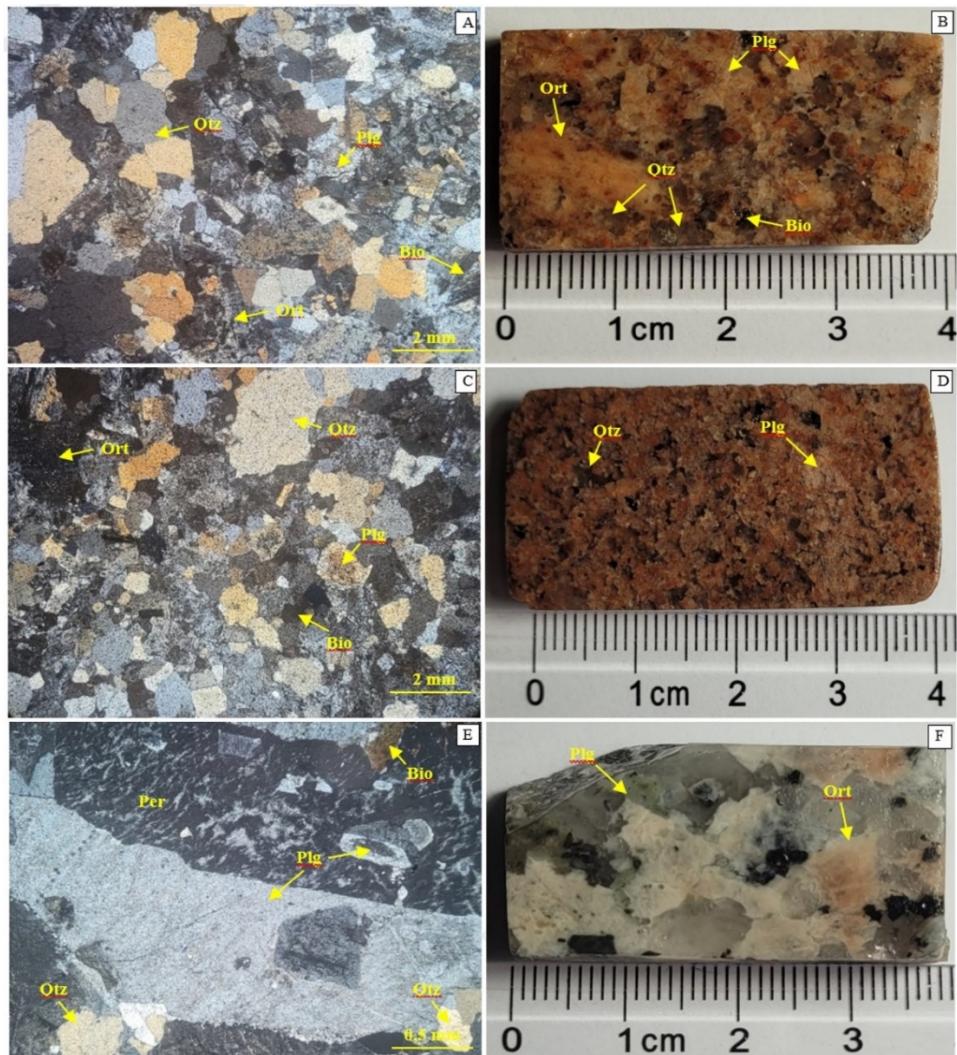


Figura 6A – Amostra A.1 – Sienogranito Porfírico, A) fotomicrografia com polarizadores cruzados; B) fotografia macroscópica. Amostra A.2 – Sienogranito Médio a Grosso, C) fotomicrografia com polarizadores cruzados; D) fotografia macroscópica. Amostra B.1 – Sienogranito Médio a Grosso, E) fotomicrografia com polarizadores cruzados; F) fotografia macroscópica.

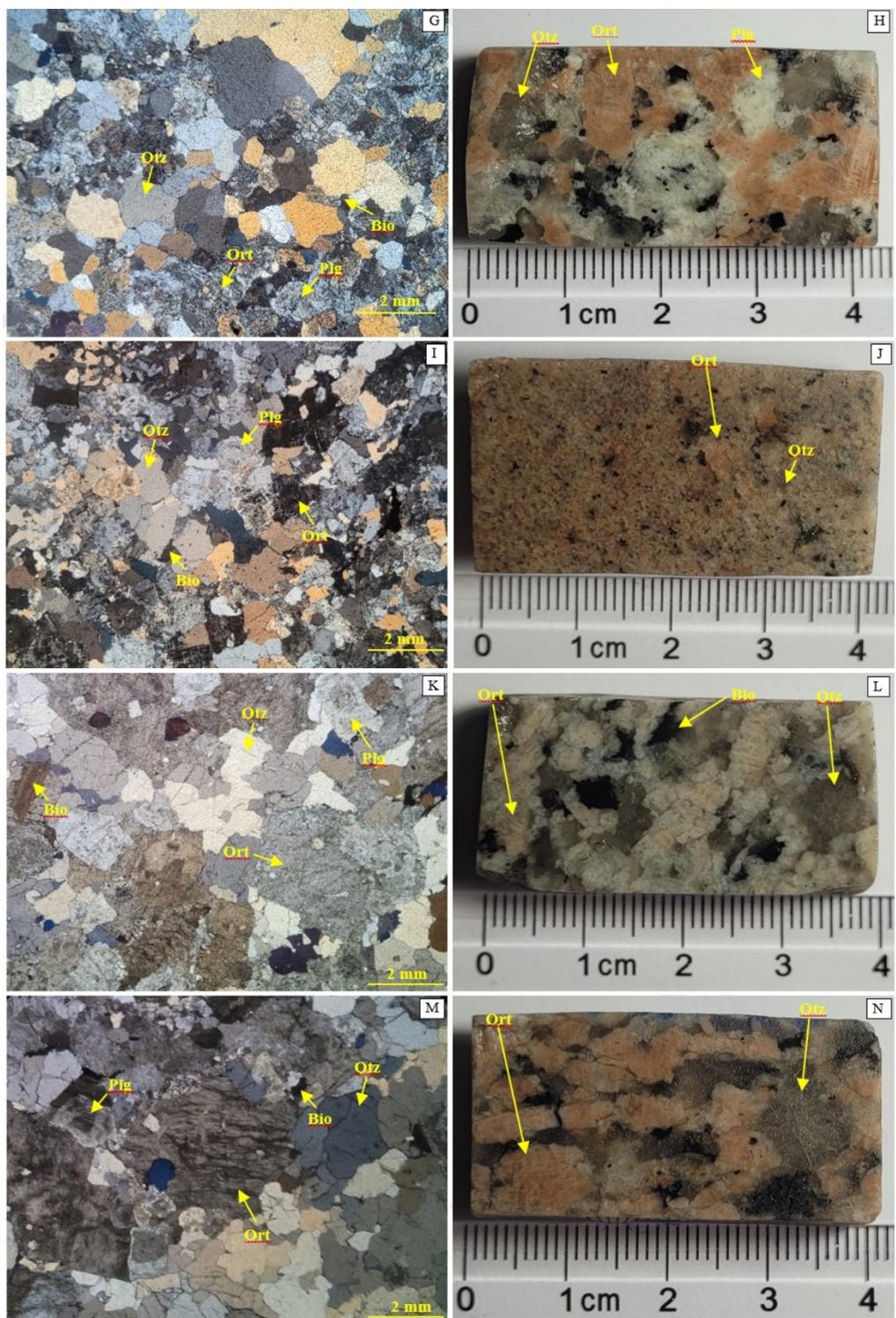


Figura 6B – Amostra C.1 – Monzogranito grosso, G) fotomicrografia com polarizadores cruzados; H) fotografia macroscópica. Amostra C.02 – Monzogranito Aplítico, I) Polarizadores cruzados; J) fotografia macroscópica. Amostra D.1 – Sienogramito Médio a Grosso; K) fotomicrografia com polarizadores cruzados; L) fotografia macroscópica. Amostra D.2 – Sienogramito Médio a Grosso, M) fotomicrografia com polarizadores cruzados; N) fotografia macroscópica.

Avaliação do potencial reativo em argamassa e concreto

Nos ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, todas as amostras do granito em combinação com o cimento padrão (CP-V da ABCP), apresentaram-se com valores abaixo de aproximadamente 0,19%, classificando-se com comportamento

“potencialmente inócuo de Grau R0” frente à reatividade potencial álcali-agregado (figura 7).

Considerando o uso do material como agregado graúdo na composição do concreto, quando as amostras apresentam comportamento potencialmente inócuo quando testadas conforme a NBR 15577-4 (ABNT, 2018), deve-se proceder a verificação de possíveis resultados

falso-negativos por meio de novos testes em prismas de concreto. Realizado em conformidade com a NBR 15577-7 - Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado (ABNT, 2018), constatou-se que todas as

amostras apresentaram comportamentos potencialmente reativos da ordem de 0,05% a 0,07% (figura 8), valores superiores ao limite de 0,03% no período de 20 semanas, conforme estabelece a NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

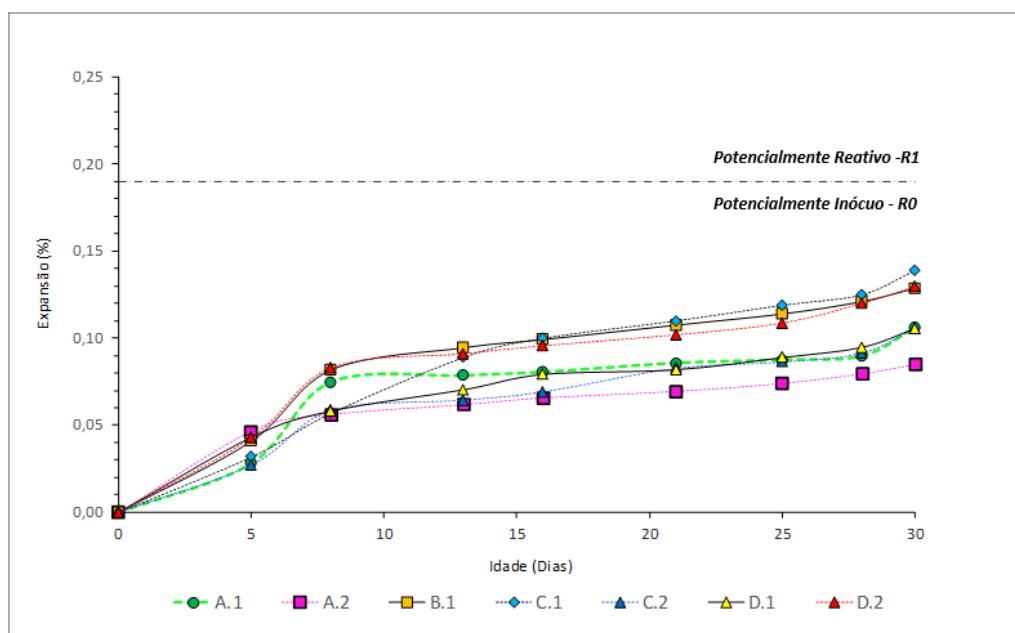


Figura 7 – Resultados do ensaio determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

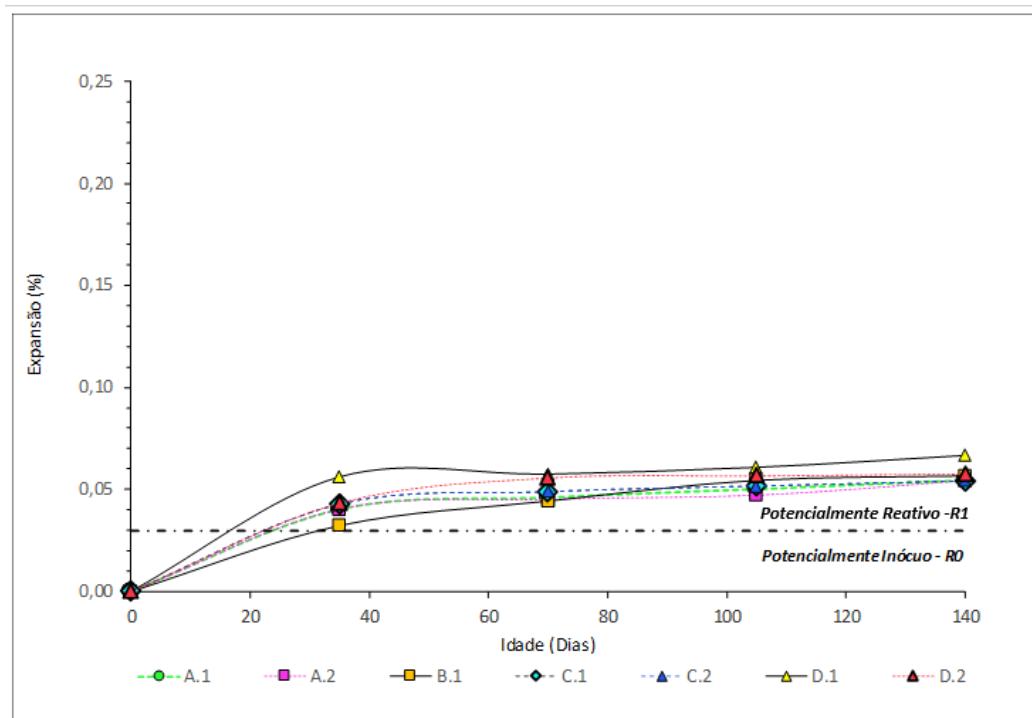


Figura 8 – Resultados dos ensaios de determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.

Resultados da difração de Raios-X (DRX)

Nos resultados de difração de raios-x, identificaram-se qualitativamente como Q – quartzo, P – plagioclásio e A – feldspato alcalino, apenas os principais picos (maior intensidade). A partir desta análise, observou-se que as sete amostras apresentaram picos na mesma posição,

diferenciando-se apenas pela intensidade.

Nas análises de difração de raios-x houve deslocamento de picos, por isso houve a necessidade de ajuste em X-offset.

Na figura 9, estão dispostas as representações gráficas dos resultados das análises difratométricas.

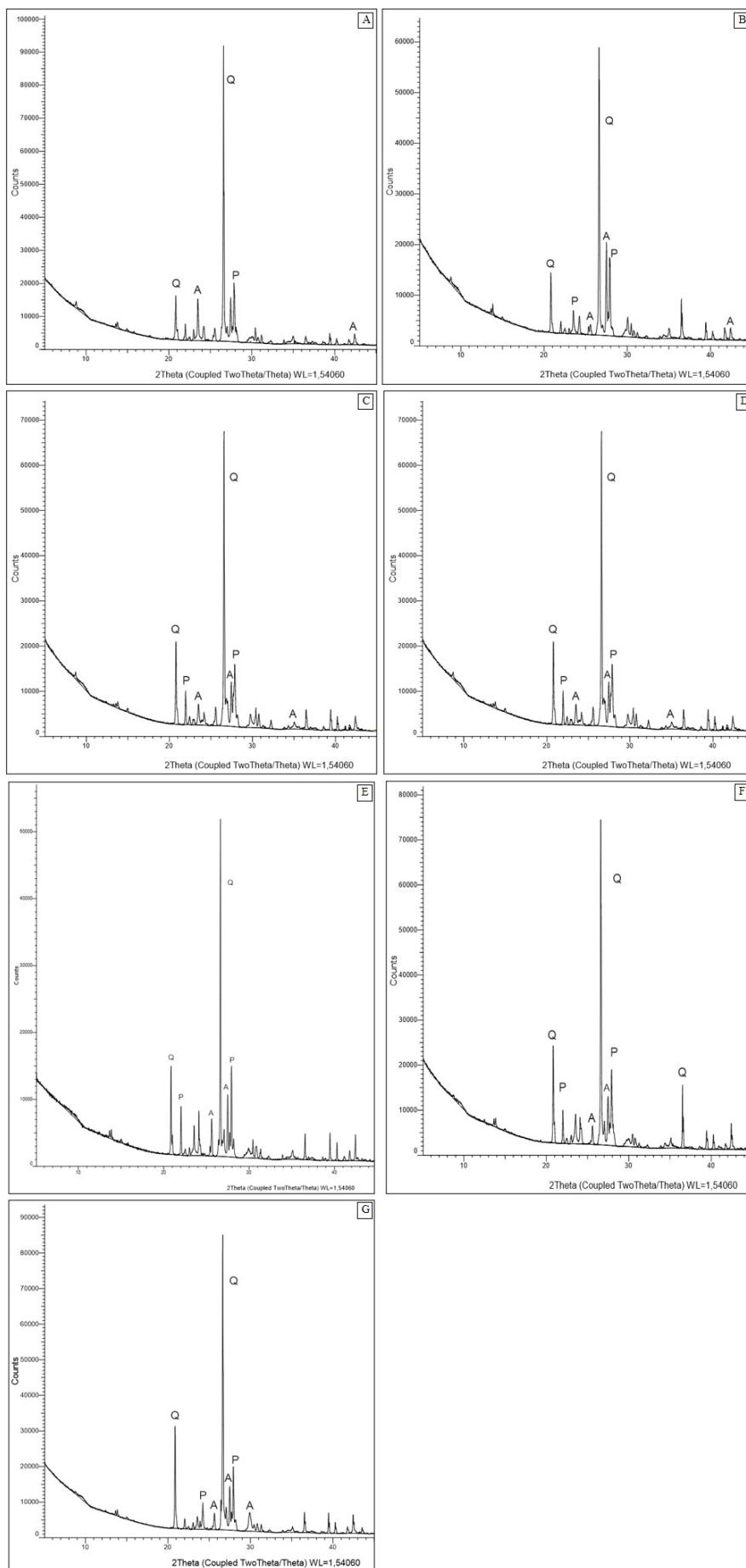


Figura 9 – Difratogramas das amostras de rocha (a) Amostra A.1 - Sienogranito Porfirítico, (b) Amostra A.2 – Sienogranito Médio a Grosso. (c) Amostra B.1 - Sienogranito Médio a Grosso, (d) Amostra C.1 – Monzogranito grosso, (e) Amostra C.02 – Monzogranito Aplítico, (f) Amostra D.1 – Sienogranito Médio a Grosso, (g) Amostra D.2 – Sienogranito Médio a Grosso.

Resultados da Espectroscopia de Raios-X por energia dispersiva (EDX)

Os dados litoquímicos obtidos neste trabalho confirmam a composição ácida compatíveis com granitos de alta sílica. Os teores de SiO₂ são da ordem de 70,49% a 74,57%, sendo constatados também, altos valores de álcalis presentes nas amostras, teores de K₂O da ordem de 5,57% a 6,35%, e Na₂O com valores de 1,93% a 2,38%.

A tabela 5 apresenta os resultados das análises químicas e os valores de equivalente alcalino calculados pela equação: Na₂Oeq = Na₂O +

0,658 K₂O.

Correlação dos resultados

A tabela 6 e a figura 10 apresentam as correlações obtidas a partir dos resultados. A tabela e os gráficos apresentam as possíveis relações entre os parâmetros de ângulo de extinção ondulante do quartzo, equivalente alcalino das amostras de rocha (NA₂eq) calculado em função dos resultados das análises químicas com os valores de expansão em barras de argamassa e com os valores de expansão em prismas de concreto.

Tabela 5 – Resultados das análises químicas das amostras de rocha do Granito São Vicente.

Analyte	A.1	A.2	B.1	C.1	C.2	D.1	D.2
SiO ₂	72,961	71,151	72,495	70,489	72,295	73,870	74,569
Al ₂ O ₃	14,651	16,074	14,424	15,062	15,105	14,446	14,246
K ₂ O	5,597	6,354	5,600	5,679	5,583	5,866	5,576
Fe ₂ O ₃	1,368	1,361	2,484	3,349	2,022	1,707	1,327
CaO	1,420	1,504	2,183	2,550	2,385	1,381	1,636
Na ₂ O	2,187	2,166	2,218	1,931	2,023	2,005	2,032
TiO ₂	0,011		0,349	0,396	0,135	0,139	0,109
SO ₃	0,314	0,225	0,104	0,293	0,195	0,346	0,295
MnO	0,098	0,046	0,042	0,107	0,164	0,095	0,073
V ₂ O ₅				0,054			
Rb ₂ O	0,076	0,079	0,042	0,040	0,052	0,055	0,047
SrO				0,022			
ZnO		0,018	0,019	0,019	0,016	0,017	0,013
NbO	0,011	0,014	0,011	0,010	0,013	0,019	0,021
Y ₂ O ₃	0,016	0,020	0,018		0,011	0,015	0,014
CuO			0,011				
MgO	1,182	0,966					
ZrO ₂	0,012	0,022				0,019	0,025
NiO						0,022	0,017
NA ₂ Oeq	5,668	5,697	5,902	5,870	6,347	5,865	5,701

Tabela 6 – Correlação de características mineralógicas versus expansão em barras de argamassa e prismas de concreto.

Amostra	A.1	A.2	B.1	C.1	C.2	D.1	D.2
Quartzo (%)	34	31	40	31	32	41	42
Feldspato Alcalino (%)	41	38	33	24	32	35	38
Plagioclásio (%)	18	16	15	35	35	17	17
Biotita e Minerais Acessórios (%)	7	14	12	9	1	8	3
Textura/Granularidade	Porfirítica	Média a Grossa	Média a Grossa	Grossa	Aplítica	Média a Grossa	Média a Grossa
Equivalente alcalino da Rocha, EDX - NA ₂ Oeq (%)	5,67	5,70	5,90	5,87	6,35	5,87	5,70
Extinção Ondulante (°)	35	35	36	36	33	30	31
Expansão em Barras de Argamassa (%)	0,11	0,08	0,13	0,14	0,11	0,11	0,13
Expansão em Prismas de Concreto (%)	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05	0,07	0,06
Classificação Petrográfica	Sieno-granito	Sieno-granito	Sieno-granito	Monzo-granito	Monzo-granito	Sieno-granito	Sieno-granito

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

As análises petrográficas identificaram quartzo, feldspato e plagioclásio como os principais minerais formadores da rocha, sendo classificadas como Monzogranitos a Sienogramitos, confir-

mando as descrições de amostras do corpo granítico realizadas por Almeida (1954), Godoy (2007), Manzano (2009) e Trivelli (2017). Não foram encontrados minerais considerados potencialmente

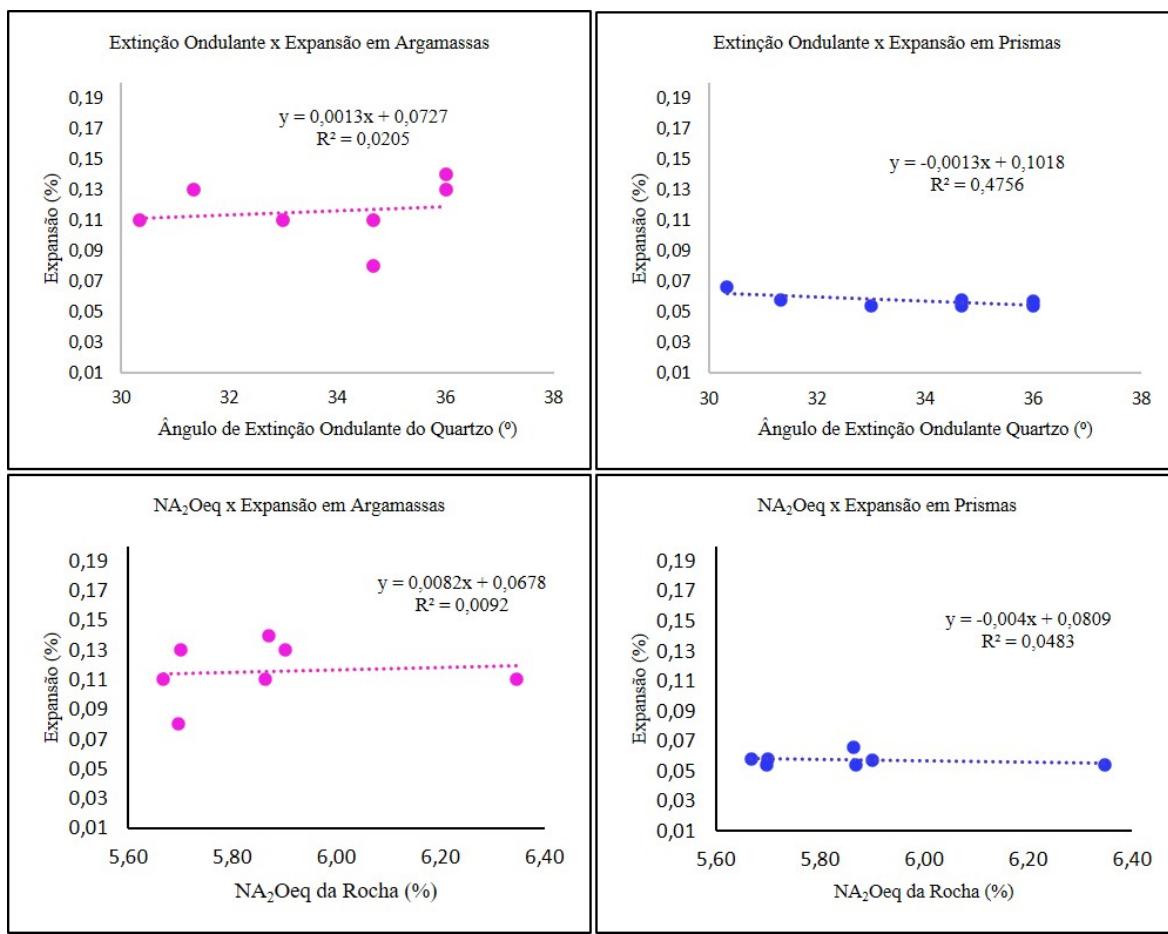


Figura 10 – Gráficos de correlação de características mineralógicas *versus* expansão em barras de argamassa e prismas de concreto.

reativos pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Assim como em muitos estudos de reação álcali-agregado em granitos, não foram identificadas correlações entre a mineralogia e as expansões, o que era esperado, uma vez que não foram identificados minerais reativos por meio da análise petrográfica, e não encontrado quartzo deformado ou microcristalino nas amostras de rocha, e não são correlacionáveis com o ângulo de extinção ondulante.

Nesse caso, os dados indicam que pode haver liberação de álcalis por parte dos agregados, de forma lenta, para a solução intersticial do concreto, provenientes do feldspato alcalino ($KAlSi_3O_8$) e plagioclásio ($NaAlSi_3O_8$) presentes na rocha, o que pressupõe a ocorrência de reação do tipo álcali-silicato. Destaca-se que a tendência da água, quando permeia o meio silicático é carrear os álcalis, principalmente Na e K observando-se que, tanto os álcalis solúveis quanto os insolúveis podem participar da reação (Sanches, 2008; Hasparyk & Kuperman, 2021).

Da mesma forma, Bérubé et al. (2002) confirmam, em pesquisas de avaliação laboratorial, que quantidades muito significativas de álcalis podem ser fornecidas com o tempo pelos agre-

gados à solução dos poros do concreto, principalmente os ricos em feldspato, no caso o granito.

Corroborando esta avaliação, Constatiner & Diamond (2003) concluem em sua pesquisa de liberação de álcalis de feldspatos em soluções de poros do concreto, que os dados obtidos fornecem evidências definitivas que os feldspatos liberam álcalis para a solução dos poros do concreto e argamassa, sendo que o K-feldspato (microclina) contribui principalmente com íons K^+ , o Na-feldspato (plagioclásio) parece contribuir com íons Na^+ , e o oligoclásio parece contribuir com ambos.

Conclui-se que, mesmo com a recomendação da NBR 15577-1 (ABNT, 2018), de utilizar como medida mitigadora a limitação do teor álcalis no concreto, com valor de 2,4 kg de Na_2Oeq/m^3 , esta determinação refere-se aos álcalis provenientes do cimento, negligenciando outras fontes. Logo, deve-se também calcular o teor de álcalis ativos no concreto, suscetíveis de serem fornecidos para a solução dos poros à longo prazo, determinados por métodos experimentais, isto porque uma parte pode permanecer retida na rede cristalina, conforme afirmam também Bérubé (2002), Sbrig Neto (2018) e Moreira (2021).

Conclui-se ainda, que os tamanhos dos grãos do agregado podem influenciar diretamente nos resultados, uma vez que os valores de expansão em barras de argamassa indicaram os agregados miúdos como potencialmente inócuos, enquanto a expansão em primas de concreto, com agregados graúdos, pelo método acelerado indicou comportamento potencialmente reativo.

Outro fator que pode ter contribuído para a expansão nos prismas de concreto, foi o maior tempo de ensaio, o que possibilitou a dissolução dos álcalis presentes nos agregados.

Tais observações segundo Couto (2008) e Moreira (2021), para os quais os métodos de ensaio em concreto produzem avaliações mais confiáveis do que os métodos em argamassa, destacando a possibilidade de resultados falso-negativos (agregados classificados como inócuos pelo ensaio em argamassa e que ocasionam efeitos deletérios em campo).

Sendo assim, mesmo que o agregado apresente inicialmente indicações de não reativo por análise petrográfica e por ensaios em barras de argamassa (30 dias), reforça-se que os resultados dos estudos de reatividades em granitos, devem ser expressos apenas ao final de um ciclo de ensaios de maior tempo de duração (meses), e que devem ser concluídos com ensaios de expansão em prismas de concreto com longa duração (01 ano), ou no mínimo, com ensaio de expansão em prismas de concreto pelo método acelerado (20 semanas), por se tratar de processos identificados em melhor condição em ensaios com emprego de agregados graúdos, e por processos lentos, pois geralmente em campo, só ocorrem em média, com idade superior à 10 anos,

segundo Ramos et al. (2016) e Ribeiro (2018).

Vale ressaltar que o presente estudo se refere ao tipo de cimento empregado e às condições específicas de laboratório. As condições de exposição em campo devem ser avaliadas de forma independente.

Salienta-se que a expansão poderá ocorrer quando os três fatores estão reunidos, umidade, alto teor de álcalis e o agregado com potencial reativo.

Logo, recomenda-se limitar o consumo de cimento, usar cimentos com menor teor de álcalis e usar adições minerais capazes de mitigar a expansão, principalmente em estruturas expostas a ambientes quentes e úmidos, ou submetidas a ciclos de molhagem e secagem, ou em contato permanente com o solo.

Como sugestões de trabalhos futuros, pode-se indicar o teste de diferentes tipos e teores de adições minerais pozolânicas, a fim de identificar a combinação que resulte em mitigação do potencial reativo dos agregados estudados; avaliar a influência da temperatura no processo de expansão dos agregados graníticos; testar maior tempo de duração em ensaios de expansão e correlação com a composição mineralógica; analisar os produtos de reação formados na argamassa e no concreto, e detalhamento estrutural, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV); avaliar a possibilidade dos efeitos de ataques combinados de RAA e formação de Etringita Tardia (Delayed Etringite Formation - DEF); e realizar análises químicas e de expansão em testemunhos de concretos que utilizaram o granito São Vicente como agregado graúdo em sua composição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, pela contribuição com o cimento padrão e todas as orientações concedidas. Ao IFMT pelo afastamento integral remunerado, e pela disponibilidade de utilização do Laboratório de Materiais de Construção - DINFRA, do Campus Cuiabá - Cel. Octayde Jorge da Silva. Ao Instituto Nacional de Tecnologia/RJ – INT, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFMT (PPGEOC - FAGEO), ao laboratório Multusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA) do Instituto de Física (UFMT) e à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, por meio do projeto # 01.04.0121.00.

REFERÊNCIAS

- ABREU FILHO, W. & ALBUQUERQUE, M.C. Projeto **Geologia das folhas Dom Aquino – Rondonópolis, Estado de Mato Grosso**. WALDEMAR A.F. E ALBUQUERQUE M.C. (Org.). Escala 1:100.000. Goiânia: CPRM, 2016.
- ALMEIDA, F.F.M. Geologia do centro-leste Mato-grossense. **Boletim da Divisão de Geologia e Mineração** – DNPM. Rio de Janeiro, v. 150, p. 1-97, 1954.
- ALMEIDA, F.F.M. Geologia do centro-oeste mato-grossense. **Boletim da Divisão de Geologia e Mineração** - DNPM/ DGM. Rio de Janeiro, v. 215, 137 p., 1964.
- ALMEIDA, E. & SOUSA, S.P. **Análise do comportamento estrutural de barragens afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem de Fagilde**. Lisboa, 2016. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa.
- ALMEIDA F.F.M. & MONTOVANI, M.S.M. **Geologia e Geocronologia do Granito São Vicente, Mato Grosso**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 47, n. 3-4, p. 451-458, 1975.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Relatório de Ensaio Número 127821 - Cimento Padrão Ensaios de Reação Álcali-Agregado. São Paulo/SP, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579 - Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro-RJ, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582 - Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro-RJ, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12826 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro-RJ, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 1 - Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-2 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 2 - Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-3 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 3 - Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 4 - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-5 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 5 - Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-6 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 6 - Determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-7 - Reatividade Álcali-Agregado Parte 7 - Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro-RJ, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro-RJ, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606 - Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro-RJ, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607 - Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro-RJ, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 11-2 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13 - Cimento Portland — Análise química — Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 15 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 16 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 17 - Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro-RJ, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18:2012 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro-RJ, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 20 - Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2012.
- ASTM C 151 / C151M – 18. Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards, V.04.01, West Conshohocken, PA, ASTM International, (2018).
- BERNARDES, & HASPARYK, 2016. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALCALI AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 15th, 2016. Actas. São Paulo 2016,
- BÉRUBÉ, M.A.; DUCHESNEA, J.; DORIONA, J.F.; RIVESTB, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, v. 32, Issue 8, 2002, p. 1215-1227.
- BUHRKE, V.E.; JENKINS, R.; SMITH, D.K. *A Practical Guide for the Preparation of Specimens for X-ray Fluorescence and X-Ray Diffraction*. Wiley-VCH. Weinheim, Germany, 1998. ISBN: 978-0-471-19458-3
- CONSTATINER, D. & DIAMOND, S. Alkali release from feldspars into pore solutions. *Cement and Concrete Research*, v. 33, Issue 4, p. 549-554, 2003
- COUTO, T.A. *Reação álcali-agregado: Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas*. Goiânia, 2008. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiânia.
- CURTIS NETO, J.A. *Estudos Tecnológicos de rochas da Intrusão de Limeira, visando aplicações como agregados em obras de engenharia*. São Carlos. 2019. 166 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,
- FERNANDES, M.I.G. *Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos de obra*. Porto, 2005. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FRANCKLIN JR, I.; RIBEIRO, R.P.; CORRÊA, F.A. Quartzite Mining Waste: Diagnosis of ASR Alkali-Silica Reaction in Mortars and Portland Cement Concrete. *Materials*, v. 14, n. 24, p. 7642. 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14247642>.
- FRANCKLIN JR, I., RIBEIRO, R. P., SILVA, M. H., AURELIANO, F. S., COSTA, A. A. F., GARCIA, V. L. G. Study of Reactive Powder Concrete Using Quartzite Tailings From the State of Minas Gerais – Brazil. *Procedia Manufacturing*, v. 38, p. 1758-1765, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.091>.
- FRAZÃO, E.B. *Alteração de Rochas como Critério de Seleção de Agregados*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 2012.
- GODOY, A.M., RUIZ, A.S.; MANZANO, J.C.; ARAÚJO-RUIZ, L.M.B. Os Granitoides Brasilianos da Faixa de Dobramento Paraguai, MS e MT. São Paulo. *Série Científica*, v. 7, n. 1, p. 29-44, 2007.
- GOMES NETO, D.P. & BARRETO, L.S. Uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seu mecanismo e os fatores que a influenciam. *CONGRESO INTERNACIONAL DE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS*, IX, João Pessoa-PB, 2013. *Anais....* João Pessoa, 2013.
- HASPARYK, N.P. *Investigação de Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel*

- Exsudado.** Porto Alegre, 2005. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- HASPARYK, N.P. Reações Expansivas no Concreto. Instituto Brasileiro do Concreto.** Palestra proferida pela internet- live. 2020. Acesso em 04/05/2020: <https://www.youtube.com/watch?v=dFG3dJV1plg&t=705s>.
- HASPARYK, N. & KUPERMAN, S.** Reações expansivas deletérias no concreto. **Revista: Concreto & Construções.** IBRACON, Ed. 102, Abr- Jun, 2021.
- HOLANDA, R.A.** Reatividade Álcali-Agregado (RAA): O Câncer do Concreto - Reação Álcali-Agregado: 60% das obras não previnem patologia. Rep. Altair Santos. Portal Massa Cinzenta, CIA. de Cimento Itambé, 2019. Disp. em: <https://www.cimentoitambe.com.br/reacao-alcali-agregado-60-das-obras-nao-previnem-patologia/>. Acessado em: 29abr2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA.** Projeção da População 2018: número de habitantes do país deve parar de crescer em 2047. IBGE, Agência de Notícias, 2018. Disp. em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/21837-projeto-da-populacao-2018-numero-de-habitantes-do-pais-dever-parar-de-crescer-em-2047>. Acessado em: 29abr2019.
- LACERDA FILHO, J.W.; ABREU FILHO, W.; VALENTE, C.R.; OLIVEIRA, C.C.; ALBUQUERQUE, M.C.** Geologia e Recursos Minerais do estado de Mato Grosso. Programa Integração, Atualização e Difusão de Dados de Geologia do Brasil. Convênio CPRM/SICME-MT, MME. 235 p., 2004.
- MANZANO, J.C. Caracterização dos Granitoides Brasilianos da Faixa de Dobramentos Paraguai, MS e MT.** Rio Claro, 2009. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- MANZANO, J.C., GODOY, A.M., ARAÚJO L.M.B.** Contexto Tectônico dos Granitoides Neoproterozoicos da Faixa de Dobramentos Paraguai, MS e MT. Rio Claro. UNESP, **Geociências**, v. 27, 4, p. 493-507, 2008.
- MIELICH, O. & REINHARDT, H.W.** Time-dependent coefficient of thermal expansion of an alkali-sensitive rock in alkaline solution. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 15 São Paulo, 2016. Anais...São Paulo, 2016.
- MOREIRA, K.M.V. Mitigação da Reação Álcali-Silica em Compósitos Cimentícios com Uso de Cinza Volante e de Escória Granulada de Alto Forno do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (Ceará).** Fortaleza, 2021. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais.
- NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto.** Tradução: CREMONINI. R.A. - 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.
- OLIVEIRA, A.M.S. & MONTICELI, J.J.** Geologia de Engenharia e Ambiental. Minerais e Rochas. Cap. 06. – São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2018.
- PEREIRA, F.M.; NEVES, P.C.P.; LENZ, D.M.; VERNEY, J.C.K.** Avaliação da reatividade potencial de rochas utilizadas como agregados na construção civil no estado do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, **Matéria**, v. 23, n. 3, p. e12175, 2018.
- PHD, Engenharia. Inspeção e Diagnóstico na Empresa Pantanal de Energia (2007)** Cuiabá, MT. Disp.: <https://www.phd.eng.br/inspecao-e-diagnostico-na-empresa-pantanal-de-energia-2007-cuiaba-mt/>. Acessado em: 14jan2022.
- PIANEZZER, G.A.; GRAMANI, L.; KAVISKI, E.** Change of effective properties of concrete by alkali-silica reaction. Revista Internacional De Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria, v. 35, n. 1, p. 8, 2019.
- RAMOS, V., FERNANDES, I., SILVA, A. S., SOARES, D., FOURNIER, B., LEAL S., NORONHA, F.** Assessment of the potential reactivity of granitic rocks - Petrography and expansion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 86, p. 63–77, 2016.
- RIBEIRO, D.V. Deterioração das estruturas de concreto.** In: **Corrosão e degradação em estruturas de concreto.** 2º ed. Rio de Janeiro: GEN, 2018. Cap. 7, p. 158-189.
- SANTOS, M.V. Relatório Técnico Consolidado da Geologia do Estado De Mato Grosso – 1:1.500.000. Parte 2: Sistematização das Informações Temáticas.** Governo de Mato Grosso – Cuiabá, 2000.
- SBRIGHI NETO, C.; QUITETE, E.B.; BATTAGIN, A.F.** Prática recomendada IBRACON: GUIA DE PREVENÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO. 1ª Edição. São Paulo. Ed. IBRACON, 2018.
- SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. MT Lidera Ranking Como Principal Polo Agrícola do País** - Notícias SEDEC. Governo de Mato Grosso – Cuiabá, 2026. Disp. em: www.sedec.mt.gov.br/-/4562276-mt-lidera-ranking-como-principal-polo-agricola-do-pais. Acessado em: 20abr2019.
- SILVA FILHO, L.C.P. Durabilidade do Concreto à ação de Sulfatos: Análise do Efeito da Permeação de Água e da Adição de Microssílica.** Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal Rio Grande do Sul.
- SOUSA, S.P.A. Análise do Comportamento Estrutural de Barragens Afetadas por Expansões do Betão. Aplicação à Barragem de Fagilde.** Lisboa, Portugal, 2016. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa.
- STRECKEISEN, A.L.** Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. **N. Jahrb. Miner, Abh.**, v. 107, p. 144-240, 1976.
- TRIVELLI, G.G.B., PIEROSAN, R., RUIZ, A.S.** Geologia e Petrologia do Granito São Vicente na Região do Parque Estadual Águas Quentes, Estado de Mato Grosso, Brasil. São Paulo, USP, **Série Científica**, v. 17, n. 3, p. 2-48, 2017.
- VALIN JR, M.O. & RIBEIRO, K.F.A.** Estudo Sobre as Patologias Ocorridas Devido a Reação Álcali-Agregado no Ginásio Aecim Tocantins em Cuiabá – MT. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XV, Maceió, 2014. **Atas...**Maceió, 2014.

Submetido em 13 de fevereiro de 2024
Aceito para publicação em 7 de agosto de 2025