



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

IVAN FRANCKLIN JUNIOR

Rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais: Estudo da fração fina para a produção de concretos de pós reativos e diagnóstico da reação álcali-agregado

São Carlos
2022

IVAN FRANCKLIN JUNIOR

Rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais: Estudo da fração fina para a produção de concretos de pós reativos e diagnóstico da reação álcali-agregado

Versão Corrigida

Original encontra-se disponível na unidade que aloja o programa

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F824r Francklin Junior, Ivan
Rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais:
Estudo da fração fina para a produção de concretos de pós reativos e diagnóstico da reação álcali-agregado / Ivan Francklin Junior; orientador Rogério Pinto Ribeiro. São Carlos, 2022.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. quartzito. 2. rejeito de mineração. 3. concreto de pós reativos. 4. concreto de ultra-alto desempenho. 5. reação álcali-agregado. 6. reação álcali-sílica. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **IVAN FRANCKLIN JUNIOR**.

Título da tese: "Rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais: estudo da fração fina para a produção de concretos de pós reativos e diagnóstico da reação álcali-agregado".

Data da defesa: 18/11/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Dr. **Rogério Pinto Ribeiro**
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Eduardo Goulart Collares**

(Universidade Estadual de Minas Gerais/UEMG)

Aprovado

Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Profa. Dra. **Leila Aparecida de Castro Motta**

(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovado

Prof. Dr. **Josinaldo de Oliveira Dias**

(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:

Profa. Associada **Cristina de Holanda Cavalcanti Tsuha**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho, dando-me força e disposição para concluir esse importante trabalho.

A minha esposa Fabiane e minhas filhas Ivana e Analu, pelo amor, incentivo e apoio durante esse importante período de minha formação.

Aos meus pais Ivan Franklin Pinto (*in memoriam*) e Maria José Franklin, alicerces de minha formação, pelo carinho e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro, pela atenção, companheirismo e orientações imprescindíveis.

Aos Professores Dr. Eduardo Goulart Collares e Dr. Ricardo Carrazedo pelas importantes contribuições durante a qualificação da tese.

À Profa Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro pelo apoio e orientação durante os estudos de microscopia dos concretos.

Ao Prof. Dr. Alessandro Ferreira Alves, pela colaboração na interpretação dos resultados de análises estatísticas.

Aos Engenheiros Maurício H. da Silva e Vinicius Lopes Granzoto, pelas contribuições durante os estudos laboratoriais realizados na Etapa 1 desta pesquisa.

À equipe técnica e administrativa do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, em especial à Maristela Batissaco e aos técnicos Benedito Osvaldo de Souza e José Luis Guerra, pelo suporte acadêmico e apoio na realização dos ensaios laboratoriais.

Às empresas SIOX Indústria, Comércio e Beneficiamento de Minério Ltda e Sales Andrade-SA Indústria e Beneficiamento Mineral Ltda, pela doação de quartzitos para realização desta pesquisa.

Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para realização deste trabalho.

RESUMO

FRANCKLIN JUNIOR, Ivan. **Rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais: Estudo da fração fina para a produção de concretos de pós reativos e diagnóstico da reação álcali-agregado**. 2022. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O estado de Minas Gerais é reconhecido no Brasil pela produção de quartzitos utilizados como rocha de revestimento na construção civil. Na exploração da chamada “pedra mineira”, o percentual de aproveitamento para a comercialização como placas de revestimento é baixíssimo, de aproximadamente 8 %. Assim, o volume expressivo de rejeitos de quartzitos é um grande problema, pois resulta em impactos ambientais negativos. Uma das possibilidades de aproveitamento deste rejeito é como componente na fabricação de concretos de pós reativos (CPRs), pois estes concretos utilizam frações ultrafinas de rochas em sua composição. Neste caso, o uso do pó de quartzitos é uma possibilidade interessante, dado o percentual de sílica predominante em sua composição. Para verificar tal hipótese, é necessário realizar estudos da Reação Álcali-Agregado (RAA), em virtude de indícios da possibilidade deletéria do quartzito com os álcalis do cimento. Com base nestas premissas, o objetivo desta pesquisa foi realizar estudos sobre a produção de CPRs com a fração fina e o pó de quartzitos explorados em duas regiões principais produtoras de Minas Gerais, Alpinópolis e São Thomé das Letras, e verificar a potencialidade reativa álcali-agregado das amostras selecionadas. Esta pesquisa foi dividida em nove etapas: coleta das amostras; apreciação petrográfica; produção e classificação das frações finas e pós de quartzitos; caracterização física dos materiais; empacotamento de partículas e produção dos CPRs; ensaios físicos e mecânicos dos CPRs; análise estatística dos resultados com os CPRs; ensaios de RAA utilizando três métodos de expansibilidade; investigação da microestrutura das amostras. As petrografias dos quartzitos resultaram elevados percentuais de quartzo deformado (95 %), portanto considerados como potencialmente reativos. Das amostras analisadas pelo método acelerado em argamassas apenas três amostras indicaram comportamento potencialmente reativo. Já os métodos acelerado e de longa duração em concretos se mostraram eficazes e foram condizentes com a potencialidade deletéria das amostras. Todas as amostras de quartzitos analisadas por microscopia foram diagnosticadas com o gel da RAA, portanto, diante deste diagnóstico, foram propostos métodos mitigadores desta patologia. Nos CPRs, os resultados mostraram a eficácia do uso de partículas fracionadas de quartzito que permitiram obter um melhor empacotamento e conseqüentemente aumento da resistência com menor consumo de cimento. Os melhores resultados atingiram resistência à compressão de 141,9 MPa com um consumo de cimento de 755,0 kg/m³. A análise discriminante demonstrou que não existem diferenças significativas entre as amostras analisadas. De maneira geral, os estudos tecnológicos realizados nas amostras de quartzitos do Sul de Minas culminaram em resultados satisfatórios para uso da rocha como agregado para a produção de CPRs, o que, conseqüentemente, contribuiria para a minimização dos impactos ambientais negativos da mineração de quartzitos.

Palavras-chave: Quartzito; rejeito de mineração; Concreto de Pós Reativos; Concreto de Ultra-Alto Desempenho; Reação Álcali-Agregado; Reação Álcali-Sílica.

ABSTRACT

FRANCKLIN JUNIOR, Ivan. **Quartzite tailings from the south of Minas Gerais: Study of the fine fraction for the production of reactive powder concrete and diagnosis of the alkali-aggregate reaction**. 2022. Thesis (Doctorate in Geotechnics) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos-SP, 2022.

The state of Minas Gerais is recognized in Brazil for the production of quartzite used as dimension stone in civil construction. In the exploitation of the called “mineira stone”, the percentage of use for commercialization as cladding plates is very low, approximately 8 %. Thus, the expressive volume of quartzite tailings is a major problem, as it results in negative environmental impacts. One of the possibilities of using this waste is as a component in the manufacture of Reactive Powder Concretes (RPCs), as these concretes use ultrafine fractions of rocks in their composition. In this case, the use of quartzite powder is an interesting possibility, due to the predominant percentage of silica in its composition. To verify this hypothesis, it is necessary to carry out studies on the Alkali-Aggregate Reaction (AAR), due to evidence of the deleterious possibility of quartzite with the alkali of cement. Based on these premises, the objective of this research was to carry out studies on the production of RPCs with the fine fraction and powder of quartzites exploited in two main producing regions of Minas Gerais, Alpinópolis and São Thomé das Letras, and to verify the Alkali-Aggregate Reactive potential of the selected samples. This research was divided into nine stages: sample collection; petrographic appreciation; production and classification of fine fractions and quartzite powders; physical characterization of materials; particle packaging and production of RPCs; physical and mechanical testing of RPCs; statistical analysis of results with RPCs; AAR assays using three expansion methods; investigation of the microstructure of the samples. The quartzite petrographs resulted in high percentages of deformed quartz (95 %), therefore considered as potentially reactive. Of the samples analyzed by the accelerated method in mortars, only three samples indicated a potentially reactive behavior. On the other hand, the accelerated and long-term methods in concrete proved to be effective and were consistent with the deleterious potential of the samples. All quartzite samples analyzed by microscopy were diagnosed with the AAR gel, therefore, in view of this diagnosis, mitigation methods of this pathology were proposed. In the RPCs, the results showed the effectiveness of the use of fractionated quartzite particles that allowed to obtain a better packing and, consequently, an increase in strength with less cement consumption. The best results reached a compressive strength of 141.9 MPa with a cement consumption of 755.0 kg/m³. The discriminant analysis showed that there are no significant differences between the analyzed samples. In general, the technological studies carried out on the quartzite samples from southern Minas Gerais resulted in satisfactory results for the use of the rock as an aggregate for the production of RPCs, which, consequently, would contribute to the minimization of negative environmental impacts of quartzite mining.

Keywords: Quartzite; mining tailings; Reactive Powder Concrete; Ultra-High Performance Concrete; Alkali-Aggregate Reaction; Alkali-Silica Reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Geração de rejeitos nas minerações de quartzitos do sudoeste mineiro.....	21
Figura 1.2 - Detalhe do gel exsudado na superfície da estrutura de concreto da UHE-Furnas.	26
Figura 2.1 – (A) Localização da área de estudo e espacialização das microrregiões e municípios do estado de Minas Gerais; (B) Mapas de localização com áreas de amostragem de rejeitos de mineração de quartzito e de diabásio referentes aos municípios de São Thomé das Letras (STL), Alpinópolis (ALP) e São Sebastião do Paraíso (SSP).	30
Figura 2.2 – Imagem de satélite das minerações de quartzito localizada no entorno da zona urbana no município de São Thomé das Letras-MG.	33
Figura 2.3 – Mapa Geológico do município de São Thomé das Letras-MG.....	34
Figura 2.4 – Imagem de satélite da mineração de quartzito localizada próxima a zona urbana no município de Alpinópolis-MG.....	35
Figura 2.5 – Mapa Geológico do município de Alpinópolis, indicando o local de coleta dos quartzitos.....	36
Figura 2.6 – Mapa Geológico de São Sebastião do Paraíso, indicando o local de coleta dos diabásios.....	37
Figura 2.7 – (A) Vista parcial das frentes de extração de placas da Mineração Bico do Gavião; (B) Aspecto visual de amostra coletada em campo; (C) Aspecto visual da amostra quarteada. (D) Quarteador mecânico.	39
Figura 2.8 - Rejeitos de quartzitos amostrados na mineração Planalto Pedras	42
Figura 2.9 – (A) Amostra de mão para extração para lâminas delgadas; (B) Equipamentos utilizados na preparação das lâminas delgadas; (C) Microscópio petrográfico.....	43

Figura 2.10 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para cominuição das amostras	45
Figura 2.11 – (A) Peneirador mecânico; (B) Frações classificadas para os estudos de RAA - método acelerado.	46
Figura 2.12 – Preparação da fração graúda da amostra ALP 2.	47
Figura 2.13 - Balança hidrostática utilizada para determinação dos índices físicos dos agregados	48
Figura 2.14 - Ensaio de massa específica do cimento Portland	49
Figura 2.15 - (A) Amostra de mão exibindo quartzito de Alpinópolis de cor acinzentada, bastante silicificado e com foliação pouco evidente; (B) Fotomicrografia (nicóis paralelos) mostrando cristais de muscovita orientados e grãos de quartzo com contatos engrenados	52
Figura 2.16 - Fotomicrografias (nicóis cruzados).	53
Figura 2.17 - (A) Detalhe macroscópico exibindo coloração preta e o aspecto maciço e compacto da amostra de mão; (B) Fotomicrografia (nicóis paralelos) do diabásio com textura intergranular, onde cristais ripiformes de plagioclásio apresentam grãos intersticiais de augita e de minerais opacos intersticiais	54
Figura 2.18 - Distribuição granulométrica da fração pó de quartzitos.	56
Figura 2.19 - Distribuição granulométrica da fração pó de quartzo da amostra JUNDÚ.	57
Figura 2.20 - Distribuição granulométrica da fração areia de quartzito e da fração areia JUNDÚ	58
Figura 3.1 - Thomas Stanton em um guarda-corpo de ponte com fissuras devido à RAA	62
Figura 3.2 Combinação de elementos para formação do gel expansivo	66

Figura 3.3 - Formas de ataque das hidroxilas à sílica.....	67
Figura 3.4 – Exemplos de sílicas reativas.....	68
Figura 3.5 - Estágios evolutivos da reação álcali-carbonato.	70
Figura 3.6 - Produto da reação álcali-carbonato formado na interface entre agregado e pasta	70
Figura 3.7 - Fissuração em blocos de fundação afetados pela RAA.	71
Figura 3.8 - Géis coletados na superfície do concreto afetado pela RAS na UHE-FURNAS.	72
Figura 3.9 - Recuperações nos pilares atacados pela RAS no vertedouro da barragem UHE-FURNAS.	72
Figura 3.10 – Pilar em concreto armado (visto de cima) da Ponte do Rio Turvo, com fissuras típicas da RAA	73
Figura 3.11 - Fluxograma de decisão de uso do agregado quanto a RAS.....	77
Figura 3.12 - Fluxograma para determinar o grau de reatividade do agregado.....	78
Figura 3.13 - Análise petrográfica - Anexo B –NBR 15577-3 (ABNT, 2018).....	79
Figura 3.14 – Indicação das frações de agregados utilizadas para produção da argamassa	81
Figura 3.15 – (A) Argamassadeira para produção das barras de argamassa; (B) moldes metálicos 25 x 25 x 285 mm; (C) aparato de medição	82
Figura 3.16 – (A) Acomodação das barras em recipiente com solução de NaOH; (B) em estufa a 80°C.....	82
Figura 3.17 - Exemplo de resultados de expansibilidade conforme limites da C-1260 (ASTM, 2014).	83
Figura 3.18 - Exemplo de resultados de expansibilidade de acordo com a NBR 15577 (ABNT, 2018).....	84

Figura 3.19 - Procedimento para cálculo da quantidade de NaOH	85
Figura 3.20 – (A) Moldes para produção dos prismas de concreto; (B) Aparato para medição da expansão	86
Figura 3.21 - Exemplo de expansão em prismas de concreto utilizando agregados de quartzitos	87
Figura 3.22 - Morfologias típicas e composição dos produtos da RAA obtidos com microscopia eletrônica de varredura - MEV (a) e espectrometria de raios X de energia dispersiva - EDX (b).....	88
Figura 3.23 – Esquema de extração da amostra a ser polida e analisada no MEV	89
Figura 3.24 - Micrografias em barras de argamassas confeccionadas com agregados de quartzito	90
Figura 3.25 – Argamassa preparada com quartzito apresentando o gel de RAA ao redor dos agregados.	90
Figura 3.26 - (A) materiais utilizados para a produção das barras de argamassa; (B) adição de material na argamassadeira; (C) barras de CPRs confeccionadas; (D) processo de adensamento utilizando a mesa flow; (E) barras dispostas verticalmente em solução de NaOH; (F) recipiente projetado para acondicionamento das amostras	94
Figura 3.27 – (A) materiais utilizados para confecção dos prismas; (B) mistura manual dos materiais; (C) adensamento com auxílio da mesa <i>flow</i> ; (D) aspecto final dos concretos após moldagem; (E) aspecto final dos prismas de concreto após a desmoldagem.	95
Figura 3.28 - Prismas posicionados na vertical no interior do recipiente (A); Recipientes acondicionados no interior da estufa à $(60\pm 2)^\circ\text{C}$ (B); Medidas de comprimento com auxílio de paquímetro (C).....	98

Figura 3.29 – Equipamento MEV utilizado para a realização dos estudos de microscopia	98
Figura 3.30 – Amostras de fragmentos de argamassas, concretos e CPRs fixadas no porta alumínio para realização da MEV.	99
Figura 3.31 - Síntese dos resultados de expansibilidade pelo método acelerado em barras de argamassa e CPR's.	101
Figura 3.32 - Análise da microestrutura das barras de argamassa e de CPR.	103
Figura 3.33 - Síntese dos resultados de expansibilidade pelo método de longa duração em prismas de concreto.	104
Figura 3.34 - Síntese dos resultados médios de expansibilidade pelo método acelerado em prismas de concreto.	105
Figura 3.35 - Fissuras generalizadas nas superfícies da amostra STL0 (padrão) destacadas na cor vermelha.	106
Figura 3.36 - Análise da microestrutura dos prismas de concreto.	107
Figura 4.1 - Avaliação da durabilidade para CUAD em comparação com o CAD e o concreto convencional.	112
Figura 4.2 – Comparação de texturas entre CAD e CPR	115
Figura 4.3 – Obras produzidas em CPR.	116
Figura 4.4 – longas cadeias laterais (A); efeito estérico (B); manutenção da trabalhabilidade do cimento (C).	121
Figura 4.5 - Ilustração esquemática dos mecanismos de funcionamento do VMA.	122
Figura 4.6 - Evolução da utilização de materiais de reforço em CUADs nas últimas 5 décadas.	123
Figura 4.7 - Curvas de deslocamento de diferentes fibras de aço submetidas à carregamento constante.	125

Figura 4.8 - Empacotamento esquemático de partículas de concreto convencional e CPR.....	126
Figura 4.9 - Perfil recomendado de distribuição granulométrica para os materiais constituintes do CPR.	126
Figura 4.10 - Modelos de empacotamento das partículas.	127
Figura 4.11 - Curvas comparativas tensão X deformação para agregado, concreto e pasta de cimento.	130
Figura 4.12 - Microestrutura compacta do CPR, com ausência da zona de transição, onde ao centro é apresentada a pasta de cimento (P), separada por grãos de agregado (G).....	131
Figura 4.13 - Porosimetria de Hg comparativa entre CC, CAD e CPR	131
Figura 4.14 – Diagrama tensão X deformação de diferentes concretos: convencional, de alto desempenho, de pós-reativos sem e com fibras, com e sem pressão confinante...	132
Figura 4.15 – (A) Pó separado para realização da granulometria por sedimentação; (B) Realização do ensaio de granulometria por sedimentação	134
Figura 4.16 - Frações granulométricas dos quartzitos separadas em laboratório para produção dos concretos.	136
Figura 4.17 - Ilustração do máximo empacotamento permitido pelos materiais (linha azul) e do empacotamento ideal de Andreassem Modificado (linha vermelha).....	137
Figura 4.18 - Ilustração do máximo empacotamento permitido pelos materiais (linha azul) e do empacotamento ideal de Andreassem Modificado (linha vermelha), referente às amostras de CPRs da Etapa 2.....	139
Figura 4.19 – Fluxograma dos estudos realizados com os CPRs na Etapa 1.	140
Figura 4.20 – CPRs moldados na Etapa 1, totalizando 132 corpos de prova.....	141

Figura 4.21 – CPRs moldados na Etapa 2, totalizando 57 (cinquenta e sete) corpos de prova.	142
Figura 4.22 – Fluxograma dos estudos realizados com os CPRs na Etapa 2	142
Figura 4.23 – Equipamento utilizado para retífica dos corpos de prova	144
Figura 4.24 - Prensa servo controlada utilizada nos ensaios mecânicos destrutivos....	146
Figura 4.25 - Posicionamento do corpo de prova de concreto para determinação da resistência à tração.....	146
Figura 4.26 – Prisma de CPR S/F posicionado na prensa elétrica hidráulica.	147
Figura 4.27 - Instrumentação dos corpos de prova de CPR's para determinação dos módulos de elasticidade.....	148
Figura 4.28 - Equipamento Sonelastic utilizado para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.	149
Figura 4.29 - Caracterização dos picos de frequência natural.....	150
Figura 4.30 – Exemplo de gráfico de probabilidade normal	153
Figura 4.31– Médias dos resultados de massa específica (A), resistência a compressão (B), resistência à tração (C), módulo de elasticidade dinâmico (D) e módulo de elasticidade estático (E).....	158
Figura 4.32 - Distribuições normais referentes aos ensaios de resistência à compressão (A), resistência à tração (B), módulo de elasticidade dinâmico (C) e módulo de elasticidade estático (D), das amostras de CPR's.....	160
Figura 4.33 – Comparação entre as médias dos resultados de módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.	162
Figura 4.34 - Correlação entre algumas das propriedades de interesse dos corpos de prova de CPR.....	168

Figura 4.35 - Análise de dispersão dos resultados obtidos dos CPRs, considerando a função discriminante 1 e a função discriminante 2 – Etapa 1.	172
Figura 4.36 - Análise de dispersão dos resultados obtidos dos CPRs, considerando a função discriminante 3 e a função discriminante 4 – Etapa 1.	173
Figura 4.37– resultados médios de massa específica (A), resistência a compressão (B), módulo de elasticidade dinâmico (C), módulo de elasticidade estático (D), resistência à tração na flexão (E) e resistência à tração por compressão diametral (F).	175
Figura 4.38 - Distribuições normais referentes aos ensaios de resistência à compressão axial (A), módulo de elasticidade dinâmico (B), módulo de elasticidade estático (C), resistência à tração na flexão (D) e resistência à tração por compressão diametral (E).	177
Figura 4.39 - Correlação entre a resistência à compressão axial e massa específica no estado endurecido analisados nas amostras de CPR's S/F (A) e nas amostras de CPR C/F (B).	181
Figura 4.40 - Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão axial analisados nas amostras de CPR's S/F (A) e nas amostras de CPR C/F (B) – Etapa 2.	182
Figura 4.41 - Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico analisados nas amostras de CPR's S/F (A) e nas amostras de CPR C/F (B) – Etapa 2.	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Pesquisas sobre CUADs e CPRs utilizando como componente o tradicional pó de quartzo industrializado.....	25
Tabela 2.1 - Reserva de quartzito nos municípios de Alpinópolis e de São Thomé das Letras.	32
Tabela 2.2 – Denominação e identificação dos rejeitos de quartzitos de São Thomé das Letras	38
Tabela 2.3 – Denominação e identificação dos rejeitos de quartzitos de Alpinópolis ...	41
Tabela 2.4 - Identificação, localização dos pontos de coleta e tipos de ocorrências de rejeitos de quartzitos de Alpinópolis	41
Tabela 2.5 – Denominação das amostras estudadas	43
Tabela 2.6 - Etapas de estudos, classificação dos agregados e ensaios realizados.....	44
Tabela 2.7 - Frações produzidas para a realização dos ensaios de caracterização, de RAA e de CPRs.	45
Tabela 2.8 – Frações granulométricas para ensaio de RAA- método acelerado	46
Tabela 2.9 – Frações granulométricas para ensaio de RAA- método de longa duração	47
Tabela 2.10 - Síntese da composição mineralógica das amostras de quartzitos de Alpinópolis.	51
Tabela 2.11 - Síntese da composição mineralógica das amostras de quartzitos de São Thomé das Letras.....	51
Tabela 2.12 – Índices físicos dos quartzitos e agregado de diabásio	55
Tabela 2.13 - Resultados das análises químicas do cimento CP-V-ARI - Holcim	59
Tabela 3.1 - Eventos internacionais realizados sobre RAA.	64
Tabela 3.2 - Síntese dos estudos de RAA realizados com quartzitos do Sul de Minas Gerais.....	65

Tabela 3.3 - Agregados potencialmente reativos.....	69
Tabela 3.4 - Classificação do grau de reatividade do agregado	73
Tabela 3.5 - Grau de risco de ocorrência da RAS	74
Tabela 3.6 - Grau de intensidade da medida preventiva (MP)	74
Tabela 3.7 - Medidas de mitigação da expansão devida a RAS.....	75
Tabela 3.8 - Requisitos de composição dos materiais inibidores	76
Tabela 3.9 - Classificação e quantificação dos agregados para produção das barras de argamassa.....	80
Tabela 3.10 - Traço de argamassa para confecção das barras para ensaio acelerado da RAA.....	81
Tabela 3.11 - Granulometria requerida do agregado graúdo.....	85
Tabela 3.12 - Síntese dos procedimentos de ensaios e respectivas normas.	91
Tabela 3.13 - Fator de conversão de Na ₂ O para NaOH.....	96
Tabela 3.14 - Relação de amostras e traços produzidos para ensaio de expansibilidade em prismas de concretos.....	96
Tabela 3.15 - Especificação dos cimentos utilizados na pesquisa e seus respectivos equivalentes alcalinos.	100
Tabela 3.16 - Síntese dos resultados de expansibilidade e da análise MEV.	108
Tabela 4.1 – Algumas pesquisas realizadas com rejeitos/resíduos industriais para produção de CPR/CUAD	117
Tabela 4.2 - Tipos, formas e dimensões de fibras de aço.....	124
Tabela 4.3 - Síntese das caracterizações físicas realizadas nos agregados e no cimento Portland.....	133
Tabela 4.4 - Dimensões granulométricas das frações pó e areia de quartzitos e respectivos percentuais adotados para produção dos CPRs – Etapa 1.	134

Tabela 4.5 - Frações granulométrica dos quartzitos utilizados na Etapa 2 para produção dos concretos.	135
Tabela 4.6 - Descrição dos traços estudados na Etapa 1 e respectivos consumos de cimento por m ³ de concreto.	138
Tabela 4.7 - Descrição dos traços estudados na Etapa 2 e respectivos consumos de cimento por m ³ de concreto.	139
Tabela 4.8 – Ensaios tecnológicos e quantidades de corpos de prova de CPRs.....	145
Tabela 4.9 - Parâmetros para análise do coeficiente de Pearson.	154
Tabela 4.10 - Resultados das médias, dos desvios padrão, dos coeficientes de variação, dos mínimos e dos máximos correspondentes as amostras analisadas de CPRs.....	159
Tabela 4.11 - Resumo das médias dos resultados obtidos nos CPRs correspondentes à Etapa 1, apresentados em ordem decrescente.....	163
Tabela 4.12 – Resultado da análise estatística de variância considerando os resultados das propriedades físico-mecânicas das amostras ALP 1, ALP 3, STL 2 e STL 3 – 1ª Etapa.	164
Tabela 4.13 - Resultados das comparações múltiplas de resistência à compressão das amostras de quartzitos utilizando o método Bonferroni.....	165
Tabela 4.14 - Resumo das correlações obtidas entre os CPRs produzidos com quartzitos – Etapa 1.	167
Tabela 4.15 - Análise discriminante dos CPRs realizada na Etapa 1 considerando os grupos CPRs (ALP1, ALP3, JUNU, STL2 e STL3) utilizando o total de 30 observações.	170
Tabela 4.16 - Funções discriminantes correspondentes aos grupos de amostras de CPRs.	171

Tabela 4.17 – Média, desvio padrão, coeficiente de variação, resultados máximos e mínimos referentes aos ensaios realizados nas amostras de CPR's.	176
Tabela 4.18 - Resumo das correlações obtidas entre as propriedades de resistência à compressão, massa específica, módulo dinâmico e módulo de elasticidade estático, referentes aos CPRs S/F – Etapa 2.	179
Tabela 4.19 - Resumo das correlações obtidas entre as propriedades de resistência à compressão, massa específica, módulo dinâmico e módulo de elasticidade estático, referentes aos CPRs C/F – Etapa 2.	180

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 JUSTIFICATIVA, RELEVÂNCIA AMBIENTAL E SOCIAL.....	23
1.2 OBJETIVOS	27
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	28
2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS QUARTZITOS.....	29
2.1 BREVE DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO SUL DE MINAS GERAIS.....	29
2.1.1 Sudeste de Minas Gerais	30
2.1.2 Sudoeste de Minas Gerais	31
2.2 LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS MINERAÇÕES DE QUARTZITOS EM ATIVIDADE NO SUDESTE E SUDOESTE DE MINAS GERAIS	31
2.2.1 Polo de São Thomé das Letras.....	32
2.2.2 Polo de Alpinópolis	35
2.3 LOCALIZAÇÃO DA MINERAÇÃO DE DIABÁSIOS	37
2.4 COLETA DAS AMOSTRAS DE QUARTZITOS	38
2.4.1 Coleta no Polo de São Thomé das Letras	38
2.4.2 Coleta no Polo de Alpinópolis.....	40
2.4.3 Denominação das amostras constituídas	42
2.5 CARACTERIZAÇÕES PETROLÓGICAS E MINERALÓGICAS	43
2.6 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS	44
2.7 PRODUÇÃO DE AGREGADOS EM LABORATÓRIO (ETAPA 1)	45
2.7.1 Produção da fração miúda para ensaio RAA pelo método acelerado..	46
2.7.2 Produção da fração graúda para ensaio de RAA pelo método de longa duração.....	47
2.8 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS.....	47
2.8.1 Índices físicos dos agregados.....	48
2.8.2 Determinação da massa específica do cimento Portland	49
2.8.3 Análise granulométrica por sedimentação.....	49
2.8.4 Composição química do cimento Portland.....	50
2.9 RESULTADOS.....	50
2.9.1 Petrografia dos quartzitos	50

2.9.2 Petrografia do Diabásio	53
2.9.3 Índices Físicos dos materiais rochosos	55
2.9.4 Análises granulométricas por peneiramento e sedimentação.....	55
2.9.4.1 Granulometrias da fração pulverulenta.....	56
2.9.4.2 Granulometrias da fração areia (miúda).....	57
2.9.5 Análise química do cimento Portland.....	58
2.10 CONCLUSÕES PARCIAIS	60
3 REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO	62
3.1 HISTÓRICO DA PATOLOGIA E ESTUDOS REALIZADOS	62
3.1.1 Estudos da RAA no Brasil	63
3.1.2 Eventos científicos realizados sobre RAA	63
3.1.3 Estudos de RAA com Quartzitos do Sul de Minas	64
3.2 TIPOS DE OCORRÊNCIA DA RAA	65
3.2.1 Reação álcali-sílica	67
3.2.2 Reação álcali-silicato.....	68
3.2.3 Reação álcali-carbonato	69
3.3 ALGUNS EXEMPLOS DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE RAA	70
3.4 MEDIDAS PREVENTIVAS DA RAA E GRAU DE RISCO DE OCORRÊNCIA.....	73
3.4.1 Medidas de mitigação.....	75
3.5 MÉTODOS DE ENSAIO PARA DIAGNÓSTICO DA RAA	77
3.5.1 Análise Petrográfica do Agregado	78
3.5.2 Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.....	80
3.5.3 Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método de longa duração.....	84
3.5.4 Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.....	87
3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	88
3.6 MATERIAIS E MÉTODOS	91
3.6.1 Cimentos	92
3.6.2 Expansão em barras de argamassa e de CPRs pelo método acelerado	92
3.6.3 Expansão em prismas de concreto pelo método de longa duração e acelerado.....	94
3.6.4 Análise da microestrutura utilizando MEV	98

3.7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	100
3.7.1 Composição dos equivalentes alcalinos dos cimentos.....	100
3.7.2 Expansibilidade em barras de argamassa e de CPR's pelo método acelerado e análise em MEV	101
3.7.3 Expansibilidade em prismas de concreto pelo método de longa duração	104
3.7.4 Expansibilidade em prismas de concreto pelo método acelerado e análise em MEV	105
3.8 CONCLUSÕES PARCIAIS	109
4 CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO – CUAD.....	111
4.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE OS CUADs.....	111
4.2 CONCRETO DE PÓS REATIVOS - CPR.....	113
4.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DE CPR	117
4.3.1 Materiais cimentícios suplementares.....	117
4.3.1.1 Cimento	118
4.3.1.2 Sílica ativa.....	118
4.3.1.3 Pó de quartzo	119
4.3.2 Aditivos.....	120
4.3.2.1 Aditivo redutores de água (superplastificantes).....	120
4.3.2.2 Aditivo modificador de viscosidade	121
4.3.3 Fibras	122
4.4 DOSAGEM E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	125
4.5 PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DO CPR	128
4.5.1 Propriedades no estado fresco.....	128
4.5.2 Propriedades no estado endurecido	129
4.6 MATERIAIS E MÉTODOS	132
4.6.1 Definição das frações granulométricas correspondente a Etapa 1....	133
4.6.2 Definição das frações granulométricas correspondente a Etapa 2....	135
4.6.3 Dosagem dos CPRs pelo método de empacotamento dos grãos.....	136
4.6.4 Confeção de concreto em laboratório.....	140
4.6.5 Cura dos corpos de prova de CPRs	143
4.6.6 Retífica dos corpos de prova de CPR's.....	143
4.6.7 Caracterização tecnológica dos CPRs	144
4.6.7.1 Resistência à compressão uniaxial.....	145

4.6.7.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	146
4.6.7.3 Ensaio de resistência à tração na flexão em prismas de concreto	147
4.6.7.4 Módulo de elasticidade estático	148
4.6.7.5 Módulo de elasticidade dinâmico	149
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS	151
4.7.1 Testes de Hipóteses	152
4.7.2 Testes de normalidade e análise de correlação	153
4.7.3 Análise de Variância (ANOVA)	155
4.7.4 Análise Discriminante	156
4.8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	157
4.8.1 Estudos realizados na Etapa 1	157
4.8.1.1 Análise estatística de variância (ANOVA) - Etapa 1.	163
4.8.1.2 Correlações entre as propriedades físico-mecânicas dos CPRs – Etapa 1	166
4.8.1.3 Análise discriminante – Etapa 1	170
4.8.1.4 Funções discriminantes ou canônicas	171
4.8.2 Estudos realizados na Etapa 2	174
4.8.2.1 Apresentação dos resultados das propriedades físico-mecânicas dos CPRs, correspondentes à Etapa 2.	174
4.8.2.2 Correlações entre as propriedades físico-mecânicas dos CPRs – Etapa 2	179
4.8.2.3 Correlação entre resistência a compressão axial e massa específica dos CPR S/F e dos CPR C/F - Etapa 2.	180
4.8.2.4 Correlação entre módulo de elasticidade estático e resistência a compressão axial dos CPR S/F e dos CPR C/F - Etapa 2.	181
4.8.2.5 Correlação entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico dos CPR S/F e dos CPR C/F - Etapa 2	183
4.9 CONCLUSÕES PARCIAIS	184
5 CONCLUSÃO.....	186
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	188
APÊNDICE A	203
APÊNDICE B.....	214

1 INTRODUÇÃO

Minas Gerais é reconhecida nacionalmente como um estado grande produtor de quartzitos. Também conhecidos como “pedra mineira”, os quartzitos são bastante utilizados como rocha de revestimento e decoração na construção civil, em formatos tais como os de placas, filetes e de pequenos fragmentos prismáticos empregados na confecção de mosaicos (ABIROCHAS, 2021). O Sul de Minas, que abarca o sudoeste e o sudeste do Estado, é a principal região produtora desta matéria-prima. O grande centro produtor a sudeste localiza-se no município de São Thomé das Letras e o da região sudoeste, no município de Alpinópolis, razão pela qual tais cidades foram escolhidas como cenário desta pesquisa (FEAM, 2015).

Durante a mineração de quartzitos são gerados grandes volumes de rejeitos, cujo volume pode ultrapassar a marca de 90 % do material extraído. Isto acontece porque o quartzito comercializável é extraído em placas padronizadas, que atendem a padrões de espessura, largura e comprimento. O rejeito gerado nos processos de lavra e de beneficiamento da “pedra mineira”, portanto, constitui um grave problema para os empreendedores, dados os impactos socioambientais negativos, tais como: desconfiguração da paisagem, alterações na conformação natural do relevo, assoreamento dos corpos d’água, supressão da vegetação nativa, instabilidade em taludes de rejeitos de mineração, dentre outros (FRANCKLIN JUNIOR et al., 2021; REIS et al., 2020). É o que demonstra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – Geração de rejeitos nas minerações de quartzitos do sudoeste mineiro.



Fonte: O Autor (2022)

Nota: (A) Extração de placas de quartzitos; (B) Rejeitos no interior das minerações; (C) Formação de grandes volumes de rejeitos no entorno das áreas de extração de placas.

Por outro lado, os rejeitos de quartzitos, se submetidos aos padrões normativos vigentes para uso de materiais rochosos na construção civil, podem converter-se em matéria-prima valorosa. É o caso, entre outras possibilidades, do seu emprego como componente do concreto.

Francklin Júnior (2009), ao estudar os rejeitos de quartzitos de minerações do sudoeste mineiro, constatou viabilidade técnica do uso deles como agregado no concreto, após realizações de caracterização tecnológica dos agregados, de reatividade potencial álcali-agregado e resistência mecânica em corpos-de-prova de concreto. Estes estudos renderam outras publicações científicas nacionais: Collares et al. (2008), Ramirio et al. (2008), Francklin Junior et al. (2008), Cândido e Francklin Junior (2009), Francklin Junior et al. (2009), Francklin Junior et al. (2011) e Fonseca (2012), e de igual destaque, três publicações internacionais: Collares et al. (2012), Francklin Junior et al. (2019) e Francklin Junior et al. (2021).

Outros estudos sobre rejeitos de quartzitos provenientes do estado de Minas Gerais foram publicados, o que indicia a pertinência do assunto, destacando-se a seguir alguns deles. Reis (2016) realizou o estudo sobre a viabilidade do uso de rejeitos de mineração de quartzitos do sudoeste mineiro como agregados, graúdo e miúdo, para a produção de peças de concreto para pavimentação. Grilo et al. (2017) e Corrêa et al. (2020) realizaram o estudo sobre a viabilidade do uso do agregado fino de rejeitos de mineração de quartzitos em misturas com solo laterítico argiloso, como base de pavimentos para vias com baixo volume de tráfego. Russo (2011) pesquisou o uso de rejeitos de quartzitos como agregado miúdo na produção de peças de concreto, de argamassas e de materiais para base e sub-base de pavimentação, tendo obtido resultados satisfatórios. Alecrim (2009) investigou a utilização de rejeitos de quartzitos provenientes dos municípios mineiros de Alpinópolis, São José da Barra, São João Batista do Glória e Guapé, como material para base e sub-base de pavimentos flexíveis, com ênfase nos ensaios de compactação proctor normal, índice de suporte Califórnia e resiliência. Ramirio et al. (2008) realizaram estudos sobre a caracterização tecnológica da fração graúda dos rejeitos de quartzitos, comparando-a com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no sudoeste de Minas Gerais. Por sua vez, Pinheiro (2003) realizou estudos de utilização de rejeitos de quartzitos, coletados em apenas uma das pedreiras da região de Alpinópolis, para determinação de algumas propriedades do concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA, RELEVÂNCIA AMBIENTAL E SOCIAL

Notadamente, os estudos sobre as possibilidades de uso, pela construção civil, dos rejeitos da exploração de quartzitos explorados no Sul do Estado de Minas Gerais, em sua maioria são dedicados aos usos possíveis da fração graúda dos rejeitos. Restam pouco estudadas as possibilidades representadas pela fração fina e pulverulenta da rocha, para que se alcance o aproveitamento integral dos quartzitos. Assim, nesta pesquisa a investigação concentra esforços na questão de avaliar a viabilidade e a eficácia do uso da fração fina e do pó dos quartzitos como materiais integrantes em concretos de ultra-alto desempenho (CUADs), especificamente os concretos de pós reativos (CPRs).

Os CPRs são uma grande inovação tecnológica do mercado da construção civil. Os materiais empregados em sua composição, de granulometria fina, com dimensão máxima característica (DMC) de 2 mm e pós - *filler* -, combinados com aditivos químicos de última geração, adições de micro e de nano sílica e de pó de quartzo, reduziram a níveis nunca antes vistos a porosidade interna do concreto (ZHANG et al., 2021; BESSAIES-BEY et al., 2022). A técnica de preparação dos CPRs considera detalhes finos, como o empacotamento das partículas, visando a obtenção da melhor compactação possível da mistura. Estes condicionantes conferem aos CPRs resistências à compressão que ultrapassam 120 MPa e podem chegar a 800 MPa, compatíveis, por exemplo, a materiais metálicos como o aço (C1856 ASTM, 2017; RICHARD e CHEYREZY, 1995; TUTIKIAN et al., 2011).

De acordo com Vanderlei (2004), as primeiras pesquisas relevantes com CPR foram desenvolvidas no início da década de 1990, por Behloul et al. (1996), que propôs uma lei do comportamento do CPR baseada em estudos realizados antes por Dugat et al. (1995). Bina (1999) reporta que França e Canadá foram os países pioneiros no desenvolvimento do CPR. Os estudos objetivaram desenvolver um composto que substituísse o concreto de alto desempenho (CAD), de qualidade tal que, em certos casos, pudesse competir até mesmo com o aço. A primeira grande estrutura executada com CPR, segundo Formagini (2006), foi uma passarela na cidade de Sherbrooke, no Canadá. Ela foi edificada em 1997, sob a batuta de Pierre Claude Aïtcin, professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Sherbrooke. Desde então, países como os Estados Unidos e o Canadá e continentes como a Europa e a Ásia vêm produzindo estruturas utilizando o CPR, tecnologia hoje considerada de ponta, adequada para atender a exigências notadamente industriais e militares.

No Brasil, entretanto, ainda existem poucas obras executadas utilizando o CPR. Segundo Tutikian (2015) e Zhang et al. (2021), apesar das já mencionadas pesquisas acadêmicas com o material, existe ainda a necessidade de se testar novos compostos, para que se torne viável a adoção deste tipo de concreto pelo mercado nacional de construção civil. Faltam, por exemplo, estudos conclusivos sobre as dificuldades apresentadas pelo CPR em estado fresco, principalmente com relação às alterações dos aspectos de consistência e de viscosidade, ambos decisivos para se determinar os tempos de trabalhabilidade para transporte, lançamento e adensamento.

É o contexto descrito anteriormente que justifica a contribuição desta pesquisa. Nela se discute a dosagem ideal para se atingir boas propriedades do CPR no estado fresco, a partir da incorporação, como agregado, dos rejeitos de mineração de quartzitos do Sul de Minas Gerais. Os quartzitos, caso se comportem positivamente como componente do CPR, atenderão a uma dupla finalidade: contribuirão para a mitigação dos impactos ambientais da exploração pela minimização da produção de rejeitos, além de se oferecerem como material alternativo a produção de CUADs.

A hipótese do uso de rejeitos quartzito como agregado para CPR tem o respaldo de outros estudos, uma vez que sua composição apresenta pelo menos 95 % de quartzo. Nos estudos realizados por Alkhalay et al. (2021), foi verificado um bom comportamento do pó de quartzito na produção de CPRs. Na ocasião, os referidos autores adotaram o processo de cura normal com temperatura de 28° C, a análise de empacotamento de partículas e a otimização dos consumos de sílica ativa e de areia de quartzo, que resultaram em melhorias expressivas da resistência à compressão e com um baixo consumo de cimento = 636,67 kg/m³ de concreto. Lee e Chisholm (2005) relataram em seus estudos experimentais, realizados na Nova Zelândia, os benefícios da adição do pó de quartzo para composição do CPR. Eles registraram que o pó de quartzo permitiu a redução do teor de cimento, ajustando a proporção de CaO e SiO na zona de transição, o que favoreceu a cura térmica do concreto e o aumento de sua resistência à compressão, esta superior a 200 MPa. Já Richard e Cheyrezy (1995) demonstraram com suas pesquisas que os grãos de pó de quartzo com dimensões entre 5 µm e 25 µm apresentam máxima reatividade quando submetidos a elevadas temperaturas de cura, o que potencializa o desempenho mecânico do CPR. Outras pesquisas de igual destaque e realizadas com o pó de quartzo são informadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Pesquisas sobre CUADs e CPRs utilizando como componente o tradicional pó de quartzo industrializado.

Autores	Objeto de estudo
Tavares et al. (2020)	Foi analisada a influência da substituição de 20 % de cimento Portland por pó de quartzo de diâmetro médio de 20 µm nas propriedades de compósitos cimentícios desde as primeiras horas de hidratação até alguns meses de cura.
Menezes et al. (2018)	Foram avaliadas as fases presentes em compostos cimentícios produzidos com pastas cimentícias com 15 % de substituição do cimento Portland pelo pó de quartzo (área específica 37,4 m ² /g).
He et al. (2017)	Foram realizados estudos da composição, da morfologia e da estrutura dos produtos de hidratação em pastas endurecidas de três tipos de cimentos mistos com adições de: sílica ativa; pó de quartzo; sílica ativa e quartzo em pó. Estes hidratados sob diferentes regimes de cura.
Tutikian (2015)	Realização de estudos para produção de peças pré-fabricadas em CPR, em especial a fabricação de uma caixa para uso em estação de tratamento de esgoto.
Christ (2014)	Foram realizados estudos objetivando o desenvolvimento de compósitos cimentícios à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e substituição parcial do cimento Portland por cinza volante.
Sujatha e Basanthi (2014)	Foram realizados estudos em concretos modificados de pós reativos com a incorporação de agregados com graduação entre 3 mm e 8 mm.
Oliveira et al. (2013)	Foram realizados estudos de dosagem de um concreto de alto desempenho em laboratório, utilizando os conceitos de reologia.
Enami e Carrazedo (2013)	Foram avaliados os benefícios e desvantagens do emprego de camisas de concreto de ultra alto desempenho no reforço de pilares curtos de concreto armado em conjunto com técnicas que mobilizam o efeito de confinamento do material.
Mallmann (2013)	Foram realizados estudos do comportamento da nanosílica aplicada em concreto de pós reativos, analisando as propriedades físicas e mecânicas.
Yunsheng et al. (2008)	Foram realizados estudos de propriedades mecânicas em concreto sustentável de pós reativo com resistência à compressão de 200MPa, preparado com uso de aditivos minerais compostos, agregados finos naturais, fibras de aço curtas e finas.

Fonte: O Autor (2022)

Assim, é uma proposta inovadora deste projeto que seu objeto principal seja a produção de CPRs utilizando-se a fração fina e o pó dos rejeitos de quartzitos. Ocorre que o pó de quartzitos contém elevado percentual de sílica, o que pode contribuir positivamente para a

formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e para o empacotamento das partículas do CPR.

A reatividade potencial álcali-agregado (RAA), ou seja, a reação dos álcalis do cimento (Na e K) com a sílica dos agregados podem produzir um gel expansivo no interior da estrutura do concreto. Contudo, a RAA também é um ponto sensível, que demanda estudos, em virtude de indícios da possibilidade deletéria da reação dos quartzitos combinados aos álcalis do cimento, haja visto que os primeiros, pela sua gênese e história metamórfica - deformação do quartzo - é uma rocha naturalmente reativa. Estudos realizados por Pinheiro (2003) e Francklin Junior (2009), tendo por objeto os quartzitos do sudeste mineiro, demonstraram um comportamento de possibilidade deletéria nas amostras. Entretanto, tais estudos limitaram-se à utilização do ensaio acelerado, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma técnica C-1260 (ASTM, 1994). Outro estudo investigativo sobre o tema, desenvolvido por Hasparyk (2005), foi realizado em uma grande barragem da UHE-Furnas, localizada no município mineiro de São José da Barra. Sua estrutura foi construída na década de 1950, com uso de quartzitos e cimentos com alto teor de álcalis (Na e K) e, segundo a referida autora, a formação do gel expansivo - patologia - só acontece quando a estrutura de concreto está em contato direto com água, tendo sido detectadas as formações do gel exsudado em alguns pontos da barragem, conforme apresentado na Figura 1.2. O estudo também propôs métodos preventivos e inibidores da reação, para que se evite danos estruturais.

Figura 1.2 - Detalhe do gel exsudado na superfície da estrutura de concreto da UHE-Furnas.



Fonte: Hasparyk (2005)

Em uma perspectiva panorâmica, dentre os benefícios da realização desta pesquisa destacam-se os seguintes aspectos:

- a) O uso alternativo dos quartzitos poderá contribuir para a diminuição do material destinado ao bota-fora e, conseqüentemente, reduzir os impactos ambientais negativos já citados anteriormente;
- b) Do ponto de vista econômico, o mercado poderá contar com um novo tipo rochoso para uso na construção civil, com baixo custo, uma vez que não demandará dos encargos necessários para a abertura de uma nova jazida;
- c) Quanto ao aspecto social, o uso alternativo dos quartzitos como agregado de CPRs poderá revigorar as minerações, as quais poderão reintegrar seus funcionários demitidos pela atividade irregular do empreendimento ou por força da exaustão do mercado tradicional de pedras para revestimento;
- d) Diferentemente da grande maioria dos estudos existentes sobre usos dos rejeitos de quartzitos, que propõe destinações alternativas, este projeto mira uma destinação nobre para o rejeito, raramente possível para outros materiais de valor econômico compatível.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi determinar a potencialidade reativa álcali-agregado dos rejeitos de quartzitos provenientes de minerações do Sul de Minas Gerais, a sudeste no município de São Thomé das Letras e a sudoeste em Alpinópolis, e estudar a possibilidade do uso das frações finas e pós destes rejeitos como compostos na fabricação de concretos de ultra-alto desempenho, para que se afira a viabilidade de uma destinação nobre para estes materiais que, atualmente, produzem impactos ambientais negativos nas minerações e unidades de processamento desta rocha.

Como objetivos específicos citam-se:

- a) Levantar e caracterizar os diferentes tipos de rejeitos de quartzitos produzidos em minerações do Sul de Minas Gerais;
- b) Caracterizar as principais variações petrográficas e texturais dos quartzitos encontrados nas pilhas de rejeitos produzidos em minerações do Sul de Minas Gerais;
- c) Classificar pela granulometria as amostras selecionadas para estudos e produzir as frações finas e pós de quartzitos processados em laboratório;

- d) Avaliar propriedades tecnológicas básicas dos quartzitos selecionados, com a finalidade de se verificar a sua adequabilidade ao uso como agregado e de se aferir as características necessárias para a dosagem e produção de CPRs;
- e) Selecionar o método de empacotamento de partículas dos grãos que oferece uma mistura com elevada compacidade para produção dos CPRs;
- f) Dosar diferentes concretos através de método de empacotamento dos grãos, objetivando atingir valores de resistência da classe dos ultra-alto desempenho;
- g) Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos CPR's compostos com quartzitos com e sem reforço de fibras metálicas;
- h) Realizar uma análise estatística discriminante multivariada para determinar o grau de significância dos resultados físicos e mecânicos das diferentes amostras de CPRs;
- i) Analisar a potencialidade deletéria dos quartzitos submetidos à ensaios de RAA, utilizando diferentes métodos de expansibilidade em barras de argamassa e em prismas de concretos;
- j) Analisar a microestrutura e a formação de patologias nas amostras de argamassas e concretos atacadas pela RAA, com recurso ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente pesquisa foi estruturada de forma que cada um dos temas que norteiam a proposta metodológica pudesse ser consultado de maneira independente, sem a necessidade do conhecimento global da pesquisa para o entendimento e a aplicação das partes. No Capítulo 2 são apresentadas as descrições geológica e geográfica dos sítios onde foram coletadas as amostras, além da caracterização física dos rejeitos de quartzitos. Os Capítulos 3 e 4, desenvolvidos na forma de artigos técnicos, apresentam a revisão bibliográfica, a metodologia, os resultados e as discussões. Mais especificamente, no Capítulo 3 são apresentados os estudos realizados nos quartzitos para análise da potencialidade reativa álcali-agregado utilizando diferentes metodologias de investigação. Já no Capítulo 4 são apresentados os estudos tecnológicos realizados em concretos de pós reativos (CPRs) produzidos com amostras de quartzitos, incluindo análises estatísticas discriminantes multivariadas para interpretação do grau de significância das diferenças obtidas dos resultados. No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e recomendações de trabalhos futuros visando a continuidade da pesquisa.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS QUARTZITOS

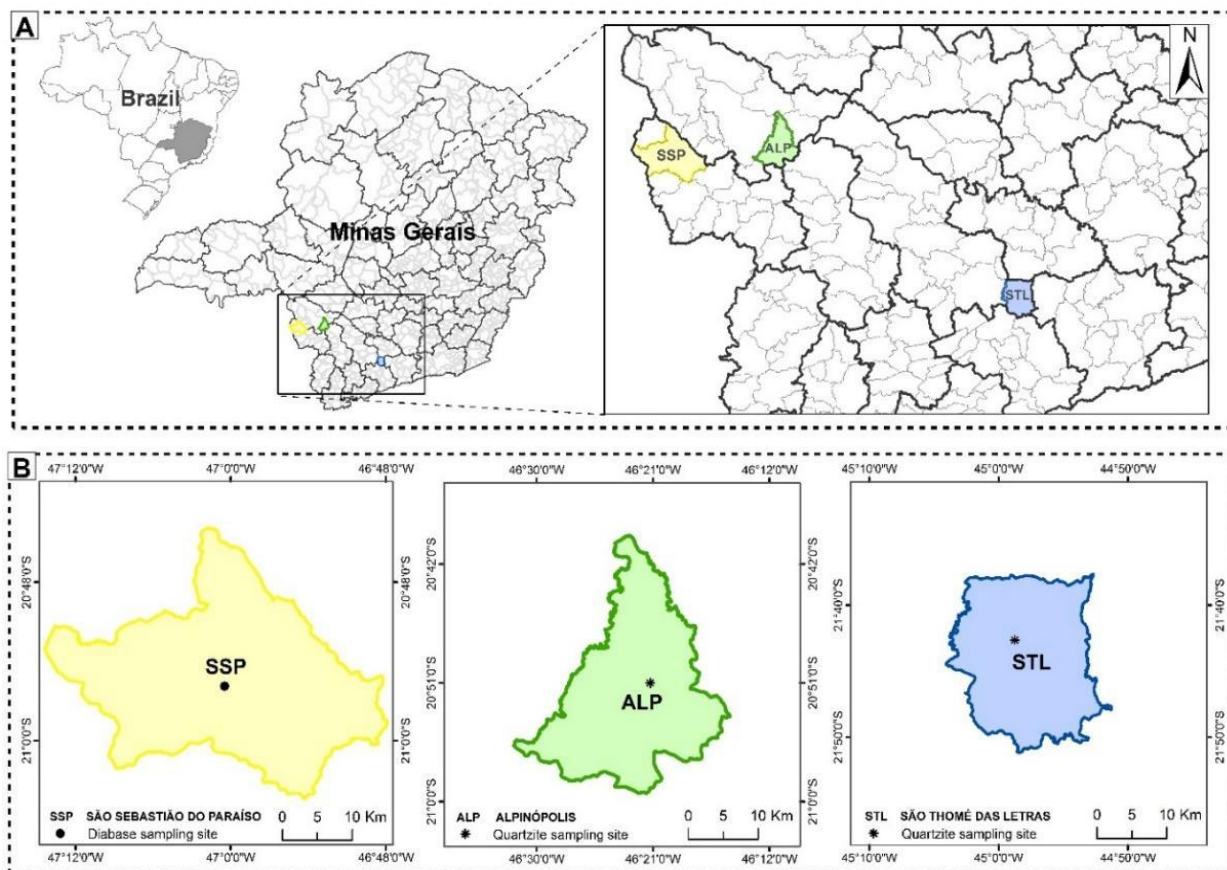
Nesta seção é apresentada uma descrição da área e dos materiais arrecimentados para a pesquisa, contemplando as seguintes etapas:

- a) breve descrição do arcabouço geológico do Sul de Minas Gerais;
- b) levantamento das principais minerações de quartzitos em atividade no Sul de Minas Gerais;
- c) coleta das amostras de quartzitos das principais minerações em atividade no Sul de Minas Gerais;
- d) caracterizações petrológicas e mineralógicas das amostras de quartzitos selecionadas;
- e) definição das etapas para realização dos ensaios tecnológicos a que serão submetidos os quartzitos selecionados;
- f) produção dos agregados em laboratório; e
- g) caracterização física dos materiais constituídos.

2.1 BREVE DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO SUL DE MINAS GERAIS

Nas regiões sudeste e sudoeste do Sul de Minas Gerais existem grandes polos produtores de quartzitos, que o exploram e comercializam para uso na construção civil. A mesorregião Sul Mineira é composta das seguintes microrregiões: Alfenas, Andrelândia, Itajubá, Passos, Poços de Caldas, Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Varginha (IBGE, 1990). Os rejeitos de quartzitos utilizados nesta pesquisa foram selecionados e coletados nas pilhas de bota-foras de minerações localizadas nos municípios de São Thomé das Letras (STL) e de Alpinópolis (ALP), incluindo também quartzitos previamente britados e classificados por empresa do setor. No presente estudo, um diabásio explotado em pedra situada na região do município mineiro de São Sebastião do Paraíso (SSP) foi a rocha referência para fins comparativos, pois trata-se de um material amplamente comercializado como agregado para concreto na região sudoeste do estado de Minas Gerais, conforme se vê na Figura 2.1.

Figura 2.1 – (A) Localização da área de estudo e espacialização das microrregiões e municípios do estado de Minas Gerais; (B) Mapas de localização com áreas de amostragem de rejeitos de mineração de quartzito e de diabásio referentes aos municípios de São Thomé das Letras (STL), Alpinópolis (ALP) e São Sebastião do Paraíso (SSP).



Fonte: O Autor (2022)

2.1.1 Sudeste de Minas Gerais

No sudeste de Minas Gerais foram estudados os quartzitos dos Grupos Carrancas/São João del Rei e Andrelândia, que afloram em algumas localidades desta região.

O Grupo Carrancas/São João del Rei, segundo Trouw et al. (1980), é dividido em duas unidades litoestratigráficas: as formações São Thomé das Letras e Campestre. A Formação São Thomé das Letras é constituída por quartzitos com mica esverdeada, enquanto que a Formação Campestre é marcada pela alternância de quartzitos e filitos, ou xistos grafitosos. De acordo com Chiodi Filho et al. (2005), a Formação São Thomé das Letras tem como principal

constituente litológico um quartzito micáceo, formado em sua essência por quartzo, mica esverdeada, turmalina preta, magnetita, ilmenomagnetita e hematita.

O Grupo Andrelândia é formado essencialmente por quartzitos, filitos e xistos grafitosos, localmente com biotita, muito semelhantes aos do Grupo Carrancas, exceto pela biotita xistos, semelhantes à mesma rocha do Grupo São João del Rei (RIBEIRO e HEILBRON, 1982). O feldspato de origem metassedimentar é bem distribuído por toda a sequência geológica, enquanto, mais restritos, os anfibolitos e talco tremolita-clorita xistos ocorrem intercalados aos metassedimentos.

2.1.2 Sudoeste de Minas Gerais

Do sudoeste de Minas Gerais foram estudados os quartzitos dos grupos Grupo Canastra e Araxá, que afloram em algumas localidades da região. Quanto às características do meio físico, no referido grupo apresentam-se as unidades geomorfológicas (CETEC, 1983): Planalto Dissecado do Sul de Minas; Serra da Canastra; e Depressão do Rio Grande. A geologia da região se caracteriza pela presença de rochas metamórficas - xistos, gnaisses e quartzitos - e os solos são constituídos, predominantemente, por latossolos amarelo, vermelho-amarelo e vermelho escuro. Localmente ocorrem cambissolos e solos podzólicos. Nas regiões das minerações predominam solos litólicos e areia quartzosa (COMIG, 2003).

2.2 LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS MINERAÇÕES DE QUARTZITOS EM ATIVIDADE NO SUDESTE E SUDOESTE DE MINAS GERAIS

Nesta etapa foi realizado um levantamento para identificar as minerações de quartzitos em atividade em Minas Gerais, por meio de dados cadastrais da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), além do recurso à fotointerpretação de imagens de satélite.

Segundo o DNPM, no Anuário Mineral (DNPM, 2016), consta que Minas Gerais tem 802.161.032 toneladas de reservas medidas de quartzitos ornamentais lavráveis. Grande parte dessas reservas estão nos municípios de São Thomé das Letras, Alpinópolis, Capitólio,

Sacramento e São João Batista da Glória. Os valores destas reservas correspondentes aos municípios de Alpinópolis e São Thomé das Letras estão indicados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Reserva de quartzito nos municípios de Alpinópolis e de São Thomé das Letras.

MUNICÍPIOS	RESERVAS (m ³)			
	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
Alpinópolis	26.433.689	23.051.363	58.719.140	26.433.689
São Thomé das Letras	82.189.963	39.278.757	44.268.661	67.201.803

Fonte: DNPM (2016)

O levantamento também definiu as minerações para coleta de amostras, considerando a expressividade de volume de produção, disposição dos rejeitos no interior das minerações e acesso ao local para coleta das amostras. Os locais escolhidos estão descritos a seguir segundo suas caracterizações geológica e ambiental. Os grandes polos produtores escolhidos para coleta das amostras foram:

a) Polo de São Thomé das Letras: Mineração Bico do Gavião

b) Polo de Alpinópolis: Mineração Planalto Pedras

2.2.1 Polo de São Thomé das Letras

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população do município de São Thomé das Letras, em 2021, era estimada em 7.151 habitantes, distribuída em uma área de 370 km². A área urbana do município fica no topo de uma montanha, a uma altitude de 1.480 m acima do nível do mar. Os principais rios locais são o Peixe e o Caí, que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Grande. E a mineração de quartzitos é um dos principais motores econômicos da jurisdição. Na Figura 2.2 é apresentada uma imagem de satélite ilustrando as minerações de quartzito do entorno da zona urbana do município de São Thomé das Letras.

Figura 2.2 – Imagem de satélite das minerações de quartzito localizada no entorno da zona urbana no município de São Thomé das Letras-MG.

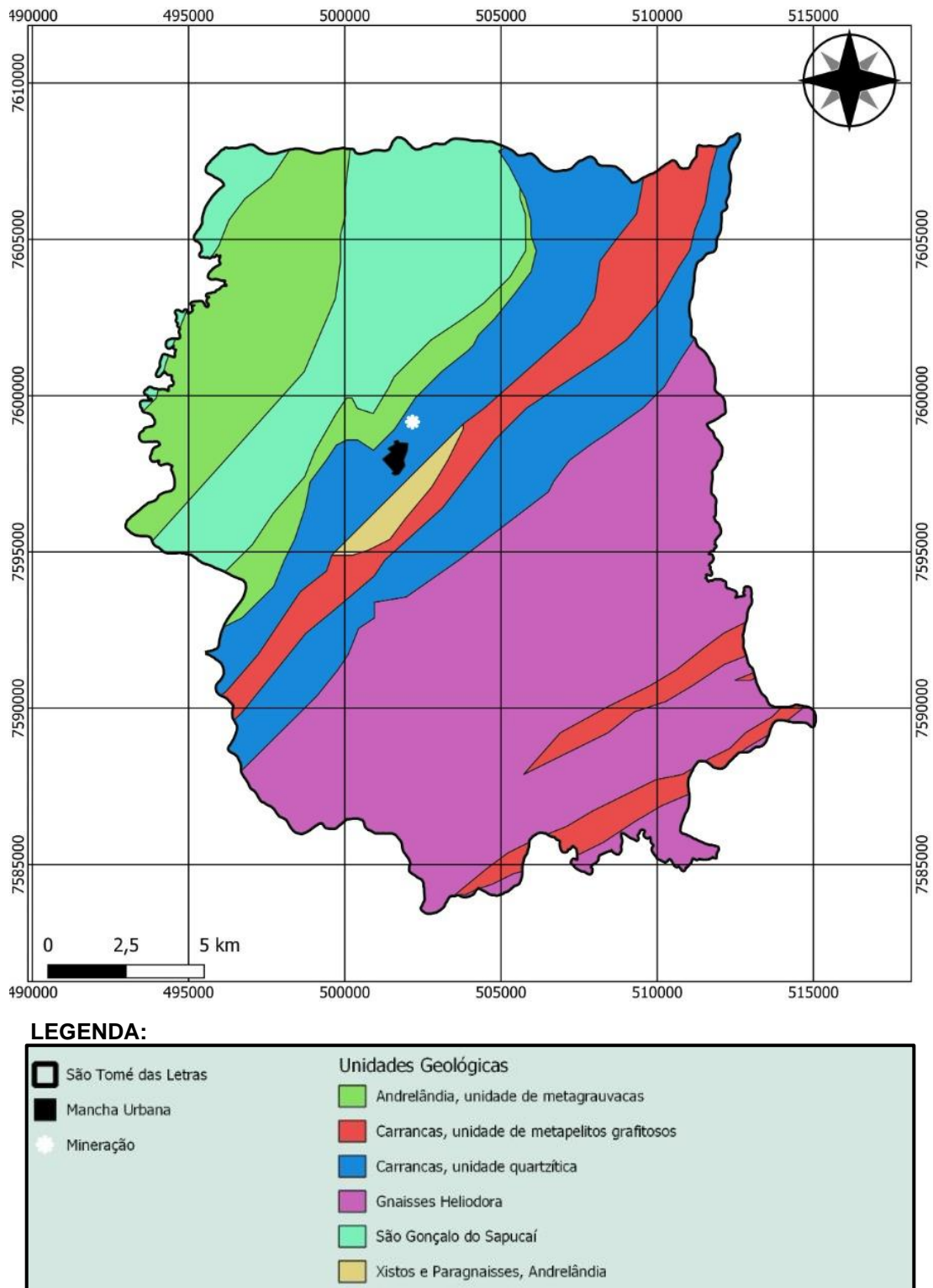


Fonte: Google Earth Pró (2022)

As amostras de rejeitos de quartzitos foram coletadas nos bota-foras da Mineração Bico do Gavião, sob acompanhamento do senhor Tônico Machado, então presidente da Associação das Empresas Mineradoras Beneficiadoras e de Comércio de Quartzito da Região de São Thomé das Letras (AMIST), localizada neste município que é considerado o principal do polo produtor da região.

A Figura 2.3, seguir, apresenta um mapa geológico do município de São Thomé das Letras. Nele estão descritas as formações rochosas e a localização da mineração de quartzitos onde foram coletadas as amostras.

Figura 2.3 – Mapa Geológico do município de São Thomé das Letras-MG.



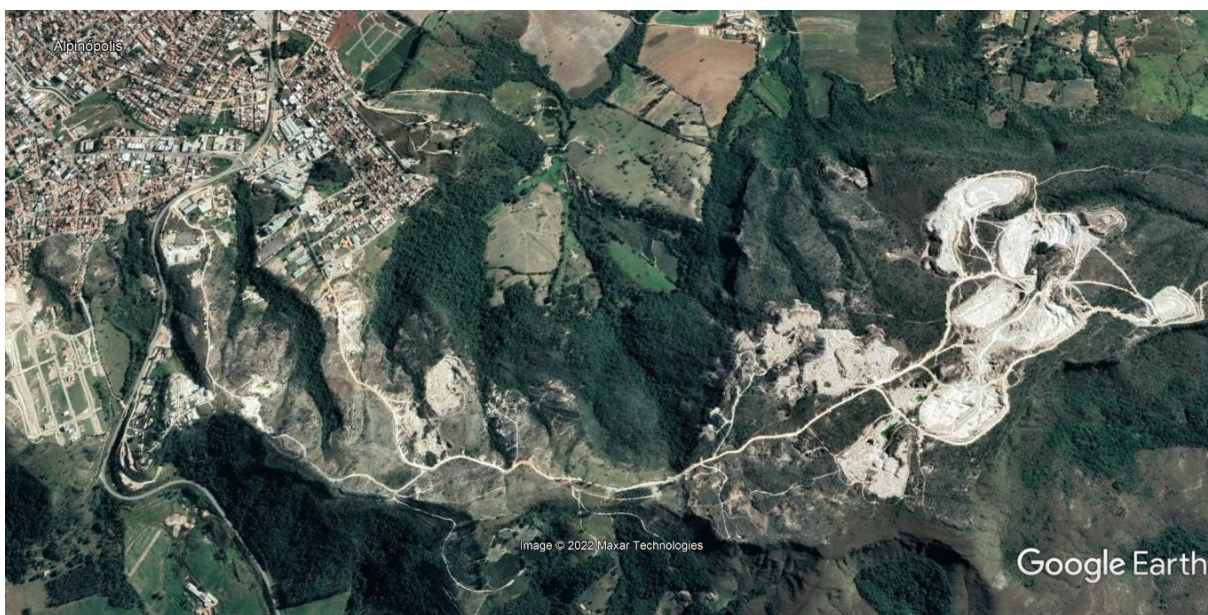
Fonte: IDE-Sisema (2022).

2.2.2 Polo de Alpinópolis

De acordo com dados do IBGE, estimou-se no ano de 2021 a população de Alpinópolis em 20.059 habitantes, residentes em uma área de 460,69 km², mais conhecida em sua região como “Ventania”, por ter se originado onde no passado existiu a Fazenda da Ventania, assim denominada por influência da serra homônima que faz parte do Município. A mineração de quartzitos está entre os principais atrativos econômicos da jurisdição.

A mineração escolhida para a coleta das amostras de rejeitos de quartzitos no Polo de Alpinópolis-MG é conhecida como “Planalto Pedras” e é de propriedade do senhor Ronaldo Ribeiro de Paula. A Figura 2.4 apresenta uma imagem de satélite mostrando minerações de quartzitos próximas da zona urbana de Alpinópolis.

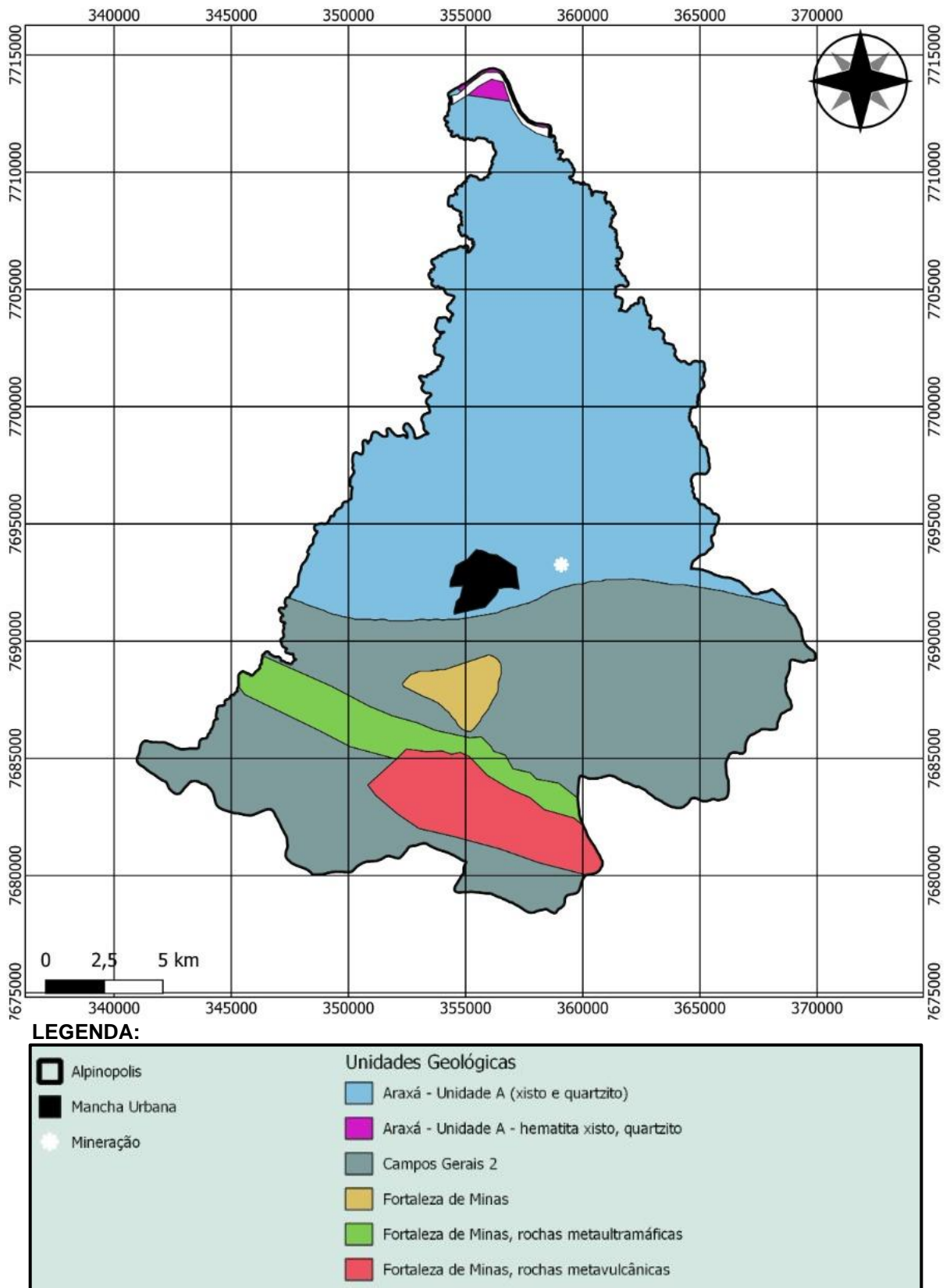
Figura 2.4 – Imagem de satélite da mineração de quartzito localizada próxima a zona urbana no município de Alpinópolis-MG.



Fonte: Google Earth Pró (2022)

A Figura 2.5 apresenta um mapa geológico do município de Alpinópolis. Nele estão descritas as formações rochosas e a localização da mineração de quartzitos onde foram coletadas as amostras.

Figura 2.5 – Mapa Geológico do município de Alpinópolis, indicando o local de coleta dos quartzitos.

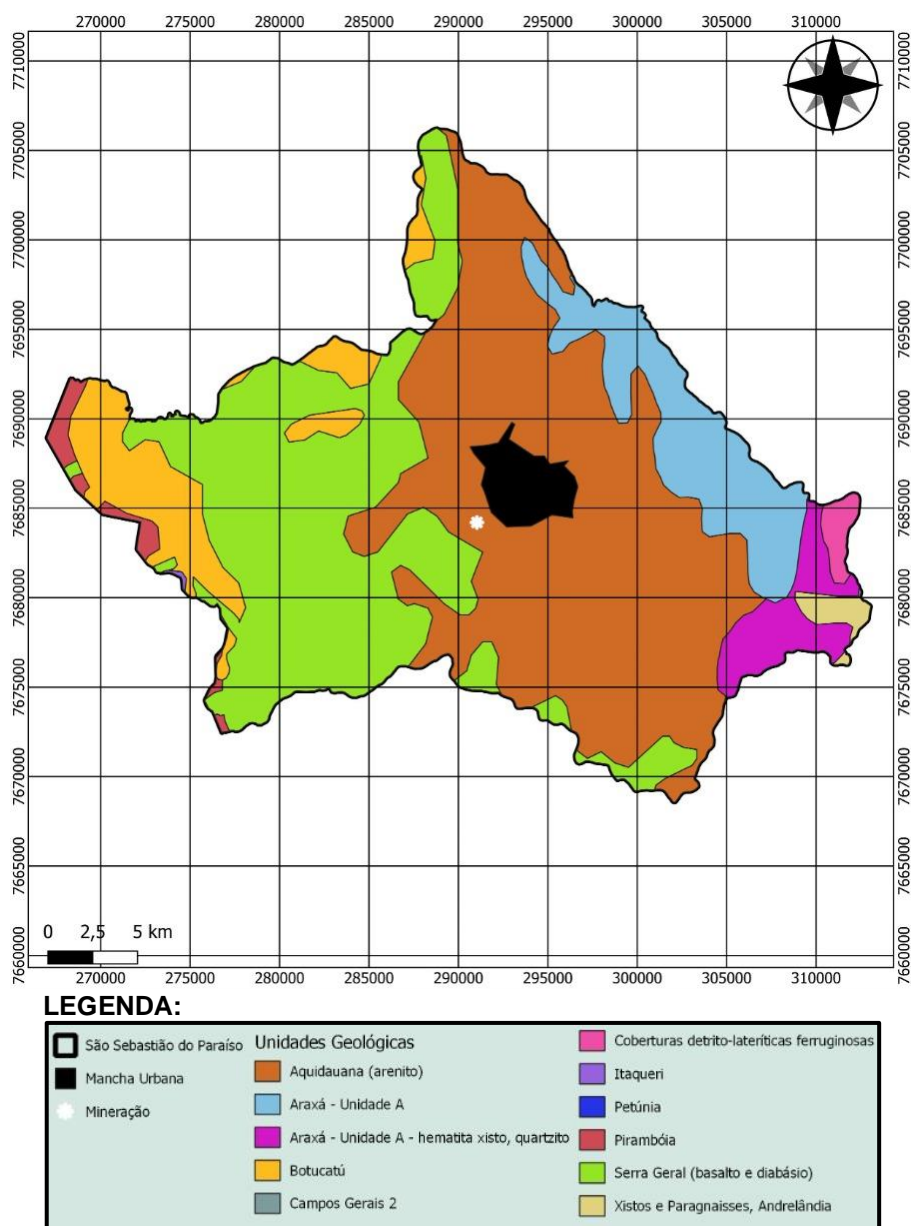


Fonte: IDE-Sisema (2022).

2.3 LOCALIZAÇÃO DA MINERAÇÃO DE DIABÁSIOS

Os diabásios explorados no município mineiro de São Sebastião do Paraíso foram a rocha escolhida como elemento comparativo aos objetos deste estudo, por serem amplamente e convencionalmente comercializados como agregados para concreto no sudoeste de Minas Gerais. A Figura 2.6 apresenta um mapa geológico do Município, em que estão descritas as formações rochosas e a localização da mineração de diabásios em que as amostras foram coletadas.

Figura 2.6 – Mapa Geológico de São Sebastião do Paraíso, indicando o local de coleta dos diabásios



Fonte: IDE-Sisema (2022).

2.4 COLETA DAS AMOSTRAS DE QUARTZITOS

As amostras representativas dos quartzitos foram coletadas nas pilhas de rejeitos das minerações, com o auxílio de uma pá carregadeira. Posteriormente, foram transportadas até o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), campus de Passos-MG. Ali, com o aparato técnico disponível, foi possível operar a amostragem com redução por quarteamento e registro das massas. Os procedimentos foram realizados conforme estabelecido pela norma NBR 16915 (ABNT, 2021).

2.4.1 Coleta no Polo de São Thomé das Letras

A visita para reconhecimento e coleta das amostras dos rejeitos de quartzitos nas minerações do município de São Thomé das Letras foram acompanhadas pelo o senhor Tonico Machado, presidente da AMIST. Durante a apresentação das frentes de lavras das minerações, foram realizadas análises pétreas dos diferentes tipos de quartzitos explorados. Os levantamentos de campo, aliados à denominação empírica dos mineradores de quartzitos para classificar os rejeitos, mostraram diferenças de tonalidade e de textura do material, conforme o ponto de extração. Foram categorizados três tipos geotécnicos de quartzitos, descritos na Tabela 2.2.

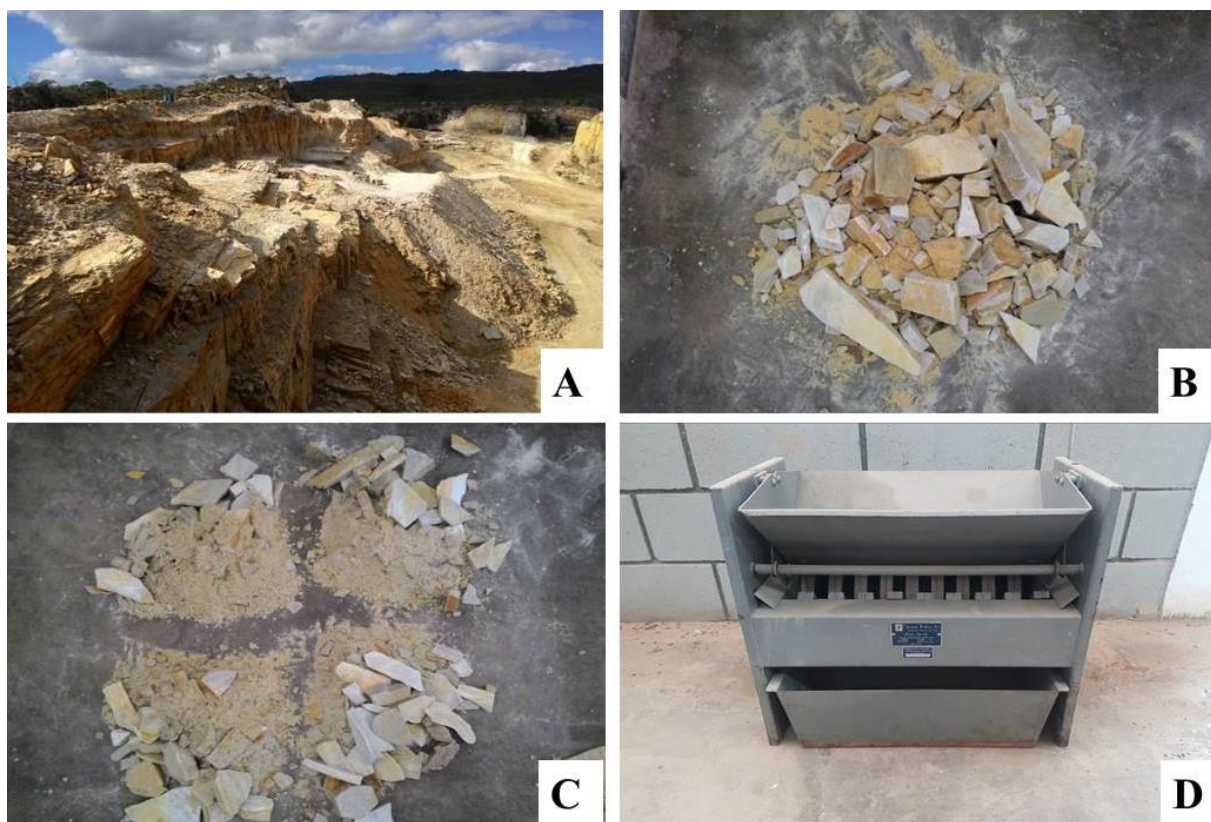
Tabela 2.2 – Denominação e identificação dos rejeitos de quartzitos de São Thomé das Letras

Denominações utilizadas pelos mineradores	Identificação macroscópica	Imagem
Material macio	quartzito friável, foliado, de menor resistência mecânica aparente;	
Material duro	quartzito com foliação incipiente e média resistência mecânica aparente; amplamente utilizado como “pedra de revestimento”	
Material vidrado	quartzito silicificado, estrutura maciça, não foliado; não possibilita formação de placas	

Fonte: O Autor (2022)

A Figura 2.7, apresenta uma imagem panorâmica da mineração denominada Bico do Gavião, localizada no Município de São Thomé das Letras. As coordenadas geográficas do ponto onde foram coletadas as amostras são 21°42'39.67"S e 44°58'44.51". No Laboratório de Materiais de Construção Civil do campus da UEMG, campus de Passos-MG, foram empregados processos de quarteamento primário e para o trabalho de redução em proporções menores foi utilizado um quarteador mecânico.

Figura 2.7 – (A) Vista parcial das frentes de extração de placas da Mineração Bico do Gavião; (B) Aspecto visual de amostra coletada em campo; (C) Aspecto visual da amostra quarteada. (D) Quarteador mecânico.



Fonte: O Autor (2022)

Durante a visita de reconhecimento das minerações do município de São Thomé das Letras foi constatada a existência de uma empresa que realiza processos de fragmentação dos rejeitos de quartzitos em diferentes frações, até dimensões pulverulentas de 500 mesh - #0,025 mm. A empresa, Sales Andrade-SA Indústria e Beneficiamento Mineral Ltda, em parceria com a empresa SIOX Indústria, Comércio e Beneficiamento de Minério Ltda, respectivamente com sede nos municípios de Três Corações-MG e de São Thomé das Letras/MG, comercializam as frações pulverulentas dos quartzitos para a produção de tintas e pigmentos esmaltados, para

placas de revestimentos e outros produtos. São inúmeras as frações produzidas, com dimensões máximas de 9,5 mm - agregado graúdo - e dimensões mínimas de 0,025 mm - 500 mesh.

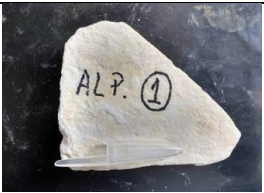
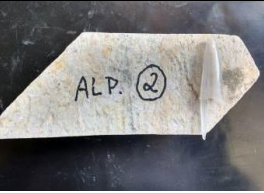

Uma das grandes dificuldades de manejo dos rejeitos, detectada nas fontes que embasam esta pesquisa, foi a de produzir e separar em laboratório as partículas pulverulentas dos quartzitos que servissem à racionalização da dosagem dos concretos. Desta forma, as diferentes frações comercializadas pelas empresas - com dimensões de partículas de 0,600 mm; 0,250 mm; 0,180 mm; 0,150 mm; 0,106 mm; 0,075 mm; 0,045 mm; 0,038 mm e 0,025 mm - justificaram a necessidade de que esta pesquisa contemplasse a elaboração de um cálculo de empacotamento de partículas mais efetivo para a finalidade do uso como componente em concretos de pós reativos.

No manejo convencional dos rejeitos, os quartzitos são transportados para a indústria, onde são submetidos ao processo de cominuição, com emprego de britadores e moinhos de bolas para se obter frações ultrafinas. Estas partículas pulverulentas são separadas em torres de ciclones por ação de força centrífuga, depois são embaladas em frações que atendem à fabricação de tintas, pigmentos e outros produtos. Em reunião com o senhor Pedro Silvio Linares, proprietário da SIOX, este doou todas as frações finas e pulverulentas utilizadas nesta pesquisa.

2.4.2 Coleta no Polo de Alpinópolis

Foram realizadas duas viagens de reconhecimento preliminar do arcabouço geológico-geotécnico das principais exposições dos quartzitos lavrados na região de Alpinópolis-MG. Com base nos levantamentos de campo foi possível classificar os quartzitos ocorrentes em três classes, conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Denominação e identificação dos rejeitos de quartzitos de Alpinópolis

Denominações utilizadas pelos mineradores	Identificação macroscópica	Imagem
Material macio	quartzito friável, foliado, de menor resistência mecânica aparente.	
Material vidrado	quartzito silicificado, estrutura maciça, não foliado; não possibilita formação de placas.	
Material duro	quartzito com foliação incipiente e média resistência mecânica aparente; amplamente utilizado como “pedra de revestimento”	

Fonte: O Autor (2022)

Após a classificação dos diferentes tipos de rejeitos, foram escolhidas estrategicamente as frentes de lavras para a realização da amostragem, tendo como critério as condições de acesso e representatividade das amostras, conforme tabela 2.4. Na Lavra 1 foram identificados dois tipos distintos de rejeitos, o duro e o macio. Já na Lavra 2 foram identificados os rejeitos vidrado e macio. E na Lavra 3, apenas um tipo de rejeito, o vidrado.

Tabela 2.4 - Identificação, localização dos pontos de coleta e tipos de ocorrências de rejeitos de quartzitos de Alpinópolis

Lavra	Ponto 1	Ponto 2	Ocorrências
1	20°51'19,80" S	20°51'18,72"S	Material duro e Material macio
	46°21'16,09" W	46°21'11,48"W	
	1080 m de altitude	1098 m de altitude	
2	20°51'0,54"S	20°51'4,72"S	Material vidrado e Material macio
	46°21'12,31"W	46°21'9,40"W	
	1026 m de altitude	1042 m altitude	
3	20°50'53,02"S	-	Material vidrado
	46°21'14,90"W		
	993 m de altitude		

Fonte: O Autor (2022)

Com o auxílio de máquina pá carregadeira, procedeu-se a coleta de aproximadamente 4m³ de cada um destes tipos de rejeitos de quartzitos, em pontos estratégicos das frentes de lavras. Estes materiais foram depositados em locais planos, com possibilidade de serem manuseados, para que pudessem ser realizadas as amostragens em conformidade com a NBR 16915 (ABNT, 2021). Na realização deste procedimento em campo, foram utilizados: balança de pêndulo com capacidade de 200 kg, enxada, pá, concha metálica, trena, talhadeira, embalagens e sacos resistentes, planilhas e GPS. As frações com dimensões inferiores a 20 cm de aresta foram encaminhadas ao LMCC da UEMG, campus de Passos-MG, para a preparação das amostras e a realização dos ensaios tecnológicos. Na Figura 2.8 que segue, são apresentadas imagens dos diferentes tipos de quartzitos identificados e classificados na mineração de Alpinópolis-MG.

Figura 2.8 - Rejeitos de quartzitos amostrados na mineração Planalto Pedras



Fonte: O Autor (2022)

Nota: (A) Material macio; (B) Material duro; (C) Material vidrado

2.4.3 Denominação das amostras constituídas

Em laboratório, as amostras foram identificadas e preparadas para a realização dos diferentes ensaios tecnológicos. As denominações dadas aos diferentes tipos de rejeitos de quartzitos oriundos das minerações de São Thomé das Letras, de Alpinópolis e do agregado convencional de diabásio estão apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Denominação das amostras estudadas

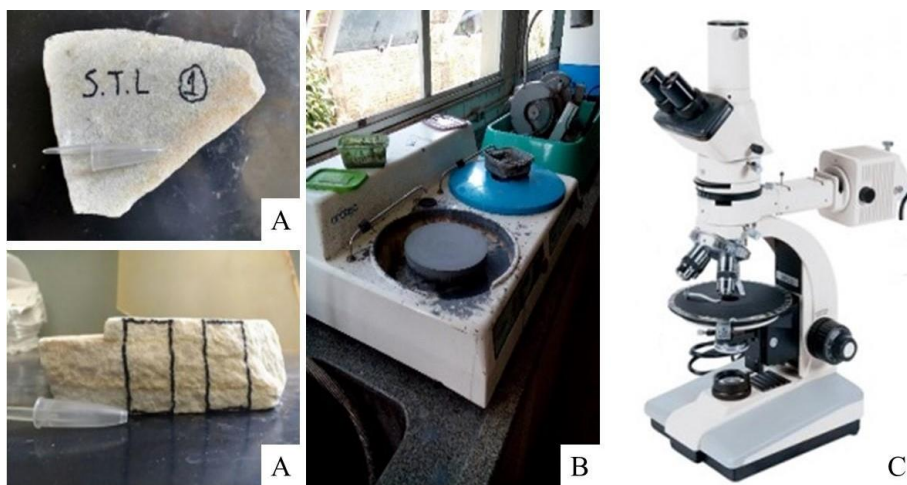
Região	Material	Denominação
São Thomé das Letras	Quartzito	STL 1 – rejeito macio
		STL 2 – rejeito duro
		STL 3 – rejeito vidrado
		STL-SA– Industrializado pela empresa S.A.
Alpinópolis	Quartzito	ALP 1 – rejeito macio
		ALP 2 – rejeito vidrado
		ALP 3 – rejeito duro
São Sebastião do Paraíso	Diabásio	DIA – rocha convencionalmente utilizada como agregado para concreto

Fonte: O Autor (2022)

2.5 CARACTERIZAÇÕES PETROLÓGICAS E MINERALÓGICAS

Foi realizada a análise petrográfica das 6 amostras de rejeitos de quartzitos extraídas das minerações de São Thomé das Letras e de Alpinópolis. As lâminas delgadas foram confeccionadas na Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) unidade de Araraquara-SP e as descrições foram realizadas no Laboratório de Pesquisa do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), campus de Rio Claro-SP, utilizando-se um microscópio petrográfico de luz transmitida da marca Opton, conforme Figura 2.9.

Figura 2.9 – (A) Amostra de mão para extração para lâminas delgadas; (B) Equipamentos utilizados na preparação das lâminas delgadas; (C) Microscópio petrográfico



Fonte: O Autor (2022)

2.6 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS

As amostras encaminhadas ao LMCC da UEMG de Passos-MG, devidamente identificadas, foram preparadas para realização dos ensaios tecnológicos em duas etapas, conforme o descrito a seguir:

- a) **Etapa 1:** Nesta etapa foram realizados ensaios utilizando as seis amostras de quartzitos selecionadas para os testes, uma amostra de diabásio e uma amostra de arenito industrializada JUNDU. As amostras de quartzitos foram constituídas na fase de reconhecimento de campo, identificadas após análise petrográfica e as frações granulométricas foram produzidas e classificadas em laboratório.
- b) **Etapa 2:** Nesta etapa foram realizados os ensaios com o uso dos agregados produzidos e classificados pelas empresas SA e SIOX de São Thomé das Letras.

Na Tabela 2.6, são apresentadas as etapas de estudo, a origem dos agregados, seu local de classificação granulométrica e os ensaios tecnológicos.

Tabela 2.6 - Etapas de estudos, classificação dos agregados e ensaios realizados

Etapas	Origem dos agregados	Classificação granulométrica dos agregados	Ensaios realizados
Etapa 1	STL 1	Em laboratório	Caracterização física dos agregados; RAA acelerado em argamassas; RAA longa duração em prismas de concreto; CPR: Propriedades físicas e mecânicas.
	STL 2		
	STL 3		
	ALP 1		
	ALP 2		
	ALP 3		
	DIA		
	JUNDU	Industrializado	
Etapa 2	STL-SA	Em Indústria SA / SIOX	RAA acelerado em argamassas (padrão normativo); RAA acelerado em barras de CPR sem sílica ativa; RAA acelerado em barras de CPR com sílica ativa; RAA acelerado em prismas de concreto (padrão normativo); RAA acelerado em prismas de concreto com 100 % quartzito; CPR sem fibras: ensaios físicos e mecânicos; CPR com fibras metálicas: ensaios físicos e mecânicos.

Fonte: O Autor (2022)

2.7 PRODUÇÃO DE AGREGADOS EM LABORATÓRIO (ETAPA 1)

A produção das diferentes frações granulométricas de agregados de quartzitos e de diabásio, correspondentes à Etapa 1, foi realizada com recurso ao equipamento de abrasão “Los Angeles” para a produção da fração miúda (Figura 2.10) e de marreta de 5 kg, manual, para a produção de fração graúda. Conforme apresentado na Tabela 2.7, foram produzidas diferentes frações granulométricas para a realização dos ensaios de reatividade potencial álcali-agregado (método acelerado e de longa duração) e dos ensaios físicos e mecânicos dos concretos de pós reativos.

Figura 2.10 – Equipamento de abrasão Los Angeles utilizado para cominuição das amostras



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 2.7 - Frações produzidas para a realização dos ensaios de caracterização, de RAA e de CPRs.

Materiais	RAA-acelerado	RAA-longa duração	CPR
Quartzitos e Diabásios	Fração miúda = *DMC 4,8 mm	Fração graúda = *DMC 19 mm	Fração miúda = *DMC 0,6 mm Fração pó passante na peneira 0,074 mm

Fonte: O Autor (2022)

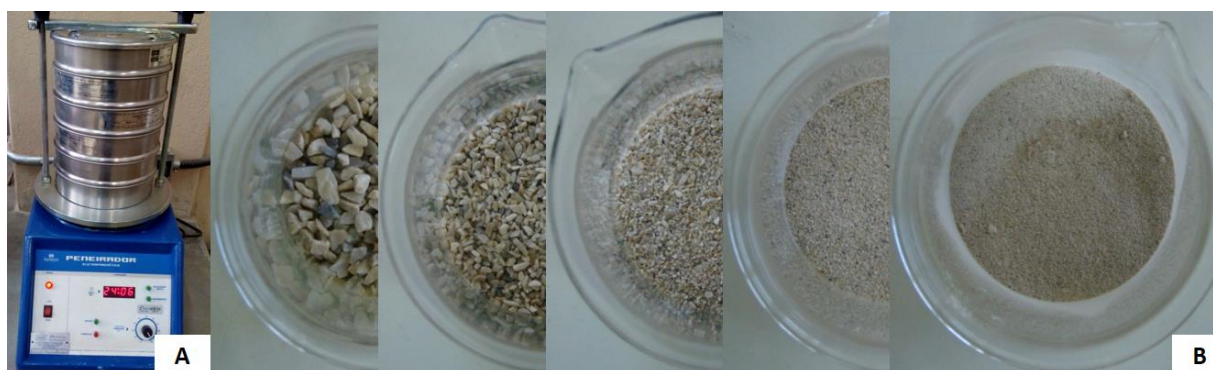
Nota: DMC = Dimensão Máxima Característica

Nas seções subsequentes são apresentados os procedimentos utilizados para produção das frações miúdas e das frações graúdas, empregadas nos ensaios de RAA correspondentes à Etapa 1.

2.7.1 Produção da fração miúda para ensaio RAA pelo método acelerado

As seis amostras de quartzitos e uma amostra de diabásio selecionadas foram processadas em equipamento de Abrasão Los Angeles, utilizando 12 esferas abrasivas. À medida com que eram aplicadas as rotações, as amostras eram retiradas do equipamento e pré-classificadas manualmente, com emprego de peneiras de série normal - 0,15 mm a 4,78 mm -, até se obter as dimensões e quantidades necessárias. Após a obtenção de quantidades suficientes para realização dos ensaios, foram separadas as frações (Tabela 2.8) em conformidade com a norma técnica NBR 15577 (ABNT, 2018). Posteriormente, elas foram classificadas com o auxílio de um peneirador mecânico (Figura 2.11 A). As frações devidamente selecionadas são apresentadas na Figura 2.11 B.

Figura 2.11 – (A) Peneirador mecânico; (B) Frações classificadas para os estudos de RAA - método acelerado.



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 2.8 – Frações granulométricas para ensaio de RAA- método acelerado

Peneira com abertura de malha		Materiais em %
Passante	Retido	%
4,75 mm	2,36 mm	10
2,36 mm	1,18 mm	25
1,18 mm	600 μ m	25
600 μ m	300 μ m	25
300 μ m	150 μ m	15

Fonte: NBR 15577-4 (ABNT, 2018)

2.7.2 Produção da fração graúda para ensaio de RAA pelo método de longa duração

Para a obtenção da fração graúda, foi realizado o processo de fragmentação manual, com auxílio de golpes de marreta 5 kg, e posteriormente o material foi classificado com auxílio de peneirador mecânico, conforme Figura 2.12.

Na Tabela 2.9, são apresentadas as frações necessárias para a produção dos concretos em conformidade com a norma técnica NBR 15577 (ABNT, 2018).

Tabela 2.9 – Frações granulométricas para ensaio de RAA- método de longa duração

Peneira com abertura de malha		Materiais em %
Passante	Retido	%
19,0 mm	12,5 mm	33,33
12,5 mm	9,5 mm	33,33
9,5 mm	4,75 μ m	33,33

Fonte: NBR 15577-6 (ABNT, 2018)

Figura 2.12 – Preparação da fração graúda da amostra ALP 2.



Fonte: O Autor (2022)

Nota: (A) peneirador mecânico; (B, C e D) frações retidas nas 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm, respectivamente.

2.8 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização tecnológica dos agregados e do cimento Portland foram:

a) Determinação de índices físicos em conformidade com a NBR NM 53 (ABNT, 2009):

Massa específica; Massa específica aparente; Absorção de água e Porosidade;

b) Determinação da massa específica do cimento Portland e de outros materiais em pó, em conformidade com a NBR 16605 (ABNT, 2017);

- c) Análise granulométrica por sedimentação, para cálculo do empacotamento dos grãos, segundo NBR 7181 (ABNT, 2016), com uso de defloculante;
- d) Determinação da composição química do cimento Portland em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.8.1 Índices físicos dos agregados

Os ensaios de índices físicos para a determinação da massa específica, massa específica aparente, absorção de água e porosidade foram realizados seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). Foram examinados os quartzitos provenientes de São Thomé das Letras e de Alpinópolis, o arenito da Mineração JUNDÚ utilizado como agregado referência na produção dos CPRs e o diabásio utilizado como referência para o ensaio de RAA.

Como método empregado para determinação dos índices físicos, foi utilizada a balança hidrostática para a determinação das massas em estado seco, na condição saturada da superfície seca e na condição submersa. Na Figura 2.13, é apresentada a balança hidrostática utilizada nos ensaios.

Figura 2.13 - Balança hidrostática utilizada para determinação dos índices físicos dos agregados



Fonte: O Autor (2022)

2.8.2 Determinação da massa específica do cimento Portland

Os cimentos escolhidos para a realização dos estudos tecnológicos foram o CP-V-ARI-Ultra, da Votorantim, utilizado na Etapa 1, e o cimento CP-V-ARI, da HOLCIM, utilizado na Etapa 2. O critério foi o fato de eles não conterem em suas composições teores de adições pozolânicas e escória siderúrgica, o que faz com que haja uma tendência natural de maior alcalinidade na composição.

O ensaio foi realizado segundo a norma técnica NBR 16605 (ABNT, 2017), utilizando-se o frasco volumétrico Le Chatelier. A massa utilizada para ensaio foi de 60 gramas, conforme mostra a Figura 2.14.

Figura 2.14 - Ensaio de massa específica do cimento Portland



Fonte: O Autor (2022)

2.8.3 Análise granulométrica por sedimentação

A análise granulométrica por sedimentação foi realizada nas frações pulverulentas dos quartzitos coletados na Etapa 1 e na amostra de arenito da Mineração JUNDÚ (utilizada como agregado referência na produção dos CPRs). O propósito desta análise foi o de se obter um perfil granulométrico que possibilitasse a realização do empacotamento das partículas dos materiais destinados à dosagem dos CPRs. A metodologia de ensaio, segundo a Lei de Stokes, seguiu a NBR 7181 (ABNT, 2016) e os procedimentos detalhados no capítulo 4.

2.8.4 Composição química do cimento Portland

A análise química completa do cimento foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do estado de São Paulo, conforme procedimentos recomendados pela C-114 (ASTM, 2018). A amostra analisada foi de cimento CP-V-ARI, da HOLCIM, e foram contempladas as seguintes determinações: perda ao fogo; anidrido silícico (SiO_2); óxido férrico (Fe_2O_3); óxido de alumínio (Al_2O_3); óxido de cálcio (CaO); óxido de magnésio (MgO); anidrido sulfúrico (SO_3); óxido de sódio (Na_2O); óxido de potássio (K_2O); óxido de cálcio livre (CaO livre); resíduo insolúvel; anidrido carbônico (CO_2); e Sulfeto (S_2^-). Os resultados foram comparados aos parâmetros estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.9 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos seguintes estudos tecnológicos:

- a) Petrografia dos quartzitos e do diabásio: apreciação petrográfica dos quartzitos de São Thomé das Letras e de Alpinópolis e do diabásio selecionado, com uso do microscópio petrográfico da UNESP, campus de Rio Claro-SP;
- b) Caracterização física dos materiais rochosos: massa específica seca, massa específica saturada superfície seca, massa específica aparente, absorção de água, análise granulométrica por peneiramento e análise granulométrica por sedimentação.
- c) Análise química do cimento Portland;

2.9.1 Petrografia dos quartzitos

Nas Tabelas 2.10 e 2.11 são apresentadas as sínteses da composição mineralógica das amostras de quartzito de Alpinópolis e de São Thomé das Letras, respectivamente.

Tabela 2.10 - Síntese da composição mineralógica das amostras de quartzitos de Alpinópolis.

Composição mineralógica média e porcentagem	Amostras		
	ALP 1	ALP 2	ALP 3
	(rejeito macio)	(rejeito vidrado)	(rejeito duro)
Quartzo	94,0 %	94,5 %	94,5 %
Muscovita	5,7 %	5,0 %	5,2 %
Opacos (hematita, limonita, hidróxido de ferro)	0,3 %	0,5 %	0,3 %
Turmalina	Traços	Traços	Traços
Zircão	Traços	Traços	Traços
Rutilo	-	-	-

Fonte: O Autor (2022).

Conforme se pode observar na Tabela 2.10, não houve variações mineralógicas expressivas entre as amostras de rejeitos de quartzitos do município de Alpinópolis.

Tabela 2.11 - Síntese da composição mineralógica das amostras de quartzitos de São Thomé das Letras.

Composição mineralógica média e porcentagem	Amostras		
	STL 1	STL 2	STL 3
	(rejeito macio)	(rejeito duro)	(rejeito vidrado)
Quartzo	94,5 %	95,0 %	94,0 %
Muscovita	5,0 %	4,6 %	5,7 %
Opacos (hematita, limonita, hidróxido de ferro)	0,5 %	0,4 %	0,3 %
Turmalina	Traços	Traços	Traços
Zircão	Traços	Traços	Traços
Rutilo	Traços	Traços	Traços

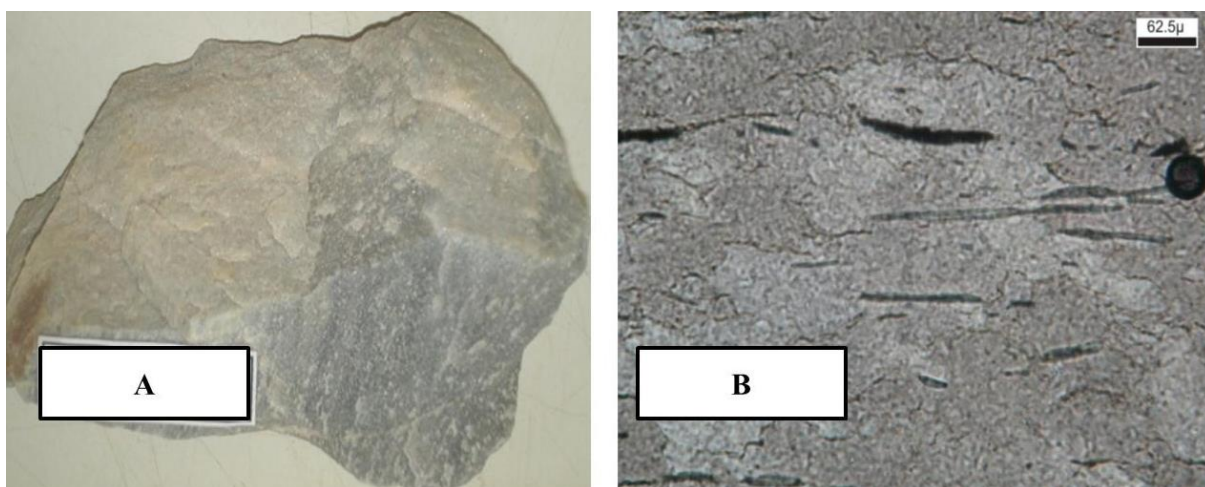
Fonte: O Autor (2022).

Os resultados apresentados na Tabela 2.11, demonstram pequenas variações mineralógicas de muscovita entre as amostras de rejeitos de quartzitos de São Thomé das Letras. Os quartzitos com intercalações de mica xistos são bem identificados em minerações de Alpinópolis e de São Thomé das Letras, pois são destinados para a produção de placas para revestimento no Sul de Minas. Microscopicamente, eles são classificados como quartzitos foliados com muscovita fina, com estrutura fortemente anisotrópica xistosa, com muscovita bem orientada e textura grano-lepidoblástica. Sua constituição é de aproximadamente 94,5 %

de quartzo e, o restante (5,5 %), por muscovita, minerais opacos e turmalina, conforme ilustrado na Figura 2.15.

Chiodi Filho et al. (2005) realizaram caracterizações petrográficas e mineralógicas em diferentes tipos de quartzitos do município de São Thomé das Letras. Na ocasião, foram estudadas 16 amostras de quartzitos, oriundas de cinco minerações. Os resultados da petrografia mostraram teores de quartzo variando entre 95 % a 98 % e teores de muscovita variando entre 3 % a 5 %. Os percentuais dos constituintes mineralógicos predominantes (quartzo e muscovita) foram semelhantes aos percentuais dos constituintes mineralógicos predominantes dos quartzitos analisados nesta pesquisa, dado que permite constatar que os quartzitos de Alpinópolis (ALP) e de São Thomé das Letras (STL) são praticamente idênticos em se tratando do aspecto mineralógico.

Figura 2.15 - (A) Amostra de mão exibindo quartzito de Alpinópolis de cor acinzentada, bastante silicificado e com foliação pouco evidente; (B) Fotomicrografia (nicóis paralelos) mostrando cristais de muscovita orientados e grãos de quartzo com contatos engrenados

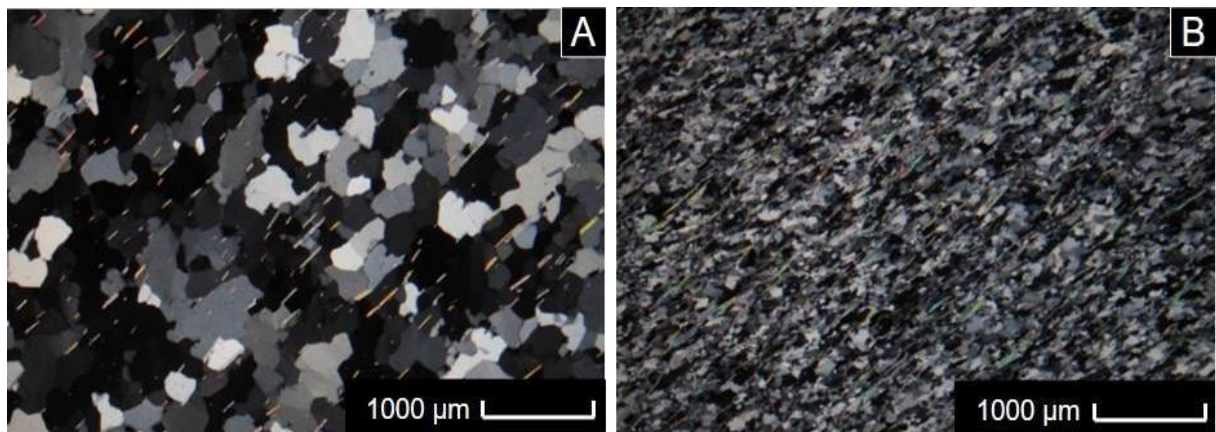


Fonte: Francklin Junior (2009)

A petrografia microscópica possibilitou as seguintes observações referentes a granulação dos quartzitos: as amostras do conjunto ALP são consideravelmente mais finas que as amostras do conjunto STL, à razão de a granulação média do conjunto ALP medir predominantemente entre 0,01 mm e 0,04 mm na largura e cerca de 0,06 mm e 0,1 mm no estiramento mineral, ao passo que a granulação média do conjunto STL, predominantemente, ficou entre 0,1 mm e 0,4 mm na largura e cerca de 0,2 mm e 0,6 mm no estiramento mineral.

Em relação à coesão das rochas, em geral os muscovita quartzitos do conjunto STL são consideravelmente menos friáveis (mais coesos) que os muscovita quartzitos do conjunto ALP. Este fato deve-se à melhor recristalização dos muscovita quartzitos do conjunto STL. Neste caso, considera-se que o grau metamórfico do conjunto STL é consideravelmente maior que o do conjunto ALP. Destaque-se, entretanto, que não houve a ocorrência de paragênese mineral indicativa dos correspondentes graus metamórficos destas rochas. Com base no grau de recristalização, o conjunto STL situaria no fácies anfibolito e o conjunto ALP no fácies xisto verde. Outro fator a se levar em consideração quanto à coesão é a intensidade intempérica de cada conjunto de amostras. Neste caso, a amostra STL 1 é a que apresentou maiores efeitos intempéricos do conjunto de amostras STL, o que a tornaria mais friável que as demais, conforme a Figura 2.16. No Apêndice A são apresentadas as descrições petrográficas detalhadas das amostras analisadas.

Figura 2.16 - Fotomicrografias (nicos cruzados).



Fonte: O Autor (2022)

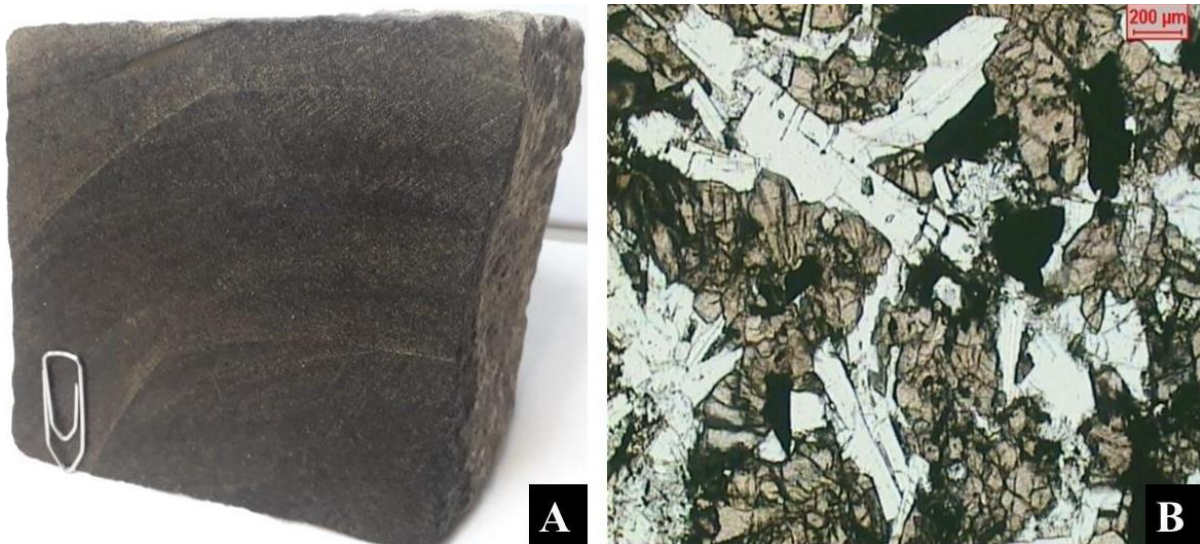
Nota: (A) quartzito STL mostrando o arranjo granoblástico dos cristais de quartzo e foliação marcada pelo alinhamento das muscovitas; (B) quartzito ALP com o mesmo arranjo textural, mas com granulometria consideravelmente menor.

2.9.2 Petrografia do Diabásio

As amostras de diabásio são oriundas de uma pedreira localizada a sudoeste do núcleo urbano do município mineiro de São Sebastião do Paraíso, cujos materiais pétreos são explorados para uso como agregado na construção civil.

Segundo Machado (2005), estas rochas são mesocráticas, possuem coloração negra e tons esverdeados. Elas são também holocristalinas, subfanerítica com granulação fina a densa e textura intergranular; constituídas por 35 % de plagioclásio, 25 % de piroxênio, 7 % de minerais opacos e 33 % de mesóstase microgranular - matriz. Os cristais de plagioclásio são fortemente alterados, com bordas corroídas pela mesóstase ou até totalmente deterioradas. Quanto aos cristais de piroxênio, predominam augita em contato irregular com os cristais de plagioclásio, bastante alterada para minerais opacos, que possuem as formas prismáticas e aciculadas. A mesóstase é formada por minerais de alteração - argilo-minerais-, microcristais de plagioclásio com textura intersertal e cristalitos aciculados. Dados peculiares da literatura a seu respeito referem-se ao grau de intemperismo químico das amostras, atuando principalmente sobre sulfetos. Destaque-se ainda que a aparência, a textura e a dureza do material, quando mais próximo das bordas do sill e da superfície, é semelhante a um xisto - biotita xisto. Na Figura 2.17 é apresentada a amostra de mão de diabásio examinada e a fotomicrografia desta rocha realizada por Machado (2005).

Figura 2.17 - (A) Detalhe macroscópico exibindo coloração preta e o aspecto maciço e compacto da amostra de mão; (B) Fotomicrografia (nicóis paralelos) do diabásio com textura intergranular, onde cristais ripiformes de plagioclásio apresentam grãos intersticiais de augita e de minerais opacos intersticiais



Fonte: O Autor (2022)

Fonte: Machado (2005)

2.9.3 Índices Físicos dos materiais rochosos

Os ensaios de índices físicos, isto é, de massa específica seca, na condição saturada superfície seca, de massa específica aparente, massa unitária compacta e de absorção de água, referentes aos diferentes tipos de rejeitos de quartzitos e diabásio, foram realizados de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009). E os resultados são apresentados na Tabela 2.12.

Foi determinado somente o valor de massa específica seca do arenito proveniente da Mineração JUNDÚ, necessário para o estudo de dosagem do CPR.

De maneira geral, os resultados de índices físicos obtidos com as amostras de quartzitos selecionadas e com o agregado de diabásio mostraram-se satisfatórios e em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2019). Entretanto, é importante destacar que os valores de massas específicas secas das amostras de quartzitos foram próximos, com exceção da amostra ALP 1, que apresentou o valor de 2,425 g/cm³.

Tabela 2.12 – Índices físicos dos quartzitos e agregado de diabásio

Índices Físicos	STL 1	STL 2	STL 3	ALP 1	ALP 2	ALP 3	DIA	JUNDÚ
massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,626	2,620	2,655	2,425	2,636	2,647	2,788	2,670
massa específica do agregado saturado (g/cm ³)	2,588	2,590	2,530	2,365	2,518	2,567	2,641	-
massa específica aparente (g/cm ³)	2,564	2,570	2,455	2,324	2,446	2,518	2,569	-
massa unitária compacta (kg/dm ³)	1,537	1,566	1,572	1,343	1,433	1,441	1,653	-
absorção de água (%)	0,91	0,72	3,07	1,79	2,94	1,93	2,79	-

Fonte: O Autor (2022)

2.9.4 Análises granulométricas por peneiramento e sedimentação

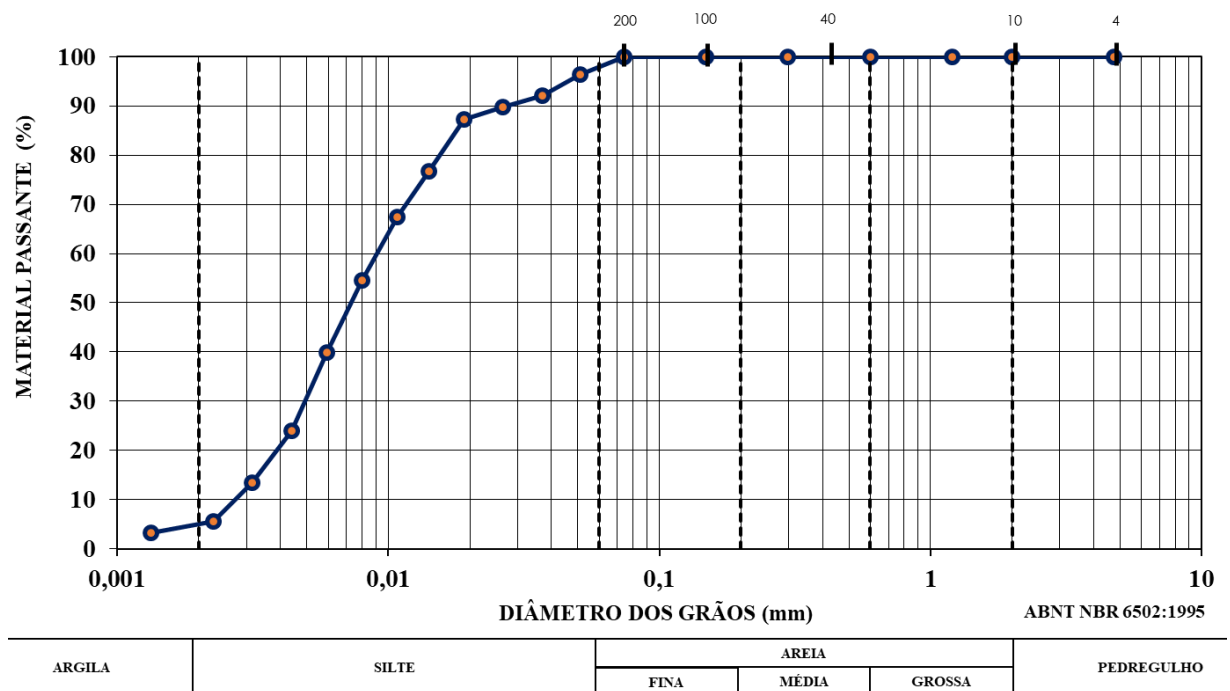
Neste tópico são apresentados os resultados de análise granulométrica das frações finas e pulverulentas dos quartzitos e do arenito da Mineração JUNDÚ.

2.9.4.1 Granulometrias da fração pulverulenta

As análises de granulometria conjunta foram realizadas exclusivamente nas frações pulverulentas dos quartzitos e dos arenitos da JUNDÚ, pois não é perfeitamente possível obter a classificação somente por peneiramento. As frações passantes na peneira de malha 0,074 mm foram ensaiadas por sedimentação, com uso de defloculante, para a obtenção da distribuição granulométrica utilizada posteriormente para o cálculo do empacotamento dos grãos, necessário ao estudo de dosagem dos CPR's.

Os resultados do perfil granulométrico de pós de quartzitos ficaram semelhantes, pois o processo de classificação adotado para obtenção das frações foi o mesmo para todas as amostras constituídas na Etapa 1. A Figura 2.18 apresenta o resultado da distribuição granulométrica das amostras de quartzitos.

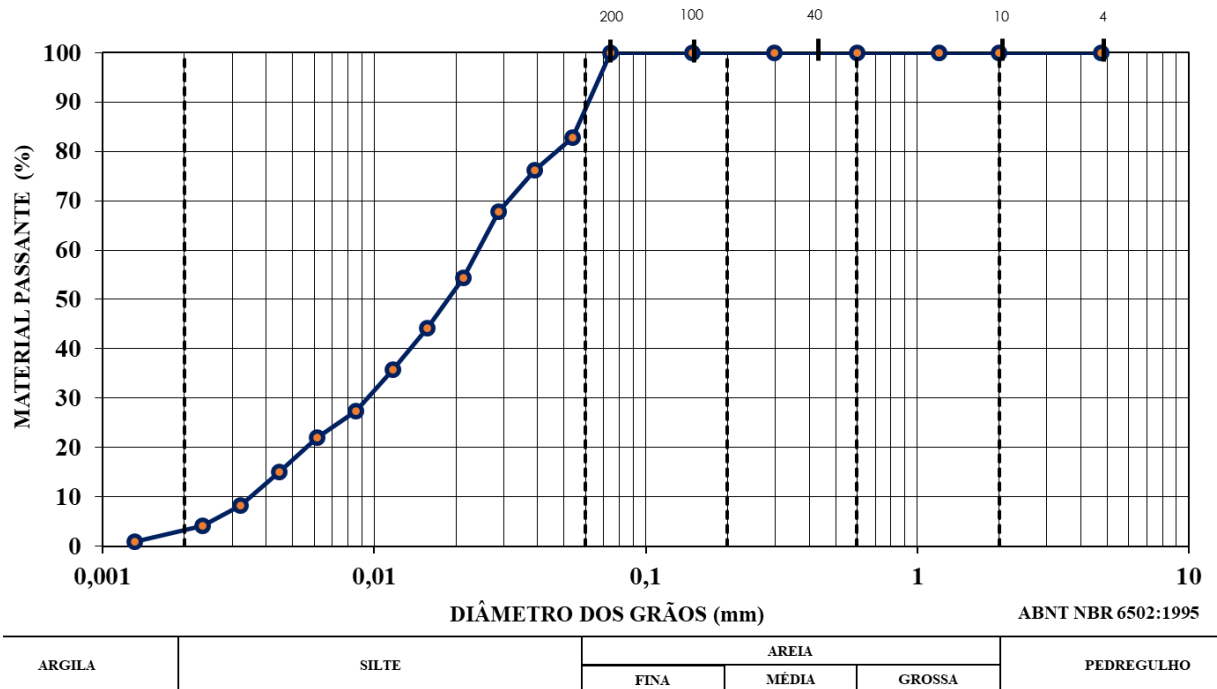
Figura 2.18 - Distribuição granulométrica da fração pó de quartzitos.



Fonte: O Autor (2022)

O perfil granulométrico das amostras de pós de quartzitos é contínuo e a classificação, considerando as dimensões dos grãos, é de 5 % de argila, 93 % de silte e 2 % de areia fina. A Figura 2.19 apresenta o resultado da distribuição granulométrica da amostra JUNDÚ de pó de quartzito.

Figura 2.19 - Distribuição granulométrica da fração pó de quartzo da amostra JUNDÚ.



Fonte: O Autor (2022)

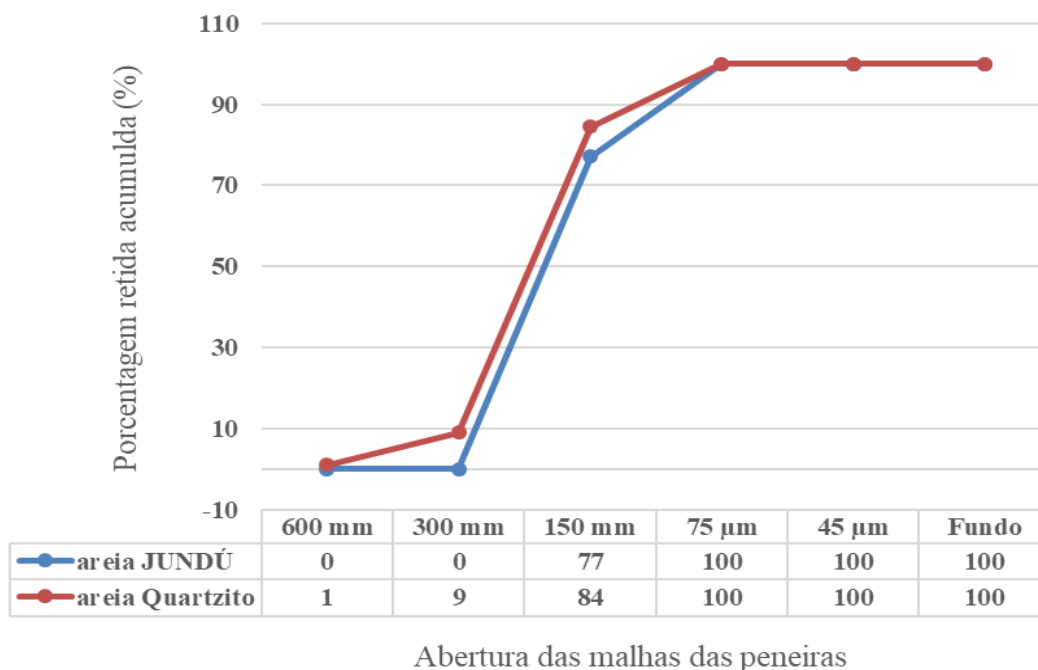
O perfil granulométrico do pó de quartzo de JUNDÚ é do tipo contínuo e sua classificação, dadas as dimensões dos grãos, que são de 4 % de argila, 84 % de silte e 12 % de areia fina.

Desta forma, a distribuição granulométrica de ambas amostras é relativamente semelhante, ressalvado o percentual de areia fina de JUNDÚ, que é superior se comparada com a amostra de quartzito.

2.9.4.2 Granulometrias da fração areia (miúda)

A fração areia das seis amostras de quartzitos foram classificadas de modo a atender aos seguintes percentuais: 600 µm retido 0,86 %; 300 µm retido 6,91 % e 150 µm retido 65,52 %. Desta forma, o perfil granulométrico ficou idêntico para todas as amostras de areia de quartzitos utilizadas para produção dos CPRs e semelhante à amostra de areia industrializada da Mineração JUNDÚ (Figura 2.20).

Figura 2.20 - Distribuição granulométrica da fração areia de quartzito e da fração areia JUNDÚ



Fonte: O Autor (2022)

2.9.5 Análise química do cimento Portland

Na Tabela 2.13 são apresentados os resultados das análises químicas realizadas na amostra de cimento Portland CP-V-ARI, da HOLCIM. Dentre as análises apresentadas, o resultado de maior interesse é o equivalente alcalino de 0,61 %, que é próximo ao limite recomendado por Mehta e Monteiro (2014) de 0,60 %. Este resultado é necessário para subsidiar a preparação das amostras de argamassas e concretos para realização do ensaio de RAA.

Todos os resultados, de maneira geral, se mostraram satisfatórios e dentro das recomendações da NBR 16697 (ABNT, 2018). Por outro lado, não foi possível realizar a análise química completa da amostra de cimento CP-V-ARI, da Votorantim, razão pela qual foi feito um contato com a empresa fabricante e solicitados os percentuais de álcalis (Na e K) para cálculo do equivalente alcalino. O valor informado foi de $Na_2O_{eq} = (0,658 K_2O + Na_2O) = 0,749 \%$, portanto, superior ao recomendado, de 0,60 %.

Tabela 2.13 - Resultados das análises químicas do cimento CP-V-ARI - Holcim

Determinações	Resultados (%) Cimento CP V - Holcim	Limites da NBR 16697 (ABNT, 2018)
Perda ao fogo (PF)	7,14	≤ 6,5
Anidrido silícico (SiO ₂)	17,6	---
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,67	---
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	3,09	---
Óxido de cálcio (CaO)	63,7	---
Óxido de magnésio (MgO)	0,56	≤ 6,5
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	2,36	≤ 4,5
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,14	---
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,71	---
Equivalente alcalino (em Na ₂ O)	0,61	---
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,30	---
Resíduo insolúvel (RI)	0,58	≤ 3,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	4,97	≤ 5,5
Sulfeto (S ₂ -)	---	---

Fonte: Modificado de IPT (2019)

2.10 CONCLUSÕES PARCIAIS

O levantamento realizado nas minerações de quartzitos do Sul de Minas Gerais permitiu constatar a existência de grandes reservas exploratórias da rocha destinados ao uso como pedra de revestimento. Neste contexto, é potencial a chance de crescimento produtivo e comercial do uso deste material pela construção civil.

Durante as visitas de reconhecimento nos polos produtores de São Thomé das Letras-MG e de Alpinópolis-MG observaram-se volumes expressivos de rejeitos gerados durante a exploração do quartzito. Tais sobras formam grandes áreas de depósito no entorno das minerações, o que configura um grande passivo ambiental e um inconveniente para os empreendedores.

Os estudos laboratoriais dos diferentes tipos de rejeitos coletados permitiram obter uma caracterização física e petrográfica satisfatória. Os percentuais dos constituintes mineralógicos dos quartzitos são de aproximadamente 94,5 % de quartzo e 5,5 % de muscovita, minerais opacos e de turmalina. Um dado que permite constatar que os quartzitos de ambos polos são praticamente idênticos em se tratando do aspecto mineralógico.

Verificou-se ainda que a granulação dos quartzitos de ALP é sensivelmente mais fina que a das amostras de STL e que os quartzitos de STL são consideravelmente mais coesos, menos friáveis, portanto, que aqueles da ALP. Comparativamente, a amostra STL 1 foi a que apresentou os maiores efeitos intempéricos entre os pares daquele polo, o que quer dizer que ela é mais friável que as demais. A manipulação dos materiais em laboratório demonstrou que as amostras STL 1, ALP 1 e ALP 3 se revelaram mais friáveis quando pressionadas entre os dedos. Por outro lado, ficou patente que as amostras mais silicificadas, como é caso da vidrada (STL 3 e ALP 2), não apresentaram friabilidade. Estas constatações são importantes para direcionar o uso destes materiais para produção das diferentes frações granulométricas, tais como pó, agregado miúdo e agregado graúdo. Neste caso, recomenda-se que somente os quartzitos silificados (vidrados) sejam utilizados para produção de agregado miúdo e graúdo. Quanto às demais amostras, elas podem ser aproveitadas para produção de fração fina e pulverulenta para uso em concretos normais e em concretos especiais de ultra-alto desempenho.

Os índices físicos das amostras de quartzitos apresentaram pouca variação entre a maioria dos tipos de rejeitos. A exceção foi a amostra ALP 1, que obteve um valor inferior de massa específica, a saber, 2,425 g/cm³. As distribuições granulométricas das frações finas e pulverulentas das amostras de quartzito e da Mineração JUNDÚ resultaram em perfis contínuos

semelhantes. Portanto, elas permitem o desenvolvimento de análises comparativas entre as amostras de concretos produzidos com estes agregados e, com isso, tornam possível obter-se uma interpretação melhor dos resultados.

A análise química completa do cimento Portland CP V-ARI, da Holcim, mostrou índices de compostos satisfatórios, com ênfase para o equivalente alcalino de 0,61 %. Já com o cimento CP V-ARI, da Votorantim, não foi possível realizar a análise. Entretanto, os resultados fornecidos pelo fabricante permitiram constatar que o equivalente alcalino de 0,749 % ficou ligeiramente superior ao limite, que é de 0,60 %. Estes dados são importantes para desenvolver os testes de RAA em argamassas e concretos que são submetidos a ataques em ambientes agressivos.

Mediante as informações levantadas sobre a produção e os tipos de rejeitos, aliadas a caracterizações físicas, químicas e petrográficas de quartzitos, arenito, diabásio e do cimento Portland, obtidas nesta fase da pesquisa, pode-se embasar os estudos de reatividade potencial álcali-agregado e os estudos dos concretos de pós reativos, visando o seu aproveitamento pela indústria da construção civil.

3 REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO

3.1 HISTÓRICO DA PATOLOGIA E ESTUDOS REALIZADOS

A reação álcali-agregado foi descoberta na década de 1930, pelo engenheiro e pesquisador Thomas Stanton, da Divisão de Estradas de Rodagem do estado norte-americano da Califórnia. Seus estudos contribuíram, não apenas com a descoberta das causas da patologia, mas também com soluções para a minimização do problema. As pesquisas de Stanton iniciaram em decorrência de estágios avançados de fissuração em estruturas de concreto. No final da referida década, após realizar inúmeras investigações em concretos deteriorados, ele detectou produtos expansivos provenientes de reações envolvendo os álcalis do cimento e os minerais da areia utilizada como agregado miúdo. Após a realização de ensaios laboratoriais, utilizando teores elevados de álcalis no cimento, o pesquisador constatou a presença de eflorescência no concreto e fissuras similares às estruturas deterioradas. Após consecutivos testes, Stanton verificou que, ao limitar a 0,60 % o teor de álcalis no cimento, a manifestação da patologia no concreto foi reduzida (HASPARIK et al., 2009; THOMAS et al. 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Com o objetivo de minimizar o risco de fissuração em obras de concreto em contato com água, principalmente em barragens, Hoobs (1988) destacou que os estudos realizados por Stanton motivaram a US Bureau of Reclamation (estatal norte americana que gerencia os recursos hídricos e geração de energia elétrica), a estabelecer o limite de 0,60 % o teor de álcalis para os cimentos utilizados na construção de suas barragens nos Estados Unidos da América.

Na Figura 3.1, Thomas Stanton posa ao lado de uma estrutura deteriorada pela RAA.

Figura 3.1 - Thomas Stanton em um guarda-corpo de ponte com fissuras devido à RAA



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

3.1.1 Estudos da RAA no Brasil

De acordo com Paulon (1981), o primeiro estudo de RAA no Brasil foi desenvolvido por Gitahy, em 1963, em rochas que foram utilizadas para construção da barragem de Jupiá-MS. Os estudos de Gitahy contribuíram, segundo Hasparyk (1999), para diagnosticar o potencial deletério da rocha gnáissica utilizada como agregado, e com isso propor a limitação do teor de álcalis do cimento e também para propor a utilização de pozolana em substituição parcial do cimento na produção de novos concretos, objetivando mitigar os efeitos expansivos.

A necessidade de se realizar estudos de RAA no Brasil foi destacada por Kihara (1986), por se tratar de um país em que existe grande diversidade litológica e poucos trabalhos publicados sobre o tema. Por outro lado, segundo Kihara e Scandiuzzi (1993), houve um aumento progressivo de estudos de casos de RAA no Brasil, entre o final dos anos 1980 e início dos anos 1990, principalmente em obras de barragens de concreto atacadas pela reação deletéria.

3.1.2 Eventos científicos realizados sobre RAA

A primeira conferência internacional sobre RAA: “*International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICCAR)*”, segundo Thomas et al. (2013), foi realizada na Dinamarca, em 1974. Na ocasião, apenas 13 trabalhos foram apresentados, por pesquisadores de cinco países: Dinamarca, Alemanha, Islândia, Reino Unido, EUA. Entretanto, foi a partir deste impulso que o interesse pela RAA cresceu, conforme se vê na Tabela 3.1. Em 1992, mais de 300 pesquisadores, representando 29 países, participaram da 9ª ICCAR sobre RAA, em Londres, na Inglaterra, evento que resultou na publicação, em seus anais, de 150 artigos. Já na 16ª edição da ICAAR, promovida em junho de 2022, em Lisboa, Portugal, foram publicados 180 trabalhos a título de anais do evento.

Em 1995, aconteceu o *Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams*, em Chattanooga, nos EUA. No evento, foram apresentados trabalhos de grande relevância, principalmente relacionados às investigações de RAA em barragens. A quantidade de trabalhos também foi significativa, superou em números de artigos a primeira edição do encontro, realizado em 1992, no Canadá.

Tabela 3.1 - Eventos internacionais realizados sobre RAA.

Edição	Ano	Local
1	1974	Copenhague (Dinamarca)
2	1975	Reiquiavique (Islândia)
3	1976	Londres (Inglaterra)
4	1978	Purdue (EUA)
5	1981	Cidade do Cabo (África do Sul)
6	1983	Copenhague (Dinamarca)
7	1986	Ottawa (Canadá)
8	1989	Quioto (Japão)
9	1992	Londres (Inglaterra)
10	1996	Melbourne (Austrália)
11	2000	Montreal (Canadá)
12	2004	Pequim (China)
13	2008	Trondheim (Noruega)
14	2012	Austin (EUA)
15	2016	São Paulo (Brasil)
16	2022	Lisboa (Portugal)

Fonte: Adaptado de ICAAR (2022).

No Brasil, o primeiro evento sobre RAA aconteceu em 1997. O Simpósio Brasileiro sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, realizado em Goiânia-GO, debateu novos casos de manifestações de RAA em estruturas de concreto, com ênfase na questão das estruturas de barragens (HASPARYK, 1999). No ano de 2016, a 15ª edição do ICAAR foi realizada em São Paulo-SP. Ao todo, 146 artigos foram publicados nos anais da conferência. Em 2019, também na capital paulista, com promoção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), aconteceu um workshop: RAA – Reações Expansivas no Concreto, em que se debateu estudos sobre métodos de prevenção e de mitigação da reação.

3.1.3 Estudos de RAA com Quartzitos do Sul de Minas

A Tabela 3.2 apresenta algumas publicações relativas a RAA, de estudos realizados com quartzitos provenientes do Sul de Minas Gerais.

Tabela 3.2 - Síntese dos estudos de RAA realizados com quartzitos do Sul de Minas Gerais

Pesquisadores	Objeto de estudo
Hasparyk (1999)	Foram realizados diversos ensaios para o diagnóstico da formação do gel expansivo em agregados de quartzitos e diabásios. De maneira geral os resultados com os diabásios indicaram uma maior potencialidade deletéria comparado ao de quartzitos.
Pinheiro (2003)	Foram realizadas investigações em uma ponte em concreto armado sobre o Rio Turvo, localizada no município de Capitólio-MG, produzida com quartzitos do sudoeste mineiro. Os elementos de fundação e pilares foram completamente deteriorados pela reação, sendo necessária a recuperação. Não foram realizados ensaios laboratoriais de RAA.
Hasparyk (2005)	Nesta tese de doutorado, foi realizada uma profunda investigação sobre manifestações patológicas provenientes da RAA na barragem de FURNAS, construída na década de 50, com uso de agregados de quartzitos para a produção dos concretos. Foram realizados diversos ensaios laboratoriais: físicos, mecânicos, petrográficos, MEV, dentre outros.
Hasparyk et al. (2006)	Foram destacadas as análises microscópicas realizadas nos concretos afetados pela RAA da UHE de FURNAS, mostrando o diagnóstico e a evolução da formação do gel expansivo.
Francklin Junior et al. (2008)	Estudo de caracterização e RAA, através do método acelerado em barras de argamassa, utilizando agregados de quartzitos do sudoeste mineiro, comparados com agregados convencionais utilizados no município de Passos-MG. Os resultados apresentados neste estudo mostraram-se satisfatórios para o uso dos quartzitos comparados com gnaisses e diabásios provenientes da mesma região.
Reis et al. (2018)	Estudo de viabilidade do uso de rejeitos de mineração de quartzitos do sudoeste mineiro, como agregados graúdo e miúdo para a produção de peças de concreto para a pavimentação. Na ocasião, foram realizados ensaios de expansibilidade, pelo método acelerado em barras de argamassa.
Francklin Junior et al. (2021)	Diagnóstico da reação álcali-sílica (RAS), utilizando diferentes métodos para a determinação da expansibilidade em barras de argamassa e prismas de concreto e análises microscópicas utilizando-se Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

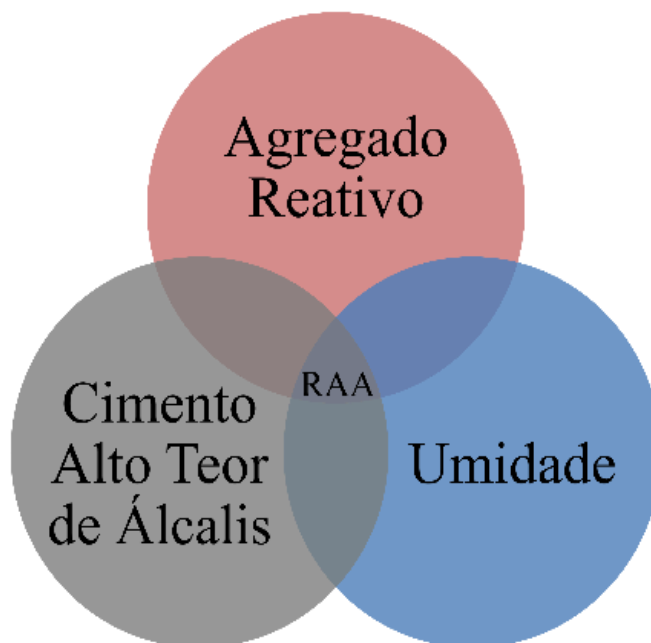
Fonte: O Autor (2022)

3.2 TIPOS DE OCORRÊNCIA DA RAA

A RAA é uma das manifestações patológicas mais comuns em concretos de cimento Portland. Trata-se de uma reação química entre alguns constituintes presentes em certos tipos de agregados e componentes alcalinos, que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto

(NBR 15577-1: ABNT, 2018). A ocorrência da RAA está condicionada à presença simultânea de três fatores: agregado potencialmente reativo, umidade e álcalis, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 Combinação de elementos para formação do gel expansivo



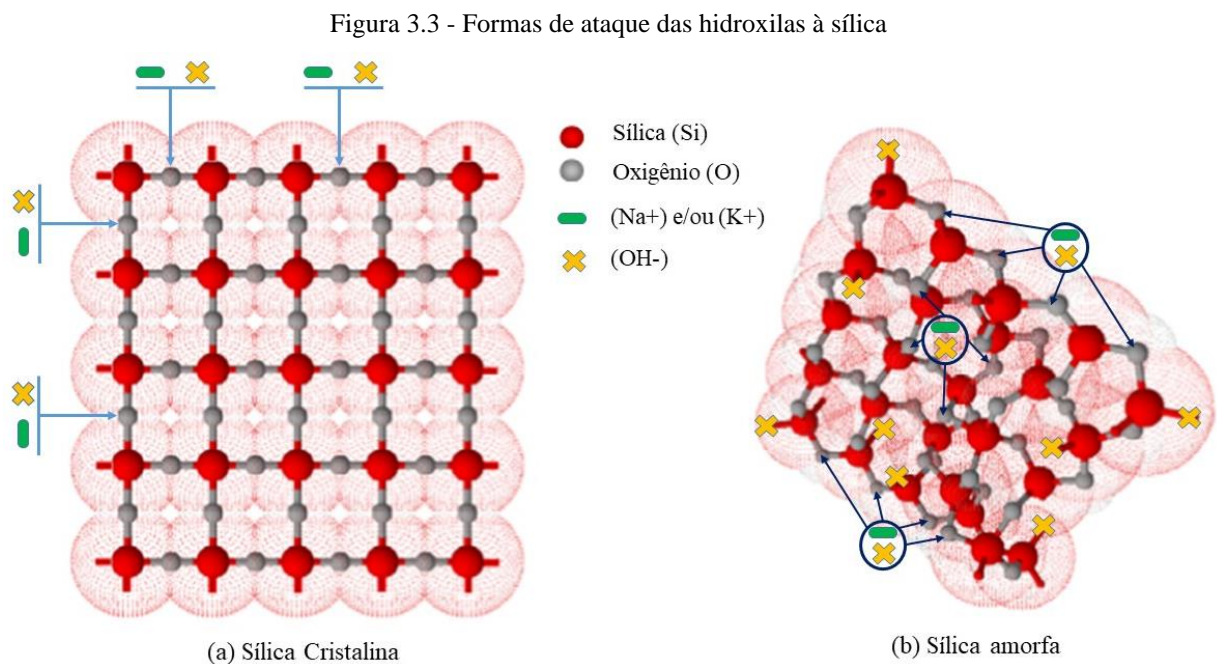
Fonte: O Autor (2022)

A reação álcali-agregado é um processo que envolve os seguintes elementos: íons alcalinos Na^+ e K^+ , derivados de argilas e xistos provenientes do cimento; íons hidroxilas (OH^-); e alguns minerais reativos que compõe os agregados, principalmente a sílica amorfa. Os álcalis, sódio e potássio, por sua vez, são rapidamente solubilizados no interior dos poros e podem ser provenientes de qualquer fonte interna ou externa ao concreto. O produto da reação é um gel higroscópico expansivo, que causa desde movimentações diferenciais nas estruturas e fissurações, até pipocamentos, exsudação do gel e redução da resistência à compressão (TIECHER 2006; MEHTA e MONTEIRO, 2014; HASPARYK, 2005; SAPAS et al., 2021; SUN et al., 2021).

Nas seções subsequentes, são discutidos os três tipos de manifestações patológicas provocadas pela RAA, sendo a reação álcali-sílica (RAS), a reação álcali-silicato (RASS) e a reação álcali-carbonato (RAC),

3.2.1 Reação álcali-sílica

É um fenômeno que ocorre quando a sílica reativa é envolvida pelo hidróxido de cálcio dissolvido a partir dos álcalis do cimento, atacando os poros do concreto ou a superfície dos agregados, formando um gel expansivo. Este é o tipo de reação considerada mais rápida quando comparada à reação álcali-silicato (MEHTA e MONTEIRO, 2014; COUTO, 2008). As sílicas reativas mais comuns, são: quartzo deformado, opala, tridimita, cristobalita e vidro vulcânico. A Figura 3.3 apresenta a forma de ataque das hidroxilas à sílica.



Fonte: Adaptado de Couto (2008)

Como pode ser observado, o ataque dos íons hidroxilas à sílica cristalina acontece na superfície externa. Este processo de ataque ocorre lentamente. Por outro lado, a sílica pouco cristalina - sílica amorfa - permite a penetração generalizada de OH^- , Na^+ e K^+ , rompendo com facilidade as ligações Si-O-Si, o que facilita que o processo de ataque ocorra mais rapidamente.

3.2.2 Reação álcali-silicato

A reação álcali-silicato (RASS) ocorre semelhantemente à reação álcali-sílica (RAS). No entanto, o processo é mais lento devido ao fato de os minerais reativos estarem mais espalhados na matriz. É a reação mais frequente no Brasil, segundo Munhoz (2007), devido ao fato de a maioria das barragens brasileiras terem sido construídas com agregados provenientes de quartzitos, granitos e gnaisses. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos, presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos e quartzitos, entre outros. Na Figura 3.4 são apresentados alguns tipos de sílicas reativas.

Figura 3.4 – Exemplos de sílicas reativas.



Fonte: Adaptado de Akhavan (2022)

Nota: quartzo (A); tridimita (B); vidro vulcânico (C); opala (D) e cristobalita (E).

Na Tabela 3.3 são apresentados os agregados produzidos com rochas ígneas e metamórficas, com suas respectivas fases mineralógicas reativas.

Tabela 3.3 - Agregados potencialmente reativos

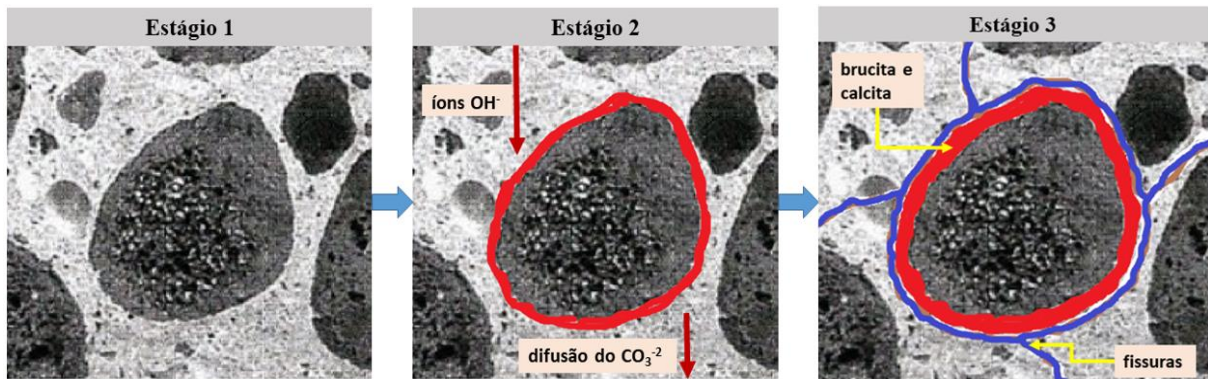
	Tipo de agregado	Fase Mineralógica Reativa
Rochas Ígneas	Andesito, Dacito, Fonolito, Latito, Obsidiana, Pedra Púmica, Riolito, Traquito e Tufo Vulcânico	Vidro vulcânico ácido a intermediário, tridimita e minerais de alteração - vidro devitrificado.
	Basalto	Minerais de alteração - clorofeita -, calcedônia, cristobalita, opala, palagonita, vidro vulcânico básico
	Granito, Granodiorito	> 30 % de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e minerais de alteração.
	Ardósia	Quartzo tensionado argilominerais - filossilicatos -
Rochas Metamórficas	Filito, Hornfel	> 30 % de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$ e quartzo microcristalino a criptocristalino vermiculita – filossilicatos -
	Gnaise, Granulito, Micaxisto, Quartzito e Xisto	> 30 % de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$, feldspato deformado e quartzo de granulação fina.
	Milonito	Quartzo tensionado e de granulação fina
	Rochas Metassedimentares	Quartzo tensionado e filos silicatos

Fonte: Adaptado de Hasparyk (1999)

3.2.3 Reação álcali-carbonato

Esta é a única reação que não produz o gel expansivo. Segundo Valduga et al. (2005), a combinação dos álcalis do cimento com os hidróxidos magnésio, provoca a desdolomitização do agregado, e com isso a expansão no interior do concreto. Em síntese, o hidróxido alcalino se regenera, enfraquece a zona de transição entre agregados e a pasta de cimento e provoca fissuras devido à perda de aderência dos materiais. De acordo com a NBR 15577 (ABNT, 2018), nesta reação, de que participam os álcalis e os agregados carbonáticos (calcários dolomíticos), são formados compostos cristalizados como a brucita, os carbonatos alcalinos, cálcicos e o silicato magnésiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos, a desdolomitização continua até que a dolomita reaja por completo ou a fonte de álcalis esgote, conforme se vê na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Estágios evolutivos da reação álcali-carbonato.

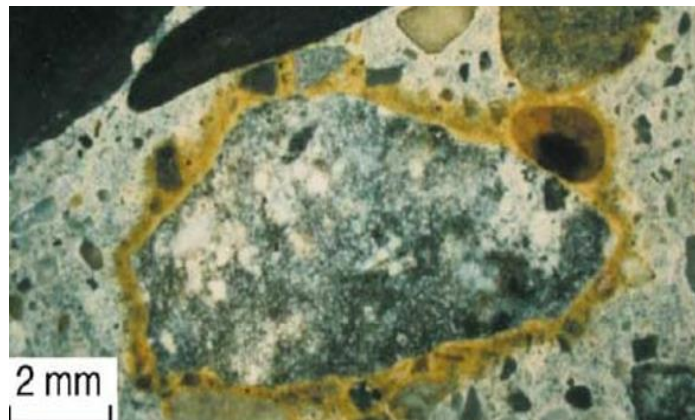


Fonte: Adaptado de Tiecher (2006)

Nota: Estágio 1: pasta e agregados dolomíticos estáveis; Estágio 2: migração de íons hidroxilas (OH⁻) até a superfície da dolomita, provocando a brucita e a calcita; Estágio 3: expansão seguida de fissuração.

Na Figura 3.6, pode-se ver o concreto atacado pela reação álcali-carbonato, com destaque para o produto formado na interface entre agregado e pasta de cimento.

Figura 3.6 - Produto da reação álcali-carbonato formado na interface entre agregado e pasta



Fonte: Gillott e Rogers (2003)

3.3 ALGUNS EXEMPLOS DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS DE RAA

São as constantes preocupações com o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado que motivam pesquisadores a propor estudos sobre os mecanismos de deterioração. Dentre esses mecanismos, um dos mais preocupantes é a RAA. Este fenômeno deletério, por suas características, não leva a estrutura ao colapso repentino, nem pode ser a única causa do desabamento de uma edificação. Entretanto, caso a patologia estrutural não seja diagnosticada e sua causa não seja devidamente tratada, para que se recupere a estrutura, os

efeitos ao longo do tempo tendem a ser devastadores. O importante, para se evitar o pior, é a realização da análise de cada caso e a adoção das medidas corretivas cabíveis, tais como: impedir o ingresso de água; tratamento químico para atenuar a velocidade de reação deletéria; restringir as deformações; e aliviar as tensões na estrutura (SANCHEZ, 2008).

A RAA pode incidir em estruturas diversas, tais como edifícios, obras portuárias, centrais termoelétricas, obras hidráulicas, barragens, centrais hidroelétricas, túneis, pontes e viadutos. Por exemplo, Mizumoto (2009) destaca o incidente, ocorrido em 2004, verificado durante a inspeção das sapatas e blocos de fundação do Edifício Areia Branca, após este colapsar. O acidente permitiu a constatação de um dos primeiros casos da RAA em obras prediais das regiões metropolitanas de Olinda e Recife, no Pernambuco. Na Figura 3.7 se pode ver as sapatas da fundação do Edifício afetados pela RAA.

Figura 3.7 - Fissuração em blocos de fundação afetados pela RAA.



Fonte: Mizumoto (2009).

Hasparyk (2005) realizou um estudo sobre as estruturas de concreto da UHE-FURNAS, no município do sudoeste mineiro de São José da Barra, atacadas pela RAA. Para este trabalho, foram extraídos de alguns testemunhos de concreto e géis cristalizados, provenientes da RAS, conforme se vê na Figura 3.8. Por sua vez, a Figura 3.9 apresenta o procedimento de recuperação de um dos pilares do vertedouro da barragem.

Figura 3.8 - Géis coletados na superfície do concreto afetado pela RAS na UHE-FURNAS.



Fonte: Hasparyk (2005).

Figura 3.9 - Recuperações nos pilares atacados pela RAS no vertedouro da barragem UHE-FURNAS.



Fonte: Hasparyk (2005).

Nota: Tela metálica e tubos de PVC para injeção de calda nas fissuras (A); Projeção de argamassa (B).

Pinheiro (2003), ao realizar um estudo com quartzitos do sudoeste de Minas Gerais, detectou inúmeros ataques provocados pela RAA à ponte do Rio Turvo, no município de Capitólio, como se vê na Figura 3.10. Para a execução da estrutura de concreto desta ponte foram utilizados agregados miúdos e grãos de quartzitos. O estágio de deterioração chegou a níveis avançados e comprometedores da segurança. Anos após o estudo de Pinheiro (2003), a ponte do Rio Turvo passou por um processo de recuperação e reforço estrutural.

Figura 3.10 – Pilar em concreto armado (visto de cima) da Ponte do Rio Turvo, com fissuras típicas da RAA



Fonte: Pinheiro (2003)

3.4 MEDIDAS PREVENTIVAS DA RAA E GRAU DE RISCO DE OCORRÊNCIA

Conforme a norma técnica NBR 15577-1 (ABNT, 2018), para que sejam mensurados os riscos de ocorrência da RAA são necessárias diversas avaliações: do grau de reatividade do agregado; das condições ambientais de exposição da estrutura; e das dimensões dos elementos estruturais de concreto. A Tabela 3.4, apresenta o grau de reatividade em função da expansão aos 30 dias, pelo método acelerado de barras de argamassa (NBR 15577-4: ABNT, 2018), e aos 365 dias, pelo método de prismas de concreto (NBR 15577-6: ABNT, 2018). Até a edição da NBR 15577 (ABNT, 2018), não se dispunha de dados estatísticos suficientes para classificar o grau de reatividade do agregado pelo método acelerado em prismas de concreto. A Tabela 3.5, por sua vez, apresenta o grau de risco de ocorrência da RAS em função das dimensões e condições da exposição da estrutura e da reatividade do agregado.

Tabela 3.4 - Classificação do grau de reatividade do agregado

Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias ^a (%)	Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias ^b (%)
Potencialmente inócuo grau R0	< 0,19	< 0,04
Potencialmente reativo grau R1	0,19 - 0,40	0,04 - 0,12
Potencialmente reativo grau R2	0,41 - 0,60	0,13 - 0,24
Potencialmente reativo grau R3	> 0,60 %	> 0,24

^a Valores com base na experiência brasileira; ^b Valores extraídos da C 1778 (ASTM, 2016).

Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

Tabela 3.5 - Grau de risco de ocorrência da RAS

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco ^a		Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço ^b em ambiente seco		Mínimo	Moderado	Alto
Estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito alto
Estruturas em contato com álcalis ^c		Alto	Muito alto	

^a Ambiente seco, com umidade relativa do ar < 60 %, geralmente encontrado no interior das edificações.

^b Elemento maciço é aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1 m.

^c Estruturas em contato com a água do mar, solos contaminados, lençóis freáticos contendo sais alcalinos etc.

Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

A Tabela 3.6 apresenta a classificação da intensidade das medidas preventivas (MP), mostrando que não há necessidade de medida preventiva quando o risco de ocorrência da RAS for desprezível, ou para estruturas de classe A, independentemente do grau de risco avaliado. Para as demais classes de estruturas, a intensidade da medida preventiva depende do grau de risco de ocorrência da RAS.

Tabela 3.6 - Grau de intensidade da medida preventiva (MP)

Risco de ocorrência	Classe de estrutura			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível			MP 0	MP 0
Mínimo		MP 0	MP 1	MP 2
Moderado	MP 0	MP 1	MP 2	MP 3
Alto		MP 3		
Muito alto		MP 4	MP 4	MP 4

Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

3.4.1 Medidas de mitigação

Segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), as medidas de mitigação da expansão provocadas pela reação de álcalis com agregados potencialmente reativos abrangem a limitação de álcalis no concreto e o uso de materiais inibidores adequados, ou ambos, conforme se vê na Tabela 3.7. Quando os materiais inibidores forem usados, eles devem apresentar determinados requisitos ou características, que levem à mitigação da expansão. A mitigação da expansão deve ser comprovada com recurso aos métodos de ensaio previstos na NBR 15577-5 ou na NBR 15577-6 (ABNT, 2018). As medidas de mitigação mostradas na Tabela 3.7 são em função da intensidade das medidas preventivas, enquanto que na Tabela 3.8 são apresentados os requisitos de composição dos materiais inibidores.

Tabela 3.7 - Medidas de mitigação da expansão devida a RAS

Grau de intensidade	Opção 1	Opção 2	Opção 3
MP 0		Nenhuma ação é necessária	
MP 1	Limitar o teor de álcalis do concreto a $< 2,4 \text{ kg/m}^3$ de Na_2O equivalente.	Utilizar cimento: CP II-E ou CP II-Z (NBR 11578: ABNT), ou CP III (NBR 5735: ABNT), ou CP IV (NBR 5736: ABNT).	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva de grau de intensidade 2.
MP 2	Utilizar cimento: CP III, com no mín. 60 % de escória (NBR 5735: ABNT).	Utilizar cimento CP IV com no mínimo 30 % de pozolana, (NBR 5736: ABNT).	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva de grau de intensidade 3.
MP 3	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio de prismas de concreto aos dois anos.	Usar uma das medidas previstas na ação preventiva de grau de intensidade 4.
MP 4			Trocar o agregado.

Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

Tabela 3.8 - Requisitos de composição dos materiais inibidores

Material inibidor	Requisitos da composição
Cimento Portland tipo CP II E e CPIII	Cimento Portland, com teores de escória granulada de alto-forno suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis < 0,19 % aos 30 dias (NBR 15577-5: ABNT), ou < 0,04 % em dois anos (NBR 15577-6: ABNT).
Cimento Portland tipo CPII-Z e CPIV	Cimento Portland, com teores de materiais pozolânicos suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis < 0,19 % aos 30 dias (NBR 15577-5: ABNT), ou < 0,04 % em dois anos (NBR 15577-6: ABNT).
Sílica ativa e metacaulim ou outros materiais pozolânicos em combinação com qualquer tipo de cimento Portland	Sílica ativa, metacaulim e materiais pozolânicos, com composição que atenda, respectivamente, às NBR 13956-1 (ABNT), NBR 15894-1 (ABNT) e NBR 12653 (ABNT). Os teores necessários destas adições devem ser suficientes para promover a mitigação das expansões a níveis < 0,19 % aos 30 dias (NBR 15577-5: ABNT), ou < 0,04 %, em dois anos (NBR 15577-6: ABNT).

Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

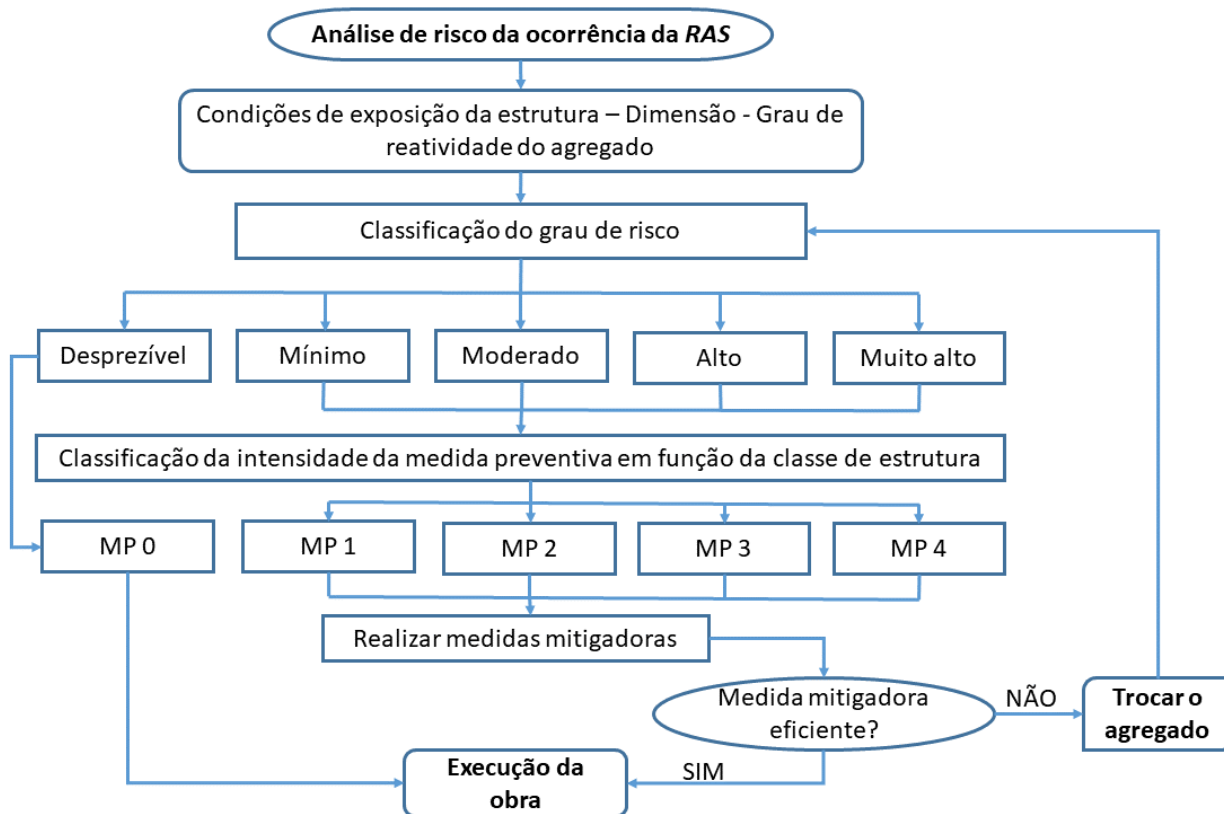
A mitigação da expansão ocasionada pela RAA pode ser alcançada pela combinação entre materiais cimentícios inibidores de expansão, a serem utilizados na obra, e pelo agregado potencialmente reativo, já avalizado e com procedimento estabelecido pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018) ou pela NBR 15577-6 (ABNT, 2018), conforme o caso.

A eficiência destes materiais cimentícios deve ser comprovada pelo método acelerado em barras de argamassa conforme NBR 15577-5 (ABNT, 2018) ou pelo método dos prismas de concreto conforme NBR 15577-6 (ABNT, 2018). A depender do grau de reatividade dos agregados, os cimentos Portland inibidores, sozinhos, podem não ser suficientes para se chegar aos níveis de mitigação de expansão necessários. Nesse caso, pode-se trocar o cimento, trocar o agregado, ou ainda incorporar à mistura adições normalizadas, que devem ser ensaiadas variando-se os teores dos materiais inibidores da reação até que se chegue à comprovação da sua eficiência contra as expansões deletérias.

A norma técnica NBR 15577-1 (ABNT, 2018) auxilia na escolha do agregado. Para tanto, ela considera, primeiramente, a definição da classe e conhecimento das condições de exposição da estrutura: isto é, determinar se o ambiente é seco, se a estrutura é enterrada ou submersa, e se está exposta à umidade ou em contato com água ou álcalis. Na sequência, se necessário é feita a análise e a classificação de risco de ocorrência da RAS, a depender das condições

ambientais, das dimensões da estrutura e do grau de reatividade do agregado. Assim, se pode aferir a intensidade das medidas necessárias preventivas e mitigadoras, conforme resume a Figura 3.11.

Figura 3.11 - Fluxograma de decisão de uso do agregado quanto a RAS

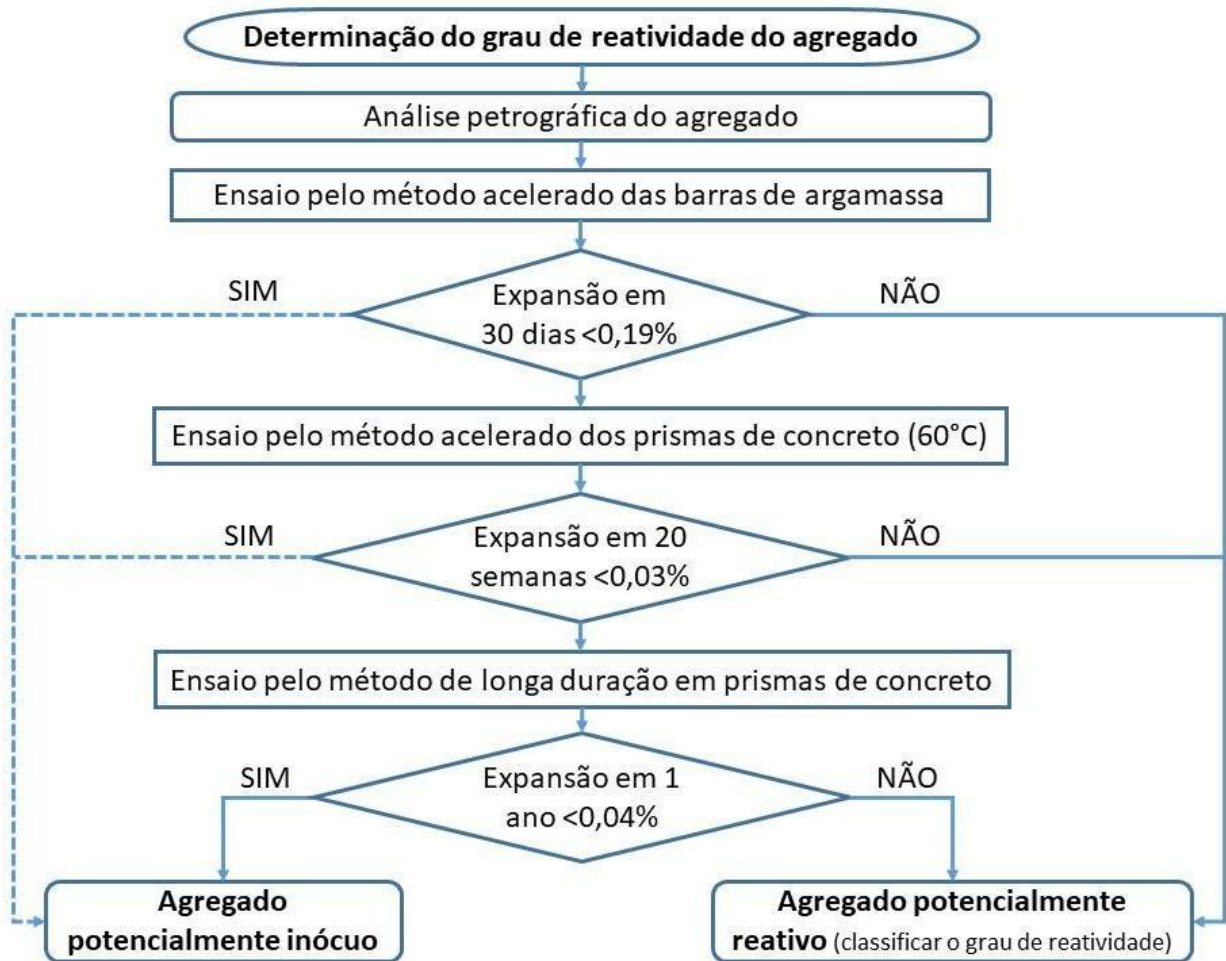


Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

3.5 MÉTODOS DE ENSAIO PARA DIAGNÓSTICO DA RAA

Existem diversos métodos de investigação para a detecção dos produtos patológicos formados pela RAA no concreto, como o método de expansibilidade em barras de argamassa e em prismas de concreto e o método químico, dentre outros (HASPARYK, 2005). Entretanto, nesta seção são abordados apenas os métodos de investigação da RAA com ênfase à avaliação da RAS e RASS, conforme apresentado na Figura 3.12, em conformidade com o estabelecido pela norma técnica NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Figura 3.12 - Fluxograma para determinar o grau de reatividade do agregado



Fonte: Adaptado de NBR 15577-1 (ABNT, 2018)

3.5.1 Análise Petrográfica do Agregado

A análise petrográfica não se aplica aos agregados miúdos. Seu procedimento consiste, de acordo com a NBR 15577-3 (ABNT, 2008), em examinar macroscopicamente a amostra e classificá-la quanto ao tipo - cascalho, pedrisco, fragmento de rocha, testemunho de sondagem ou pedra britada -, bem como avaliar suas propriedades físico-mecânicas, classificando-as segundo as seguintes categorias: rocha muito coerente, coerente, pouco coerente ou friável.

Com a utilização de uma seção delgada registram-se, com auxílio de um microscópio petrológico, as características texturais, de granulação, de composição mineralógica, de presença ou ausência de minerais e das fases deletérias quanto à RAA e à quantidade de quartzo microgranular - <0,15 mm. Os limites máximos aceitáveis de fases reativas para classificar o

agregado como potencialmente inócuos são: 5 % - quartzo deformado -, 3 % - calcedônia-, 1 % - tridimita ou cristobalita-, 3 % - vidro vulcânico - e 0,5 % - opala. A Figura 3.13, apresenta o Anexo B da NBR 15577-3 (ABNT, 2018), que auxilia na realização da apreciação petrográfica.

Figura 3.13 - Análise petrográfica - Anexo B –NBR 15577-3 (ABNT, 2018)

Tipo: <input type="checkbox"/> Cascalho <input type="checkbox"/> Pedrisco <input type="checkbox"/> Areia de britagem <input type="checkbox"/> Fragmento de rocha <input type="checkbox"/> Testemunho de sondagem <input type="checkbox"/> Pedra britada		
Forma dos fragmentos / índice de forma: <input type="checkbox"/> Lamelar <input type="checkbox"/> Equidimensional <input type="checkbox"/> Alongada <input type="checkbox"/> Não se aplica		
Propriedades físico-mecânicas: <input type="checkbox"/> Rocha muito coerente <input type="checkbox"/> Rocha coerente <input type="checkbox"/> Rocha pouco coerente <input type="checkbox"/> Rocha friável		
Características macroscópicas:		
Cor:		
Estrutura: <input type="checkbox"/> Maciça <input type="checkbox"/> Foliada <input type="checkbox"/> Bandada <input type="checkbox"/> Outra:		
Características microscópicas:		
Composição mineralógica		
Principal:	Subordinada:	Deletérios <input type="checkbox"/> opala <input type="checkbox"/> zeólita <input type="checkbox"/> calcedônia <input type="checkbox"/> quartzo deformado <input type="checkbox"/> vidro vulcânico <input type="checkbox"/> quartzo microgranular <input type="checkbox"/> vidro devitrificado <input type="checkbox"/> outros: _____ <input type="checkbox"/> clorofeita Porcentagem de quartzo microgranular <input type="checkbox"/> <5% <input type="checkbox"/> 5% a 15% <input type="checkbox"/> >5% <input type="checkbox"/> não se aplica
Textura		
Granularidade: <input type="checkbox"/> Grossa (3 cm e 5 mm) <input type="checkbox"/> Média (5 mm e 1 mm) <input type="checkbox"/> Fina (< 1 mm)		
Estado de alteração: <input type="checkbox"/> Rocha sã <input type="checkbox"/> Rocha pouco alterada <input type="checkbox"/> Rocha alterada		
Observações:		
Feições indicativas de deformação		
Feldspatos – Texturas potencialmente reativas: <input type="checkbox"/> Mirmequita (quartzo vermiforme) <input type="checkbox"/> Mesopertita <input type="checkbox"/> Pertita em chama <input type="checkbox"/> Não se aplica		
Granularidade da matriz/cimento (para rochas sedimentares): <input type="checkbox"/> > 1 mm <input type="checkbox"/> 1 mm a 0,20 mm <input type="checkbox"/> < 0,20 mm <input type="checkbox"/> Não se aplica		
Microfissuração: <input type="checkbox"/> Ausente ou fraco <input type="checkbox"/> Moderado <input type="checkbox"/> Forte <input type="checkbox"/> Não se aplica		
Tipo de rocha: <input type="checkbox"/> Ígnea <input type="checkbox"/> Sedimentar <input type="checkbox"/> Metamórfica		
Classificação petrográfica:		
Reatividade potencial álcali-agregado: <input type="checkbox"/> Potencialmente inócuo <input type="checkbox"/> Potencialmente reativo		

Fonte: Adaptado de NBR 15577-3 (ABNT, 2018)

3.5.2 Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

O método de ensaio acelerado, preconizado pelas normas NBR 15577-4 (ABNT, 2018) e C-1260 (ASTM, 2014), determina, por meio da variação de comprimento - expansão - de barras de argamassa, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica, na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis do cimento.

De acordo com a norma técnica NBR 15577-1 (ABNT, 2008), para a execução do ensaio são necessários os seguintes cuidados de temperaturas e umidade: sala de moldagem em temperatura de $24\pm 4^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $\geq 50\%$; água de amassamento à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$; estufa para armazenamento das barras de argamassa à temperatura de $80\pm 2^{\circ}\text{C}$; câmara úmida à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $\geq 95\%$; sala de desmoldagem e da sala de leitura à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$

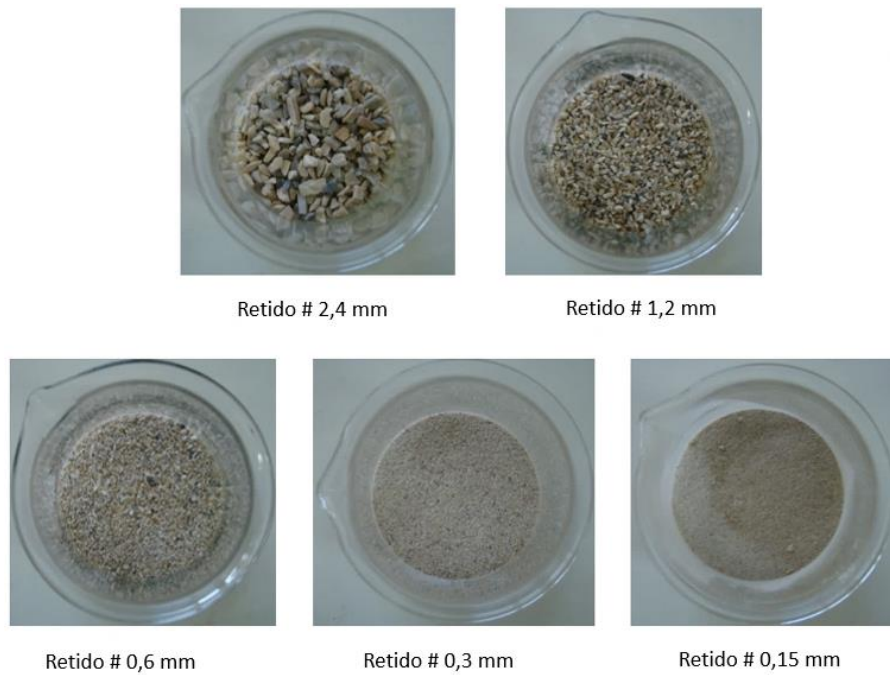
O agregado miúdo utilizado para produção da argamassa deve ser classificado de acordo com a sua granulometria, respeitando-se a quantidade de material retido em cada uma das peneiras indicadas, conforme mostra a Tabela 3.9. Por sua vez, a Figura 3.14 apresenta exemplos de obtenção de agregados conforme frações estabelecidas pela NBR 15577 (ABNT, 2018).

Tabela 3.9 - Classificação e quantificação dos agregados para produção das barras de argamassa

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material	
Passante (mm)	Retido (mm)	%	g
4,75	2,36	10	99,0
2,36	1,18	25	247,5
1,18	0,60	25	247,5
0,60	0,30	25	247,5
0,30	0,15	15	148,5

Fonte: Adaptado de NBR 15577 (ABNT, 2018)

Figura 3.14 – Indicação das frações de agregados utilizadas para produção da argamassa



Fonte: O autor, 2022

A norma técnica NBR 15577 (ABNT, 2018) estabelece o traço que deverá ser utilizado para produzir a argamassa, conforme apresentado na Tabela 3.10. Caso a massa específica (d) do agregado seja menor que $2,45 \text{ g/cm}^3$, deverá ser corrigida a sua quantidade utilizando a equação 3.1.

$$m_a = 990 * \frac{d}{2,65} \quad (3.1)$$

m_a = é a massa de agregado em g

d = massa específica seca em g/cm^3

Tabela 3.10 - Traço de argamassa para confecção das barras para ensaio acelerado da RAA

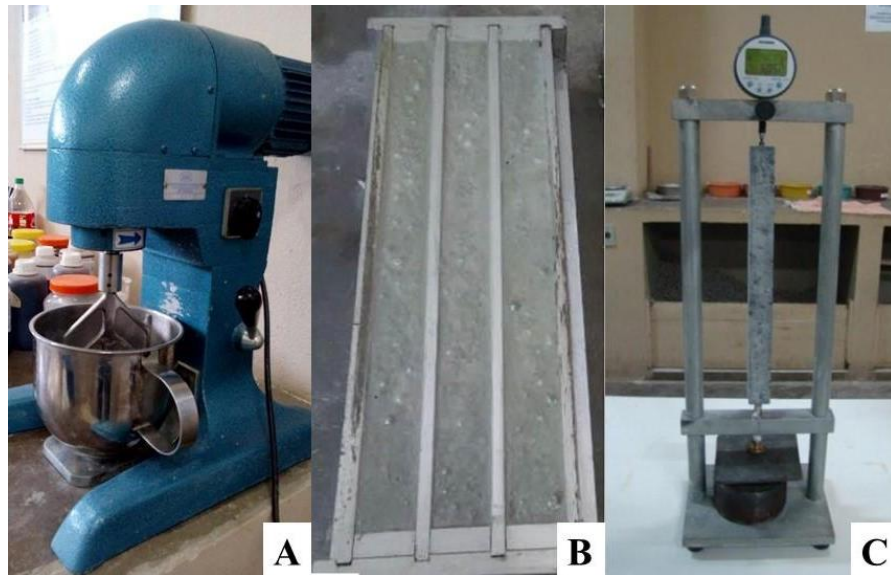
	Cimento	Agregado	Água
Traço	1	2,25	$a/c = 0,47$
massa (g)	440	990	206,8

Fonte: NBR 15577 (ABNT, 2018)

Conforme a norma técnica NBR 15577 (ABNT, 2018), para a mistura dos materiais e a produção da argamassa deve ser utilizada uma argamassadeira elétrica, com cuba com capacidade para 5 litros. Os moldes utilizados para moldagem dos corpos-de-prova devem conter locais para a fixação de pinos de inox. Quando desmoldado, os pinos servem de

referência para a medida da expansibilidade. As barras de argamassa devem conter as dimensões 25 x 25 x 285 mm e as medidas de expansão são realizadas com auxílio de um relógio comparador com precisão de 0,001 mm, conforme o apresentado na Figura 3.15.

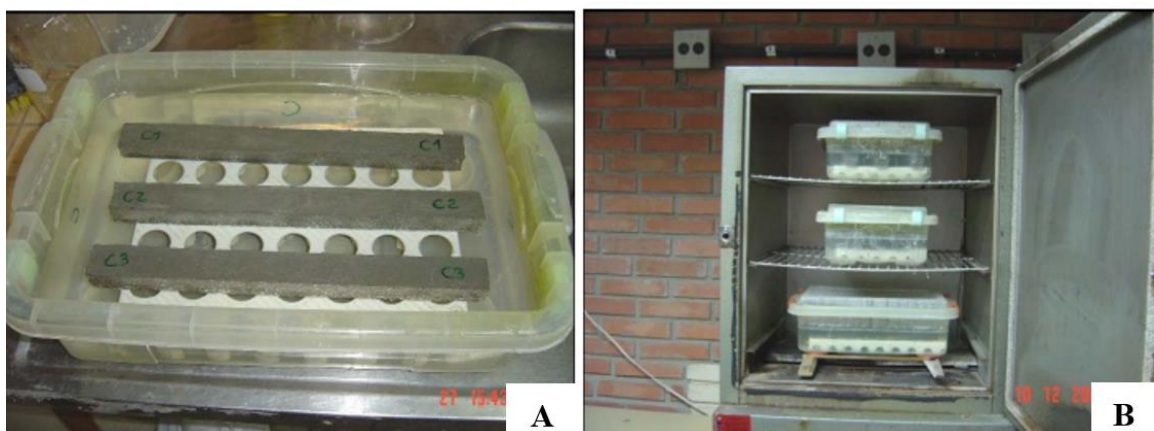
Figura 3.15 – (A) Argamassadeira para produção das barras de argamassa; (B) moldes metálicos 25 x 25 x 285 mm; (C) aparato de medição



Fonte: O autor, 2022

As barras de argamassa, após o período de cura inicial, devem ser mergulhadas em solução alcalina de NaOH a 1 N e submetidas à temperatura de 80 °C, em estufa ventilada. Na Figura 3.16 é apresentado procedimento realizado por Kormann et al. (2004).

Figura 3.16 – (A) Acomodação das barras em recipiente com solução de NaOH; (B) em estufa a 80°C



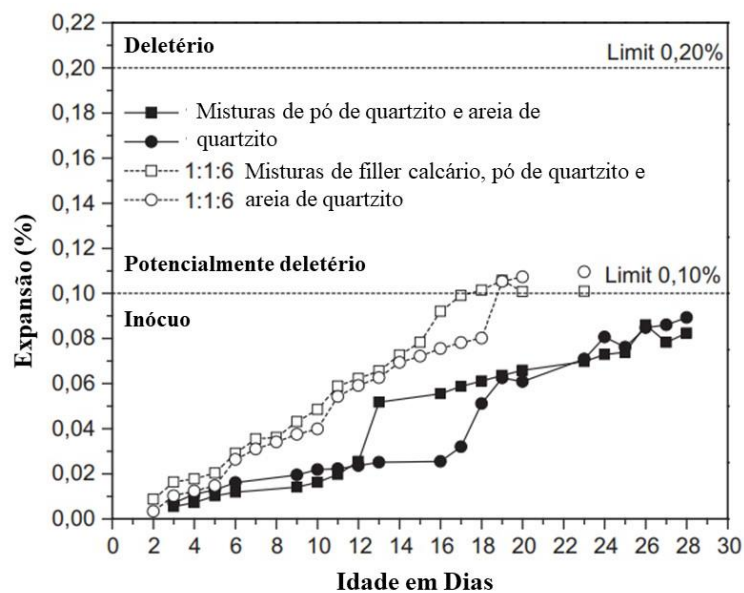
Fonte: Kormann et al. (2004)

O cimento Portland a ser utilizado para a avaliação do grau de reatividade de um determinado agregado deve ser um cimento-padrão e deve satisfazer, segundo a norma NBR 15577 (ABNT, 2018), às seguintes condições: superfície específica de $4900 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$; equivalente alcalino total expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($0,658 \text{ K}_2\text{O} \% + \text{Na}_2\text{O} \%$) de $0,90 \pm 0,10 \%$; expansão em autoclave inferior a $0,20 \%$; relação água/cimento (a/c) igual a $0,47$ em massa.

Em relação aos limites de expansibilidade, segundo a norma C-1260 (ASTM, 2014), para expansões medidas aos 16 dias, valores menores que $0,10 \%$ indicam comportamento inócuo na maior parte dos casos, taxas entre $0,10$ e $0,20 \%$ indicam a possibilidade de comportamento potencialmente deletério e valores superiores a $0,20 \%$ indicam comportamento deletério. Como há uma faixa de dúvida, em que as expansões entre $0,10$ e $0,20 \%$, aos 16 dias de idade, podem indicar agregados tanto com comportamento inócuo, como reativo, sugere-se neste caso levar o ensaio pelo menos até os 28 dias de idade. Além disso, ainda existe a necessidade de se obter informações suplementares com confirmação dos minerais reativos, formação dos produtos da reação e informações de campo de uso do agregado.

No estudo de RAA realizado por Barros et al. (2016), utilizando rejeitos de quartzitos provenientes de indústria de rocha ornamental sediada na região Nordeste do Brasil, tendo os limites de expansão baseados na norma C-1260 (ASTM, 2014), foi verificado indícios do comportamento inócuo das barras de argamassa produzidas com agregados de quartzitos, pois as expansões produzidas ficaram próximas a $0,10 \%$. É o que se vê na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Exemplo de resultados de expansibilidade conforme limites da C-1260 (ASTM, 2014).

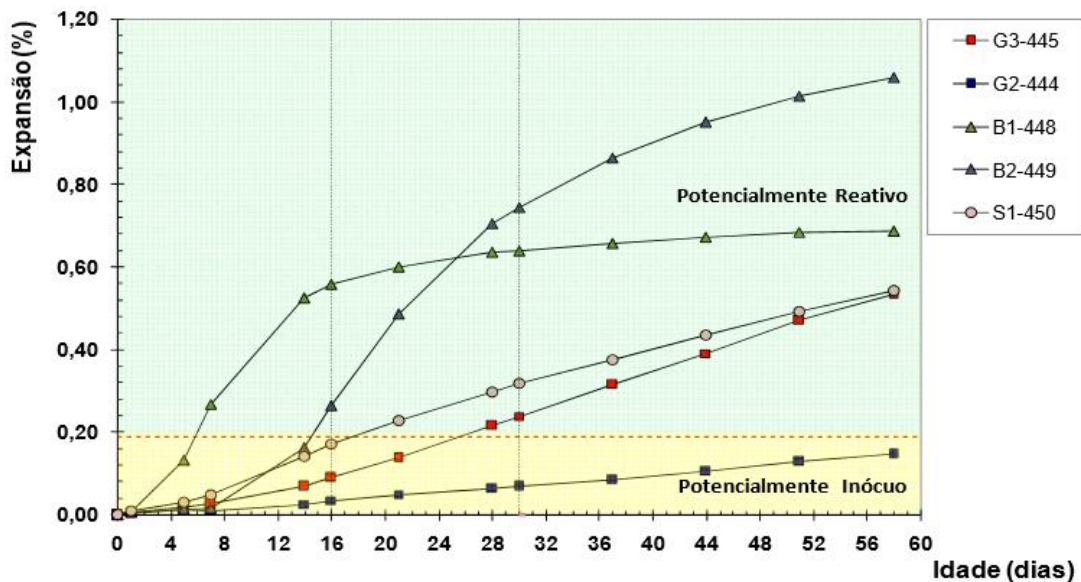


Fonte: Barros et al. (2016)

A metodologia adotada pela norma técnica NBR 15577-1 (ABNT, 2018) recomenda que as medidas de expansibilidade sejam realizadas nas idades de 16 e 30 dias, contados a partir da moldagem, tendo-se como resultado a expansão média das três barras de argamassa. Para expansões menores que 0,19 % aos 30 dias, o agregado é classificado como potencialmente inócuo e, para superiores a 0,19 %, é classificado como potencialmente reativo.

Na Figura 3.18, é apresentado um exemplo de resultado de expansibilidade obtido por Mizumoto (2009), no qual, aos 16 dias, três das cinco amostras de diferentes procedências e formações litológicas - sendo, granitos (G2 e G3), basaltos (B1 e B2) e seixo (S1) - foram analisadas e classificadas como de comportamento inócuo. Já aos 30 dias, apenas uma delas permaneceu com este comportamento.

Figura 3.18 - Exemplo de resultados de expansibilidade de acordo com a NBR 15577 (ABNT, 2018)



Fonte: Mizumoto (2009)

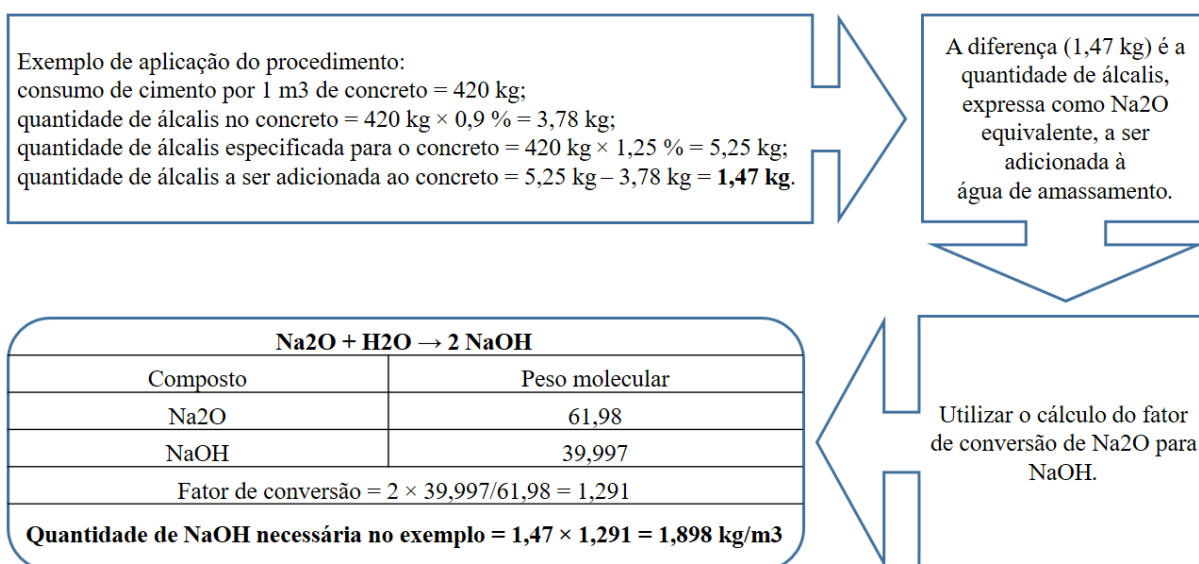
3.5.3 Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método de longa duração

De acordo com a norma técnica NBR 15577-6 (ABNT, 2018), este método de ensaio é considerado o mais eficiente para investigação da RAA. Ele tem como propósito avaliar tanto o agregado graúdo quanto o miúdo, utilizando-se cimento padrão, com adição suplementar de NaOH. Os corpos-de-prova de concreto têm dimensões de 75 x 75 x 285 mm. A temperatura

da câmara úmida e da sala onde ocorre a moldagem e a desmoldagem, deve ser de $23 \pm 2^\circ \text{C}$. A umidade relativa da sala de moldagem deve ser $\geq 50 \%$ e a da câmara úmida $\geq 95 \%$.

O estudo de dosagem do concreto deve atender, segundo a norma NBR 15577 (ABNT, 2018), às seguintes exigências: consumo de cimento de 420 kg/m^3 ; relação a/c de 0,45; volume compacto seco de agregado graúdo de 70 % do volume total de concreto; teor de argamassa seca de 50 % e módulo de finura do agregado miúdo de $2,7 \pm 2$. Com o objetivo de elevar o teor de álcalis do cimento à 1,25 % de equivalente alcalino em Na_2O , uma quantidade específica calculada de NaOH deve ser dissolvida na água de amassamento, com base nos álcalis totais do cimento expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, conforme apresentado na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Procedimento para cálculo da quantidade de NaOH



Fonte: Adaptado de NBR 15577-6 (ABNT, 2018)

Os agregados graúdos devem ser classificados pela dimensão dos grãos, conforme apresentado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Granulometria requerida do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha		Proporção Individual em massa
Passante (mm)	Retido (mm)	
19,0	12,5	1/3
12,5	9,5	
9,5	4,75	

Fonte: NBR 15577 (ABNT, 2018)

Para que os ensaios sejam considerados válidos e representativos, para cada mistura de concreto efetuada devem ser moldados pelo menos três prismas de concreto (SANCHEZ, 2008). Durante as primeiras 24 horas, os prismas deverão ser acondicionados em câmara úmida, para cura do concreto, protegendo-os do gotejo de água. A expansão de cada prisma de concreto é determinada com o auxílio de aparato de medição, com aproximação de 0,001 mm, através da diferença entre o comprimento inicial, aferido no primeiro dia, e o comprimento final verificado em cada uma das idades de controle, e deve ser expressa em porcentagem (Figura 3.20).

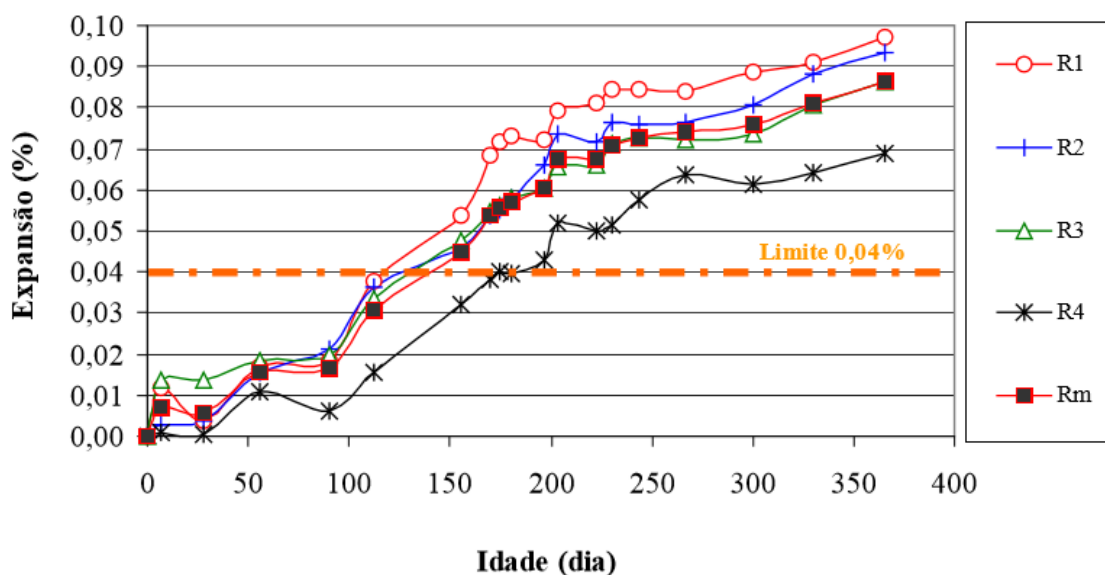
Figura 3.20 – (A) Moldes para produção dos prismas de concreto; (B) Aparato para medição da expansão



Fonte: Sanchez (2008)

A expansão média dos prismas de concreto numa determinada idade deve ser expressa com aproximação de 0,01 %, sendo estas limitadas por uma taxa de 0,04 %: ou seja, para expansões inferiores a 0,04 %, os agregados são considerados inócuos. Na Figura 3.21 são apresentados os resultados de ensaios de expansão em prismas de concreto obtidos por Hasparyk (2005), nos quais foi constatado, por exemplo, o potencial deletério dos agregados de quartzitos utilizados nos concretos com valores médios de expansão de 0,08 %, em 365 dias.

Figura 3.21 - Exemplo de expansão em prismas de concreto utilizando agregados de quartzitos



Fonte: Hasparyk (2005)

3.5.4 Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado

Alternativamente e de forma semelhante ao ensaio de longa duração, foi elaborada uma nova metodologia de ensaio, o método acelerado. Nele, os prismas de concreto são submetidos a ambientes agressivos, com condições de cura e temperatura controlada de 60° C, para serem analisados durante um período de 20 semanas. Além da medida da variação de comprimento, é recomendada a medida da variação de massa, em percentagem, de cada um dos prismas, para se assegurar a saturação adequada.

Este novo método compõe a atual NBR 15577 (ABNT, 2018). Sua criação foi motivada por sugestões de procedimentos estabelecidos pela RILEM TC 219-AC (2016) e por algumas outras pesquisas brasileiras. Dentre estas, destaca-se o trabalho desenvolvido por Sanchez et al. (2011). Entretanto, a norma ainda necessita de dados estatísticos que sejam suficientes para uma classificação mais detalhada do grau de reatividade pelo método acelerado.

Este método foi discutido em 2016 durante a *15ª International Conference on Alkali-Aggregate Reaction – ICAAR*, em São Paulo. Posteriormente em 2017, foi realizado um Workshop promovido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, também em São Paulo, onde foram apresentadas novas propostas para atualização da NBR 15577 (ABNT, 2018).

Para a determinação da reatividade potencial do agregado em prismas de concreto, por meio do método acelerado, se o resultado obtido indicar expansão menor que 0,03 %, na idade

de 20 semanas, o agregado é considerado potencialmente inócuo. Já se o resultado indicar expansão maior ou igual a 0,03 %, na idade de 20 semanas, o agregado é classificado como potencialmente reativo.

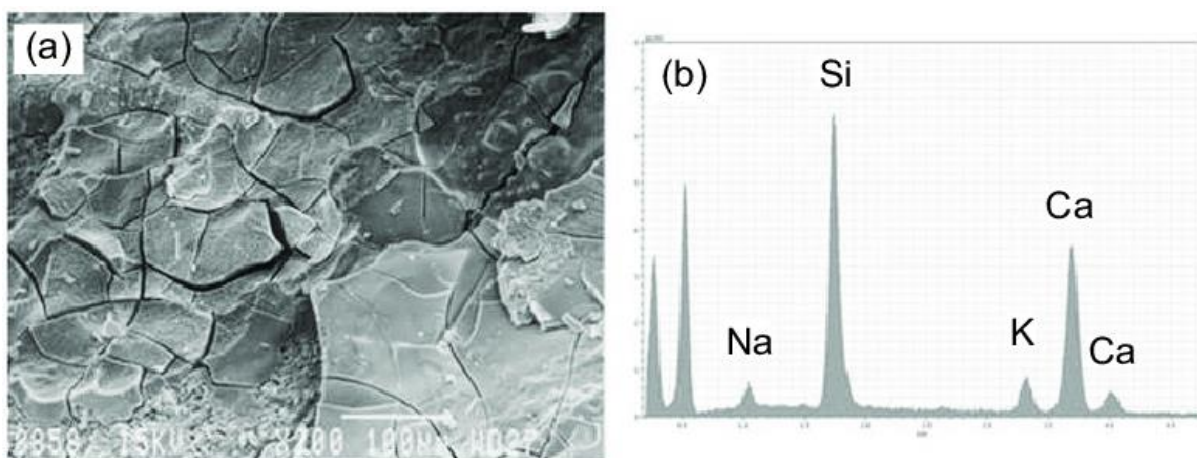
Anote-se, por fim, que é grande a necessidade de formulação de outros meios investigativos da RAA, tendo em vista que os métodos normativos atuais são subjetivos quanto ao diagnóstico da patologia.

3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que vem sendo largamente utilizada na análise da microestrutura de concretos e argamassas, além de outros materiais utilizados na construção civil. Ela serve para avaliar estruturas que já possuam reações desencadeadas. A amostra é submetida a um feixe de elétrons, de modo que informações podem ser apuradas a partir dos sinais originados.

Os elétrons secundários são os mais importantes na formação de imagens obtidas por MEV. São eles que fornecem informações topológicas da amostra. Já os elétrons retroespalhados fornecem informações sobre o número atômico e os raios X identificam e quantificam os elementos presentes no material. Por proporcionarem grandes ampliações imagéticas, eles permitem a identificação precisa dos produtos da RAA, conforme se vê na Figura 3.22 (DIAMOND, 2004; CYR e POUHET, 2015).

Figura 3.22 - Morfologias típicas e composição dos produtos da RAA obtidos com microscopia eletrônica de varredura - MEV (a) e espectrometria de raios X de energia dispersiva - EDX (b)



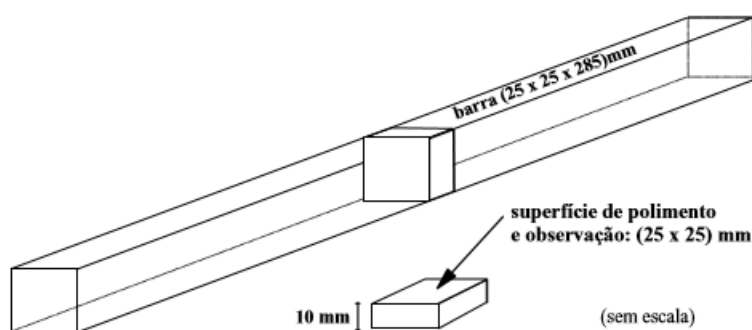
Fonte: Cyr e Pouhet (2015)

Geralmente, o gel expansivo proveniente da reação é observado no MEV através de bordas nas interfaces da pasta/agregado em amostras previamente polidas de argamassa ou concreto. As superfícies de fratura também são analisadas, com o objetivo de verificar a concentração dos produtos da RAA nos poros da amostra, disperso na argamassa, interfaces e/ou depositados nas fissuras dos agregados.

Segundo Mohammadi et al. (2020), em alguns tipos rochosos, como o quartzito, por exemplo, a formação do gel proveniente da RAS ocorre geralmente na superfície do agregado, formando produtos ricos em sílica e cálcio. Normalmente os álcalis migram pelas camadas superficiais mais rapidamente que o cálcio, facilitando a decomposição do agregado e a formação do gel de RAS. Este ciclo se repete e leva o concreto à expansão por meio de forças de tração interna na zona de transição - entre o agregado e a matriz de cimento. Strack et al. (2020), em seus estudos, identificaram produtos expansivos proveniente da RAS por meio de análises investigativas utilizando o MEV em argamassas produzidas com agregados de quartzito (Las Placitas) dos EUA previamente atacadas com soluções de NaOH e de KOH.

Hasparyk (1999) realizou uma investigação da RAA, através do MEV, em barras de argamassa confeccionadas com agregado de quartzitos e basaltos, com recurso ao método acelerado. As barras foram mergulhadas durante 30 min em acetona e, posteriormente, foram extraídas do centro da barra amostras com 10 mm de espessura, conforme Figura 3.23.

Figura 3.23 – Esquema de extração da amostra a ser polida e analisada no MEV



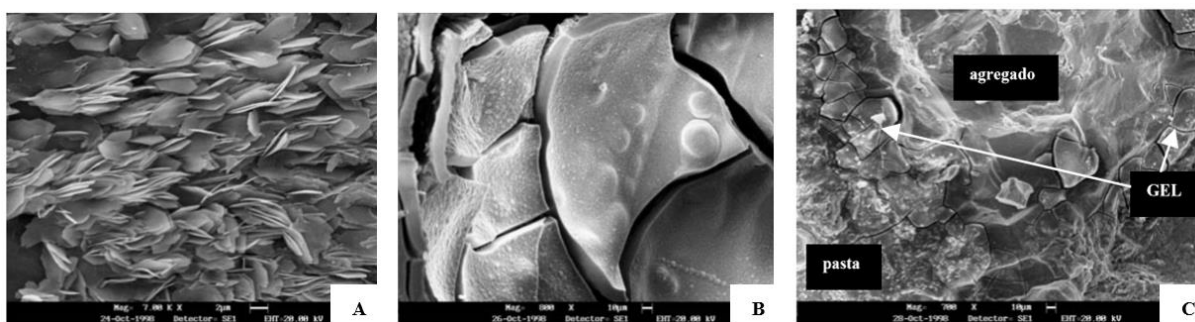
Fonte: Hasparyk (1999)

Após cada etapa de polimento, as amostras foram submetidas a imersão em álcool isopropílico. Depois do polimento, foi realizada a limpeza das superfícies utilizando-se o

ultrassom para a retirada do abrasivo e da pasta de diamante. Em seguida, as amostras foram colocadas em porta alumínio e submetidas à metalização utilizando ouro.

A Figura 3.24 apresenta micrografias realizadas por Hasparyk (1999) em barras de argamassas confeccionadas com agregados de quartzitos. Em (A) são destacadas finas placas cristalizadas sobre o agregado de quartzito, em (B) está evidenciado o gel maciço gretado formado no poro da argamassa e em (C) são apresentadas as fases dos materiais constituintes, com destaque para o gel expansivo formado na zona de transição entre o agregado e a pasta.

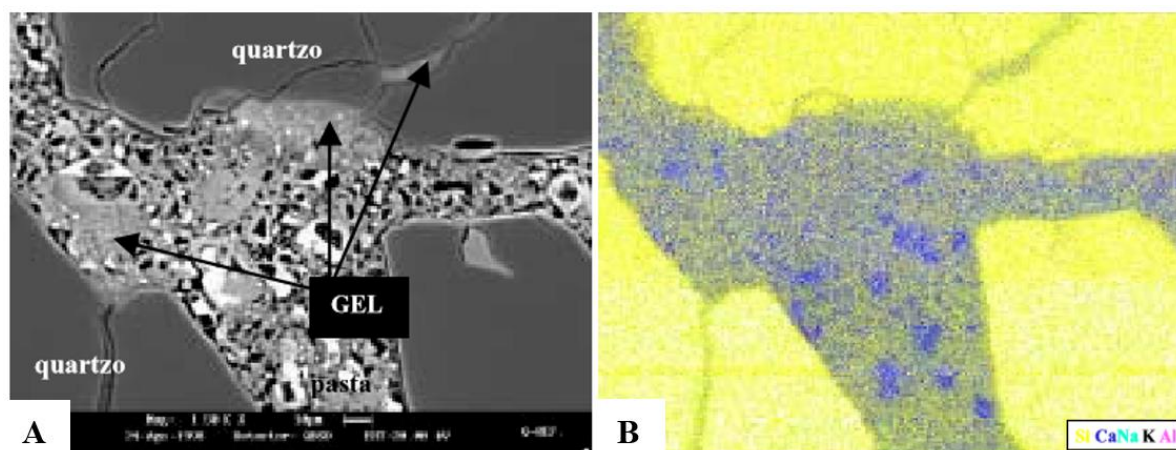
Figura 3.24 - Micrografias em barras de argamassas confeccionadas com agregados de quartzito



Fonte: Hasparyk (1999)

Hasparyk (1999) também realizou um contraste em uma amostra de argamassa utilizando o MEV e, posteriormente, o raio X, o que possibilitou uma melhor interpretação dos produtos formados, conforme se vê na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Argamassa preparada com quartzito apresentando o gel de RAA ao redor dos agregados.



Fonte: Hasparyk (1999)

Nota: (A) imagem no detetor de elétrons retroespalhados; (B) imagem de Raios X, sendo Si (amarelo), Ca (azul), Na (azul claro, K (preto) e Al (rosa)

3.6 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os procedimentos adotados para a realização do estudo de RAA. As amostras representativas dos quartzitos (ALP e STL) e do diabásio (DIA) foram submetidas a ensaios laboratoriais, para investigação das manifestações patológicas. O programa experimental contemplou: a determinação da composição química do cimento, para quantificar os teores de álcalis presentes; o ensaio de expansibilidade pelo método acelerado em barras de argamassa e de CPR's; o ensaio de expansibilidade pelo método de longa duração em prismas de concreto; o ensaio de expansibilidade pelo método acelerado em prismas de concreto; e as análises microestruturais com recurso ao MEV. A Tabela 3.12, apresenta uma síntese dos procedimentos de ensaios e as respectivas normas técnicas empregadas.

Tabela 3.12 - Síntese dos procedimentos de ensaios e respectivas normas.

Ensaio	Norma	Descrição básica
Composição Química do Cimento	C-114 (ASTM, 2018)	Obtenção do teor de álcalis (Na e K) e equivalentes alcalinos dos cimentos CPV-ARI Ultra e CP V-ARI, dos fabricantes Votorantim Cimentos e LAFARGEHOLCIM, respectivamente.
Expansão em Barras de Argamassa e de CPR pelo Método Acelerado	NBR 15577-4 (ABNT, 2018)	Confecção de 3 barras de argamassa para cada uma das 8 amostras (traço 1:2,25:0,47), 3 barras de CPR com sílica ativa (traço 1:0,25:1,54:0,22 e 9,6 % de superfluidificante) e 3 barras de CPR sem sílica ativa (traço 1:1,54:0,22 e 9,6 % de superfluidificante), todas com dimensões 25x25x285 mm. Leituras de expansibilidade, periodicamente, até 30 dias.
Expansão em Prismas de Concreto pelo Método Longa Duração	NBR 15577-6 (ABNT, 2018)	Confecção de 3 prismas para cada uma das 8 amostras, exceto STL0 e ALP1, dimensões 75x75x285 mm. Consumo de cimento 420 kg/m ³ ; a/c 0,45; volume de 70 % agregado graúdo; teor argamassa seca 50 %; MF agregado miúdo em 2,7. Leituras de expansibilidade, periodicamente, até 365 dias.
Expansão em Prismas de Concreto pelo Método Acelerado	NBR 15577-7 (ABNT, 2018)	Confecção de 3 prismas com “traço padrão” (STL0) e 6 prismas com 100 % de quartzito (STL0 100 %). Dimensões 75x75x285 mm; Leituras de expansibilidade utilizando relógio comparador e de comprimento com paquímetro, periodicamente, até 30 semanas.
Microestrutura (MEV)	Não Normativo	As fotomicrografias de SEM foram obtidas em equipamento ZEISS LEO 440. As amostras foram recobertas com 6 nm de ouro e mantidas em dessecador até a análise. E finalmente as amostras foram submetidas a Análise de Energia Dispersiva (EDS) utilizando o equipamento EDX LINK ANALYTICAL.

Fonte: O Autor (2022)

3.6.1 Cimentos

Os cimentos utilizados nesta pesquisa foram: o CP V-ARI ULTRA, lote L07133708, do fabricante Votorantim Cimentos e o CP V-ARI HOLCIM, lote F10/09/19-RBOO E3PZ258, do fabricante LAFARGEHOLCIM. Estes cimentos foram escolhidos por não conterem adições ao clínquer, pois as escórias e as pozolanas que compõem o CP-III e o CP-IV, respectivamente, podem contribuir para a mitigação da RAA.

O resultado de equivalente alcalino do CP V-ARI ULTRA, da Votorantim, foi obtido diretamente com o fabricante; e o resultado de equivalente alcalino do CP V, da Holcim, foi obtido por meio de análises químicas realizadas no Laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), conforme apresentado no capítulo 2.

3.6.2 Expansão em barras de argamassa e de CPRs pelo método acelerado

Seguindo os procedimentos recomendados pela norma técnica NBR 15577-4 (ABNT, 2018) foram produzidas 03 barras de argamassas com dimensões de 25 x 25 x 285 mm, com traço fixado em 1:2,25:0,47 e quantidades em massa (g) de 440:990:206,8, para cada uma das oito amostras de agregados (Figura 3.26 A). A argamassa foi preparada com água destilada com uma pequena concentração de NaOH, para correção dos álcalis mínimos presentes no cimento de $Na_2O_{eq} = 0,90 \%$. As misturas foram produzidas com auxílio de uma argamassadeira elétrica, com hélice planetária e cuba com capacidade para 5 litros, de forma a se obter a perfeita homogeneidade das misturas (Figura 3.26 B). Em seguida, as amostras foram adensadas com auxílio da mesa *flow* e soquete metálico (Figura 3.26 D). Nas extremidades dos moldes foram fixados pinos em aço inox, para serem incorporados à argamassa e servirem de bases para a determinação da expansibilidade.

Após a moldagem, as barras permaneceram em repouso em câmara úmida. Decorrido o período de cura, as barras foram retiradas dos moldes e identificadas, além de ter sido registrada a leitura inicial (Figura 3.26 C). Na sequência, as barras foram submersas em água e a seguir mantidas em estufa a 80 ° C, durante 24 h. Então foi efetuada uma nova leitura e as barras foram transferidas, para serem submersas na solução padrão com NaOH a 1 N e mantidas em estufa a 80 ° C, acelerando as reações, enquanto a solução fornece íons alcalinos suficientes, tornando

possível a obtenção de resultados em um curto espaço de tempo (Figuras 3.26 E e 3.26 F). As leituras de expansão foram realizadas periodicamente, aos 8, 16, 22 e 30 dias de idade, contados a partir da moldagem. E os resultados foram expressos em porcentagem de expansão, correspondendo às médias das três barras.

Durante a produção de algumas argamassas foram observadas friabilidades, principalmente nas amostras de quartzitos STL1, ALP1 e ALP3, que provocaram a autofragmentação dos materiais durante a mistura na argamassadeira. No caso específico da amostra ALP1, além de alterar a granulometria do agregado, a friabilidade resultou no aumento da área de superfície específica dos grãos, tornando necessário o uso de aditivo superplastificante à mistura, para promover a fluidez necessária para moldagem das barras de argamassas.

Além das argamassas normatizadas, para a análise da RAS foram produzidas barras de concretos de pós reativos (CPRs) com adição de sílica ativa (traço 1:0,25:1,54:0,22), denominadas CPR (c/s), e sem adição de sílica ativa (traço 1:1,54:0,22) denominada CPR (s/s), ambos utilizando 9,6 % de superfluidificante e a fração fina e pulverulenta de agregados de quartzitos de São Thomé das Letras (STL). O objetivo foi verificar o comportamento de durabilidade e a potencialidade reativa dos CPRs nesta condição de ensaio, frente a ataques em soluções agressivas de elevada alcalinidade. Nesta etapa de estudo, espera-se que os CPRs tenham um comportamento expansivo diferente das argamassas padronizadas, pois a dimensão máxima característica do agregado foi de apenas 0,6 mm. Com isso, existe uma exposição maior dos grãos de quartzo, o que pode acelerar o processo reativo, caso ele ocorra. Outra hipótese foi verificar a capacidade mitigadora da sílica ativa industrializada para combater os fenômenos expansivos.

Figura 3.26 - (A) materiais utilizados para a produção das barras de argamassa; (B) adição de material na argamassadeira; (C) barras de CPRs confeccionadas; (D) processo de adensamento utilizando a mesa flow; (E) barras dispostas verticalmente em solução de NaOH; (F) recipiente projetado para acondicionamento das amostras



Fonte: O Autor (2022)

3.6.3 Expansão em prismas de concreto pelo método de longa duração e acelerado

Para os ensaios de RAA pelo método de longa duração e acelerado, em prismas de concreto, foram adotados os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas NBR 15577-6 e NBR 15577-7 (ABNT, 2018). Na Figura 3.27 são destacados os procedimentos utilizados de preparo e moldagem dos prismas, onde são apresentados os materiais utilizados na fabricação dos concretos (A), o processo de mistura manual dos materiais (B), o adensamento realizado

com auxílio da mesa *flow* (C), o aspecto final dos concretos após moldagem (D) e o aspecto final dos prismas de concreto após a desmoldagem e identificação.

Figura 3.27 – (A) materiais utilizados para confecção dos prismas; (B) mistura manual dos materiais; (C) adensamento com auxílio da mesa *flow*; (D) aspecto final dos concretos após moldagem; (E) aspecto final dos prismas de concreto após a desmoldagem.



Fonte: O Autor (2022)

De posse dos percentuais de Na e K dos cimentos, foi realizado o ajuste dos teores de equivalentes alcalinos ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) em 1,25 %, por meio da adição de NaOH à água de amassamento do concreto, utilizando-se o procedimento estabelecido na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Fator de conversão de Na_2O para NaOH.

$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH}$	
Composto	Peso molecular
Na_2O	61,98
NaOH	39,997
Fator de conversão = $2 \times 39,997/61,98 = 1,291$	
Fonte: NBR 15577 (ABNT, 2018)	

As dosagens de concreto levaram em conta o consumo de cimento em 420 kg/m^3 , a relação água/cimento em 0,45, o volume compacto seco do agregado graúdo em 70 %, o teor de argamassa seca em 50 % e o módulo de finura do agregado miúdo em 2,7.

A Tabela 3.14, apresenta a relação das amostras e dos traços produzidos.

Tabela 3.14 - Relação de amostras e traços produzidos para ensaio de expansibilidade em prismas de concretos.

Ensaio	Amostras	Traço (kg)
Método de longa duração	STL1	1:1,56:2,56:0,45
	STL2	1:1,51:2,61:0,45
	STL3	1:1,41:2,62:0,45
	ALP2	1:1,62:2,39:0,45
	ALP3	1:1,69:2,40:0,45
	DIA	1:1,85:2,76: 0,45
Método Acelerado	STL0 (padrão)	1:1,41:2,62: 0,45
	STL0 (100 %)	

Fonte: O Autor (2022)

Após a moldagem, os prismas foram dispostos em câmara úmida por 24h e, posteriormente, foi realizada a desforma e a leitura inicial, com auxílio do relógio comparador. Posteriormente, os prismas foram acondicionados verticalmente, em recipientes plásticos com uma lâmina d'água ao fundo, e apoiados em uma grelha, de modo a manter uma distância 20 ± 5 mm da base dos recipientes. Os prismas de concreto foram mantidos em um ambiente com controle de temperatura a 38 ± 2 °C.

Antes de cada leitura, os prismas foram removidos da estufa e colocados em câmara úmida a 23 ± 2 ° C. Este procedimento foi necessário, pois poderiam ocorrer divergências significativas de expansibilidade caso não fossem respeitados estes intervalos de tempo e temperatura (WALLAU et al., 2018). As leituras de expansibilidade realizadas foram contadas a partir da moldagem dos prismas, nas idades de 7, 28, 56 dias de idade e por leituras mensais dos 3 até 12 meses.

As amostras STL1, ALP1 e ALP3 mostraram-se bastante friáveis durante a mistura e o adensamento do concreto. As partículas se fragmentaram, modificando a granulometria dos materiais, tendo como consequência o aumento da viscosidade do concreto, em virtude da alteração da superfície específica dos agregados. Como alternativa para facilitar o adensamento dos prismas, sem alterar a relação *a/c*, foi adicionado um aditivo superfluidificante às misturas. A amostra ALP1, mesmo com a adição do aditivo, foi descartada por apresentar elevado índice de porosidade e não atender às condições de adensamento.

Para a determinação da expansibilidade pelo método acelerado, foram produzidos dois traços de concretos. O primeiro deles, com uso de agregados miúdos inócuos (areia normalizada do IPT) e com agregados graúdos de quartzitos (STL0 padrão), conforme sugerido pela norma NBR 15577 (ABNT, 2018). E o segundo traço, produzido com agregados miúdos e graúdos de quartzitos (STL0 100 %). Os adensamentos dos concretos nos moldes prismáticos foram realizados em três camadas, com auxílio da mesa *flow*. Além da leitura de expansibilidade com relógio comparador, os prismas de concretos foram submetidos à mensuração de comprimento, utilizando o paquímetro. Após a determinação das medidas de expansibilidade iniciais em 24 h, os prismas foram acondicionados na posição vertical, em um recipiente hermético, com uma lâmina d'água de 30 ± 5 mm, e levados posteriormente para uma estufa (60 ± 2 ° C). As leituras foram realizadas nas idades de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 semanas (Figura 3.28).

O método acelerado em prismas foi normatizado pela ABNT em 2018 e várias pesquisas contribuíram para o estabelecimento deste procedimento. Por exemplo, os trabalhos publicados por Wallau et al. (2018) e Sanchez et al. (2011), que analisaram os desempenhos das expansibilidades dos concretos com uso de temperaturas superiores a 38° C, dentre outras análises. Pesquisas realizadas por Shi et al. (2020) apontaram um bom indicativo de método diagnóstico da RAS, utilizando temperaturas entre 60° C e 80° C, em prismas atacados com soluções mistas de KOH e NaOH.

Figura 3.28 - Prismas posicionados na vertical no interior do recipiente (A); Recipientes acondicionados no interior da estufa à $(60\pm 2)^\circ\text{C}$ (B); Medidas de comprimento com auxílio de paquímetro (C)



Fonte: O Autor (2022)

3.6.4 Análise da microestrutura utilizando MEV

No presente estudo, as fotomicrografias (MEV) das barras de argamassas e dos prismas de concretos foram obtidas na Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química de São Carlos (CAQI/IQSC/USP), utilizando o equipamento ZEISS LEO 440, operado com feixe de elétrons de 15kV, corrente de 2,82A e I probe de 200Pa (Figura 3.29).

Figura 3.29 – Equipamento MEV utilizado para a realização dos estudos de microscopia



Fonte: O Autor (2022)

Conforme apresentado na Figura 3.30, os fragmentos selecionados para investigação da microestrutura foram retirados de locais estratégicos de amostras de argamassas e de concretos que apresentaram expansões significativas durante os ensaios de expansibilidade e que manifestaram fissuras em suas superfícies. As amostras de CPRs não sofreram envergaduras e/ou fissurações, mas foram separadas para investigação da microestrutura. As amostras foram recobertas com 6nm de ouro em um metalizador Coating System BAL-TEC MED 020 (BAL-TEC, Liechtenstein) e mantidas em dessecador até o momento de análise. Foram realizadas análises utilizando o detector de elétrons secundários para obtenção das imagens e EDX Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raio-X para as microanálises dos produtos selecionados para investigação.

Figura 3.30 – Amostras de fragmentos de argamassas, concretos e CPRs fixadas no porta alumínio para realização da MEV.



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: (AM1) STL0 padrão- prisma de concreto - corpo de prova 1; (AM2) STL0 padrão - prisma de concreto - corpo de prova 2; (AM3) STL0 padrão - prisma de concreto - corpo de prova 3; (AM4) STL0 100 % - prisma de concreto; (AM5) ALP 2 - barra de argamassa - quartzito; (AM6) DIA - barra de argamassa – diabásio; (AM7) STL - barra de argamassa - quartzito; (AM8) barra de CPR s/s - sem sílica ativa; (AM9) barra de CPR c/s - com sílica ativa.

3.7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os seguintes resultados: composições de equivalentes alcalinos dos cimentos; expansibilidade pelo método acelerado em barras de argamassa; expansibilidade pelo método de longa duração em prismas de concreto; e expansibilidade pelo método acelerado em prismas de concreto. Os estudos de expansibilidade foram realizados utilizando amostras de quartzitos e do agregado referência de diabásio (DIA), seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 15577 (ABNT, 2018).

3.7.1 Composição dos equivalentes alcalinos dos cimentos

Os cimentos CP V-ARI Ultra, da Votorantim e CP V-ARI, da HOLCIM, foram escolhidos por não conterem em suas composições adições de pozolana e de escória siderúrgica, pois estas adições podem contribuir para a mitigação da reação álcali-sílica (RAS). Desta maneira existe uma tendência natural de maior alcalinidade na sua composição. Conforme detalhado no capítulo 2, foram realizadas análises químicas para obtenção do teor de álcalis (Na e K) nos cimentos (Tabela 3.15).

Tabela 3.15 - Especificação dos cimentos utilizados na pesquisa e seus respectivos equivalentes alcalinos.

Tipo	Fabricante	Lote / fabricação	Equivalente Alcalino (Na₂O_{eq})
CP V - ARI ULTRA	Votorantim Cimentos	L07133708	0,749 %
CP V – ULTRA RÁPIDO	Lafarge-Holcim	F10/09/19-RBOO E3PZ25	0,61 %

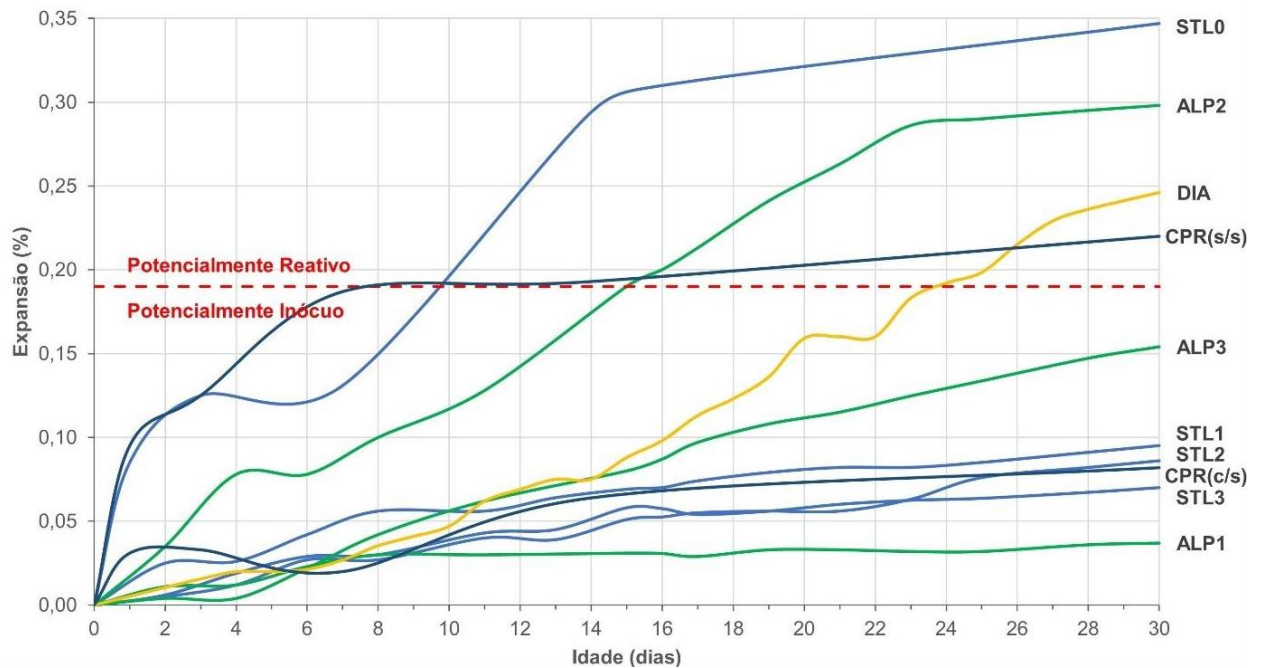
Fonte: O Autor (2022)

Estudos realizados por Tiecher (2006) com agregados do Sul do Brasil, combinados com diferentes tipos de cimentos, comprovaram a situação desfavorável do CP V-ARI na promoção da formação do gel expansivo em barras de argamassa submetidas ao ensaio de expansão pelo método acelerado. Por outro lado, existem vários produtos que mitigam essa reação, como, por exemplo, o uso de sílica ativa e de outros produtos pozzolânicos, como a escória de alto forno e a cinza volante, entre outros, comprovadamente eficazes na redução do equivalente alcalino de argamassas e concretos (CASSIANI et al., 2021; TAPAS et al., 2021).

3.7.2 Expansibilidade em barras de argamassa e de CPR's pelo método acelerado e análise em MEV

A Figura 3.31 apresenta um comparativo dos resultados de expansibilidade média das barras de argamassa e de CPR's, até a idade de 30 dias, ensaiadas pelo método acelerado.

Figura 3.31 - Síntese dos resultados de expansibilidade pelo método acelerado em barras de argamassa e CPR's.



Fonte: O Autor (2022)

As amostras de quartzitos STL0, ALP2 e CPR (s/s) e de diabásio (DIA) apresentaram um comportamento potencialmente reativo, com expansões acima do limite de 0,19 % estabelecido pela norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018). As amostras que apresentaram comportamento potencialmente reativo foram selecionadas para análise microestrutural, utilizando o MEV, para a constatação da ocorrência do gel expansivo proveniente da RAS.

A amostra STL0 não apresentou envergaduras e não se observou sinais expressivos de fissuras na superfície das barras. Já a amostra ALP 2 não apresentou envergaduras nas barras, mas apenas pequenos sinais de fissuras.

A amostra CPR (s/s), por sua vez, atingiu expansibilidades iniciais elevadas, com tendência à estabilização após o oitavo dia. Isso pode ser atribuído ao baixo índice de porosidade da amostra, o que provoca a baixa permeabilidade da solução e, como consequência, a redução da possibilidade da reação. Por outro lado, as amostras de CPR (c/s) com adição de

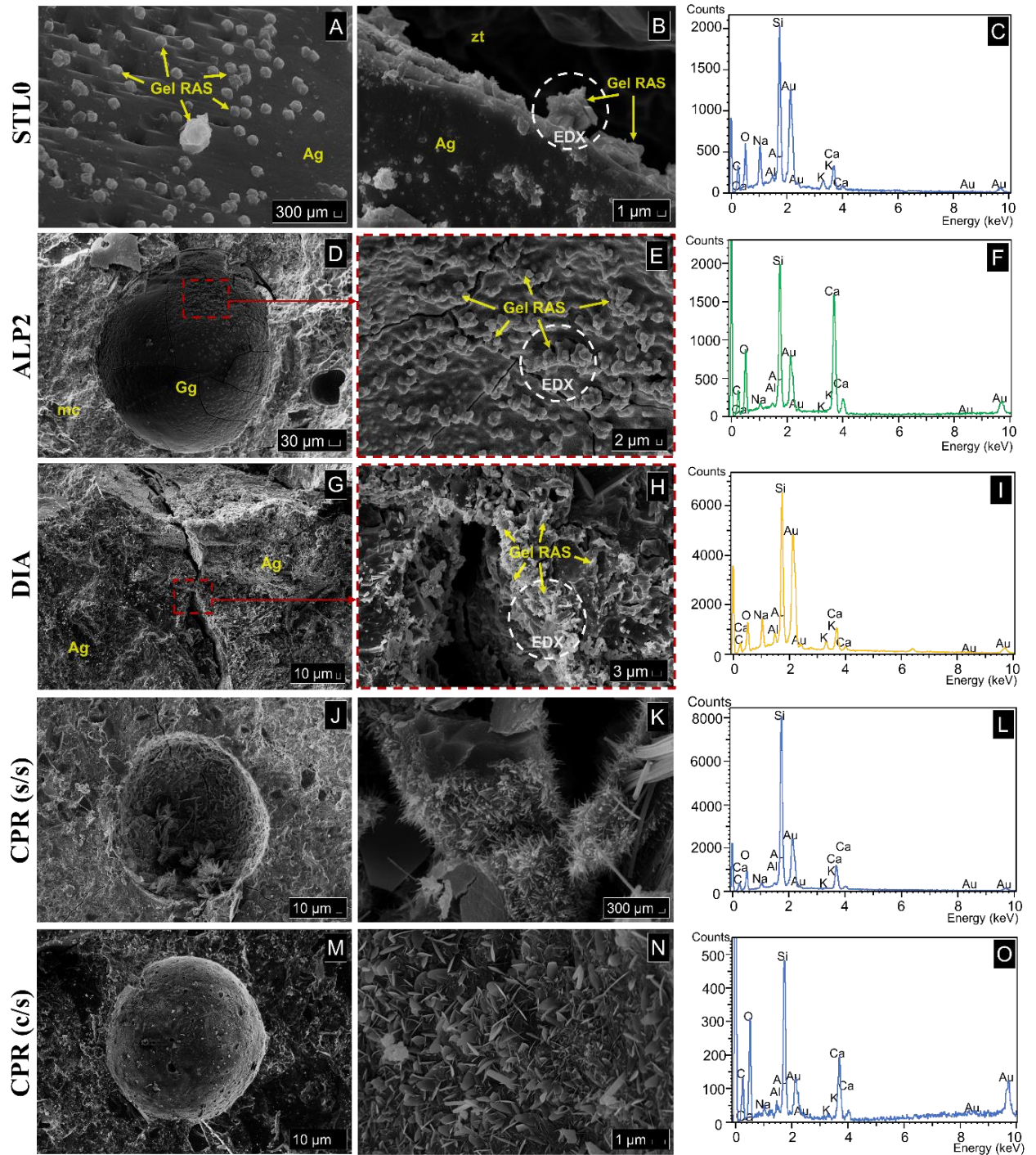
sílica ativa apresentaram um comportamento potencialmente inócuo, o que indica a eficácia do uso de sílica ativa para a mitigação das reações expansivas provenientes da RAA, mesmo em CPR's que contêm quartzitos e cimento CP V-ARI.

Na amostra STL0, durante as investigações microscópicas e as análises de espectroscopia de EDX realizadas nas barras de argamassa e de CPRs, foi possível observar produtos característicos de géis cristalizados apegados à borda do agregado. Observou-se, também, a formação generalizada típica de géis na superfície do agregado, conforme se vê na Figura 3.32 A e B. No gel supramencionado, foi realizada a análise de espectroscopia de EDX, com a qual constatou-se que se trata de géis de silício provenientes da RAS, como se pode ver na Figura 3.32 C. Na amostra ALP2 foi identificado um poro com aspecto de gel maciço gretado, conforme mostra a Figura 3.32 D. E, com a ampliação da imagem, foi possível ver as fissuras gretadas e a formação de gel botrioidal, típicos da RAS, registradas na Figura 3.32 E. Foi possível ainda identificar os produtos cristalinos gerados na superfície do agregado e, a partir da análise utilizando o espectro de EDX, constatar que se trata de géis de silício provenientes da RAS, conforme mostra a Figura 3.32 F.

As imagens da microestrutura do diabásio (DIA) foram coletadas no interior da região de fissura da amostra, em que se verificou a presença generalizada de produtos cristalizados, ilustrados pela Figura 3.32 G e H. Estes cristais foram submetidos à análise de EDX, o que permitiu confirmar a hipótese da formação do gel sílico-cálcico alcalina da RAS, conforme se vê na Figura 3.32 I. As amostras de CPR (c/s) e CPR (s/s) apresentaram micrografias de poros em que não foram identificadas com clareza os produtos típicos expansivos da RAS, apesar das análises de EDX, apontadas para o interior dos poros, indicarem picos de produtos sílico-cálcico alcalina. (Figuras 3.32 J, K, L, M, N e O).

Vale mencionar que Reis et al. (2018) também determinaram, pelo método acelerado, a expansibilidade de argamassas produzidas com quartzitos de Alpinópolis. Os resultados obtidos foram de aproximadamente 0,25 % aos 28 dias, valor próximo ao resultado da amostra ALP2, obtido nesta pesquisa. Já Barros et al. (2016), ao estudar a RAA de resíduos de quartzitos provenientes do Nordeste brasileiro, constatou expansões pouco significativas. Entretanto, este estudo realizou apenas o ensaio em barras de argamassa, sem se ocupar da investigação da microestrutura do composto. Sachlová et al. (2017), ao estudarem os quartzitos oriundos de Praga, capital da República Tcheca, verificaram comportamentos expansivos através de ensaios acelerados em barras de argamassas, com comprovação do diagnóstico da RAS utilizando-se o MEV.

Figura 3.32 - Análise da microestrutura das barras de argamassa e de CPR.



Fonte: O Autor (2022)

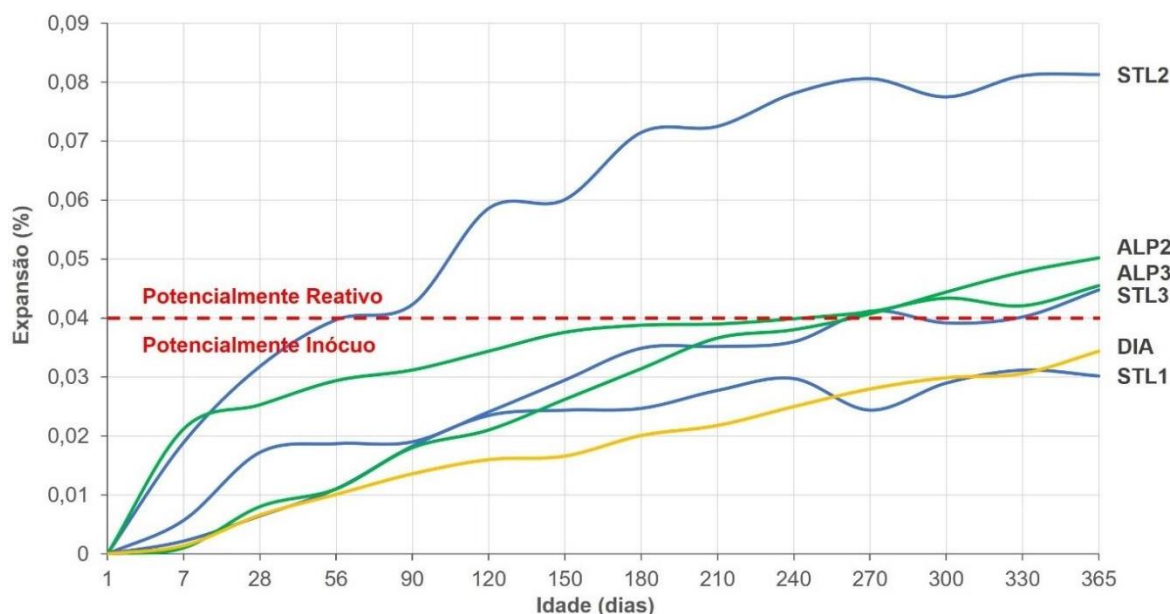
Nota: (A) Géis desenvolvidos e aderidos à borda do agregado; (B) Géis sendo formados na superfície do agregado; (D) Produtos do gel maciço gretado aderidos à superfície do poro; (E) Aspecto do gel gretado e botrioidal aderido à superfície do poro; (G) ITZ onde foram realizadas as investigações; (H) Depósitos de géis na superfície do agregado provocados pela ASR; (J e M) detalhes dos poros amostras CPR (s/s) e CPR (c/s). (K e N) detalhes dos produtos cristalinos. (C, F, I, L, O) análises de espectroscopia de EDX.

3.7.3 Expansibilidade em prismas de concreto pelo método de longa duração

A Figura 3.33 apresenta a síntese dos resultados de expansibilidade média pelo método de longa duração dos prismas de concreto, até a idade de 365 dias. A amostra STL2 apresentou um comportamento potencialmente reativo, com expansibilidade significativa, verificada logo no início do ensaio, superior ao limite de 0,04 % estabelecido pela norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018). Entretanto, a amostra não apresentou envergaduras e não foram observados sinais de fissuras na superfície dos prismas, motivo pelo qual ela não foi selecionada para a realização da análise em MEV. Por outro lado, esta mesma amostra, ensaiada pelo método acelerado em barras de argamassa, apresentou expansões pouco significativas, sendo enquadrada como potencialmente inócua. É importante destacar que, segundo a norma NBR 15577 (ABNT, 2018), os resultados obtidos pelo método de longa duração prevalecem sobre os obtidos pelo método acelerado, por se tratar de um procedimento mais confiável.

Os resultados das amostras STL3, ALP2 e ALP3, até a idade de 365 dias, ultrapassaram ligeiramente o limite estabelecido pela NBR 15577 (ABNT, 2018), sendo classificadas como potencialmente reativas. Já a expansibilidade média dos prismas de concreto produzidos com o agregado de diabásio (DIA) mostraram um comportamento potencialmente inócuo, contrário ao ensaio realizado pelo método acelerado em barras de argamassa, que manifestou um comportamento potencialmente reativo.

Figura 3.33 - Síntese dos resultados de expansibilidade pelo método de longa duração em prismas de concreto.



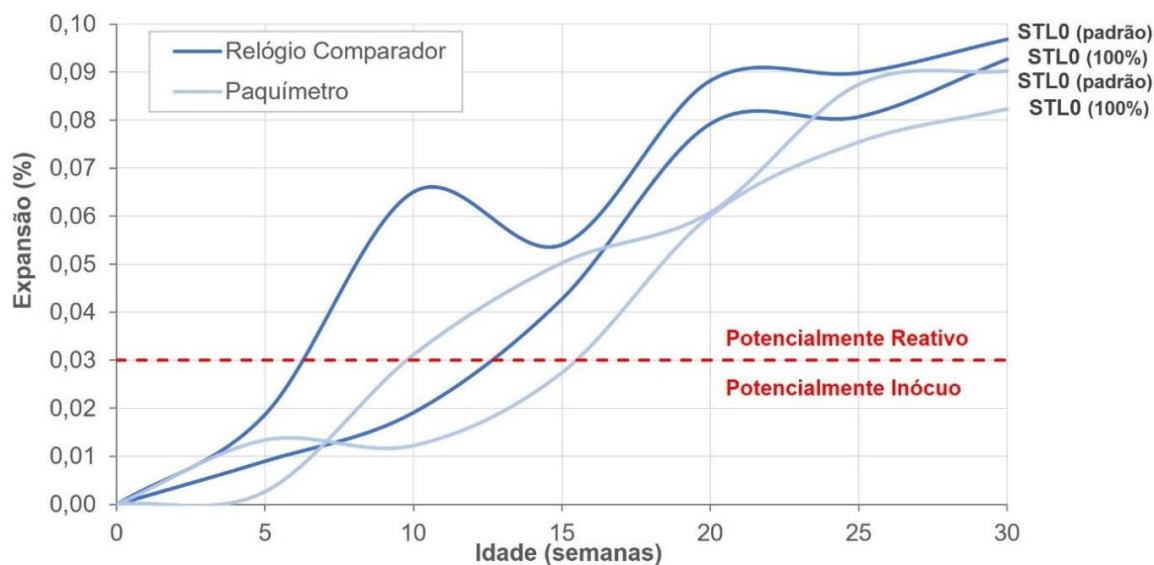
Fonte: O Autor (2022)

3.7.4 Expansibilidade em prismas de concreto pelo método acelerado e análise em MEV

A Figura 3.34 apresenta as médias de expansibilidade de duas amostras, sendo seis prismas de concretos produzidos com 100 % de agregado miúdo e graúdo de quartzito (STL0 100 %) e três prismas de concretos produzidos conforme o padrão normativo (STL0 Padrão).

As medidas de expansibilidade dos prismas de concreto foram realizadas com o auxílio de relógio comparador acoplado ao aparato de medição, associadas a leituras comparativas feitas com auxílio de paquímetro digital. Muito embora a norma NBR 15577-7 (ABNT, 2018) recomende a realização das leituras até a idade de 20 semanas, optou-se por prolongar as leituras de expansibilidade até a idade de 30 semanas. Todos os prismas de concreto analisados apresentaram comportamento potencialmente reativo, segundo a classificação da NBR 15577 (ABNT, 2018), com expansões superiores a 0,03 %. A amostra STL0 (100 %) não apresentou envergaduras e foram observados poucos sinais de fissuras na superfície dos prismas. Os resultados de expansibilidade da amostra foram semelhantes com a utilização dos dois tipos de medição empregados. Já na amostra STL0 Padrão foi possível observar envergaduras leves e fissuras generalizadas nas superfícies dos prismas, como se vê na Figura 3.35. Os resultados de expansibilidade, utilizando os dois tipos de medição, apresentaram divergências até a idade de 20 semanas. Porém, nas idades de 25 e 30 semanas os resultados, progressivamente, começaram a se assemelhar. Por tais motivos, as amostras foram encaminhadas para a realização do ensaio de microestrutura utilizando-se o MEV.

Figura 3.34 - Síntese dos resultados médios de expansibilidade pelo método acelerado em prismas de concreto.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 3.35 - Fissuras generalizadas nas superfícies da amostra STL0 (padrão) destacadas na cor vermelha.

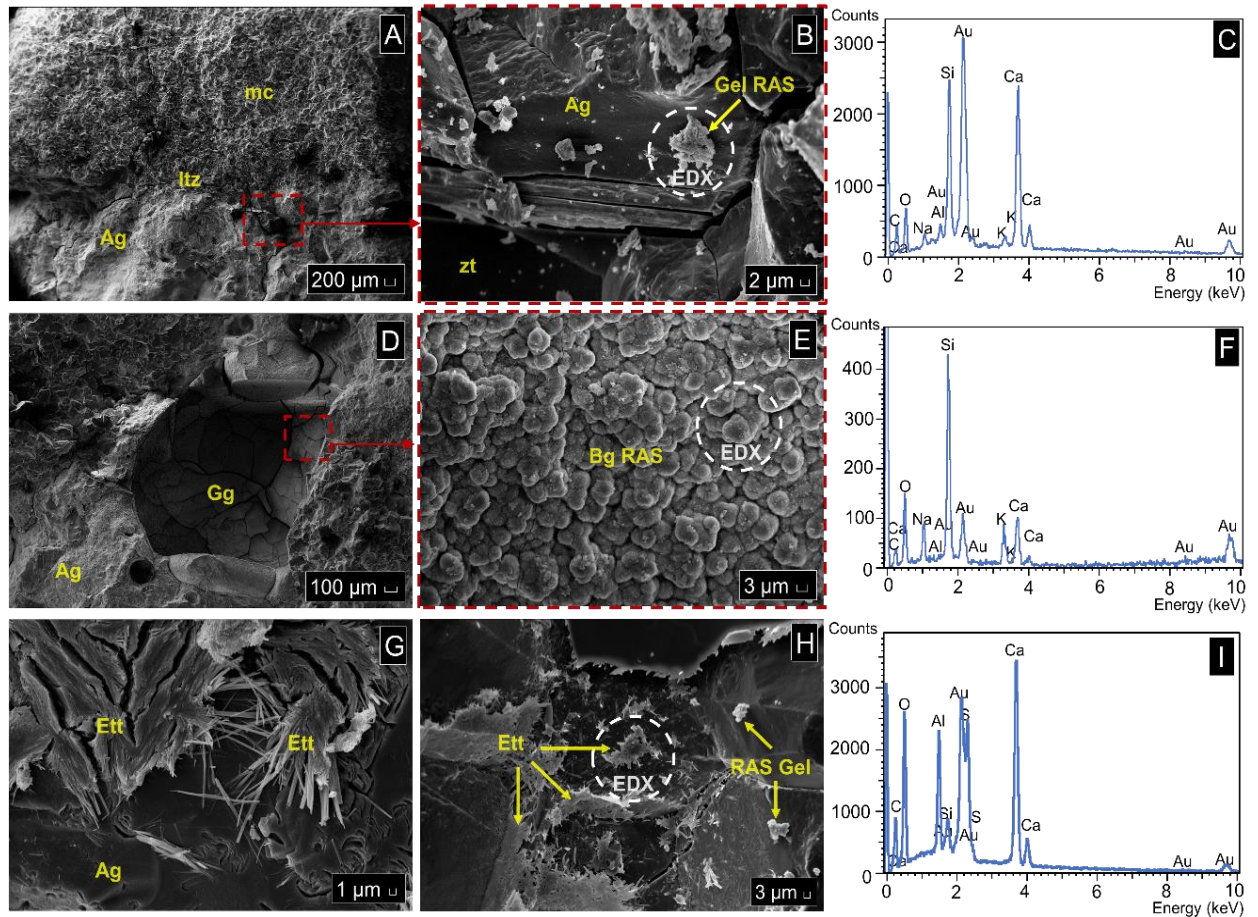


Fonte: O Autor (2022)

As fotomicrografias apresentadas nas Figuras 3.36 A, B, C, D, E e F são provenientes da amostra STL0 (Padrão). Durante a investigação, foi observada a presença de produtos cristalizados, de composição sílico-cálcico alcalina, formados sobre o agregado, como se vê na Figuras 3.36 A, B, C. Outra análise investigativa permitiu constatar, no interior de um poro, a presença de gel maciço gretado típico da RAS, conforme a Figura 3.36 D. E, na mesma imagem ampliada, se verificou que os produtos cristalizados são de aspecto botrioidal, conforme demonstra a Figura 3.36 E. No exame do espectro de EDX, realizado no interior do poro, foi possível constatar que se trata de géis de silício cristalizados, provenientes da RAS, como se vê na Figura 3.36 F. Na investigação realizada a respeito da amostra STL0 (100 %) foi possível

constatar, em alguns locais na Interface da Zona de Transição (IZT), a presença de géis de silício cristalizados e de produtos de sulfoaluminato de cálcio, típicos de etringita tardia, aderidas às superfícies do agregado, como se vê na Figura 3.36 G, H e I.

Figura 3.36 - Análise da microestrutura dos prismas de concreto.



Fonte: O Autor (2022)

Nota: STL0 (Padrão): (A) ITZ investigada; (B) Depósitos de géis na superfície do agregado provocados pela ASR; (D) Produtos do gel maciço gretado aderidos à superfície do poro; (E) Aspecto do gel botrioidal aderido à superfície do poro. STL0 (100 %): (G) Formação de etringita tardia na superfície do agregado (H) Produtos típicos da RAS e etringita tardia formada na superfície do agregado da amostra. Análise de espectroscopia EDX: (C e F) STL0 (Padrão); (I) STL0 (100 %)

A Tabela 3.16 apresenta uma síntese dos resultados obtidos pelos métodos de expansibilidade e o diagnóstico final, obtido com o auxílio do MEV.

Tabela 3.16 - Síntese dos resultados de expansibilidade e da análise MEV.

Amostras	Barras de Argamassa Método Acelerado	Prismas de Concreto	Prismas de Concreto	MEV
		Método de Longa Duração	Método Acelerado	
STL0	Potencialmente Reativo	-	Potencialmente Reativo	Reativo
STL1	Potencialmente Inócuo	Potencialmente Inócuo	-	-
STL2	Potencialmente Inócuo	Potencialmente Reativo	-	-
STL3	Potencialmente Inócuo	Potencialmente Reativo	-	-
ALP1	Potencialmente Inócuo	-	-	-
ALP2	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	-	Reativo
ALP3	Potencialmente Inócuo	Potencialmente Reativo	-	-
DIA	Potencialmente Reativo	Potencialmente Inócuo	-	Reativo

Fonte: O Autor (2022)

Como pôde ser observado, nos quartzitos provenientes de São Thomé das Letras-MG e de Alpinópolis-MG, assim como no diabásio de São Sebastião do Paraíso-MG, foi diagnosticada a presença de gel proveniente da RAS. A maioria das amostras analisadas pelo método acelerado em barras de argamassa apresentou comportamento não reativo, inócuo, dado que comprova que tal metodologia é menos eficaz em comparação com os métodos de longa duração e o acelerado aplicado a prismas de concreto, os quais indicaram a potencialidade reativa dos agregados. De qualquer modo, a análise da microestrutura utilizando-se o MEV é indispensável para o diagnóstico preciso desta patologia.

Diante ao exposto, e pelas comprovações das expansões provocadas pela RAS em argamassas e concretos produzidos com quartzitos da região Sudeste do Brasil, é recomendada a realização de ações mitigadoras da RAS para estruturas de concreto submetidas ao contato com água. Para a mitigação, a norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018) sugere a limitação de álcalis no concreto e/ou o uso de materiais inibidores adequados, tais como sílica ativa, cinza volante, metacaulim e cimentos com adições de escória ou pozolana, entre outros.

Alguns exemplos de estudos de mitigação da RAS demonstraram a eficiência do uso de cinza volante, entre 15 e 25 %, de sílica ativa, 10 %, e de escória de alto forno, entre 40 e 60 %, como substitutos parciais do cimento, em concretos produzidos com agregados oriundos da Austrália (SAPAS et al., 2021) e da Colômbia (CASSIANI et al., 2021). Métodos alternativos de mitigação, com o uso de nitrato de cálcio (OEY et al., 2020) e de hidróxido de cálcio (SUN et al., 2021), demonstraram grande eficácia com o uso em agregados de vidros. Outro método mitigador comprovadamente eficaz é o uso do nitrato de lítio, que reduz a taxa de dissolução da sílica dos agregados no interior do concreto (LEEMANN et al., 2014; TREMBLAY et al., 2010; KOBAYASHI e TAKAGI, 2020; EKOLU et al., 2017).

3.8 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este estudo investigou a potencialidade reativa de rejeitos de quartzitos do Sul de Minas Gerais, em barras de argamassa e prismas de concreto, estes submetidos a diferentes tipos de ataques alcalinos, em ambientes agressivos e controlados.

O resultado da análise petrográfica das amostras de quartzitos foi importante por alertarem sobre os riscos inerentes à RAS em concretos produzidos com este material, uma vez que o percentual de sílica foi de aproximadamente 95 %, conforme determinado no capítulo 2.

Com relação às expansibilidades obtidas pelos diferentes métodos de ensaio de RAA, foi possível constatar, pelo método acelerado em barras de argamassa, que as amostras STL apresentaram pequenas expansões, sendo classificadas como potencialmente inócuas. Entretanto, ao ensaiar mesmas amostras pelos métodos de longa duração e acelerado, em prismas de concreto, com exceção da amostra STL1, todas as demais apresentaram comportamentos expansivos que ultrapassaram os limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, sendo por isso classificadas como potencialmente reativas. Ou seja, indicou-se assim a menor confiabilidade do método de ensaio acelerado em barras de argamassa.

Com relação às amostras de Alpinópolis, apenas a ALP2 apresentou comportamento potencialmente reativo quando submetida ao método acelerado em barras de argamassa. Já no método de longa duração em prismas de concreto, as amostras ALP2 e ALP3 mostraram um comportamento expansivo superior ao limite estabelecido pela norma técnica vigente.

Quanto ao agregado de diabásio (DIA), selecionado por se tratar de uma rocha magmática composta por mineral reativo de vidro vulcânico e por ser comumente utilizado no sul de Minas Gerais como agregado para concretos, durante a análise em MEV, utilizando-se fragmentos da barra de argamassa, ensaiada pelo método acelerado, foi constatada a presença do gel expansivo. Esperava-se que, durante o ensaio utilizando o método de longa duração, a amostra de diabásio apresentasse expansões significativas, justamente por se tratar de um método mais confiável. Porém, o índice de expansibilidade foi baixo neste ensaio.

Os ensaios realizados nas amostras de CPR's indicaram a eficácia do uso de sílica ativa para a mitigação dos efeitos da patologia. Além de eles terem apresentado um baixo índice de expansibilidade média, não foram detectados produtos típicos da reação durante a análise em MEV. Entretanto, nas análises de EDX foram registrados picos de compostos sílico-alcalinos. Diante destes indícios, recomenda-se a realização de análises de RAS em prismas produzidos com CPR's, pelos métodos acelerados e de longa duração.

Durante a realização da análise da microestrutura em MEV, todas as amostras de quartzitos ensaiadas foram diagnosticadas com a presença de géis expansivos provenientes da RAS, indicando a necessidade de utilização deste método para a realização do diagnóstico preciso da patologia. Além disto, também foram detectados produtos expansivos típicos de etringita tardia, desenvolvidos nas superfícies dos agregados, que podem ser atribuídos à elevação de temperatura durante o ensaio, somada à concentração de CaSO_4 - sulfato de cálcio. De qualquer maneira, é recomendada a realização de ensaios específicos de ataques por sulfato para um melhor diagnóstico desta patologia, de modo a se criar as condições necessárias para se propor métodos mitigadores desta reação, como o uso de cimento resistente a sulfatos, por exemplo.

O diagnóstico de RAA em quartzitos e no diabásio corroborou a importância de se investigar as reações químicas decorrentes da RAA em concretos produzidos com estes agregados, de modo a possibilitar que engenheiros e pesquisadores avaliem os melhores usos destes materiais para cada uma das diferentes estruturas de concreto, sobretudo quando se tratar de estruturas que estarão em contato com a água, como barragens, diques, pontes e muros de arrimo. Com este cuidado, conclui-se que os rejeitos de quartzitos podem ser utilizados como agregado alternativo em argamassas e concretos, podendo contribuir para a redução da quantidade de materiais descartados como rejeitos de mineração, consequentemente reduzindo o impacto ambiental negativo no sul do estado de Minas Gerais.

4 CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO – CUAD

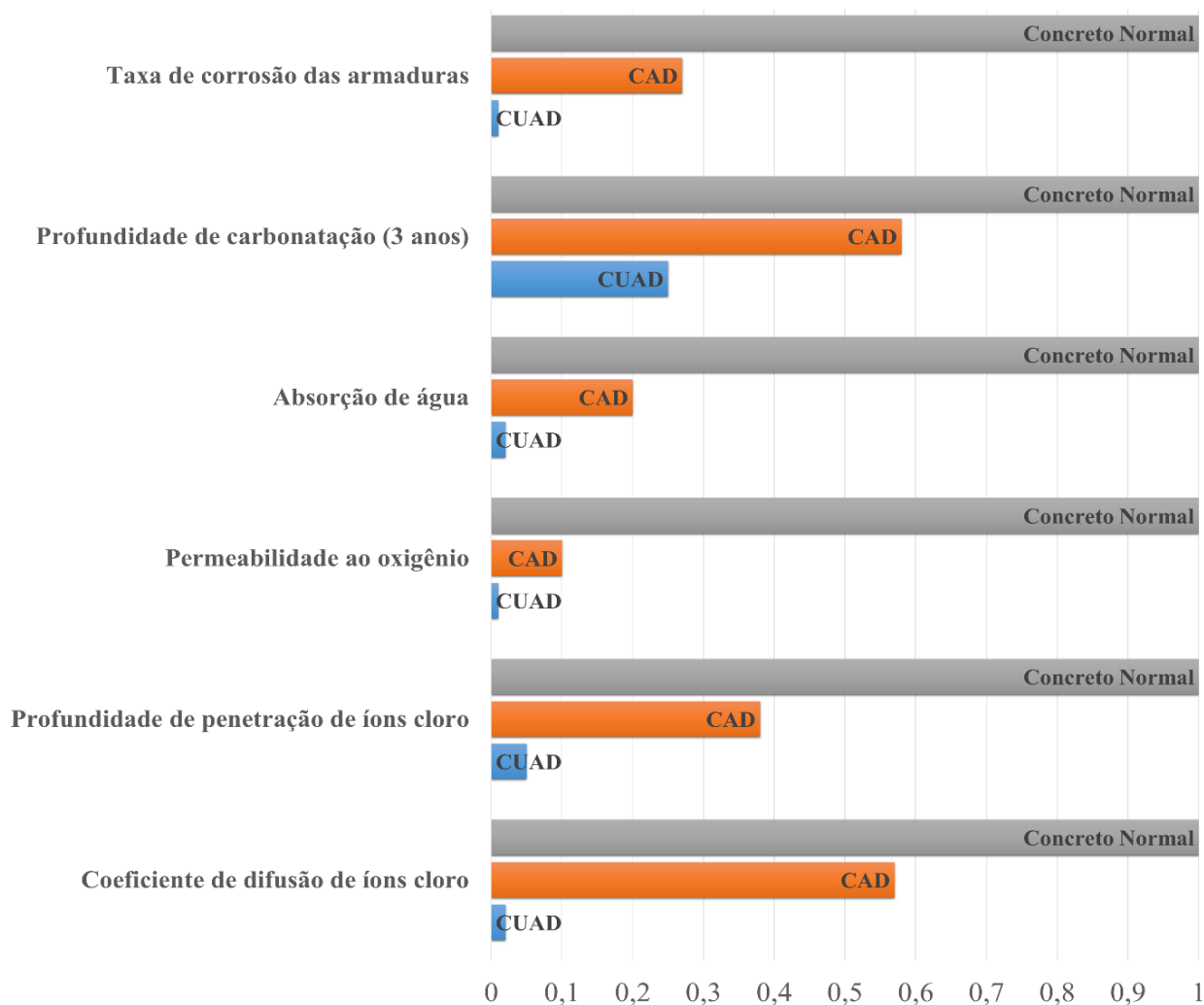
Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos relacionados às propriedades do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD), com ênfase na classe dos Concretos de Pós Reativos (CPRs).

4.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE OS CUADs

Com resistência à compressão mínima de 120 MPa (C1856 ASTM, 2017), o CUAD foi considerado, ao surgir, como um compósito cimentício revolucionário para o setor da construção civil. Sua elevada resistência e baixa porosidade propiciam elevada durabilidade e, conseqüentemente, aumenta a vida útil das estruturas (RICHARD e CHEYREZY, 1995; VANDERLEI, 2004; RUSSELL e GRAYBEAL, 2013). Entretanto, alguns desafios limitam o uso amplo do CUAD, como sua baixa trabalhabilidade, sobretudo quando se trata de grandes volumes de concreto, a alta retração autógena, as propriedades de tração insuficientes e a durabilidade imprevisível após a fissuração do concreto. Mesmo assim, de acordo com Du et al. (2021), o CUAD é considerado um dos materiais de construção mais promissores para as futuras obras sustentáveis, dada a sua baixa relação água/cimento (a/c 0,15–0,25), alto índice de empacotamento de partículas, o uso de fibras de aço (≥ 2 %, em volume) e o uso de aditivos superfluidificantes. Além dos recursos tecnológicos supracitados, o CUAD também permite que se obtenha elevadas propriedades mecânicas de resistência à compressão na fase da cura, seja a padrão ($f_{c28} \geq 120$ MPa) ou a cura térmica ($f_{c28} \geq 150$ MPa) (AHMED et al., 2022; RUSSELL e GRAYBEAL, 2013).

Na produção do CUAD, a utilização de fibras metálicas é comum, pois este tipo de concreto apresenta comportamento frágil e as fibras melhoram a ductilidade (BUTTIGNOL et al., 2017). Segundo Voort et al. (2008), o CUAD apresenta durabilidade superior porque sua estrutura interna é quase impermeável a elementos como o dióxido de carbono, o cloreto e o sulfato, dentre outros agressivos. Na Figura 4.1 é apresentada uma avaliação comparativa de durabilidade entre o CUAD, o Concreto de Alto Desempenho (CAD) e o Concreto Convencional (CC).

Figura 4.1 - Avaliação da durabilidade para CUAD em comparação com o CAD e o concreto convencional.



Fonte: Voort et al. (2008).

Os estudos sobre concretos especiais de alta resistência se intensificaram na década de 1980, com produção restrita apenas aos ensaios experimentais feitos em laboratório. Na época, foram analisados vários tipos de misturas com uso de cimentos isentos de macro defeitos, com emprego de adições como a sílica e de fibras metálicas para reduzir o comportamento frágil dos concretos (NAAMAN e WILLE, 2012).

Pesquisas como a realizada por Richard e Cheyrezy (1995), aliadas ao avanço tecnológico no desenvolvimento de aditivos superplastificantes, proporcionaram a obtenção de um CPR de melhor trabalhabilidade, o que foi considerado revolucionário para o processo evolutivo do CUAD. Com o recurso dos aditivos superplastificantes, o CUAD alcançou níveis elevados de resistência à compressão, com marcas de até 800 MPa. Ao atingir estes níveis de resistência nunca antes alcançados, o setor passou a difundir o conceito de Concreto de Ultra-

Alto desempenho nos ambientes científico e tecnológico da construção civil (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

A partir do ano de 2000, os estudos sobre CUAD passaram a se preocupar mais intensamente com o desenvolvimento de um concreto mais barato e de menor impacto ambiental, principalmente através da redução do consumo de cimento ($<850 \text{ kg/m}^3$) e de sílica ativa ($<200 \text{ kg/m}^3$). Tal redução é obtida com o uso de adições minerais pozolânicas (KANG et al., 2019; RANDL et al., 2014).

Atualmente, os estudos sobre CUAD buscam alternativas para torná-lo um material de uso universal ou mais amplo para a produção de diferentes tipos de estrutura. Uma das preocupações centrais neste esforço é a elevada viscosidade desse tipo de concreto, o que torna delicados os processos de produção da mistura e de execução das estruturas. As dificuldades de trabalhabilidade, para garantir a homogeneização do composto, são particularmente sensíveis quando se trata de produzir grandes volumes de CUAD, ocasiões em que a alta viscosidade pode provocar o mau funcionamento do misturador (EL-TAWIL et al., 2018). Outra dificuldade é processo de cura do concreto: o consumo elevado de aglomerante e a retração autógena resultam em alto risco de incidência de fissuras, trincas e em alguns casos até mesmo no descolamento da estrutura (ZHU et al., 2020).

Além disso, o uso de fibras de aço resulta em um aumento expressivo do custo final do CUAD. Por isso, é um grande desafio para projetistas e pesquisadores desenvolver soluções que garantam as propriedades mínimas e necessárias de tração e ductilidade, com consumo reduzido de fibras (DU et al., 2021).

A durabilidade também deve ser observada ao se incorporar à mistura algumas matérias-primas especiais, como resíduos de vidro e outros tipos de sílicas, pois estes tipos de material podem tornar o concreto suscetível à reação álcali-agregado (FAN et al., 2020).

4.2 CONCRETO DE PÓS REATIVOS - CPR

O uso de diferentes materiais sustentáveis na fabricação de CUAD está se tornando cada vez mais comum, devido aos impactos ambientais negativos provocados pela exploração inadequada dos recursos naturais (AHMED et al., 2022; DU et al., 2021). Nos campos da mineração e da construção civil, uma das alternativas para a redução do impacto ambiental negativo é o aproveitamento máximo dos rejeitos de mineração. E eles podem ser usados como

agregados finos e pulverulentos em concretos especiais, entre eles o CPR (FRANCKLIN JUNIOR et al., 2019)

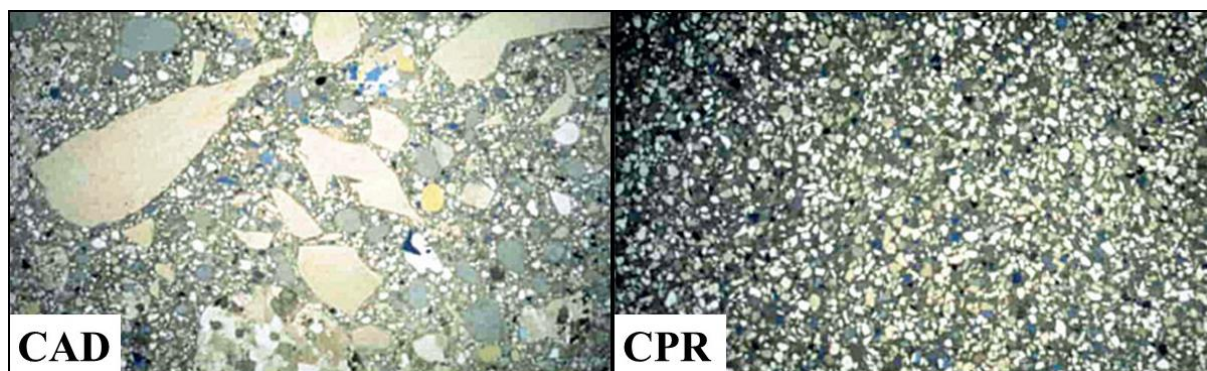
De acordo com Sanjuán e Andrade (2021), o CPR é a nova geração na evolução do CUAD, dadas as suas notáveis durabilidade e elevada tenacidade. Richard e Cherezy (1995) foram os precursores na promoção do aumento das propriedades mecânicas dos CPRs a níveis elevados. Os referidos pesquisadores desenvolveram dois tipos de CPR, sendo o primeiro denominado CPR 200, com resistência à compressão entre 170 MPa e 230 MPa e resistência à tração entre 20 MPa e 50 MPa, e o segundo denominado CPR 800, com resistência à compressão entre 500 MPa e 800 MPa e resistência à tração entre 45 MPa e 140 MPa (RICHARD e CHEYREZY, 1995). Entretanto, usualmente as classes de resistências mínimas adotadas por alguns pesquisadores são de 120 MPa e 150 MPa (C1856 ASTM, 2017; AHMED et al., 2022).

Os principais constituintes do CPR incluem cimento, sílica ativa, agregado miúdo, pó de quartzo, aditivo superplastificante e, opcionalmente, fibras (NAFEES et al., 2021). Com a evolução do desempenho químico dos aditivos superplastificantes, o uso de adições minerais e de pó de quartzo, foi possível obter concretos com elevadas proporções de finos e baixas relações água/aglutinante, enquanto que as fibras são necessárias para aumentar a resistência à tração e a aumentar a ductilidade dos CPRs (ABID et al., 2017; FEHLING e LORENZ, 2013). Além disso, o perfeito empacotamento das partículas, aliado à cura térmica, conferem um elevado índice de compacidade à mistura, o que aumenta a resistência do concreto. Na Figura 4.2, são apresentadas imagens comparativas das texturas superficiais de um Concreto de Alto Desempenho (CAD) e de um CPR (TOULEMONDE e RESPLENDINO, 2011).

A seguir, estão elencados os princípios básicos para o desenvolvimento do CPR, segundo Richard e Cheyrezy (1995) e Vanderlei (2004):

- Eliminação do agregado graúdo para melhoria da homogeneidade;
- Melhora no empacotamento do material granular para aumento da compacidade;
- Aplicação de pressão confinante no concreto fresco durante o processo de adensamento;
- Realização de cura térmica para favorecer uma melhor formação da estrutura cristalina;
- Incorporação de pequenas fibras metálicas para melhoria da ductilidade.

Figura 4.2 – Comparação de texturas entre CAD e CPR

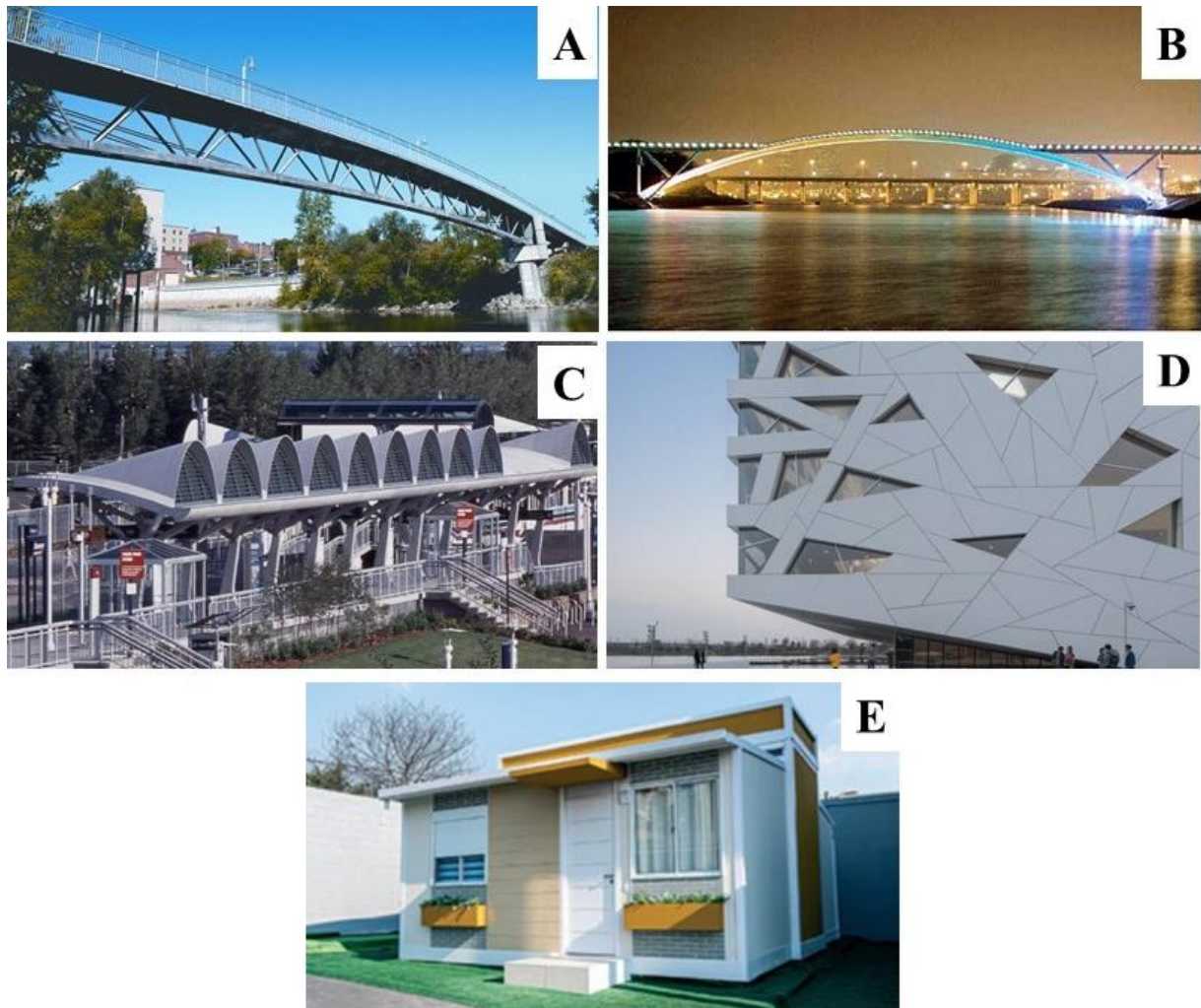


Fonte: Toulemonde e Resplendino (2011).

Nafees et al. (2021), de uma perspectiva contemporânea, anotaram que o CPR está se difundindo no setor da construção civil e tem sido cada vez mais usado em vários campos de construção, incluindo a construção de pontes, de túneis, de minerações e de arranha-céus. Por sua vez, Yazici et al. (2009) acrescentam que o CPR tem servido também à produção de elementos especiais, tais como vigas protendidas, estruturas resistentes a impactos e explosões, tubos de esgoto, tubos de alta pressão e estruturas para o armazenamento de resíduos industriais e nucleares.

A Figura 4.3 A apresenta a ponte Sherbrooke no Canadá, considerada a primeira obra construída em CPR, no ano de 1997. Porém, segundo Barbosa (2021), a obra que se destaca como inaugural segundo a literatura especializada é a passarela da Paz, em Seul, na Coreia do Sul, que tem 120 m de vão livre, 4,3 m de largura e apenas 3 cm de espessura, conforme se vê na Figura 4.3 B. A Figura 4.3 C mostra a estação de trem de Shawnessy, no Canadá, em que os CPRs foram utilizados para a fabricação dos elementos de cobertura. A Figura 4.3 D destaca a versatilidade das aplicações do CPR na construção civil ao apresentar uma casa de espetáculos em Hangzhou, na China, que foi revestida com painéis de CUAD/CPR. No Brasil, segundo Christ et al. (2019) e conforme a Figura 4.3 E, destaca-se a aplicação do CPR pela empresa New House, de São Paulo, que edificou uma unidade habitacional com placas deste tipo de concreto (DUCTAL, 2022; TUTIKIAN et al., 2011; PARSEKIAN et al., 2008; HAJAR et al., 2004).

Figura 4.3 – Obras produzidas em CPR.



Fonte: Modificado de: Hajar et al. (2004); Tutikian et al. (2011); Parsekian et al. (2008); Ductal. (2022); Christ et al. (2019).

Nota: Passarela de Sherbrooke, Canadá (A); passarela da Paz, Coreia do Sul (B); Estação de trem de Shawnessy, Canadá (C); casa de espetáculos em Hangzhou, China (D); unidade habitacional em São Paulo, Brasil (E).

Entretanto, de acordo com Ahmed et al., (2022), alguns problemas dificultam a produção de CPR em larga escala, dado o ainda alto custo de produção e seus efeitos adversos para o meio ambiente decorrentes, entre outros elementos, da elevada emissão de CO₂. Assim, a substituição de cimento por sílica ativa e/ou outras adições minerais, como cinzas volantes, escória de alto-forno e pó de quartzo podem mitigar danos ambientais e custos. Outros tipos de materiais cimentícios sustentáveis, como o cimento álcali-ativado, também podem ser usados na fabricação de CPR (GERALDO et al., 2022). Na mesma clave, outra alternativa é a utilização de resíduos e rejeitos industriais como agregado fino e/ou como material pulverulento na fabricação do CPR, o que colabora para o aspecto sustentável da produção e do uso do CPR.

Na Tabela 4.1 são destacados alguns estudos realizados com rejeitos/resíduos industriais para a produção de CPR/CUAD.

Tabela 4.1 – Algumas pesquisas realizadas com rejeitos/resíduos industriais para produção de CPR/CUAD

Pesquisadores	Objeto de estudo
Luo et al. (2022)	Utilização de resíduos finos de carvão de ganga, proveniente de indústria chinesa para uso como agregado no CPR.
Alkhaly et al. (2021)	Utilização de resíduos de quartzitos provenientes da Indonésia como agregado pulverulento para fabricação de CPR.
González et al. (2020)	Utilização de resíduos finos de mineração de fluorita da Espanha para uso como agregado no CUAD.
Jiao et al. (2020)	Utilização de resíduos de vidros como agregado miúdo e pulverulento na produção de CUAD.
Francklin Junior et al. (2019)	Utilização de rejeitos de quartzitos do sudoeste de Minas Gerais para uso como agregado fino e pulverulento no CPR.
Boadella et al. (2019)	Utilização de resíduos pulverulentos de corte de granito para uso como agregado no CUAD
Zegardlo et al. (2016)	Utilização de resíduos cerâmicos de louças sanitárias para uso como agregado fino na fabricação de CUAD.
Singh et al. (2016)	Utilização de resíduos pulverulentos de corte de granito como agregado no CUAD
Ahmad et al. (2014)	Utilização de resíduos finos de calcário e de escória siderúrgica como agregado no CUAD.

Fonte: O Autor (2022)

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DE CPR

Nesta seção são discutidos os materiais utilizados na fabricação do CPR, são destacadas as suas características e as interferências da matéria-prima no processo de hidratação, resistência e desempenho do composto.

4.3.1 Materiais cimentícios suplementares

Além do cimento Portland, existem outros tipos de materiais cimentícios suplementares comuns utilizados nos CPRs, como por exemplo a sílica ativa, a cinza volante e a cinza de casca de arroz. Segundo Ahmed et al. (2022), estes materiais podem contribuir para a melhoria do desempenho da mistura no estado fresco, em diversos aspectos, tais como na redução do

consumo de superplastificante, na redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, na redução do custo e da taxa de carbono emitido para a atmosfera. Segundo Rohden et al. (2020), os materiais pozolânicos complementares apresentam, quimicamente, uma elevada quantidade de SiO_2 e/ou CaO reativo, que pode promover a hidratação do cimento por meio de reações pozolânicas e/ou hidráulicas, principalmente quando a relação a/c é extremamente baixa. Além disso, segundo (LIU et.al, 2021), estes materiais aumentam a durabilidade das estruturas, uma vez que melhoram a resistência à penetração de cloretos e reduzem o ataque de sulfatos aos concretos.

4.3.1.1 Cimento

A escolha do tipo de cimento é uma das etapas mais importantes no estudo de dosagem dos CPRs, devido a necessidade de se promover o bom desempenho do composto, com o menor consumo de cimento possível. Lee e Chisholm (2005) recomendam que os cimentos contenham altos teores de silicato tricálcico (C_3S) e de silicato dicálcico (C_2S) e baixo teor de aluminato tricálcico (C_3A). Isso porque este último, por suas características, tem pouco valor agregado como agente ligante e é incluído no cimento, principalmente, por conta de seu papel como fundente durante o processo de calcinação, típico dos cimentos brasileiros do tipo CPV-ARI (NBR 16697: ABNT, 2018).

4.3.1.2 Sílica ativa

A sílica ativa pode ser definida como um pó altamente fino, obtido no processo de produção de silício metálico, com teores de SiO_2 superiores a 90 %. Ela atua no CPR como material pozolânico, promovendo vários benefícios ao concreto (NAFEES et al., 2021; DU et al., 2021; NBR 13956: ABNT, 2012). A seguir são listados alguns destes benefícios:

- Redução da permeabilidade;
- Aumento da resistência aos ataques de agentes agressivos;
- Melhoria das propriedades mecânicas à compressão;
- Redução do consumo de cimento;
- Hidratações secundárias;
- Melhoria das propriedades reológicas devido ao formato esférico de seus grãos.

A utilização de sílica ativa na produção de CPR pode variar de 5 % a 25 % da mistura, em função do consumo de cimento em massa. Quando a proporção é inferior a 10 %, devido à elevada finura da sílica ativa, deve-se promover a melhoria da densidade de empacotamento de partículas, de modo a se aumentar a trabalhabilidade do CPR (DU et al., 2021). Entretanto, quando o teor excede 10 %, a elevada superfície específica da sílica pode induzir uma redução significativa da trabalhabilidade do concreto, em função da aglutinação de partículas finas e da adsorção da água livre da mistura. Nestes casos, torna-se necessário o uso de aditivos redutores de água (TAVARES et al., 2020).

4.3.1.3 Pó de quartzo

Os tipos rochosos mais utilizados no CPR como agregados miúdo e pulverulentos são constituídos de quartzo, dada sua alta resistência mecânica natural. No entanto, outros materiais de origem basáltica, granítica e calcária também podem ser utilizados. Segundo Rohden et al. (2020), o tipo rochoso não é um fator limitante da resistência à compressão dos CPRs: ou seja, concretos com mais de 200 MPa podem ser produzidos com areias e pós de baixa resistência, próximos a 80 MPa, como é o caso de alguns tipos de calcários. Segundo Ahmed et al. (2022), a disponibilidade limitada de quartzo e seu alto custo exigem a busca por materiais mais baratos e abundantes. Nestes materiais alternativos, uma das características importantes a serem avaliadas é a dimensão, a forma e a distribuição granulométrica dos grãos que se quer usar como agregado.

Um dos principais benefícios do pó de quartzo é sua capacidade de promover a atividade pozolânica no CPR. Porém, a ativação e a velocidade da reação dependem do tamanho da partícula e da superfície específica: quanto menor a dimensão, maior é a capacidade da reação. Em geral, a literatura especializada recomenda que as partículas variem entre 5 μm e 25 μm de diâmetro. Contudo, alguns estudos indicam que nas partículas inferiores a 5 μm pode haver atividade pozolânica, ao passo que as partículas maiores que 5 μm sofrem redução da capacidade de reação (ZANNI et al., 1996; BENEZET e BENHASSAINE, 1999; MENEZES et al., 2018; TAVARES et al., 2020).

Tavares et al. (2020) investigaram concretos produzidos com pós de quartzo com partículas próximas a 20 μm e constataram que esta faixa granulométrica não é suficiente para a promoção da reação pozolânica no composto. O agregado, portanto, serve apenas como material de enchimento. Por outro lado, o incremento de temperatura durante a cura do CPR

pode favorecer a atividade pozolânica, potencializando o desempenho mecânico do pó de quartzo. Estudos realizados por He et al. (2017) mostraram a ativação pozolânica do pó de quartzo, em misturas de cimento Portland submetidos à temperaturas de 90° C, resultou na formações C-S-H e C-H, e à temperaturas de 200° C e 250° C promoveram a formação somente de C-S-H, com cristais de jennita de morfologia predominantemente prismática.

Zanni et al. (1996) reforçam a importância da temperatura para o aumento das cadeias de C-S-H e para o desenvolvimento da reatividade do pó de quartzo em CPRs, principalmente em temperaturas superiores a 200° C. Sob altas temperaturas, o aumento da pozolanicidade pode variar entre 40 % e 60 %, de acordo com o tempo de tratamento e a variação de temperaturas utilizadas no CPR. Assim como ocorre com a sílica ativa, o pó de quartzo também pode interferir no comportamento reológico de misturas de cimento Portland, em especial no caso de misturas de alta concentração volumétrica de partículas sólidas, como nas pastas de CUAD. O aumento na densidade máxima de empacotamento das misturas especiais ultra finas reduz o teor de vazios, propiciando água reologicamente ativa, o que contribui para a redução da viscosidade plástica (LOWKE, 2012).

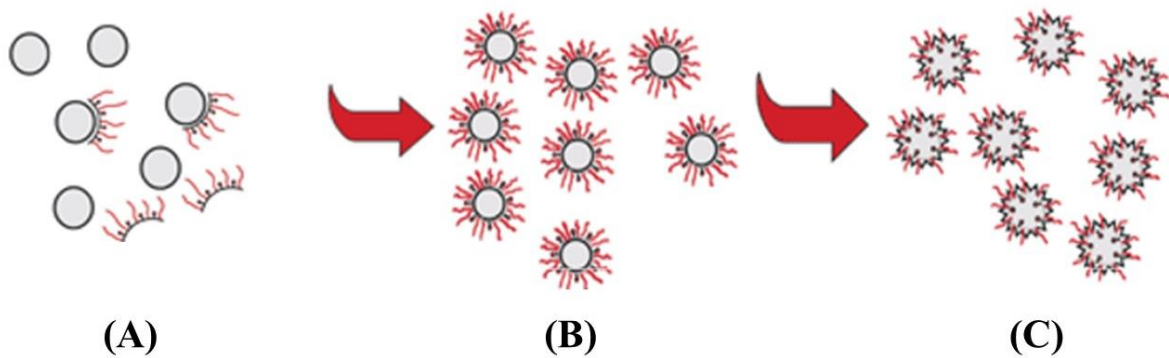
4.3.2 Aditivos

Nesta seção são destacados os principais aditivos químicos usados para modificar as propriedades dos CPRs no estado fresco.

4.3.2.1 Aditivo redutores de água (superplastificantes)

Segundo Shi et al. (2015), os aditivos superplastificantes têm sido usados em CPRs para se obter uma elevada compacidade, por meio da redução significativa de água na mistura. Dentre os diversos tipos de aditivos, destacam-se os éteres policarboxilatos, que apresentam alta eficiência na dispersão de partículas de cimento devido a sua ação eletrostática (ZHANG et al., 2021). Conforme o exposto na Figura 4.4, o policarboxilato possui longas cadeias laterais, que aumentam o espaço físico em um sistema de partículas de cimento, como se vê na Figura 4.4 A. O resultado é uma redução de água bastante superior aos plastificantes de gerações anteriores, devido ao chamado efeito estérico, exemplificado na Figura 4.4 B. Assim, tem-se a possibilidade da manutenção da trabalhabilidade da mistura, mesmo com o início do processo de hidratação do cimento, como mostra a Figura 4.4 C.

Figura 4.4 – longas cadeias laterais (A); efeito estérico (B); manutenção da trabalhabilidade do cimento (C).



Fonte: modificado de Basf (2014).

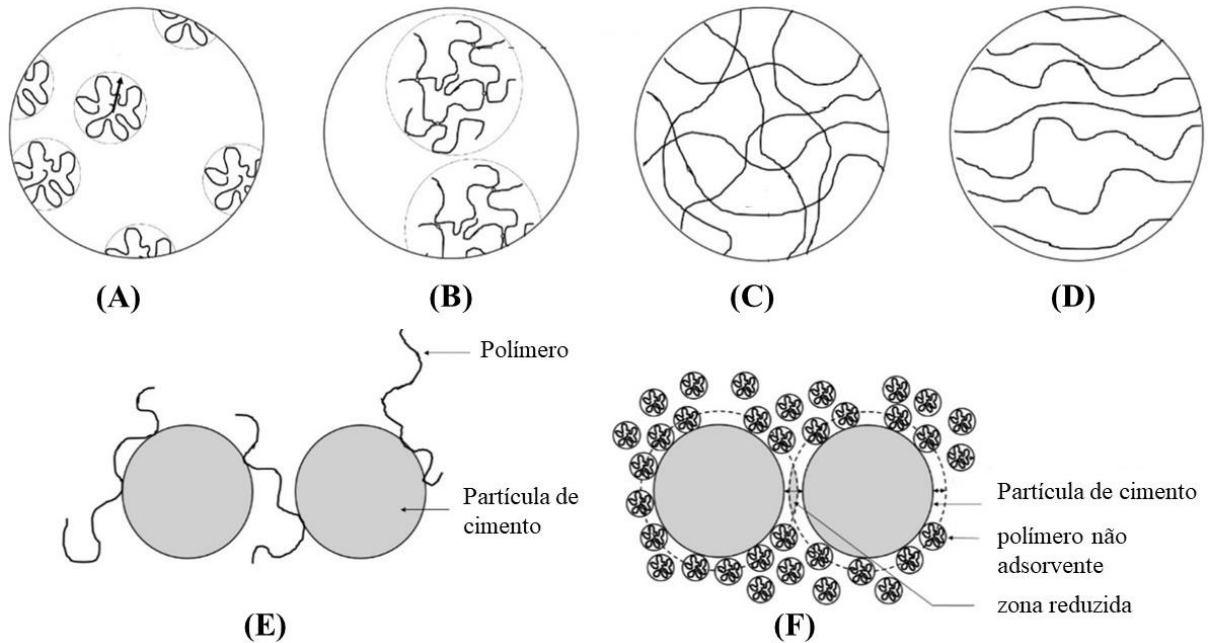
4.3.2.2 Aditivo modificador de viscosidade

De acordo com Bessaies-Bey et al. (2022), o Aditivo Modificador de Viscosidade (VMA) é um composto formado por polímeros solúveis em água, que tem a função de melhorar as propriedades reológicas do CPR por meio de alterações nas tensões de escoamento, na viscosidade e na tixotropia do composto. Os VMAs mais comuns são derivados de éter de celulose e polissacarídeos de fontes microbianas, como a goma de whelan e a goma de diutan (TENG et al., 2020; VURST et al., 2017). Os mecanismos de ação dos VMAs estão elencados a seguir e são apresentados na Figura 4.5.

- Solvatação e inchaço: a longa cadeia de polímeros VMA pode adsorver água livre e inchar para aumentar a viscosidade;
- Associação de polímeros: são caracterizados pela alta propensão à agregação, de forma a minimizar o contato entre sua parte hidrofóbica e o solvente;
- Entrelaçamento de polímeros: polímeros VMA adjacentes podem desenvolver forças atrativas para formar uma rede tipo gel, bloqueando o movimento da água e, assim, aumentando a viscosidade;
- Alinhamento do polímero com o fluxo: sob cisalhamento podem ocorrer mudanças na estrutura do polímero, as cadeias do polímero se alinham com a direção do fluxo, esticam e/ou desembaraçam;
- Floculação em ponte: polímeros de alta massa molar são capazes de adsorver simultaneamente as superfícies de várias partículas de cimento ao mesmo tempo;

- Redução da floculação: a diferença na concentração de polímero não adsorvido entre a solução em massa e as zonas deplegadas gera as chamadas forças atrativas de depleção, que podem causar floculação de partículas.

Figura 4.5 - Ilustração esquemática dos mecanismos de funcionamento do VMA.



Fonte: modificado de Bessaies-Bey et al. (2022).

Nota: (A) solvatação e inchaço; (B) associação de polímero; (C) entrelaçamento de polímero; (D) alinhamento do polímero com o fluxo; (E) Floculação em ponte; (F) redução da floculação.

4.3.3 Fibras

As fibras utilizadas nos CPRs têm a função de melhorar a resistência à tração, restringindo a iniciação e a propagação de fissuras e melhorando a capacidade de absorção de energia e a ductilidade após a formação de fissuras (NAFEES et al., 2021; WANG et al., 2021; ROHDEN et al., 2020; YOO et al., 2017).

Existem diversos tipos de fibras que podem ser utilizadas nos concretos, sendo as principais as fibras de vidro, metálicas, de carbono, minerais e sintéticas - polímeros. Na Figura 4.6 são apresentados alguns tipos de fibras utilizados desde a década de 1970, para dar a ver a evolução dos materiais alternativos para reforço em CUADs. Destaque-se, no panorama evolutivo, a utilização adicional de nanomateriais na matriz cimentícia após os anos 2000 (GONG et al., 2022).

Figura 4.6 - Evolução da utilização de materiais de reforço em CUADs nas últimas 5 décadas.



Fonte: Adaptado de Gong et al., (2022).

Nafees et al. (2021), ao investigarem CPRs reforçados com fibras metálicas, verificaram melhorias significativas na ductilidade, na capacidade de deformação e de dissipação de energia em elementos estruturais e no aumento da resistência, na ordem de 10 %. Além disso, durante testes de compressão uniaxial, o CPR suportou uma quantidade significativa de carga após a fissuração inicial. Meng e Khayat (2018), em seus estudos com CPRs, verificaram melhorias significativas na resistência à tração, na ordem de 120%, com utilização de apenas 2 % de fibra de aço. Por outro lado, Ji et al. (2012), ao analisarem diferentes teores de fibras de aço, na ordem de 1 %, 2 %, 3 % e 4 %, verificaram que 3 % foi o teor que proporcionou o melhor desempenho na redução da propagação de fissuras em CPRs. Em outro estudo realizado com uso de fibras de aço inoxidável, Han et al. (2016) apontaram que percentuais de 0,5 %, em volume, aumentaram significativamente a resistência à tração e melhoraram a tenacidade, de modo semelhante ao que ocorre com as fibras metálicas. Por fim, de acordo com Meng e Khayat (2018), as fibras de aço são as mais utilizadas para a produção de CPRs. Por outro lado, elas podem ter algumas desvantagens, como o elevado custo, a possibilidade da ocorrência de corrosão, a influência no acabamento superficial da estrutura e o aumento da densidade do concreto.





Por sua vez, a fibras de vidro é de uso bastante difundido na indústria da construção civil. Entretanto, estudos realizados por Gesoglu et al. (2016) demonstraram que a resistência à flexão do CUAD, com 2 % de fibras de vidro, é reduzida em 25 %, um indicativo alto, sobretudo

se comparado com o CUAD com o mesmo percentual de fibras de aço. Outra fibra bastante utilizada para essa finalidade é a sintética de polietileno. No entanto, a superfície hidrofóbica da fibra sintética leva a uma zona de transição porosa entre a fibra e a matriz.

Existem alguns parâmetros verificáveis que orientam a tomada de decisão sobre a utilização das fibras, tais como: a sua natureza; as dimensões; a forma geométrica; a textura superficial; a resistência; o módulo de elasticidade; a proporção; e o método de incorporação. E todas essas características influenciam significativamente nas propriedades dos concretos (VANDERLEI, 2004).

Na Tabela 4.2 são apresentadas algumas formas geométricas e dimensões de fibras metálicas utilizadas para produção de CUADs (GONG et al., 2022).

Tabela 4.2 - Tipos, formas e dimensões de fibras de aço.

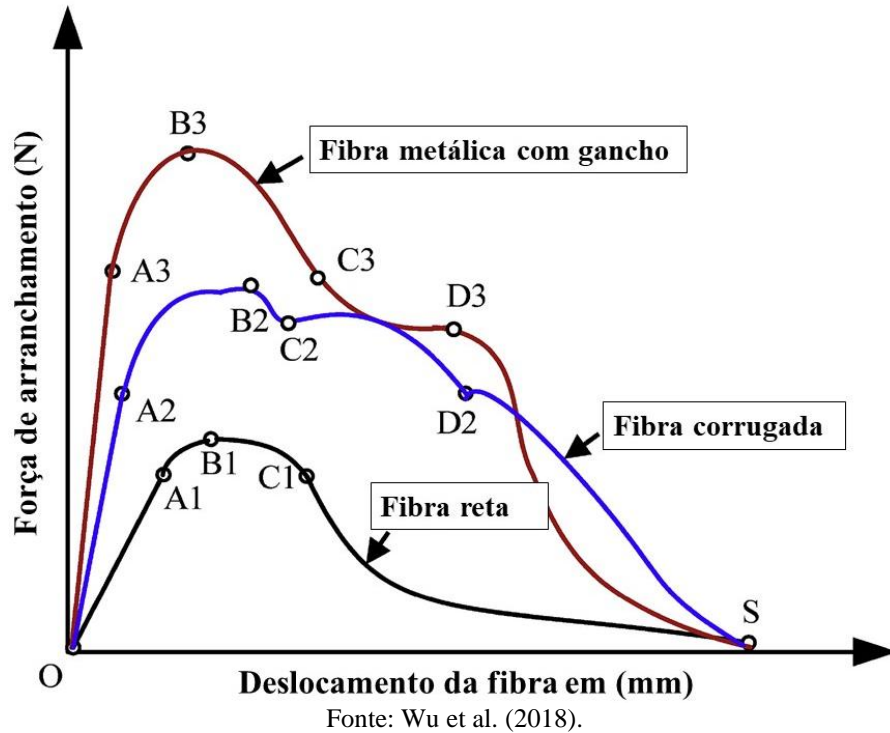
Tipos de fibra	Forma da fibra	Comprimento (mm)	Diâmetro (μm)
Reta		6	0,16
		13	0,16
		12	0,2
		13	0,2
		30	0,3
Ganchos nas pontas		13	0,2
		20	0,25
		20	0,35
		30	0,38
Corrugada		13	0,2
		30	0,3
Torcida/deformada		13	0,2
		18	0,3
		30	0,3
		30	0,5

Fonte: Gong et al., (2022).

Segundo Gong et al. (2022), as fibras deformadas apresentam melhor desempenho no aumento das propriedades mecânicas à tração do CUAD. Wu et al. (2018) investigaram as propriedades de aderência entre o CPR e a fibra, utilizando fibras com diferentes formatos: retas, em forma de gancho e corrugadas. Os resultados obtidos no ensaio de arrancamento demonstraram que as fibras corrugadas e em forma de gancho melhoraram significativamente

as propriedades de aderência, em até sete vezes quando comparadas às fibras retas, como pode ser observado na Figura 4.7.

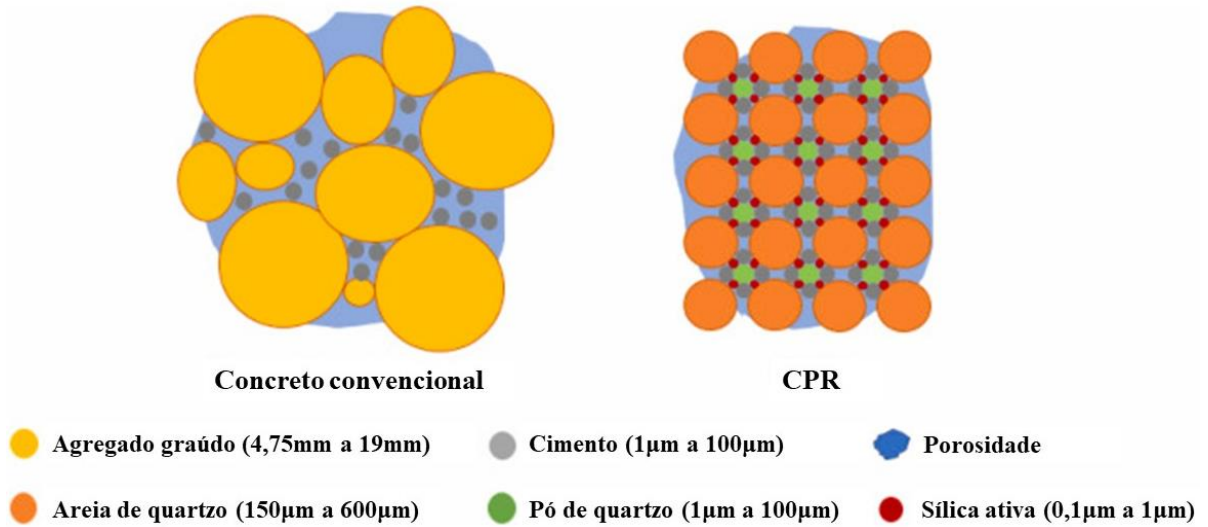
Figura 4.7 - Curvas de deslocamento de diferentes fibras de aço submetidas à carregamento constante.



4.4 DOSAGEM E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O propósito do estudo de dosagem é o de promover o máximo empacotamento de partículas, conforme apresentado na Figura 4.8, de modo a contribuir para o aumento da compactidade, para a baixa porosidade e, conseqüentemente, para o aumento da resistência mecânica dos CPRs. Entre os modelos teóricos de dosagem disponíveis, aquele modificado por Andreasen e Andersen é o mais aceito e utilizado (GONG et al., 2022; YU et al., 2015).

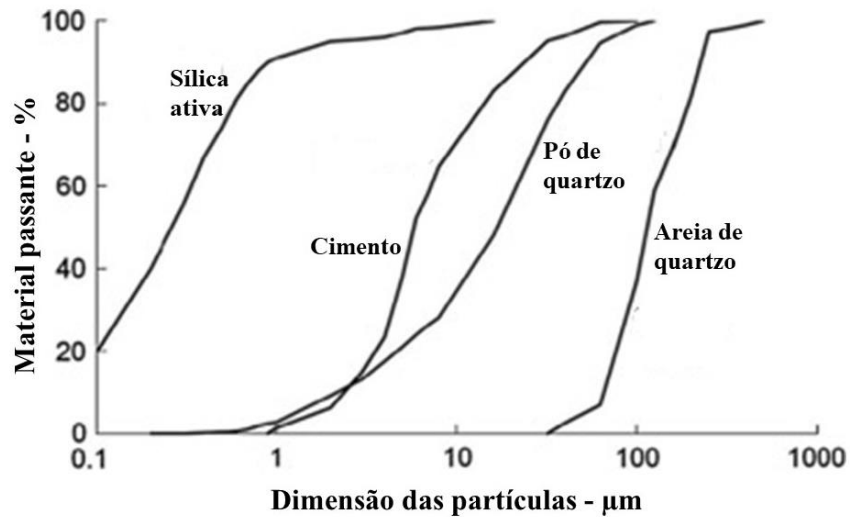
Figura 4.8 - Empacotamento esquemático de partículas de concreto convencional e CPR.



Fonte: Du et al. (2021).

A Figura 4.9 apresenta a distribuição granulométrica considerada como ideal para que os materiais constituintes do CPR obtenham um bom empacotamento de partículas (MAYHOUBAB et al., 2021).

Figura 4.9 - Perfil recomendado de distribuição granulométrica para os materiais constituintes do CPR.

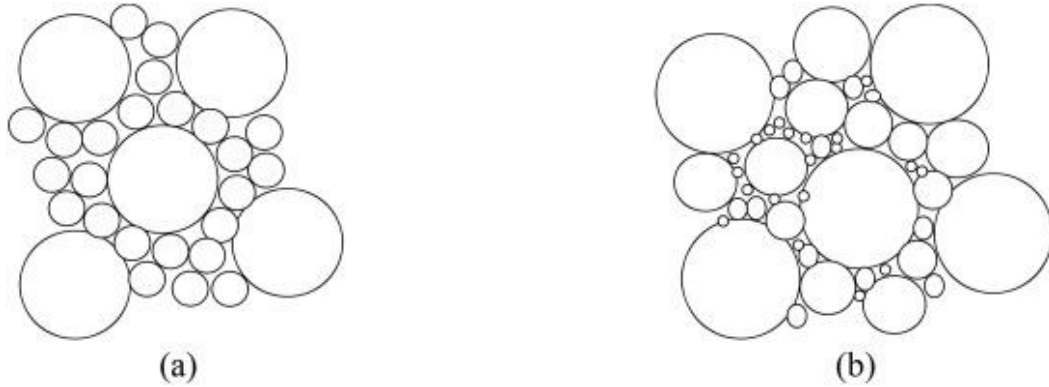


Fonte: Mayhoubab et al. (2021).

Considerando os métodos de empacotamento existentes, destacam-se dois deles, típicos para o desenvolvimento do estudo de dosagem, sendo eles o modelo discreto com partículas uniformes e o modelo contínuo com distribuição granulométrica contínua (CASTRO e

PANDOLFELLI, 2009). O modelo contínuo é mais utilizado para a produção de CPRs, por proporcionar uma estrutura interna com maior índice de compacidade, conforme apresentado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Modelos de empacotamento das partículas.



Fonte: Du et al. (2021).

Nota: (a) empacotamento discreto; (b) empacotamento contínuo

O primeiro modelo utilizando a distribuição granulométrica contínua dos grãos foi desenvolvido por Fuller e Andersen (DU et al., 2021). Posteriormente, considerando o efeito do tamanho mínimo de partícula no empacotamento de partículas, Funk e Dinger desenvolveram o modelo de Andreassen modificado, conforme é apresentado na equação 5.1 (VANDERLEI e GIONGO, 2006).

$$CPFT = \left[\frac{d^q - d_{min}^q}{(d_{max}^q - d_{min}^q)} \right] \cdot 100 \quad (5.1)$$

Sendo:

$CPFT$ = percentual acumulado de finos menor que “d” em volume;

d = tamanho da partícula;

d_{min} = menor tamanho de partícula da distribuição;

d_{max} = maior tamanho de partícula da distribuição;

q = coeficiente de distribuição.

Segundo Vanderlei (2004), os valores de q foram obtidos por Dinger e Funk por meio de simulações computacionais, em que foram constatados que os valores de q menores ou iguais a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo para distribuições infinitas, ao passo que os valores superiores a 0,37 podem ocasionar a porosidade residual no concreto. Para que a mistura apresente boa trabalhabilidade, o valor do coeficiente de distribuição deve ser menor que 0,30. Assim, valores de q próximos a 0,30 favorecem a produção de concretos adensados sob vibração, enquanto valores menores que 0,25 resultam em misturas de concretos autoadensáveis.

4.5 PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DO CPR

4.5.1 Propriedades no estado fresco

A trabalhabilidade do CPR deve ser bem controlada para que se garanta a homogeneidade da mistura e a formação de uma microestrutura densa. Materiais mais pesados, como as fibras metálicas, podem sofrer segregação, e materiais mais leves, como as fibras sintéticas, podem emergir no concreto, caso a trabalhabilidade não seja convenientemente alcançada.

Uma das grandes dificuldades da produção de CPR está no processo de mistura de seus componentes, pois os materiais pulverulentos, aliados à elevada superfície específica e à baixa relação a/c , atuam provocando o aumento das forças atrativas entre as partículas, tornando necessário, para a homogeneização do composto, o uso de percentuais elevados de superplastificante e de uma grande energia do misturador (ROHDEN et al., 2020).

A velocidade do misturador mecânico também pode influenciar as propriedades do CPR. Hiremath e Yaragal (2018) verificaram que velocidades entre 50 rpm e 100 rpm resultaram em melhores homogeneizações, ao passo que velocidades muito altas podem desencadear a incorporação de ar na mistura.

O consumo elevado de materiais pozolânicos intensifica as reações iniciais de hidratação, o que provoca uma rápida redução da trabalhabilidade do CPR, principalmente em temperaturas elevadas. Este problema é atribuído principalmente à hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) e do gesso ($CaSO_4$), que geram uma grande quantidade de etringita, o que faz aumentar as ligações e os atritos entre as partículas. Portanto, retardar o processo de hidratação é importante para melhorar a fluidez do CPR, podendo para isto ser utilizado aditivo retardador

de pega ou gelo triturado, em substituição à água de amassamento (DU et al., 2021; XIE et al., 2018).

Outra dificuldade apresentada pelo CPR está relacionada aos processos de moldagem e de adensamento. Devido a sua alta viscosidade, podem surgir nichos de concretagem que, como consequência, reduzem o desempenho mecânico do concreto no estado endurecido (ROHDEN et al., 2020). Métodos de aplicação de pressão confinante durante o processo de adensamento podem contribuir para reduzir esse problema, pois eles aumentam a compacidade do concreto. Além disso, a cura térmica em temperaturas iguais ou superiores a 90° C pode contribuir para a melhor formação cristalina, garantindo-se assim maior resistência dos CPRs.

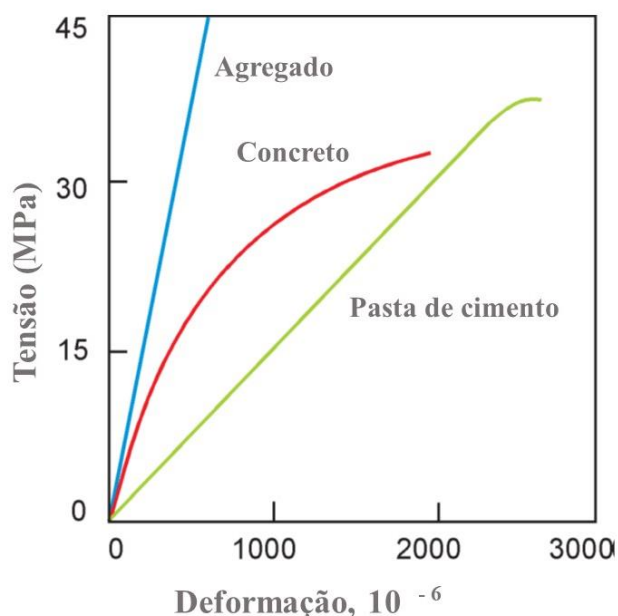
Existem três principais métodos de cura: a cura padrão, a cura à vapor e a cura em autoclave. Segundo Mayhoubab et al. (2021), a cura a vapor se destaca pela sua praticidade e por promover um bom impacto no desempenho do cimento, da sílica ativa e do pó de quartzo. No cimento, a elevação da temperatura provoca o aumento da reação pozolânica e faz com que o gel de CSH extra seja formado. A cura à vapor também pode ativar a sílica encontrada no pó de quartzo e, portanto, pode atuar como material de ligação e de empacotamento. Rohden et al. (2020), ao estudarem CPR colorido, verificaram a possibilidade de se conseguir resistências à compressão superiores a 300 MPa, com uso de cura térmica a 90° C, sem a necessidade do pré-adensamento e da cura em autoclave. É importante destacar que o CPR, com a utilização da cura térmica, apresenta incrementos de resultados de resistência à compressão em idades superiores a 28 dias. No concreto convencional esse comportamento geralmente acontece nas primeiras idades e tende a reduzir a resistência após os 28 dias (ROHDEN et al., 2020; YAZICI et al., 2009). Outras propriedades também podem ser melhoradas com a utilização da pressão confinante no processo de adensamento. Ipek et al. (2012), durante seus estudos, verificaram um aumento de resistência à tração em amostras de CPRs da ordem de 34 %. Richard e Cheyrezy (1995) e Rohden et al. (2020) concordam que, para alcançar resistências superiores a 600 MPa, é necessária a aplicação de pressão confinante em torno de 50 MPa, para o adensamento de corpos de prova de CPR, combinado ao uso de cura térmica em autoclave, a temperaturas entre 250° C e 400° C.

4.5.2 Propriedades no estado endurecido

As propriedades mecânicas do concreto convencional são influenciadas pela qualidade de ligações na interface da zona de transição, entre o agregado e a matriz cimentícia, bem como

pelo índice de porosidade interna. Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas “tensão X deformação do agregado”, da matriz da pasta de cimento e do concreto. Nelas, é possível observar que a pasta de cimento e o agregado apresentam, respectivamente, um comportamento elástico linear, enquanto que o concreto apresenta um comportamento não-linear frente à “tensão X deformação”. Isso se deve às complexidades microestruturais dos produtos cristalinos do concreto e às dimensões e conexões dos poros, as quais colaboram na progressão das microfissuras na zona de transição durante o ensaio de resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

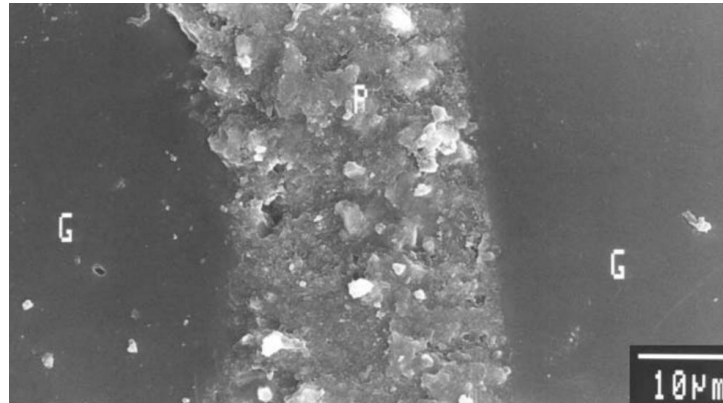
Figura 4.11 - Curvas comparativas tensão X deformação para agregado, concreto e pasta de cimento.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

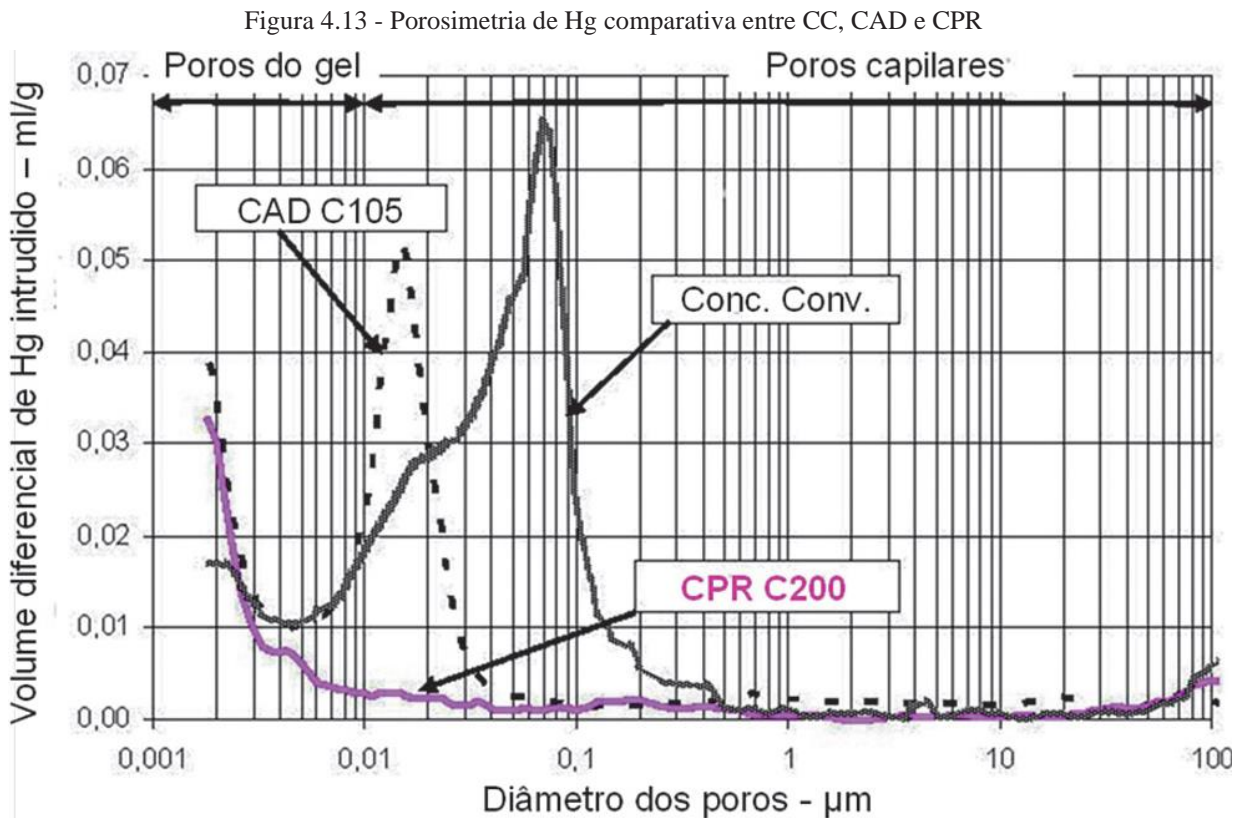
Por outro lado, o CPR foi desenvolvido com recurso às técnicas de empacotamento dos grãos e com o auxílio de aditivo superplastificante, as quais tornam possível obter-se a necessária homogeneidade de mistura com baixa relação água/cimento (a/c). Dessa forma, é possível obter microestruturas mais densas e com baixíssima porosidade. A adição de partículas finas, como o pó de quartzo, contribui para o empacotamento e o fechamento dos espaços vazios deixados pelo agregado miúdo, criando-se assim uma zona de transição muito compacta e sem poros evidentes, conforme a Figura 4.12 (MAYHOUBAB et al., 2021; TUTIKIAN et al., 2011; AİTCIN, 2008).

Figura 4.12 - Microestrutura compacta do CPR, com ausência da zona de transição, onde ao centro é apresentada a pasta de cimento (P), separada por grãos de agregado (G).



Fonte: AÏTCIN, (2008).

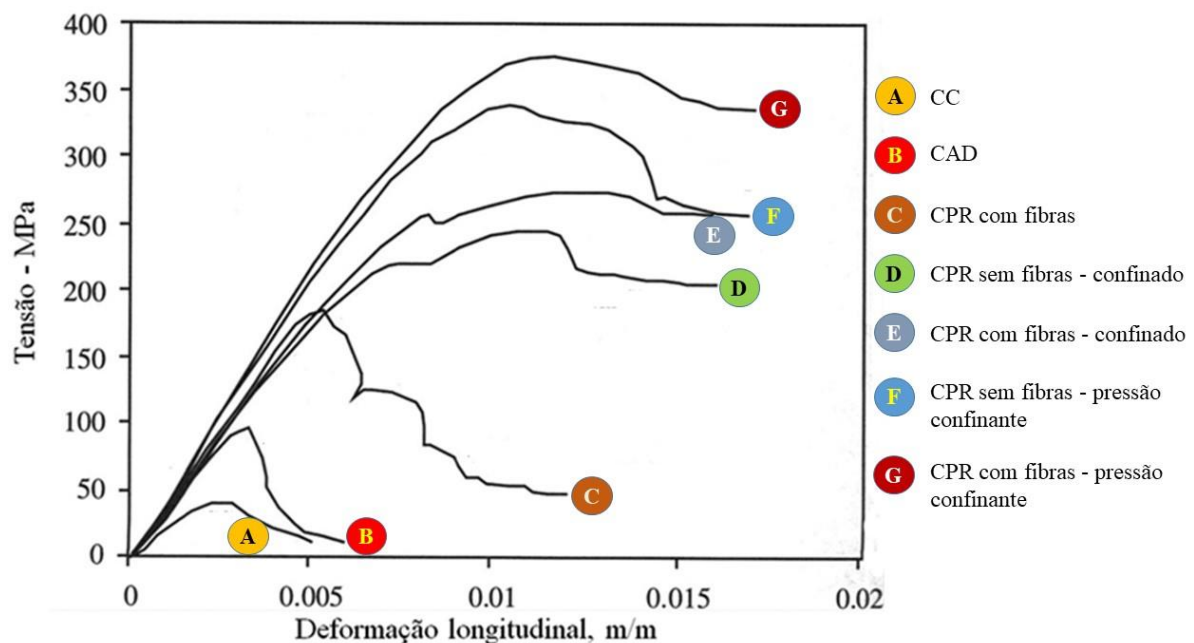
Tutikian et al. (2011), por meio do estudo de empacotamento de partículas, para demonstrar o efeito da redução da porosidade aliada a uma baixa relação a/c , apresentam na Figura 4.13 exemplos de estudos comparativos de porosimetria de Hg que utilizam amostras de CC, CAD e CPR. As análises comparativas destacaram as vantagens do CPR, devido ao seu baixo índice de porosidade.



Fonte: Tutikian et al. (2011).

Desta forma, a baixa porosidade e consumos mais elevados de materiais pozolânicos se refletem na melhoria das propriedades mecânicas à compressão e no aumento do módulo de elasticidade. Além disso, o uso de fibras, somado à aplicação de pressão confinante durante a moldagem do CPR, contribui sensivelmente para a melhoria das propriedades supracitadas, conforme apresentado na Figura 4.14 (AİTCIN, 2000).

Figura 4.14 – Diagrama tensão X deformação de diferentes concretos: convencional, de alto desempenho, de pós-reativos sem e com fibras, com e sem pressão confinante.



Fonte: Modificado de Aİtcin (2000).

4.6 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos com os CPRs foram realizados em duas etapas, conforme a descrição a seguir:

- **Etapa 1:** Produção de cinco traços de CPRs, com diferentes amostras de quartzitos coletadas em campo, com as frações obtidas e classificadas em laboratório, e a produção de um traço de CPR com agregado convencional de arenito. Para todos os seis traços foram utilizados sílica ativa, aditivo superfluidificante e fibra de vidro.
- **Etapa 2:** Produção de dois traços de CPRs, com amostras de quartzitos processadas e classificadas pelas indústrias S.A. e SIOX, utilizando sílica ativa, aditivo superfluidificante e fibras de aço.

Na Tabela 4.3 é apresentada a síntese das caracterizações físicas realizadas nos agregados e no cimento Portland, conforme descrito no capítulo 2.

Tabela 4.3 - Síntese das caracterizações físicas realizadas nos agregados e no cimento Portland.

Etapa 1			Etapa 2		
Material	Ensaio / Estudos	Normas	Material	Ensaio / Estudos	Normas
Quartzito	Constituição dos agregados - Quartzitos fragmentados em laboratório utilizando equipamento de abrasão Los Angeles.	-	Quartzito industrializado	Constituição dos agregados - Quartzitos previamente britados e classificados por empresa do setor.	-
	Determinação da massa específica realizada utilizando a fração graúda (DMC >19 mm)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)		Determinação da massa específica realizada utilizando a fração miúda	NBR NM 52 (ABNT,2009)
Quartzito	Análise granulométrica por peneiramento e por sedimentação	NBR NM 248 (ABNT,2003) / NBR 7181 (ABNT, 2016)	Quartzito industrializado	Amostras obtidas em frações granulométricas previamente classificadas por indústria	-
Cimento CP V-ARI	Determinação da massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	Cimento CP V-ARI	Determinação da massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)

Fonte: O Autor (2022)

4.6.1 Definição das frações granulométricas correspondente a Etapa 1

De posse das análises granulométricas dos rejeitos de quartzitos, foram estabelecidos os percentuais das frações miúda e pulverulenta, para análise de empacotamento com auxílio do *software* EMMA Elkem Material Mix Analyser, versão 3.5.2, de licença gratuita. Vale ressaltar que a classificação realizada na fração miúda dos quartzitos ficou semelhante à classificação granulométrica do agregado miúdo JUNDÚ, o agregado de referência. Na Tabela 4.4 são indicadas as frações miúda e pulverulenta de quartzitos e os respectivos percentuais utilizados para produção dos CPRs.

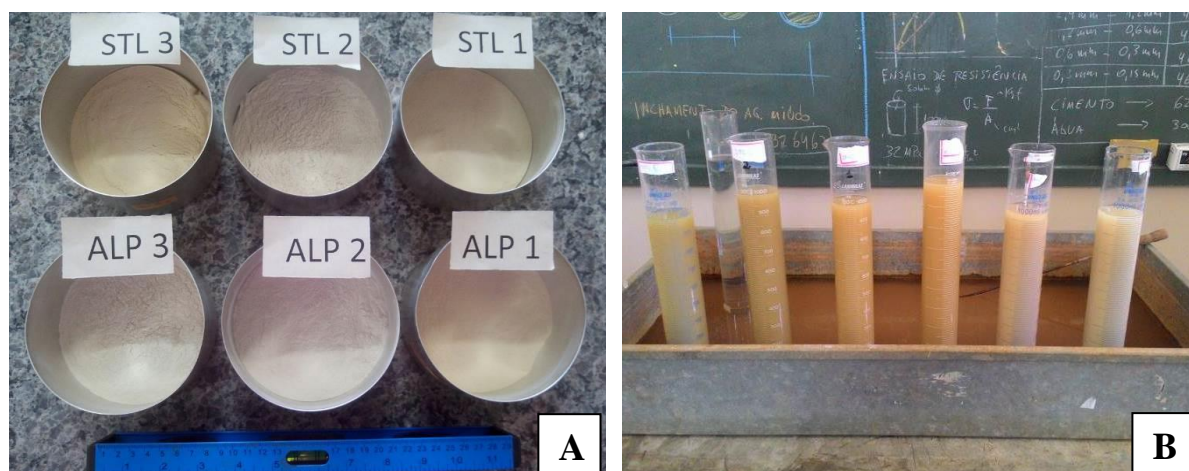
Tabela 4.4 - Dimensões granulométricas das frações pó e areia de quartzitos e respectivos percentuais adotados para produção dos CPRs – Etapa 1.

	Malha das peneiras em (μm)	Porcentagem retida na peneira
Fração miúda (areia)	600 μm	0,86 %
	300 μm	6,91 %
	150 μm	65,52 %
Fração pó (pulverulenta)	74 μm	13,48 %
	45 μm	6,52 %
	Fundo da peneira	6,71 %

Fonte: O Autor (2022)

As frações inferiores a 0,074 mm foram peneiradas manualmente, de forma a agilizar o processo de obtenção das porções. Na fração pulverulenta, passante em peneira de malha 45 μm , foram utilizados aproximadamente 500 g de cada uma das amostras de quartzitos, para a realização da análise granulométrica, conforme Figura 4.15 A. O ensaio obedeceu o procedimento estabelecido pela norma NBR 7181 (ABNT, 2016), que fixa o método de sedimentação de partículas com uso do defloculante, no caso, o hexametáfosfato de sódio, conforme Figura 4.15 B.

Figura 4.15 – (A) Pó separado para realização da granulometria por sedimentação; (B) Realização do ensaio de granulometria por sedimentação



Fonte: O Autor (2022)

Para o cimento e a sílica ativa foram adotadas as frações granulométricas sugeridas na biblioteca de materiais, disponibilizada pelo *software* de empacotamento EMMA.

4.6.2 Definição das frações granulométricas correspondente a Etapa 2

Os agregados de quartzitos foram previamente classificados pelas indústrias S.A. e SIOX, em São Thomé das Letras-MG, e as frações granulométricas utilizadas para a realização do estudo de dosagem dos CPRs são apresentadas na Tabela 4.5 e na Figura 4.16, respectivamente.

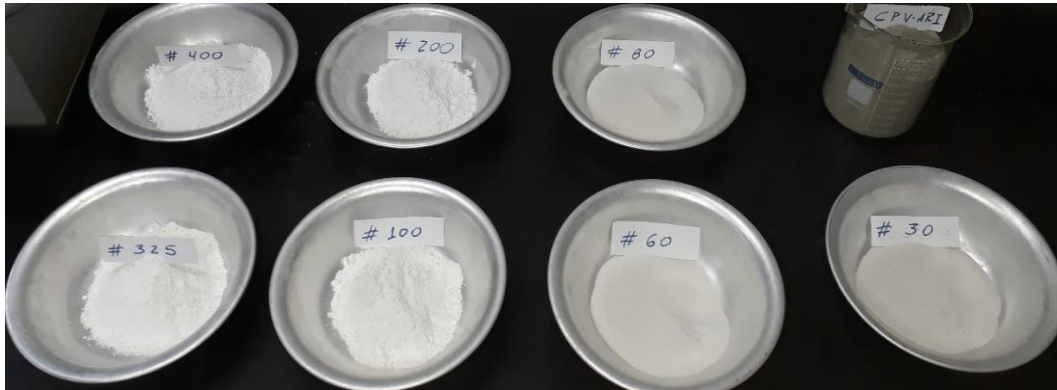
Tabela 4.5 - Frações granulométrica dos quartzitos utilizados na Etapa 2 para produção dos concretos.

	Malha das peneiras em mesh	Malha das peneiras em (μm)	Porcentagem retida na peneira
Frações classificadas industrialmente	# 30	600 μm	18,18 %
	# 60	250 μm	16,88 %
	# 80	177 μm	15,58 %
	# 100	150 μm	14,28 %
	# 200	74 μm	12,98 %
	# 325	45 μm	11,68 %
	# 400	37 μm	10,38 %

Fonte: O Autor (2022)

As diferentes frações intermediárias de quartzitos classificados industrialmente permitiram, com auxílio do *software* EMMA, obter um perfil mais satisfatório de empacotamento das partículas em relação aos quartzitos classificados na Etapa 1. Os procedimentos para realização do estudo do empacotamento são apresentados na seção subsequente.

Figura 4.16 - Frações granulométricas dos quartzitos separadas em laboratório para produção dos concretos.



Fonte: O Autor (2022)

4.6.3 Dosagem dos CPRs pelo método de empacotamento dos grãos

De posse das análises granulométricas e das massas específicas dos materiais componentes dos concretos, foram desenvolvidos os estudos de dosagem, com auxílio do *software* EMMA da ELKEM®, em que as referências de empacotamento consistem em métodos numéricos desenvolvidos por *Andreasen Modificado*.

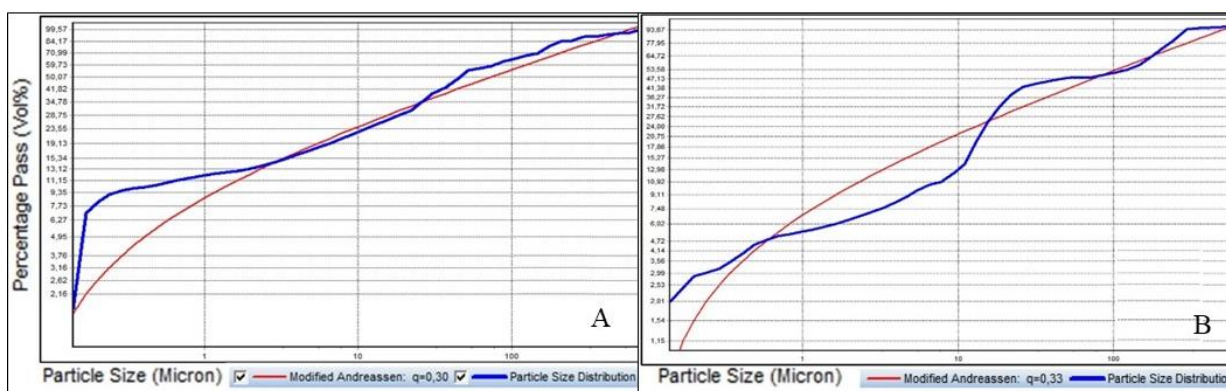
Os traços de CPRs foram estabelecidos com as seguintes denominações:

- CPR com quartzitos ALP 1 (Etapa 1);
- CPR com quartzitos ALP 2 (Etapa 1);
- CPR com quartzitos ALP 3 (Etapa 1);
- CPR com quartzitos STL 2 (Etapa 1);
- CPR com quartzitos STL 3 (Etapa 1);
- CPR com arenitos da Mineração JUNDÚ (Etapa 1);
- CPR com quartzitos industrializados STL, **sem** fibras metálicas (Etapa 2);
- CPR com quartzitos industrializados STL, **com** fibras metálicas (Etapa 2).

Não foi possível produzir o concreto com a amostra STL 1 por dois motivos: ocorreram deficiências no estado fresco, durante a primeira tentativa de produção, o que impossibilitou a moldagem dos corpos de prova; e também por não haver frações de areia e pós suficientes para a reprodução de um novo traço.

Na Figura 4.17 são apresentadas as curvas de empacotamento que foram obtidas para a definição dos traços de CPRs correspondentes às amostras ALP 1, ALP 3, STL 2, STL 3 e JUNDÚ (Figura 4.17 A) e a amostra ALP 2 (Figura 4.17 B). Nas imagens, a linha vermelha representa a distribuição granulométrica ideal sugerida pelo *software* e a linha em azul indica a distribuição granulométrica encontrada para os traços. Entre todas as amostras, somente ALP2 obteve uma curva de empacotamento diferente das demais, por ter sido constituída de um traço com menores proporções de quartzitos.

Figura 4.17 - Ilustração do máximo empacotamento permitido pelos materiais (linha azul) e do empacotamento ideal de Andreassen Modificado (linha vermelha).



Fonte: O Autor (2022)

Nota: (A) amostras ALP1, ALP3, STL2, STL3 e JUNDÚ; (B) amostra ALP2. - Etapa 1.

Na Etapa 1, buscou-se manter a proximidade dos consumos de cimento em torno de 850 kg/m³ de concreto dos traços, com exceção das seguintes amostras:

- ALP 1, com consumo de 818,20 kg/m³, por ter massa específica dos quartzitos menor em relação às outras amostras;
- ALP 2, com consumo de 985,90 kg/m³, por ter obtido uma quantidade limitada da fração areia de quartzitos, de modo que as proporções foram diferentes dos demais traços.

Na Tabela 4.6 são apresentados os traços produzidos na Etapa 1, incluindo os indicativos de consumo de cimento por m³ de concreto.

Tabela 4.6 - Descrição dos traços estudados na Etapa 1 e respectivos consumos de cimento por m³ de concreto.

Amostras	Proporções em massa (kg)					Aditivos e fibras em %			Cimento (kg/m ³ concreto)
	cimento	sílica ativa - Tecnosil	pó de quartzito	areia de quartzito	a/c	nano sílica (em massa)	Superplastificante - Glenium 51 Basf (em massa)	Fibras de vidro (em volume)	
STL 2	1,00	0,145	0,183	1,20	0,25	2 %	3 %	0,18 %	847,68
STL 3	1,00	0,145	0,183	1,20	0,25	2 %	3 %	0,18 %	852,85
ALP 1	1,00	0,145	0,183	1,20	0,25	2 %	3 %	0,18 %	818,20
ALP 3	1,00	0,145	0,183	1,20	0,25	2 %	3 %	0,18 %	851,68
JUNDÚ	1,00	0,145	0,183	1,20	0,25	2 %	3 %	0,18 %	854,91
*ALP 2	1,00	0,200	0,200	0,690	0,25	2 %	3 %	0,18 %	985,90

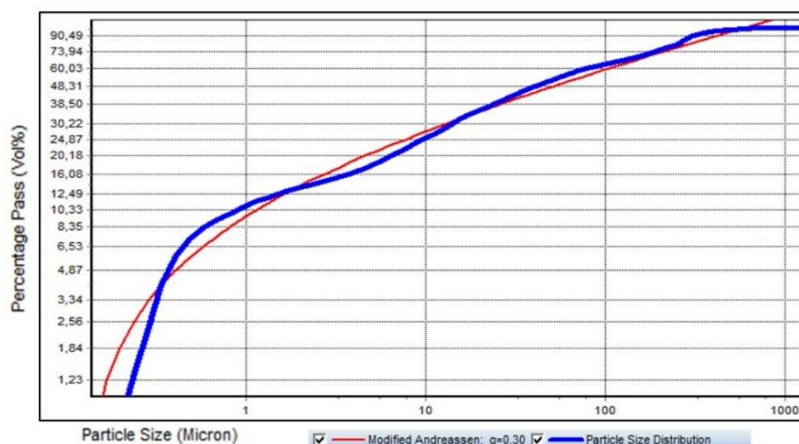
Fonte: O Autor (2022)

Nota: * o traço da amostra ALP 2 foi modificado em função da baixa disponibilidade da fração areia de quartzito.

O propósito principal desta etapa do estudo foi o de ajustar as curvas de empacotamento, de forma que todos os traços ficassem semelhantes. Para isso, foram realizadas verificações de granulometria e massas específicas dos diferentes materiais que compõem os CPR's - areia quartzito, areia JUNDÚ, pó de quartzito, pó JUNDÚ, cimento Portland e sílica ativa -, para serem inseridos ao *software* EMMA, de modo a traçar as curvas de empacotamento de grãos. Não foi realizada a fixação do consumo de cimento por metro cúbico de concreto para possibilitar a otimização do empacotamento dos grãos por meio dos estudos obtidos pelo *software* EMMA. Com exceção de ALP2, os traços das demais amostras foram definidos em: 1 : 0,145 : 0,183 : 1,20 : 0,25.

Na Etapa 2, para a constituição da curva de empacotamento, o *software* EMMA foi alimentado com as informações das frações granulométricas apresentadas na Tabela 4.5. Estas diferentes frações dos quartzitos, que obtidas pelas empresas S.A e Siox, possibilitaram a realização de melhores ajustes das proporções do traço, para que a curva de empacotamento ficasse mais próxima da curva de referência do *software*. Na Figura 4.18, destacada na cor azul, é apresentada a curva de empacotamento obtida.

Figura 4.18 - Ilustração do máximo empacotamento permitido pelos materiais (linha azul) e do empacotamento ideal de Andreasen Modificado (linha vermelha), referente às amostras de CPRs da Etapa 2.



Fonte: O Autor (2022)

A curva granulométrica obtida na Etapa 2 ficou próxima da linha de referência projetada pelo *software*, portanto considerada mais adequada quando comparada com a curva da Etapa 1, pois o quartzito previamente classificado pelas indústrias possibilitou um melhor ajuste de empacotamento das partículas. Com isso, os consumos de cimentos puderam ser fixados em 755 kg/m^3 . Na Tabela 4.7, são apresentados os traços produzidos na Etapa 2, incluindo os indicativos de consumo de cimento por m^3 de concreto.

Tabela 4.7 - Descrição dos traços estudados na Etapa 2 e respectivos consumos de cimento por m^3 de concreto.

Amostras	Proporções em massa (kg)				Aditivos e fibras em % (em relação a massa de cimento)		Cimento (kg/m^3 concreto)
	cimento	sílica ativa - Elkem	Pó e Areia de quartzo	a/c	Superplastificante - ADVA 585 (em massa)	Fibras metálicas (em volume)	
STL S/F	1,00	0,25	1,54	0,22	9,0 %	-	755,0
STL C/F	1,00	0,25	1,54	0,22	9,0 %	2,0 %	755,0

Fonte: O Autor (2022)

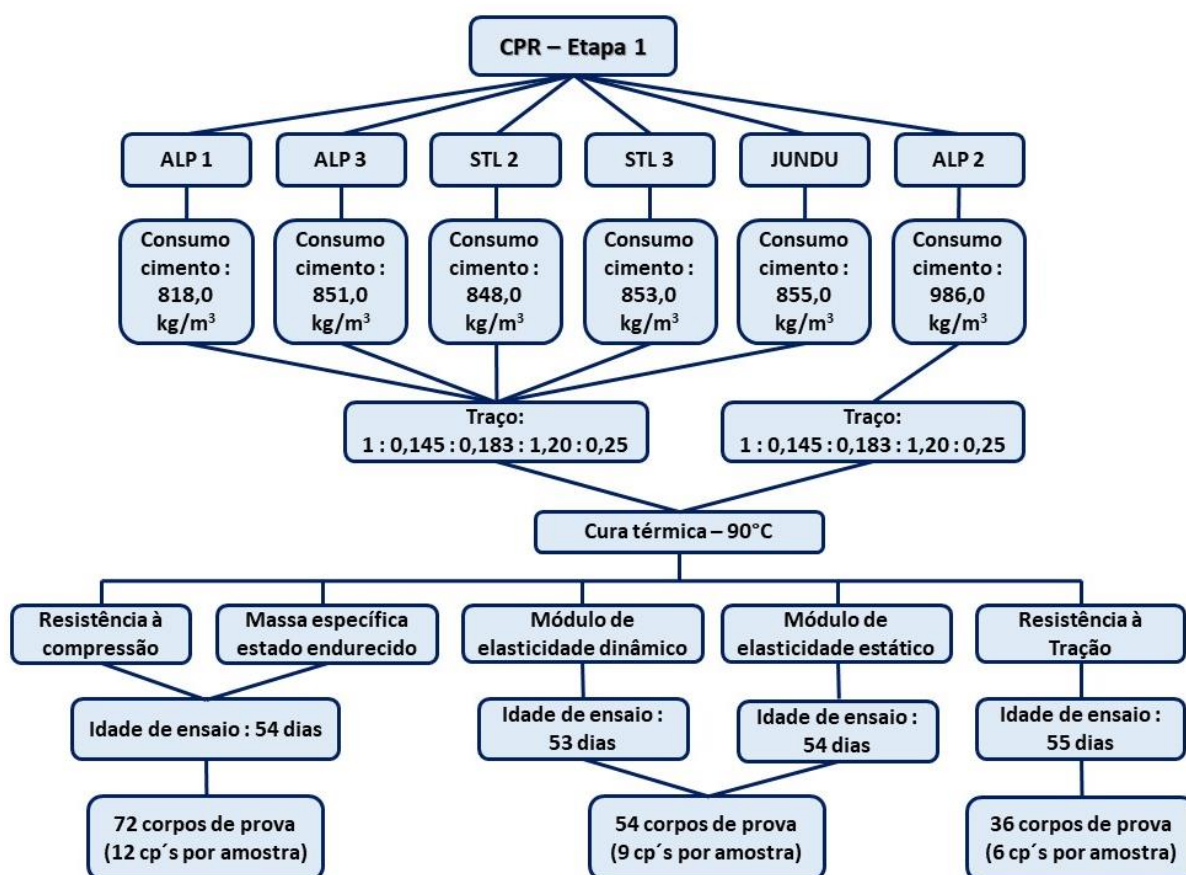
Quando comparados os traços estabelecidos nas duas etapas, é possível perceber que os ajustes de empacotamento dos grãos realizados na Etapa 2 permitiram reduzir o consumo de

cimento de 850,0 kg/m³ para 755,00 kg/m³. Também a relação água/cimento foi reduzida, de 0,25 para 0,22.

4.6.4 Confeção de concreto em laboratório

Para a análise do comportamento em estado fresco e endurecido, foram confeccionados diversos tipos de concretos, todos de acordo com a norma NBR 12821 (ABNT, 2009). Por se tratar de um tipo concreto com aspectos reológicos bastante diferentes dos concretos convencionais, foram adotados os procedimentos de moldagem realizados por Vanderlei (2004). Os concretos foram produzidos no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, na cidade paulista homônima, e no Laboratório de Materiais de Construção da UEMG de Passos, em Minas Gerais. Em ambas escolas foi utilizada uma argamassadeira elétrica apropriada para o tipo de concreto. Na Figura 4.19 é apresentado o fluxograma dos estudos com os CPRs realizados na Etapa 1

Figura 4.19 – Fluxograma dos estudos realizados com os CPRs na Etapa 1.



Fonte: O Autor (2022)

Na Etapa 1 foram confeccionados 22 corpos de prova cilíndricos, de 50 mm X 100 mm, para cada um dos 6 traços de CPR. Portanto, no total foram produzidos 132 corpos de prova, conforme apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20 – CPRs moldados na Etapa 1, totalizando 132 corpos de prova.



Fonte: O Autor (2022)

Na Etapa 2 foram produzidos dois traços de concreto, sendo um traço com incorporação de fibras metálicas (CPR C/F) e o outro traço sem a incorporação de fibras metálicas (CPR S/F), conforme Figura 4.21. Foram moldados os seguintes corpos de prova:

- 23 corpos de prova cilíndricos com 50 mm X 100 mm, de CPR S/F;
- 3 corpos de prova prismáticos com 40 mm X 40 mm X 160 mm, de CPR S/F;
- 25 corpos de prova cilíndricos com 50 mm X 100 mm, de CPR C/F;
- 6 corpos de prova prismáticos com 40 mm X 40 mm X 160 mm, de CPR C/F.

Nesta etapa da pesquisa foram utilizadas fibras de aço retas, com revestimento de cobre, com dimensões de 12,0 mm de comprimento e 0,2 mm de diâmetro, importadas da China e fabricadas pela Weixian Jinzhuwang Steel Fiber Manufacturing CO., LTD.

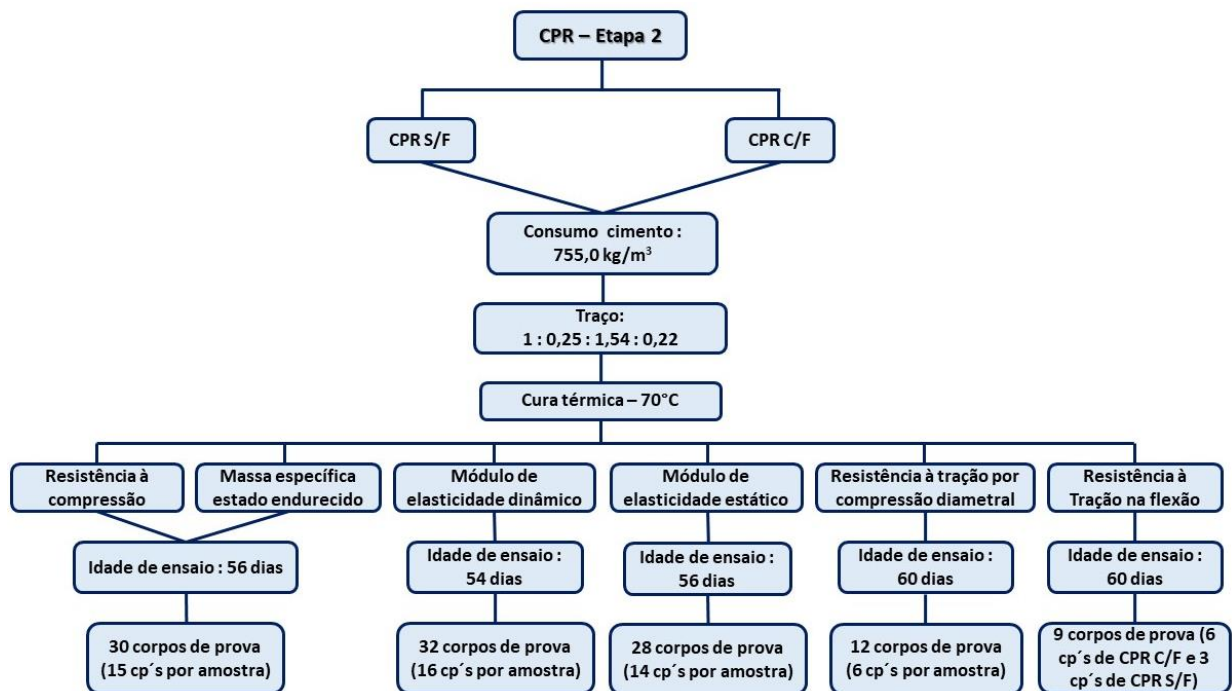
Figura 4.21 – CPRs moldados na Etapa 2, totalizando 57 (cinquenta e sete) corpos de prova.



Fonte: O Autor (2022)

Na Figura 4.22 é apresentado o fluxograma dos estudos realizados com os CPRs correspondentes a Etapa 2.

Figura 4.22 – Fluxograma dos estudos realizados com os CPRs na Etapa 2



Fonte: O Autor (2022)

Em ambas etapas foram realizados os seguintes procedimentos: escolha das frações granulométricas dos agregados; dosagem conforme método de empacotamento dos grãos;

confeção de concreto em laboratório; moldagem e cura dos corpos de prova; determinação das propriedades físicas e mecânicas dos CPRs.

4.6.5 Cura dos corpos de prova de CPRs

Normalmente recomenda-se que o processo de cura térmica seja realizado em altas temperaturas, para acelerar as reações de cristalização dos materiais aglomerantes. Alguns estudos indicam que, em temperaturas acima de 200° C, o pó de quartzo presente no CPR pode ser estimulado e desenvolve propriedades pozolânicas (TAVARES et al., 2020; HE et al., 2017; CHRIST e TUTIKIAN, 2013).

Na Etapa 1, a cura térmica dos CPRs seguiu as recomendações propostas por Vanderlei (2004). Os corpos de prova, na pré-cura, foram armazenados à temperatura ambiente por 48h. Posteriormente, eles foram colocados em banho com a água à temperatura de 90°C, pelo período de 24h. Em seguida, os corpos de prova foram acondicionados em cura úmida à temperatura de 28° C, até se completarem 28 dias de idade. A cura térmica foi realizada utilizando banho termorregulador.

Na Etapa 2, os corpos de prova foram acondicionados durante as primeiras 24 horas em câmara úmida. Posteriormente, eles foram armazenados em um recipiente com água e levados à cura térmica utilizando estufa durante o período de 3 dias. O aumento da temperatura foi gradual até atingir o limite de 70° C, após o que, no terceiro de cura, a temperatura foi reduzida gradualmente até atingir a condição ambiente.

4.6.6 Retífica dos corpos de prova de CPR's

As retíficas nas extremidades de topo e de base dos corpos de prova de CPRs foram realizadas no laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia da UNESP de São Carlos-SP. O processo foi realizado em uma retífica que promove a perfeita regularização, tornando a superfície extremamente polida, o que permitiu alcançar dois objetivos importantes: nos ensaios mecânicos de compressão, as forças foram distribuídas uniformemente no corpo de prova; e foi possível determinar, com precisão, a massa específica no estado endurecido. Conforme apresentado na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Equipamento utilizado para retífica dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2022)

4.6.7 Caracterização tecnológica dos CPRs

Os estudos de caracterização tecnológica dos CPRs foram realizados em alguns dos laboratórios dos departamentos de Geotecnia e de Estruturas da EESC-USP, são eles:

- Massa específica dos concretos no estado endurecido;
- Ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos (NBR 5739: ABNT, 2018; NBR 15845-5: ABNT, 2015);
- Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222: ABNT, 2011);
- Resistência à tração na flexão em prismas de concreto (NBR 12142: ABNT, 2010);
- Módulo de elasticidade estático do concreto (NBR 8522: ABNT, 2017);
- Módulo de elasticidade dinâmica por ressonância acústica (E1876: ASTM, 2001).

Na Tabela 4.8 são apresentados os ensaios tecnológicos e as respectivas quantidades de corpos de prova de CPRs utilizados nesta pesquisa.

Tabela 4.8 – Ensaio tecnológicos e quantidades de corpos de prova de CPRs.

ENSAIOS	ETAPA 1		ETAPA 2	
	Número de cp's por amostra	Total por ensaio	Número de cp's por amostra	Total por ensaio
Resistência à compressão	3	18	-	-
Módulo de Elasticidade Estático / Resistência uniaxial / Módulo de Elasticidade Dinâmico (ressonância acústica)	9	54	15	30
Resistencia à Tração por compressão diametral	6	36	6	12
Resistência à Tração na flexão em prismas			3/6	9
Número cp's reservados como contraprova	4	24	2/4	6
TOTAL DE CORPOS DE PROVA DE CPR		132	-	57

Fonte: O Autor (2022)

4.6.7.1 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Primeiramente, foram determinadas as dimensões dos corpos de prova, para cálculo das massas específicas no estado endurecido. Em seguida, foram realizados os ensaios de compressão nas idades de 54 dias - Etapa 1- e 56 dias - Etapa 2. Na Figura 4.24 é apresentada a prensa servo controlada utilizada para a realização dos ensaios mecânicos de resistência e de elasticidade.

Figura 4.24 - Prensa servo controlada utilizada nos ensaios mecânicos destrutivos

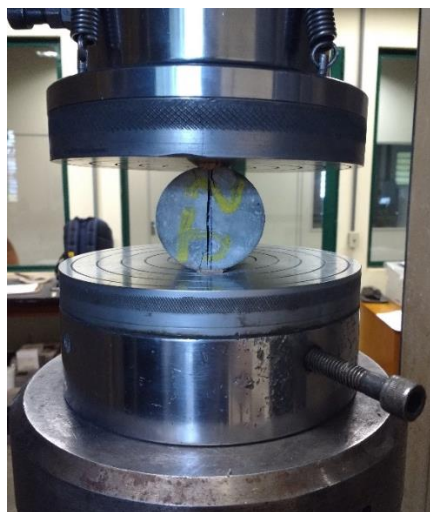


Fonte: O Autor (2022)

4.6.7.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi adotado o procedimento estabelecido pela norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Na Figura 4.25 são apresentados os detalhes sobre o posicionamento dos corpos de prova na máquina de ensaio.

Figura 4.25 - Posicionamento do corpo de prova de concreto para determinação da resistência à tração.



Fonte: O Autor (2022)

Como pode ser observado, filetes de madeira foram dispostos ao longo da geratriz do corpo de prova para direcionar uniformemente a aplicação das forças. Os resultados foram determinados através da equação 5.2, a seguir.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (5.2)$$

$f_{ct,sp}$ = é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

F = força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d = diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l = comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

4.6.7.3 Ensaio de resistência à tração na flexão em prismas de concreto

Os ensaios de resistência à tração na flexão em prismas de CPRs foram executados seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 12142 (ABNT, 2010), utilizando uma prensa elétrica hidráulica do Departamento de Estruturas da EESC-USP. Na Figura 4.26 é apresentada imagem do prisma de CPR posicionado no equipamento.

No processo do ensaio, primeiramente foram definidas as distâncias entre apoios e pontos de aplicação de força. Na sequência foi aplicada a força de maneira gradual, uniforme e sem promoção de impactos contra o corpo de prova.

Figura 4.26 – Prisma de CPR S/F posicionado na prensa elétrica hidráulica.



Fonte: O Autor (2022)

O cálculo da resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a equação 5.3.

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (5.3)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ = é a resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

F = é a força máxima registrada na máquina, em newtons (N);

l = é a dimensão do vão entre os apoios, em milímetros (mm);

b = é a largura média do corpo de prova, em milímetros (mm);

d = é a altura média do corpo de prova, em milímetros (mm);

4.6.7.4 Módulo de elasticidade estático

Para a determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação à compressão foi utilizada a prensa servo controlada do Laboratório de Geotecnia da EESC-USP. Os corpos de prova, devidamente retificados, foram instrumentados com extensômetros eletrônicos, como se vê na Figura 4.27, e as forças foram aplicadas à velocidade de 0,45 MPa por segundo.

Foram ensaiados 54 corpos de prova, sendo nove corpos de prova para cada uma das seis amostras de concretos, e obtidos além do módulo de elasticidade a resistência à compressão uniaxial.

Figura 4.27 - Instrumentação dos corpos de prova de CPR's para determinação dos módulos de elasticidade.

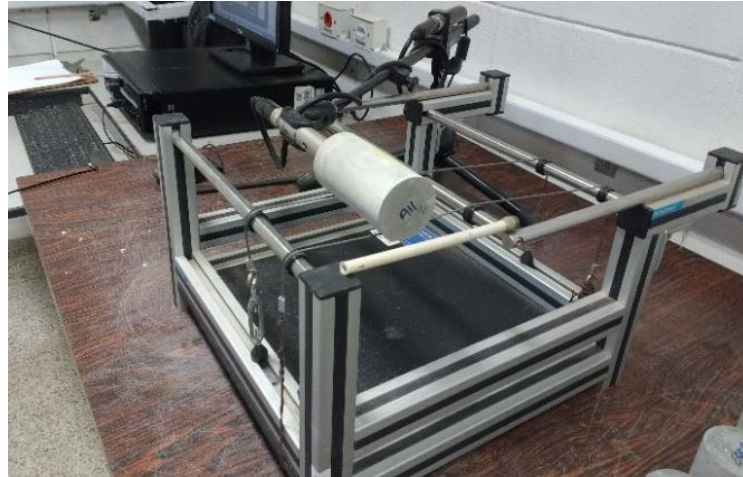


Fonte: O Autor (2022)

4.6.7.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Para a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico nos CPRs foi adotado o método de ressonância acústica, com recurso ao equipamento Sonelastic, do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, como se vê na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Equipamento Sonelastic utilizado para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.



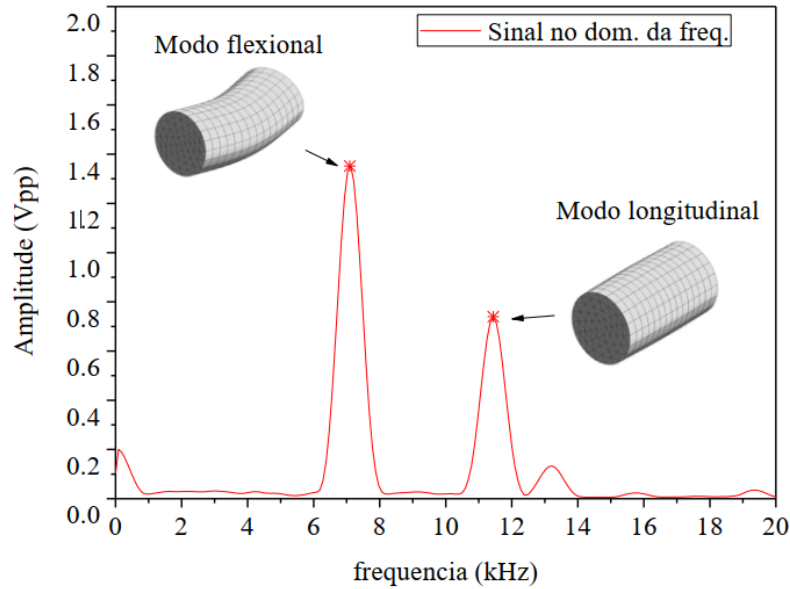
Fonte: O Autor (2022)

Neste procedimento, o corpo de prova é exposto à excitação por impacto de curta duração, com auxílio de um martelo, tendo a frequência vibratória captada por microfone. Os dados coletados são processados pelo *software* Sonelastic, que realiza a Transformada Rápida de Fourier (FFT), em conformidade com o estabelecido pelas normas técnicas E1876-01 (ASTM, 2001) e C215-02 (ASTM, 2003).

Segundo Krahl et al. (2019), um corpo de prova cilíndrico pode apresentar dois modos de vibração fundamentais: o flexional, em que o impacto do martelo acontece no sentido perpendicular à altura do corpo de prova; e o longitudinal, em que o impacto do martelo é realizado em uma das extremidades, paralelo à altura do corpo de prova. A caracterização dos picos de frequência natural destes impactos é apresentada na Figura 4.29.

Foram utilizados os mesmos 54 corpos de prova ensaiados pelo método estático destrutivo. As equações 5.4 e 5.5 são as que foram utilizadas na realização do ensaio.

Figura 4.29 - Caracterização dos picos de frequência natural



Fonte: Krahl et al. (2019).

O módulo de elasticidade, obtido pelo modo de vibração flexional ($E_{d,f}$, em Pa) foi determinado através da equação 5.4.

$$E_{d,f} = 1,6067 \left(\frac{L^3}{D^4} \right) m \cdot f_{N,1,f}^2 \cdot T_1' \quad (5.4)$$

Em que:

m = é a massa do corpo de prova (em gramas);

D = é o diâmetro do corpo de prova (em mm);

L = é o comprimento do corpo de prova (em mm);

$f_{N,1,f}^2$ = é a frequência natural fundamental flexional obtida em um sinal;

T_1' = é um fator de correção para o modo fundamental flexional.

O módulo de elasticidade dinâmico obtido por vibração longitudinal, mediante a excitação do corpo de prova cilíndrico com impacto de curta duração e de forma centrada foi determinado conforme a Equação 5.5.

$$E_{d,l} = 5,093 \left(\frac{L}{D^2} \right) m \cdot f_{N,1,l}^2 \quad (5.5)$$

A equação 5.6 apresenta o fator de correção para o modo fundamental flexional (T'_1), em que ν é o coeficiente de Poisson dinâmico, estimado em 0,20.

$$T'_1 = 1 + 4,939(1 + 0,0752\nu_d + 0,8109\nu_d^2) \left(\frac{D}{L}\right)^2 - 0,4883 \left(\frac{D}{L}\right)^4 - \left[\frac{4,69(1+0,2023\nu_d+2,173\nu_d^2)\left(\frac{D}{L}\right)^4}{1,00+4,754(1+0,1408\nu_d+1,536\nu_d^2)\left(\frac{D}{L}\right)^2} \right] \quad (5.6)$$

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS

Segundo Oliveira (2007), a estatística descritiva é aquela que sumariza um conjunto de dados por intermédio de medidas descritivas, sejam elas de centralidade ou de dispersão, bem como por meio de tabelas de distribuição de frequências e gráficos.

Diante dos diferentes tipos de amostras de quartzitos estudados na Etapa 1 e do universo expressivo de corpos de prova ensaiados, impôs-se a necessidade de se avaliar se as diferenças obtidas nos resultados eram estatisticamente significativas ou não. Para tanto, nesta seção são apresentadas as metodologias adotadas para a realização das análises de variâncias e discriminantes multivariadas.

No primeiro momento foi realizada a sumarização das observações coletadas para cada tipo de amostra. Ou seja, foram caracterizadas as principais medidas de centralidade e de dispersão associadas a tais amostras, dentre elas a média e o desvio padrão. As medidas de centralidade servem essencialmente para tipificar um conjunto de dados, ou seja, para identificar o valor mais típico em uma variável quantitativa, seja ela discreta ou contínua. De modo inverso, as medidas de dispersão servem para mensurar a variabilidade em torno da média, ou, ainda, para mensurar o grau de variabilidade dos dados em torno da média, dando uma ideia inicial de variabilidade entre os dados.

Ressalta-se que para outras análises estatísticas, será utilizada a média como um componente importante, ilustrando na descrição dos testes de hipóteses associados a ANOVA, bem como análises de normalidade e discriminantes.

4.7.1 Testes de Hipóteses

De acordo com Brunii (2009), o método da análise inferencial, criado para se realizar estimativas de parâmetros populacionais, também pode ser usado para testes de hipóteses extraídas de dados amostrais. A partir das amostras, este método permite inferir intervalos de confiança de valores, limitados por parâmetros mínimos e máximos, que descrevem a estimativa de um parâmetro não conhecido.

No uso da análise inferencial para a testagem de hipóteses, deve-se começar a análise pela descrição das hipóteses estatísticas nula e alternativa. A hipótese nula, denotada por H_0 , considera que não existe relação entre os grupos ou entre as variáveis estudadas. Por outro lado, a hipótese alternativa, denotada por H_1 , considera que existe relação entre os fenômenos estudados, ou, ainda, que existem diferenças entre os grupos ou entre as variáveis analisadas. Segundo Calegare (2009), as hipóteses estatísticas, em linhas gerais, podem ser descritas como segue:

- Hipótese Nula (H_0): uma afirmação em que não se espera qualquer diferença ou efeito. Se a hipótese nula não for rejeitada, não se fará modificação alguma.
- Hipótese Alternativa (H_1): uma afirmação de que se espera alguma diferença ou efeito. A aceitação da hipótese alternativa conduz à modificação de opiniões ou de atitudes.

De acordo com Moore (2006), para a tomada de decisão em favor de H_0 ou de H_1 é necessário comparar dois termos: o nível de significância ou probabilidade a priori (α) e o grau de significação ou probabilidade a posteriori (p-valor ou simplesmente p). Ressalte-se que tal probabilidade é definida pelo pesquisador antes de realizar os estudos. O nível de significância tipicamente utilizado no contexto da engenharia é $\alpha = 0,05$ ou 5 %. Para a presente pesquisa será utilizado o nível $\alpha = 0,05$. Por sua vez, o grau de significação ou nível descritivo do teste, descreve a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação ao valor observado quando a hipótese H_0 é verdadeira. Normalmente interpreta-se que um p-valor pequeno significa que a probabilidade de se obter um valor da estatística de teste como o observado é muito improvável, o que leva à não aceitação da hipótese nula H_0 . Segundo Brunii (2009), a conclusão em favor de H_0 ou H_1 deve ser feita com o comparativo entre a probabilidade a priori (α) e a probabilidade a posteriori (p-valor), conforme segue:

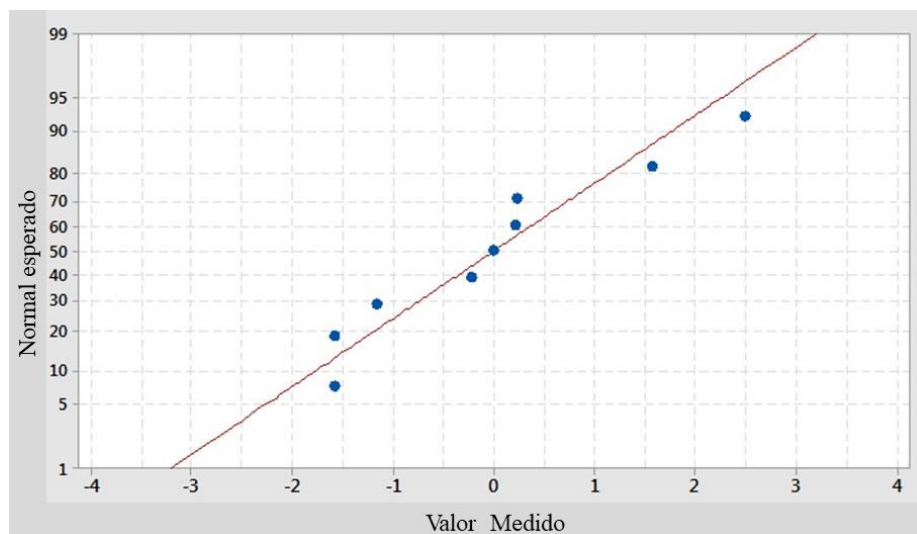
- $p\text{-valor} \geq \alpha$ – deve-se aceitar H_0 , ou seja, a diferença não é estatisticamente significativa.
- $p\text{-valor} < \alpha$ – deve-se aceitar H_1 , ou seja, a diferença é estatisticamente significativa.

Portanto, a decisão final do teste de hipóteses sempre consiste em rejeitar ou em não rejeitar a hipótese nula (H_0), de acordo com o nível de significância definido a priori e com o valor de p mensurado na análise. Em síntese, se H_0 é rejeitado, H_1 será aceita como verdadeira, ou seja, estará sendo admitida que a diferença neste caso é estatisticamente significativa; por outro lado, se H_0 não for rejeitada, estará sendo admitida que a diferença não é estatisticamente significativa.

4.7.2 Testes de normalidade e análise de correlação

Com o objetivo de entender qual o melhor método de correlação para as variáveis apresentadas, foi realizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, adotando o coeficiente $\alpha = 5\%$ como nível de significância. É importante ressaltar que, de acordo com Calegare (2009), o resultado encontrado com os testes de normalidade se dá na forma gráfica de probabilidade normal, com alguns dados estatísticos, em que cada ponto no eixo horizontal é um valor medido e, no eixo vertical, é a probabilidade acumulada, conforme exemplificado na Figura 4.30.

Figura 4.30 – Exemplo de gráfico de probabilidade normal



Fonte: Adaptado de Calegare (2009)

A finalidade deste teste é o de descrever se a transformação se mantém de maneira acumulada em uma reta. O intuito básico do método é o de que uma transformação seja aplicada no eixo vertical do gráfico da distribuição acumulada. Assim, se a distribuição dos dados é normal, a transformação converte a distribuição acumulada em uma reta. De outra parte, se for muito diferente da reta, provavelmente os dados não seguem uma distribuição normal. Com outras palavras, quanto mais próximos da reta estiverem os pontos, maior é a chance de a variável seguir uma distribuição normal. Do contrário, os dados não seguem uma distribuição normal. Desta maneira, com base na teoria dos testes de hipóteses, são geradas duas hipóteses:

- Hipótese Nula: os dados seguem uma distribuição normal.
- Hipótese Alternativa: os dados não seguem uma distribuição normal.

Segundo Field (2009), de maneira geral os coeficientes de correlação são espécies de indicadores, utilizados para mensurar o grau de relacionamento, ou, por outra, o quão forte é a associação entre as variáveis estudadas e o que elas significam. Assim sendo, existem dois métodos aplicáveis, o Coeficiente de Spearman e o Coeficiente de Correlação de Pearson, ambos com variação entre -1 e 1 (ou, -100 % à 100 %). Para o Coeficiente de Pearson, é necessária a normalidade dos dados, enquanto para o Coeficiente de Spearman tal premissa não é necessária.

Para a descrição da força de associação entre as variáveis foi utilizada a classificação conforme Anderson (2003) e os parâmetros estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Parâmetros para análise do coeficiente de Pearson.

Resultados	Coeficiente de Pearson
[0,90; 1]	Muito forte
[0,70; 0,89]	Forte
[0,40; 0,699]	Moderada
[0,20; 0,399]	Fraca
[0 a 0,199]	Muito fraca

Fonte: Adaptado de Anderson (2003).

Dessa forma, para que a correlação obtida seja muito forte entre variáveis é necessário que o coeficiente de correlação entre elas assuma o valor entre 0,9 e 1. Ressalta-se que o cálculo do coeficiente de correlação linear foi realizado com recurso aos *softwares* SPSS 21.0® e

Statistica 13.5[®], com os quais foram determinadas as correlações entre todas as variáveis disponíveis no presente estudo.

A busca pela confiabilidade dos resultados dos coeficientes tornou necessária a testagem de significância da correlação estabelecida. Segundo Moore (2006), este teste é fundamental para se entender se os dados amostrais utilizados são suficientes para realizar inferências. Utilizando-se $\alpha = 0,05$ ou 5 %, e através da análise dos mesmos, pôde-se aceitar ou rejeitar as hipóteses relacionadas aos testes da correlação. Logo, o teste de hipótese da correlação foi pautado por hipóteses estatísticas configuradas como:

- Hipótese Nula: ($r = 0$), considera que o coeficiente de correlação obtido não é estatisticamente significativo.
- Hipótese Alternativa: ($r \neq 0$), considera que o coeficiente de correlação obtido é estatisticamente significativo.

4.7.3 Análise de Variância (ANOVA)

Segundo Oliveira (2007), ANOVA é um tipo de teste de hipóteses por comparação de três ou mais médias, que serve para se analisar se existe diferença significativa entre grupos para uma variável quantitativa de interesse, ou para determinar se as médias de três ou mais populações são iguais. Com outras palavras, a ANOVA pode ser compreendida como um conjunto de técnicas estatísticas úteis para a verificação de “fatores” que produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse - variável quantitativa. Além disso, a testagem se alicerça em uma amostra extraída de cada população, isto é, ela permite caracterizar se as médias de três ou mais populações são iguais - método comparativo entre três ou mais valores médios.

É importante destacar que, no contexto da ANOVA, quando se toma a decisão em favor de H1, ou seja, em favor da diferença, é possível utilizar testes auxiliares para descrever onde se encontram as diferenças entre os aos pares. Dentre os métodos, destacam-se os Bonferroni, Tcheffé, LSD, Tukey e Duncan. Para o propósito desta pesquisa sobre grupos de amostras de quartzitos será utilizado o teste de Bonferroni, para a verificação do grau de significância das diferenças entre aos grupos.

4.7.4 Análise Discriminante

Segundo Calegare (2009), a Análise Discriminante é uma técnica de abordagem multivariada, que serve para classificar elementos de uma amostra ou população de modo a indicar, nos grupos, os objetos com maior poder de discriminação. Sua aplicação, portanto, exige que os grupos para os quais cada elemento pode ser segmentado sejam preestabelecidos, possibilitando desta maneira a elaboração de uma função matemática, conhecida por função discriminante. De acordo com Morettin (2017), o intuito principal da análise discriminante é inferir a relação entre uma variável dependente qualitativa, categórica ou não-métrica, e um conjunto de variáveis quantitativas, métricas. Assim, na descrição das variáveis mais importantes para a construção da função discriminante é necessário selecionar alguma forma de procedimento sequencial, principalmente quando se tem uma grande quantidade de variáveis. Entre tais procedimentos, são destacados os métodos de seleção *forward*, *backward* e *stepwise*. Neste último, que consiste em uma combinação dos procedimentos *forward* e *backward*, as variáveis são inseridas no modelo uma a uma, de acordo com o valor de F parcial de entrada em cada estágio. Para este estudo foi selecionado o método *stepwise*, por ser suportado pela maioria dos *softwares* estatísticos, tais como os *softwares* SPSS 21.0[®] e Statistica 13.5[®].

Segundo Calegare (2009), a abordagem discriminante pode ser vista sumariamente como uma técnica estatística capaz de classificar fenômenos levando-se em consideração uma série de variáveis discriminantes e uma probabilidade, ou chance, de pertencimento. Assim, trata-se de uma tipologia de método estatístico que busca, a partir de algumas semelhanças, estabelecer a formação de grupos. Dessa forma, é possível quantificar a probabilidade de pertencimento a um ou outro grupo.

Com estes métodos de análise foi possível interpretar os valores e responder à hipótese de saber se das amostras de quartzitos de Alpinópolis e de São Thomé das Letras são semelhantes ou não para uso como agregado na produção de CPRs. Tais resultados subsidiaram os estudos realizados na Etapa 2.

4.8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões dos estudos tecnológicos dos CPRs são apresentados nesta seção em duas etapas, a saber:

- **Etapa 1:** Estudos das propriedades mecânicas e elásticas dos CPRs, incluindo a análise estatística de variância, a análise discriminante multivariada e a análise de correlação dos resultados;
- **Etapa 2:** Estudos das propriedades mecânicas e elásticas dos CPRs e a análise de correlação dos resultados.

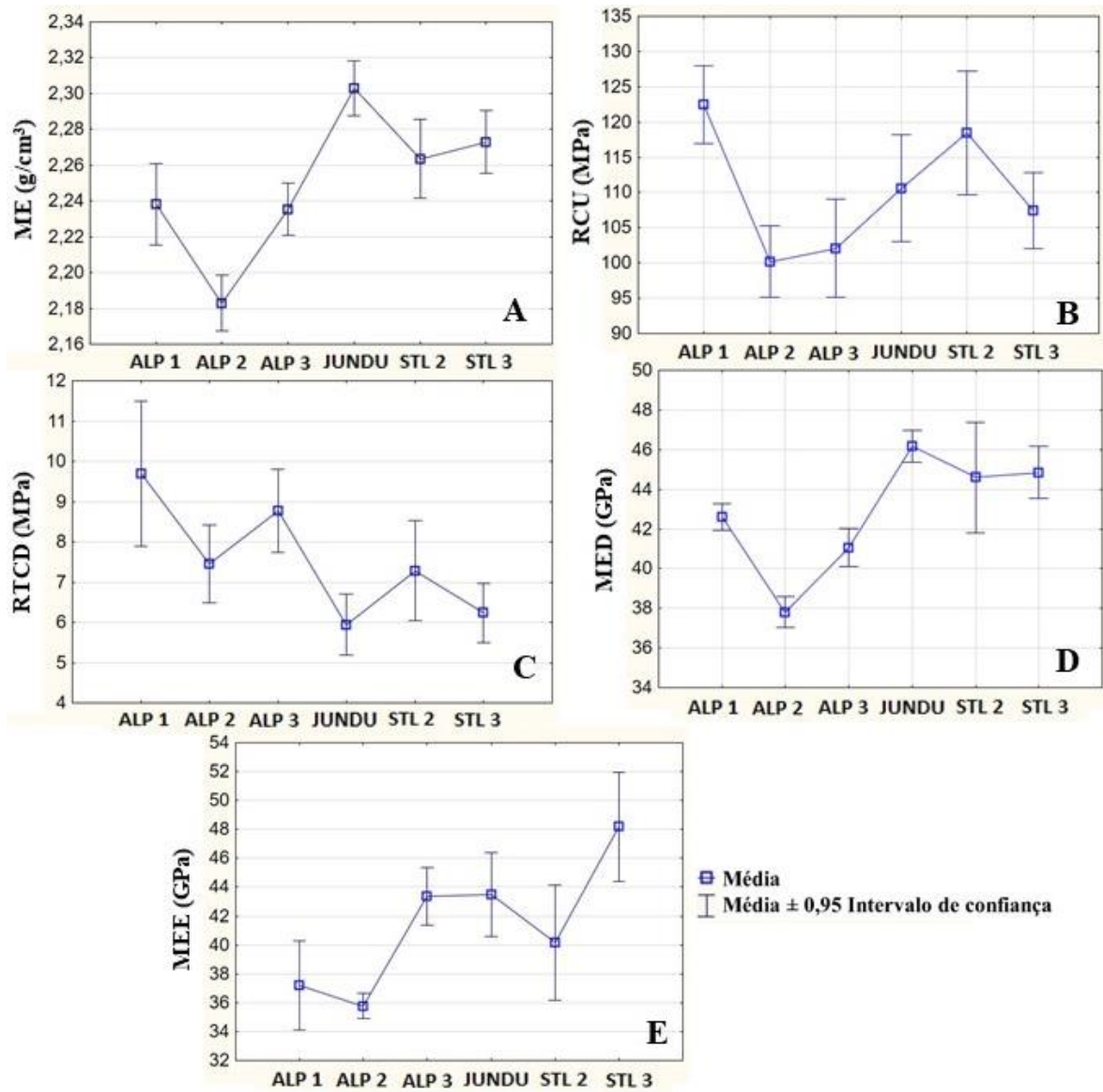
As análises estatísticas realizadas na Etapa 1 foram necessárias para subsidiar a realização dos estudos na Etapa 2.

4.8.1 Estudos realizados na Etapa 1

Na Etapa 1, os concretos foram produzidos no LMCC da UEMG de Passos-MG e, após o processo de cura, foram encaminhados ao Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, para realização dos ensaios tecnológicos. Com os resultados obtidos nesta etapa, foram realizadas a análise estatística de variância, a análise estatística discriminante multivariada e as análises de correlações. O objetivo das análises estatísticas foi o de verificar se existem discriminações significativas entre as amostras de CPRs produzidos com os diferentes tipos de quartzitos.

Na Figura 4.31 apresenta os resultados médios de massa específica - ME (A), de resistência a compressão uniaxial - RCU (B), de resistência à tração por compressão diametral - RTCD (C), do módulo de elasticidade dinâmico - MED (D) e do módulo de elasticidade estático - MEE (E), correspondentes aos corpos de prova de CPRs, considerando o intervalo de confiança de 0,95.

Figura 4.31– Médias dos resultados de massa específica (A), resistência a compressão (B), resistência à tração (C), módulo de elasticidade dinâmico (D) e módulo de elasticidade estático (E).



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME: Massa específica no estado endurecido; RCU: Resistência à compressão uniaxial; RTCD: Resistência à tração por compressão diametral; MED: Módulo de elasticidade dinâmico; MEE: Módulo de elasticidade estático.

Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados das médias, dos desvios padrão, dos coeficientes de variação, dos mínimos e dos máximos correspondentes as amostras analisadas de CPRs.

Tabela 4.10 - Resultados das médias, dos desvios padrão, dos coeficientes de variação, dos mínimos e dos máximos correspondentes as amostras analisadas de CPRs.

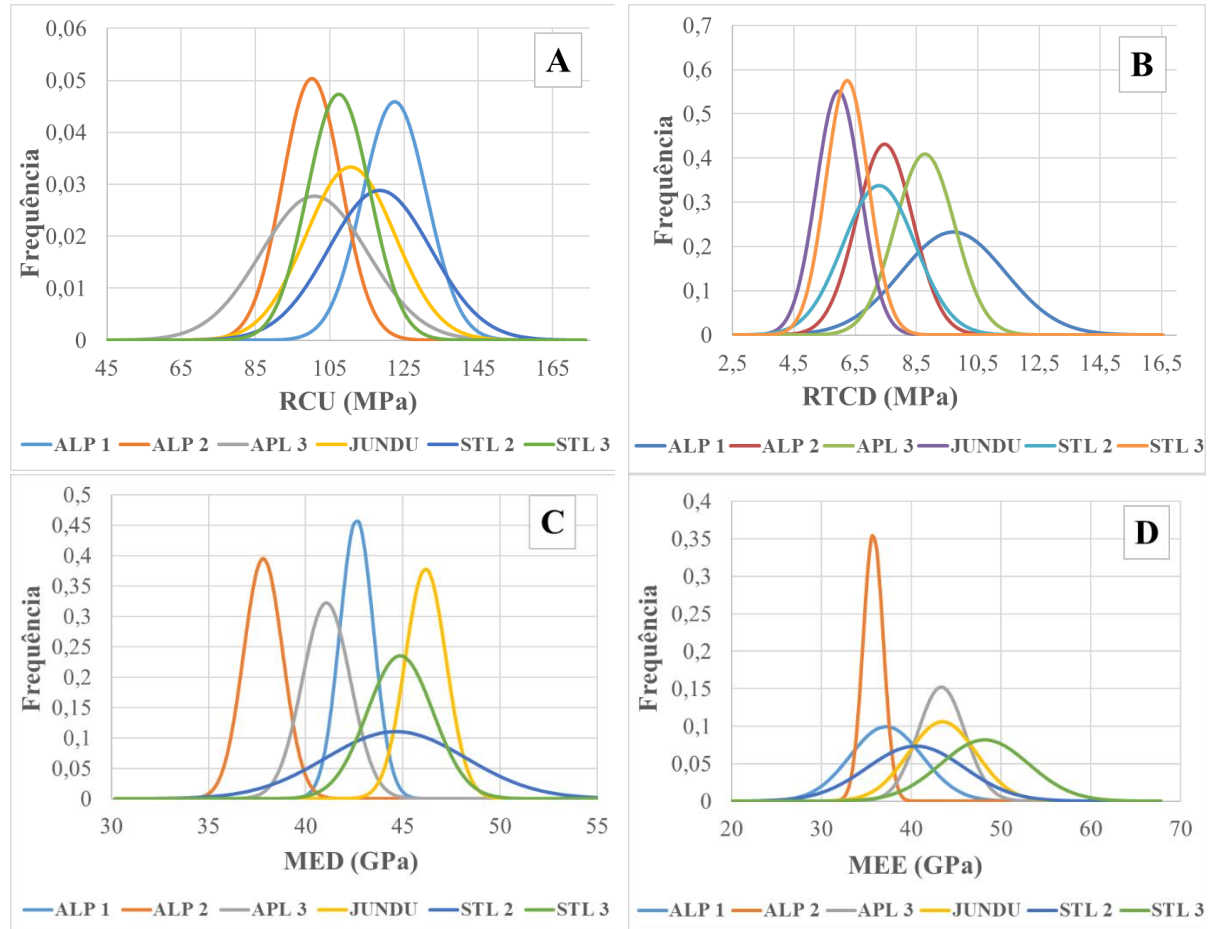
Propriedade	Amostra	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Resultado Máximo	Resultado Mínimo
ME (g/cm ³)	ALP 1	2,238	0,04	1,60 %	2,323	2,181
	ALP 2	2,183	0,02	1,10 %	2,222	2,130
	ALP 3	2,235	0,02	1,00 %	2,276	2,207
	JUNDÚ	2,303	0,02	1,00 %	2,344	2,275
	STL 2	2,264	0,03	1,50 %	2,315	2,216
	STL 3	2,273	0,03	1,20 %	2,321	2,235
RCU (MPa)	ALP 1	122,5	8,7	7,10 %	136,4	108,1
	ALP 2	100,2	7,9	7,90 %	110,7	84,6
	ALP 3	100,9	14,4	14,30 %	117,1	60,8
	JUNDÚ	110,6	12,0	10,80 %	122,6	83,8
	STL 2	118,5	13,9	11,70 %	143,6	101,3
	STL 3	107,4	8,4	7,80 %	116,0	85,2
RTCD (MPa)	ALP 1	9,69	1,71	17,60 %	12,09	7,90
	ALP 2	7,45	0,92	12,40 %	8,90	6,27
	ALP 3	8,77	0,98	11,10 %	9,87	7,44
	JUNDÚ	5,95	0,72	12,20 %	6,96	5,07
	STL 2	7,28	1,18	16,20 %	8,78	6,03
	STL 3	6,23	0,69	11,10 %	7,02	5,49
MED (GPa)	ALP 1	42,6	0,87	2,00 %	44,7	42,0
	ALP 2	37,8	1,01	2,70 %	39,9	36,4
	ALP 3	41,1	1,24	3,00 %	43,0	39,2
	JUNDÚ	46,2	1,06	2,30 %	48,4	45,1
	STL 2	44,6	3,61	8,10 %	50,2	40,1
	STL 3	44,8	1,69	3,80 %	48,1	42,5
MEE (GPa)	ALP 1	37,2	4,01	10,80 %	43,7	32,6
	ALP 2	35,8	1,12	3,10 %	37,5	34,0
	ALP 3	43,4	2,62	6,00 %	47,8	41,0
	JUNDÚ	43,5	3,77	8,70 %	47,4	35,7
	STL 2	40,5	5,42	13,40 %	47,8	33,9
	STL 3	48,2	4,90	10,20 %	55,0	41,3

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME: Massa específica no estado endurecido; RCU: Resistência à compressão uniaxial; RTCD: Resistência à tração por compressão diametral; MED: Módulo de elasticidade dinâmico; MEE: Módulo de elasticidade estático.

Na Figura 4.32 são apresentadas as distribuições normais, referentes aos ensaios de RCU (A), RTCD (B), MED (C) e MEE (D), das amostras de CPRs estudadas. Os testes de normalidade foram realizados com auxílio do *software* SPSS 21.0[®], com recurso ao método Kolmogorov-Smirnova. Os resultados são apresentados no Apêndice B.

Figura 4.32 - Distribuições normais referentes aos ensaios de resistência à compressão (A), resistência à tração (B), módulo de elasticidade dinâmico (C) e módulo de elasticidade estático (D), das amostras de CPR's.



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: RCU: Resistência à compressão uniaxial; RTCD: Resistência à tração por compressão diametral; MED: Módulo de elasticidade dinâmico; MEE: Módulo de elasticidade estático.

Como pode ser observado, a amostra que obteve maior média de massa específica foi a JUNDÚ, com $2,303 \text{ g/cm}^3$, e a amostra com menor média de massa específica foi a ALP 2, com $2,183 \text{ g/cm}^3$. A diferença obtida na amostra ALP 2 pode ser atribuída a um eventual aumento da porosidade interna dos CPRs, visto que houve uma alteração significativa do traço pela falta da fração miúda de quartzitos, o que se refletiu em um perfil de empacotamento de partículas inferior em comparação com as demais amostras.

Em relação à resistência à compressão, a amostra ALP 1 obteve a maior média, de 122,5 MPa, e a amostra ALP 3 apresentou o maior desvio padrão, de 14,4 MPa. A amostra ALP 2, mesmo apresentando maior consumo de cimento em relação às demais amostras, 986 kg/m³, apresentou menor média de resistência à compressão, pois a ausência de frações de quartzitos se refletiu em um menor índice de empacotamento dos grãos. Por outro lado, a amostra ALP 1, mesmo obtendo o menor consumo de cimento, 818 kg/m³, apresentou maior resistência à compressão, por ter obtido um melhor empacotamento das partículas.

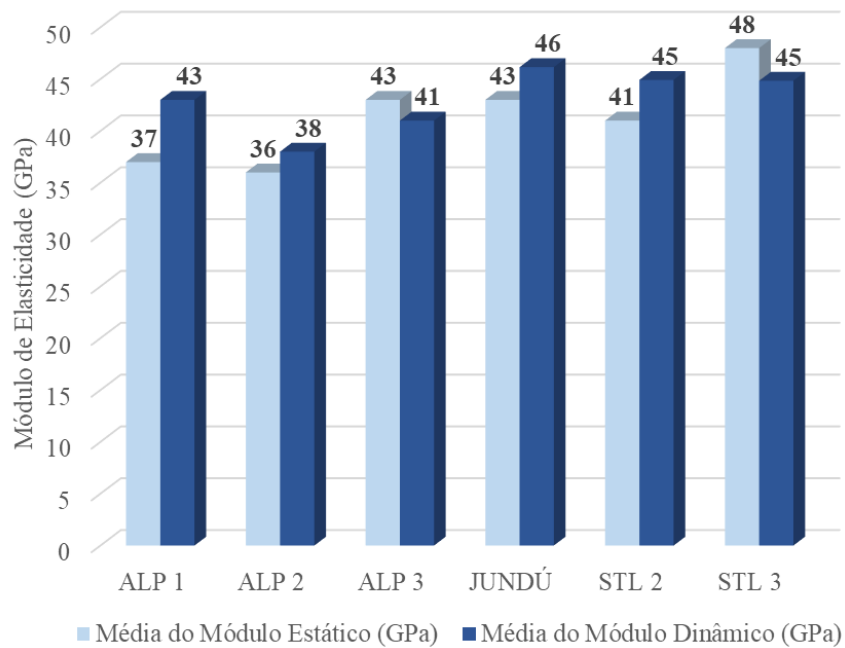
Dentre os resultados apresentados na Figura 4.32 C, destacam-se os valores obtidos pela amostra ALP 1, que obteve a maior média de resistência à tração, 9,69 MPa, e o maior desvio padrão entre os resultados, 1,71 MPa, que se refletiu em um coeficiente de variação de 17,6 %. É importante destacar que em todas as amostras de CPRs aqui consideradas foram incorporadas fibras de vidro picotadas, para melhorar as propriedades mecânicas à tração.

Em se tratando do módulo de elasticidade dinâmico, novamente destacou-se a amostra ALP2, que apresentou o menor valor entre as amostras analisadas, resultado que pode ser associado a eventuais dificuldades de empacotamento das partículas. Outra amostra que merece destaque é a STL 2, que apresentou desvio padrão significativo de 3,11 GPa, quando comparada com as demais amostras.

Dentre os resultados apresentados de módulo de elasticidade estático, destacou-se a amostra STL 3, que obteve a maior média, com 48,2 GPa. Das amostras ALP 1, STL 2 e STL 3 resultaram os maiores coeficientes de variação entre todas as analisadas.

Também foi observado que os resultados médios gerais de módulo de elasticidade estático e de módulo de elasticidade dinâmico ficaram, de maneira geral, relativamente próximos, como pode ser observado na Figura 4.33.

Figura 4.33 – Comparação entre as médias dos resultados de módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: O Autor (2022)

Esta pesquisa tornou perceptível a confiabilidade no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por ressonância acústica. Com excessão da amostra ALP 1, que obteve uma diferença média de 6 GPa, os demais resultados ficaram relativamente próximos e com médias entre as amostras consideradas satisfatórias se comparadas com as pesquisas com resultados semelhantes realizadas por Russell e Graybeal (2013), Delplace (2012) e Vanderlei (2004).

Na Tabela 4.11 são apresentados, em ordem decrescente, os resumos das médias dos resultados das propriedades físico-mecânicas analisadas nas amostras de CPRs correspondentes à Etapa 1.

Tabela 4.11 - Resumo das médias dos resultados obtidos nos CPRs correspondentes à Etapa 1, apresentados em ordem decrescente.

ME (g/cm ³)		RCU (MPa)		RTCD (MPa)		MED (GPa)		MEE (GPa)	
JUNDÚ	2,303	ALP 1	122,5	ALP 1	9,69	JUNDÚ	46,2	STL 3	48,2
STL 3	2,273	STL 2	118,5	ALP 3	8,77	STL 3	44,8	JUNDÚ	43,5
STL 2	2,264	JUNDÚ	110,9	ALP 2	7,45	STL 2	44,6	ALP 3	43,4
ALP 1	2,238	STL 3	107,4	STL 2	7,28	ALP 1	42,6	STL 2	40,5
ALP 3	2,235	ALP 3	100,9	STL 3	6,23	ALP 3	41,1	ALP 1	37,2
ALP 2	2,183	ALP 2	100,2	JUNDÚ	5,95	ALP 2	37,8	ALP 2	35,8

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME: Massa específica no estado endurecido; RCU: Resistência à compressão uniaxial; RTCD: Resistência à tração por compressão diametral; MED: Módulo de elasticidade dinâmico; MEE: Módulo de elasticidade estático.

Como pode ser observado, a ALP 2 obteve as menores médias de resultados entre as amostras analisadas na Etapa 1, exceto no ensaio de resistência à tração, em que a amostra JUNDÚ obteve a menor média. As menores médias obtidas na amostra ALP 2 são atribuídas à constituição do traço, que ficou diferente das demais amostras, refletindo-se em um menor índice de empacotamento das partículas, um maior índice de porosidade interna e, conseqüentemente, alterando negativamente suas propriedades físico-mecânicas.

4.8.1.1 Análise estatística de variância (ANOVA) - Etapa 1.

Com auxílio do *software* SPSS 21.0[®], foi realizada uma ANOVA em que se considerou somente as amostras de CPRs que resultaram em propriedades físico-mecânicas semelhantes, produzidas com agregados dos quartzitos ALP1, ALP3, STL2 e STL3. Portanto, a amostra ALP2, por ter sido produzida com traço distinto das demais amostras, e a amostra JUNDÚ, por ser constituída de arenito, não foram consideradas nesta análise.

Para a realização da análise foram consideradas as seguintes hipóteses:

- H0: não existe diferença entre os valores obtidos das propriedades físico-mecânicas para com as quatro amostras.
- H1: existe diferença entre os valores obtidos das propriedades físico-mecânicas para com as quatro amostras.

Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados de ANOVA realizados nas quatro amostras dos quartzitos ALP1, ALP3, STL2 e STL3, considerando as variáveis: massa específica no estado endurecido (ME); resistência à compressão uniaxial (RCU); resistência à tração por compressão diametral (RTCD); módulo de elasticidade dinâmico (MED); e módulo de elasticidade estático (MEE).

Tabela 4.12 – Resultado da análise estatística de variância considerando os resultados das propriedades físico-mecânicas das amostras ALP 1, ALP 3, STL 2 e STL 3 – 1ª Etapa.

Propriedades analisadas		Soma dos quadrados	df	F	p-valor
ME	Entre grupos	0,006	3	2,316	0,107
	Nos grupos	0,018	20		
	Total	0,024	23		
RCU	Entre grupos	1290,535	3	4,644	0,013
	Nos grupos	1852,443	20		
	Total	3142,978	23		
RTCD	Entre grupos	42,677	3	9,890	0,000
	Nos grupos	28,769	20		
	Total	71,446	23		
MED	Entre grupos	47,561	3	3,035	0,053
	Nos grupos	104,468	20		
	Total	152,030	23		
MEE	Entre grupos	378,275	3	5,722	0,005
	Nos grupos	440,735	20		
	Total	819,010	23		

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral; MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático; df = graus de liberdade; F = razão das variâncias (média entre grupos/nos grupos); p-valor = probabilidade a posteriori.

Considerando os grupos de amostras analisados, ALP 1, ALP 3, STL 2 e STL 3, foi constatado que o p-valor, para as variáveis módulo de elasticidade dinâmico e massa específica, resultaram em 5,3 % e 10,7 %, respectivamente. Portanto, $p\text{-valor} > \alpha = 5 \%$, sendo aceita a hipótese nula H_0 , demonstrando que não existem diferenças significativas entre os valores das propriedades analisadas dos CPRs.

Por outro lado, as variáveis resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e resistência à tração resultaram em p-valor de 1,3 %, 0,5 % e 0,0 %, respectivamente, sendo $p\text{-valor} < \alpha = 5 \%$. Desta forma, foi rejeitada a hipótese nula H_0 , pois existem diferenças significativas entre os resultados das três variáveis analisadas.

O método de Bonferroni, com o uso de comparações múltiplas entre os pares das amostras, foi empregado para demonstrar onde ocorrem as diferenças significativas nas variáveis RCU, MEE e de RTCD das quatro amostras de quartzitos analisadas, conforme apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados das comparações múltiplas de resistência à compressão das amostras de quartzitos utilizando o método Bonferroni.

Amostras comparadas	RCU			MEE			RTCD			
	Diferença média	p-valor	Conclusão das diferenças	Diferença média	p-valor	Conclusão das diferenças	Diferença média	p-valor	Conclusão das diferenças	
ALP1	ALP3	16,57500*	0,044	existe diferença	-6,76667	,128	não existe diferença	0,92167	1,000	não existe diferença
	STL2	-0,30167	1,000	não existe diferença	-3,43333	1,000	não existe diferença	2,41667*	0,014	existe diferença
	STL3	11,59333	0,300	não existe diferença	-10,7167*	,005	existe diferença	3,46167*	0,000	existe diferença
ALP3	ALP1	-16,57500*	0,044	existe diferença	6,76667	,128	não existe diferença	-0,92167	1,000	não existe diferença
	STL2	-16,87667*	0,039	existe diferença	3,33333	1,000	não existe diferença	1,49500	0,259	não existe diferença
	STL3	-4,98167	1,000	não existe diferença	-3,95000	,963	não existe diferença	2,54000*	0,009	existe diferença
STL2	ALP1	0,30167	1,000	não existe diferença	3,43333	1,000	não existe diferença	-2,41667*	0,014	existe diferença
	ALP3	16,87667*	0,039	existe diferença	-3,33333	1,000	não existe diferença	-1,49500	0,259	não existe diferença
	STL3	11,89500	0,269	não existe diferença	-7,28333	,085	não existe diferença	1,04500	0,881	não existe diferença
STL3	ALP1	-11,59333	0,300	não existe diferença	10,7167*	,005	existe diferença	-3,46167*	0,000	existe diferença
	ALP3	4,98167	1,000	não existe diferença	3,95000	,963	não existe diferença	-2,54000*	0,009	existe diferença
	STL2	-11,89500	0,269	não existe diferença	7,28333	,085	não existe diferença	-1,04500	0,881	não existe diferença

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: Células com texto na cor vermelha = existe diferença; Células com texto na cor preta = não existe diferença; RCU = Resistência à compressão uniaxial; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral; MEE = Módulo de elasticidade estático.

As diferenças de resistência à compressão consideradas significativas, apresentadas na Tabela 4.4, foram atribuídas somente em duas das combinações, ALP 1 com ALP 3 e ALP 3 com STL 2. Em todas as outras quatro combinações os resultados demonstraram que não existem diferenças significativas entre as amostras analisadas.

Embora as duas combinações tenham demonstrado diferenças no nível 0,05, é importante ponderar que tais diferenças não devem ser consideradas de grande relevância, pois há variáveis que interferem nas propriedades mecânicas dos concretos, tais como o adensamento e o processo de cura dos corpos de prova, por exemplo. Algumas amostras apresentaram coeficientes de variação superiores a 10 %, demonstrando que é perfeitamente possível reduzir em laboratório a variabilidade entre os resultados dos CPRs, por meio de ações corretivas nos procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova.

Em relação ao módulo de elasticidade estático, não se verificou diferenças significativas para a maioria das combinações realizadas. Somente a combinação ALP 1 com STL 3 apresentou diferenças entre as amostras analisadas. Por outro lado, considerando a resistência à tração por compressão diametral, as diferenças foram significativas para a metade das combinações realizadas. Destaque-se, também, que em todas as amostras foram incorporadas fibras de vidro picotadas e que a ação delas prevaleceu no comportamento mecânico à tração dos CPRs.

Em linhas gerais, as análises de variância realizadas nas amostras de CPRs demonstraram que, na maioria das combinações realizadas entre as amostras, não houve diferenças significativas. Portanto, é plausível considerar que os quartzitos oriundos de diferentes lavras das regiões de São Thomé das Letras e de Alpinópolis podem ser considerados como de iguais propriedades para o uso como agregado na produção de CPRs. Vale ressaltar, também, que mesmo dentro da mesma localidade, por exemplo a ALP, a estatística demonstrou diferenças nos resultados, o que reforça que estas diferenças podem estar ligadas à preparação da amostra e não necessariamente à composição do quartzito.

4.8.1.2 Correlações entre as propriedades físico-mecânicas dos CPRs – Etapa 1

Na Tabela 4.14 são apresentadas as correlações obtidas entre todas as amostras de CPRs produzidos com quartzitos, considerando-se as propriedades físico-mecânicas como as variáveis independentes.

Tabela 4.14 - Resumo das correlações obtidas entre os CPRs produzidos com quartzitos – Etapa 1.

	RCU	ME	MED	MEE	RTCD
RCU	---	$R^2=0,328$	$R^2=0,6952$	$R^2 = 0,1218$	$R^2 =0,1949$
	---	$p=,010$	$p=,000$	$p=,521$	$p=,302$
ME	$R^2=0,328$	---	$R^2=0,913$	$R^2=0,5533$	$R^2 =-0,2027$
	$p=,010$	---	$p=,000$	$p=,002$	$p=,283$
MED	$R^2=0,6952$	$R^2=0,913$	---	$R^2=0,5254$	$R^2 =-0,0946$
	$p=,000$	$p=,000$	---	$p=,003$	$p=,619$
MEE	$R^2 =0,1218$	$R^2 =0,5533$	$R^2 =0,5254$	---	$R^2 =-0,2764$
	$p=,521$	$p=,002$	$p=,003$	---	$p=,139$
RTCD	$R^2 =0,1949$	$R^2 =-0,2027$	$R^2 =-0,0946$	$R^2 =-0,2764$	---
	$p=,302$	$p=,283$	$p=,619$	$p=,139$	---

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: R = coeficiente de correlação Pearson; p = (p-valor) = probabilidade a posteriori; Células hachuradas = forte correlação entre as propriedades analisadas; ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral; MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático.

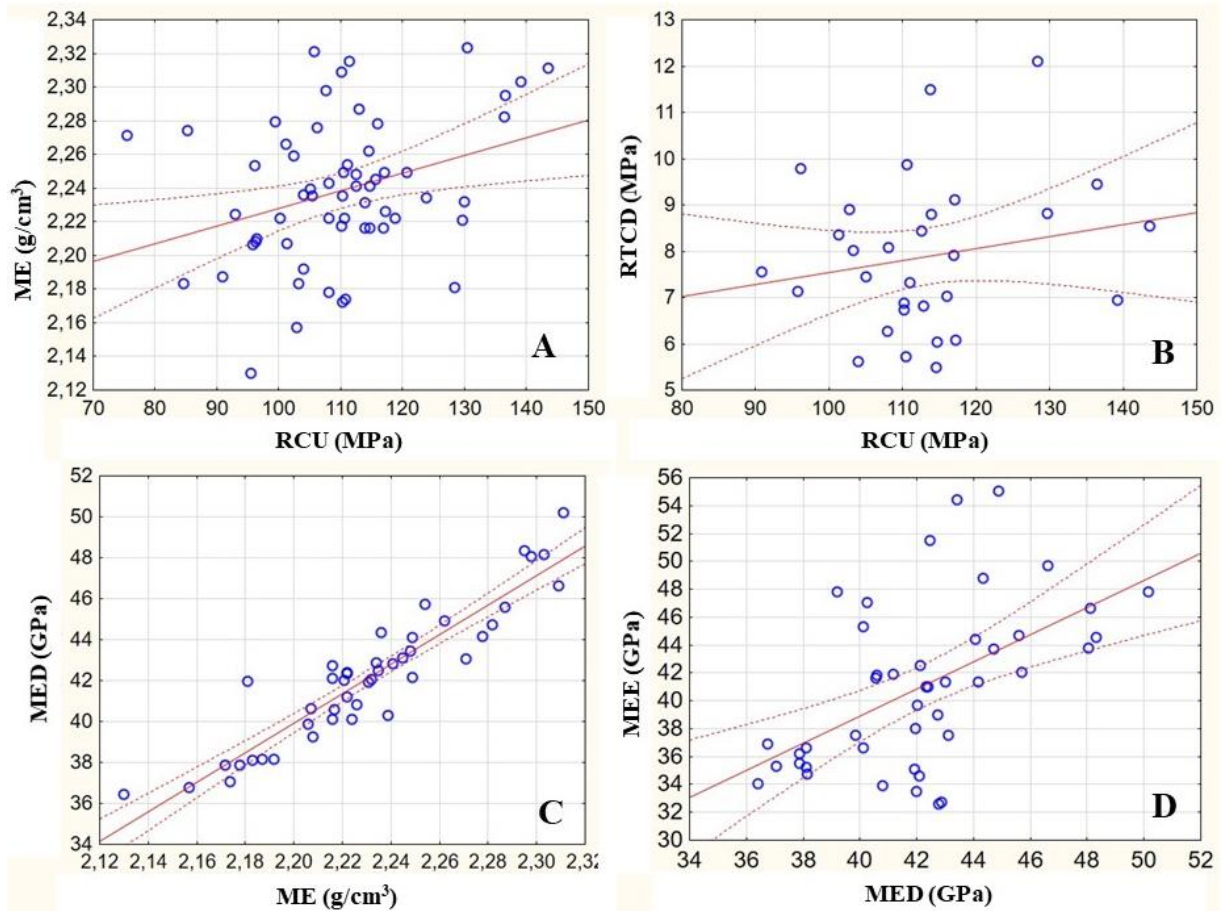
As correlações no nível 0,05 (p-valor < 0,05) estão destacadas na Tabela 4.14. Observa-se que existe uma forte correlação entre as variáveis analisadas, com exceção da resistência à tração, que obteve uma fraca correlação com as demais propriedades.

Na seção subsequente são apresentadas as correlações consideradas mais relevantes, que merecem ser discutidas e analisadas nesta pesquisa. As análises foram realizadas com auxílio do *software* Statistica 13.5[®], utilizando-se somente amostras de quartzitos e considerando-se as seguintes hipóteses:

- H0: o coeficiente de correlação obtido não é estatisticamente significativo.
- H1: o coeficiente de correlação obtido é estatisticamente significativo.

Na Figura 4.34 são apresentados os resultados das correlações referentes às propriedades de ME X RCU (A), de RTCD X RCU (B), de ME X MED (C) e de MED X MEE (D).

Figura 4.34 - Correlação entre algumas das propriedades de interesse dos corpos de prova de CPR.



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME: Massa específica no estado endurecido; RCU: Resistência à compressão uniaxial; RTCD: Resistência à tração por compressão diametral; MED: Módulo de elasticidade dinâmico; MEE: Módulo de elasticidade estático.

Considerando as grandezas de resistência à compressão e de massa específica, foi obtido um p-valor de 0,010 (1,0 %). Assim sendo, restou rejeitada a hipótese nula (H_0), pois $p\text{-valor} = 1,0\% < \alpha = 5\%$, considerando que o relacionamento linear entre as grandezas é significativo. Entretanto, a correlação não é muita alta devido ao resultado do coeficiente de correlação de Pearson, de 0,328.

Algumas dispersões, verificadas nas análises de correlação dos CPRs, são atribuídas, principalmente, ao arranjo cristalino da microestrutura do concreto, que interfere nas suas propriedades mecânicas. Isto porque as diferenças entre os resultados de massas específicas foram pouco significativas para a maioria das amostras analisadas.

Considerando a relação resistência à compressão e resistência à tração, foi obtido um p-valor de 0,302 (30,2 %). Assim, foi aceita a hipótese nula (H_0), pois $p\text{-valor} = 30,2\% > \alpha = 5\%$

%, uma vez que o relacionamento linear entre as grandezas não é estatisticamente significativo. Esta correlação é considerada fraca devido ao resultado do coeficiente de correlação de Pearson, de 0,1949.

É importante reiterar que foram utilizadas fibras de vidro picotadas em todas as amostras de CPRs. Desta forma, o teor e a orientação das fibras se refletem nas propriedades mecânicas do concreto, o que pode ter contribuído para a dispersão dos resultados, pois o consumo de fibras foi baixo, de apenas 0,18 % em volume. Tal hipótese é reforçada nas pesquisas realizadas por Li et al. (2019), Krahl et al. (2018), Ren et al. (2018) e Abbas et al. (2015).

Como pode ser observado na Figura 4.4 C, existe uma forte correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico do concreto e a massa específica no estado endurecido, em que o resultado do coeficiente de correlação de Pearson é de 0,91, obtido um p-valor de 0,000 (0 %). Assim sendo, é rejeitada a hipótese nula (H_0), pois $p\text{-valor} = 0\% < \alpha = 5\%$, considerando-se que o relacionamento linear entre as grandezas é significativo.

Foi possível perceber que a ressonância acústica provocada no corpo de prova por meio da excitação, utilizando martelo metálico, além de oferecer respostas confiáveis de propriedades elásticas, também pode contribuir indiretamente para a obtenção de resultados de massa específica do concreto no estado endurecido, devida a forte correlação obtida na análise.

Em relação às grandezas de módulo de elasticidade dinâmico e de módulo de elasticidade estático foi obtido um p-valor de 0,00 (0 %). Assim, restou rejeitada a hipótese nula (H_0), pois $p\text{-valor} = 0\% < \alpha = 5\%$, considerando-se que o relacionamento linear entre as grandezas é significativo. Entretanto, tal correlação é considerada moderada devido ao resultado do coeficiente de correlação de Pearson, de 0,54.

Os resultados das análises de correlação entre módulo dinâmico e módulo estático demonstraram certa confiabilidade. Entretanto, é importante ressaltar a necessidade de se realizar aprimoramentos no processo de trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, para possibilitar a eliminação de vazios indesejáveis e, conseqüentemente, se alcançar uma compacidade dos CPRs satisfatória, que possibilite finalmente a redução da dispersão dos resultados e a melhora da correlação entre as propriedades.

4.8.1.3 Análise discriminante – Etapa 1

Na Tabela 4.15 são apresentados os resultados da análise discriminante, realizada com o auxílio do *software* Statistica 13.5[®], em que foram obtidos os valores de Wilks Lambda, F e p-valor para as variáveis físico-mecânicas das amostras de CPRs ALP1, ALP3, JUNDÚ, STL2 e STL3.

Tabela 4.15 - Análise discriminante dos CPRs realizada na Etapa 1 considerando os grupos CPRs (ALP1, ALP3, JUNU, STL2 e STL3) utilizando o total de 30 observações.

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (4,36)	p-value
RCU	0,069737	0,731966	1,922468	0,144070
ME	0,061009	0,836680	1,024804	0,417464
MED	0,067505	0,756165	1,692931	0,189215
MEE	0,095340	0,535401	4,555728	0,008325
RTCD	0,102953	0,495810	5,338724	0,003979

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: Célula com cor de texto vermelha = houve discriminação; Célula com cor de texto preta = não houve discriminação; ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral; MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático.

Para a realização da análise foram consideradas as seguintes hipóteses:

- H0: não houve discriminação entre os grupos de CPRs considerando os resultados das propriedades físico-mecânicas analisadas;
- H1: houve discriminação entre os grupos de CPRs considerando os resultados das propriedades físico-mecânicas analisadas.

Em relação às variáveis de resistência à compressão, de massa específica e de módulo de elasticidade dinâmico, os resultados obtidos de “p-valor” foram superiores a 5 %. Portanto, é aceita a hipótese nula (H0), considerando-se que não houve discriminação estatisticamente significativa entre os grupos de CPRs. Por outro lado, as variáveis de módulo de elasticidade estático e de resistência à tração obtiveram resultados de p-valor inferiores a 5 %, de forma que foi rejeitada a hipótese nula (H0), considerando-se que houve discriminação estatisticamente significativa.

A variável que mais contribuiu para a separação dos grupos de CPRs foi a resistência à tração, pois obteve-se o menor valor de Partial Lambda = 0,495. Porém, é importante destacar que as fibras de vidro utilizadas nos CPRs exercem forte influência no comportamento mecânico à tração e, conseqüentemente, influencia dispersão entre os resultados.

4.8.1.4 Funções discriminantes ou canônicas

Em seguida, foram calculadas as funções canônicas ou discriminantes para os grupos de amostras de CPRs ALP1, ALP3, JUNDÚ, STL2 e STL3, considerando as variáveis independentes de ME, RCU, RTCD, MEE e MED, conforme apresentado na Tabela 4.16.

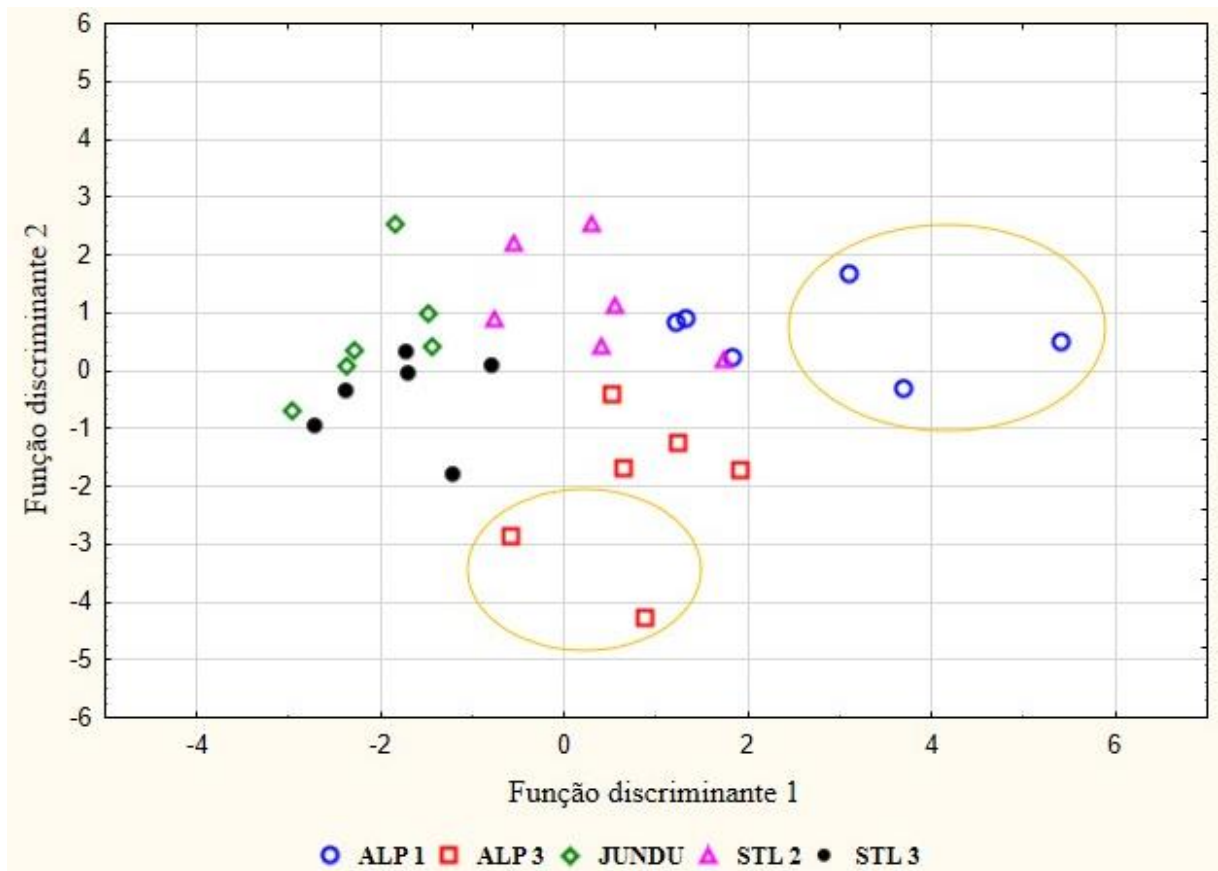
Tabela 4.16 - Funções discriminantes correspondentes aos grupos de amostras de CPRs.

Funções canônicas (discriminantes)	Funções removidas	Wilks'Lambda	p-value
1	0	0,063654	0,000001
2	1	0,303414	0,004479
3	2	0,789901	0,462293
4	3	0,982108	0,805214

Fonte: O Autor (2022)

Conforme se observa na Tabela 4.16, foram geradas 4 funções discriminantes. Neste sentido, é importante lembrar que cada função discriminante sucessiva contribui menos para o poder discriminatório geral. Ou seja, a primeira linha contém o teste de significância para todas as funções, a segunda linha descreve o significado das funções restantes, desconsiderando-se a anterior e assim sucessivamente. Portanto, neste caso, as duas primeiras funções discriminantes foram estatisticamente significativas, enquanto a terceira função, p-valor = 46,2 %, e a quarta função, p-valor = 80,5 %, indicaram que não há discriminação entre os grupos de variáveis. Para elucidar melhor essas interpretações, na Figura 4.35 e na Figura 4.36 são apresentados os resultados de dispersões das funções discriminantes 1 e 2.

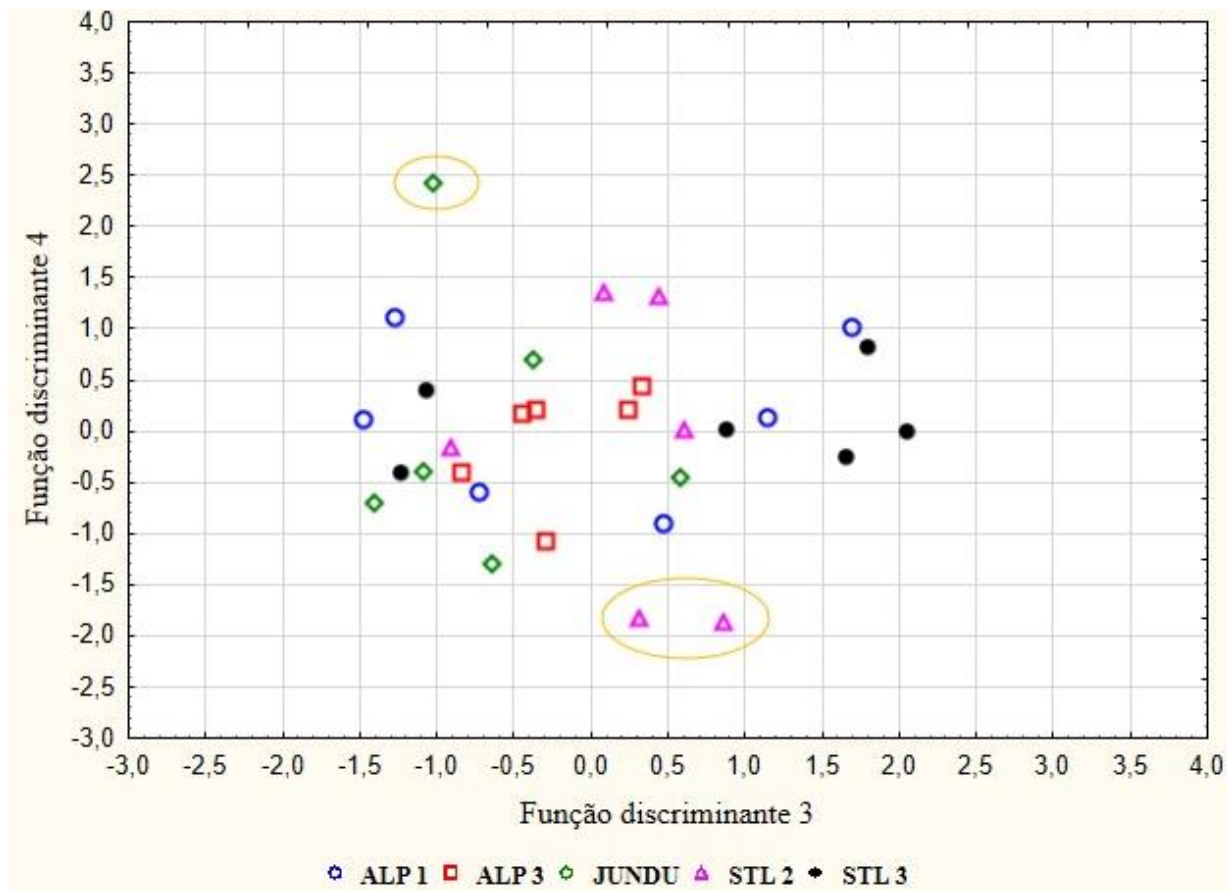
Figura 4.35 - Análise de dispersão dos resultados obtidos dos CPRs, considerando a função discriminante 1 e a função discriminante 2 – Etapa 1.



Fonte: O Autor (2022)

Considerando, na Figura 4.35, o grupo de valores plotados, somente três resultados, da ALP 1, ficaram separadas do grupo na perspectiva de observação da função discriminante 1, com dispersão entre -3,0 e 2,0. Já no campo de observação da função discriminante 2, somente dois resultados correspondentes à amostra ALP 3 ficaram separadas do grupo principal, com dispersão entre -2,0 e 3,0.

Figura 4.36 - Análise de dispersão dos resultados obtidos dos CPRs, considerando a função discriminante 3 e a função discriminante 4 – Etapa 1.



Fonte: O Autor (2022)

No campo de visão da função 3, todas as amostras estão de certa forma agrupadas com um intervalo de dispersão entre -1,5 e 2,0. Já na perspectiva de observação da função 4 foram verificados dois valores de STL 2 e um valor de JUNDU, que estão separados do grupo principal, cuja dispersão ficou entre -1,5 e 1,5. Assim, é possível constatar que existem grandes semelhanças entre as amostras analisadas de quartzitos e do arenito JUNDU para a utilização como agregado miúdo e pulverulento em CPRs.

A análise estatística discriminante multivariada realizada nesta seção permitiu constatar que não houve discriminação entre a maioria dos grupos de CPRs produzidos com quartzitos e areia industrializada JUNDU. Desta forma, considerou-se que os resíduos finos de quartzitos provenientes dos municípios de Alpinópolis e São Thomé das Letras são semelhantes para uso como agregado miúdo em concretos. Além das análises estatísticas que permitiram estas constatações, as composições mineralógicas dos rejeitos de quartzitos analisados também se mostraram muito semelhantes.

Diante do exposto, as constatações das semelhanças entre os rejeitos de quartzitos obtidas na Etapa 1, subsidiaram os estudos realizados na Etapa 2 onde foi utilizado quartzitos industrializados oriundos de diferentes lavras de São Thomé das Letras.

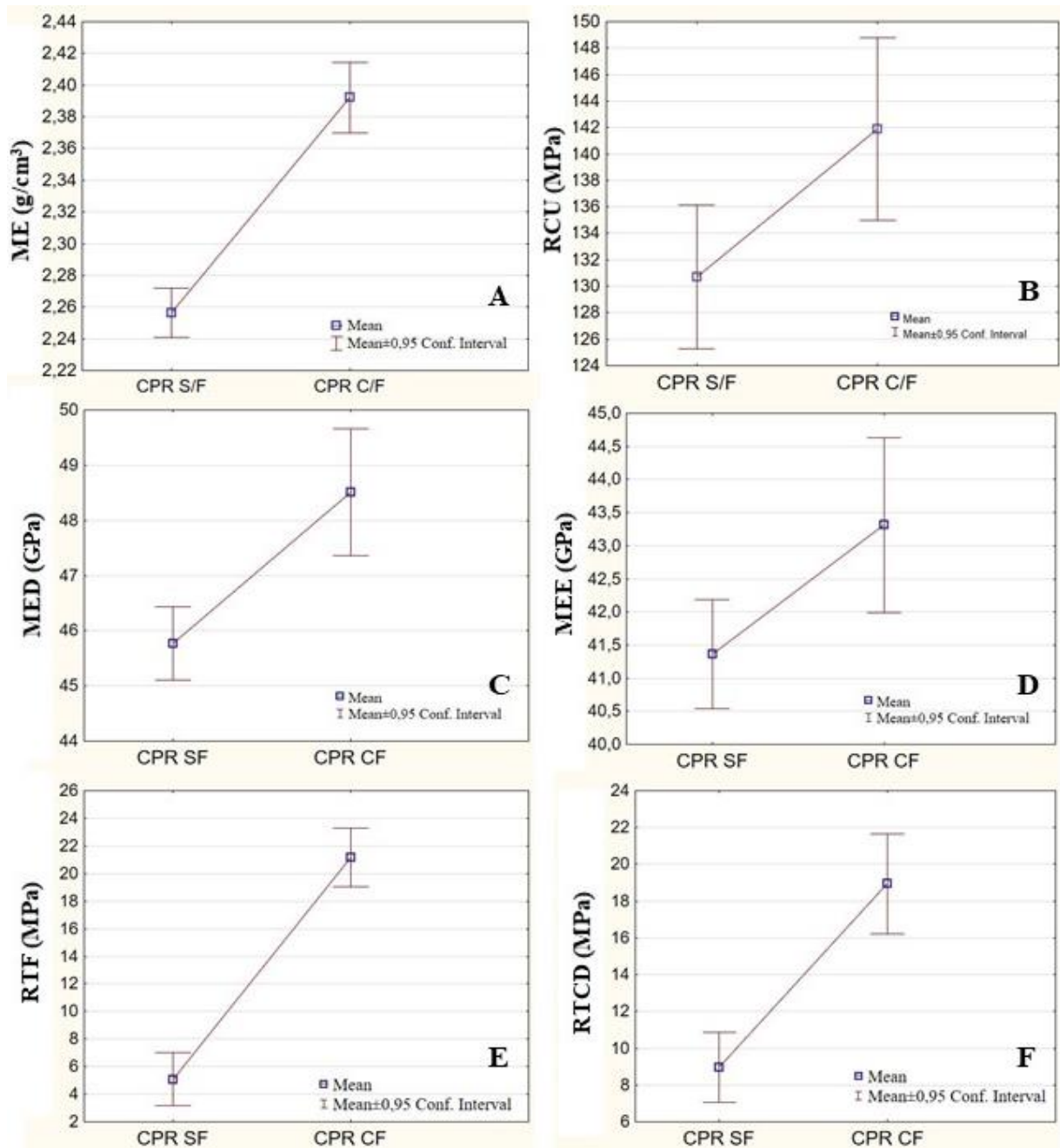
4.8.2 Estudos realizados na Etapa 2

Mediante as semelhanças entre a maioria das amostras de quartzitos analisadas na Etapa 1, foi realizada uma nova etapa de estudos para que se analisasse os quartzitos industrializados oriundos de diferentes lavras de São Thomé das Letras, de modo a se avaliar certas propriedades físicas e mecânicas importantes para a produção de CPRs. Para tanto, foram desenvolvidos dois traços de CPRs, sendo um com incorporação de fibras (CPR C/F) e o outro traço sem a incorporação de fibras (CPR S/F).

4.8.2.1 Apresentação dos resultados das propriedades físico-mecânicas dos CPRs, correspondentes à Etapa 2.

Os ensaios de ME, RCU, MED, MEE, RTF e RTCD foram realizados utilizando-se os corpos de prova de CPRs devidamente retificados, topos e bases. Os resultados médios, com intervalos de confiança de 0,95, são apresentados na Figura 4.37.

Figura 4.37– resultados médios de massa específica (A), resistência a compressão (B), módulo de elasticidade dinâmico (C), módulo de elasticidade estático (D), resistência à tração na flexão (E) e resistência à tração por compressão diametral (F).



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático; RTF = Resistência à tração na flexão; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral.

Na Tabela 4.17 são apresentados os resultados máximos, os resultados mínimos, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação referentes ao ensaio de ME, RCU, MED, MEE, RTF e RTCD.

Tabela 4.17 – Média, desvio padrão, coeficiente de variação, resultados máximos e mínimos referentes aos ensaios realizados nas amostras de CPR's.

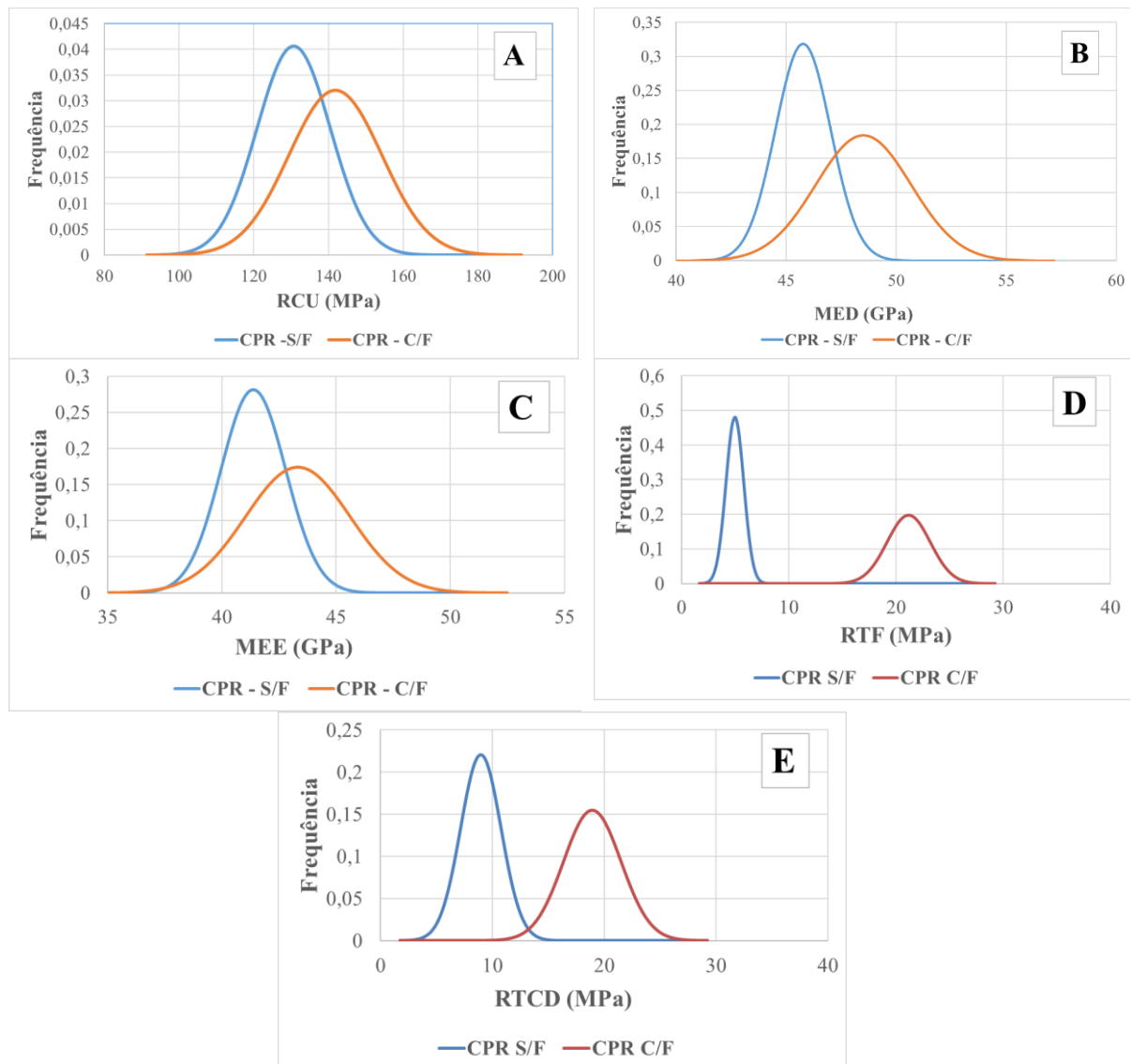
	ME (g/cm ³)		RCU (MPa)		MED (GPa)		MEE (GPa)		RTF (MPa)		RTCD (MPa)	
	S/F	C/F	S/F	C/F	S/F	C/F	S/F	C/F	S/F	C/F	S/F	C/F
Média	2,256	2,392	130,7	141,9	45,77	48,51	41,36	43,31	4,96	21,16	8,97	18,94
Desvio Padrão	0,03	0,04	9,8	12,5	1,25	2,17	1,42	2,29	0,83	2,01	1,81	2,58
Coeficiente de variação	1,2 %	1,7 %	7,5 %	8,8 %	2,7 %	4,5 %	3,4 %	5,3 %	16,7 %	9,5 %	20,1 %	13,6 %
Resultado Máximo	2,310	2,437	145,3	152,7	47,76	51,29	43,50	46,80	5,91	24,94	12,10	22,92
Resultado Mínimo	2,209	2,274	115,0	106,8	42,59	41,41	38,80	38,20	4,38	19,52	7,00	15,92

Fonte: O Autor (2022)

Legenda: ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático; RTF = Resistência à tração na flexão; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral.

Na Figura 4.38 são apresentadas as distribuições normais das amostras referentes aos resultados de RCU (A), MED (B), MEE (C), RTF (D) e RTCD (E) das amostras de CPRs.

Figura 4.38 - Distribuições normais referentes aos ensaios de resistência à compressão axial (A), módulo de elasticidade dinâmico (B), módulo de elasticidade estático (C), resistência à tração na flexão (D) e resistência à tração por compressão diametral (E).



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: RCU = Resistência à compressão uniaxial; MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático; RTF = Resistência à tração na flexão; RTCD = Resistência à tração por compressão diametral.

Como se observa, os corpos de prova de CPR C/F obtiveram um ganho de massa específica médio de 5,7 % em relação aos corpos de prova de CPR S/F e as médias dos CPR S/F ficaram próximas aos resultados obtidos dos CPRs estudados na Etapa 1.

Os resultados de resistência à compressão do CPR C/F foram superiores se comparados aos resultados obtidos nos CPR S/F. Neste caso, a fibra metálica se refletiu positivamente nas

propriedades mecânicas de compressão. Pesquisas realizadas por Abbas et al. (2015) e Wille et al. (2011) constataram aumentos razoáveis da resistência à compressão em CPRs que contêm fibras de aço retas, principalmente com teores mais elevados, de 2,5 % a 8 %, e com fibras mais longas, de 16 mm a 30 mm. Por outro lado, Ren et al. (2018) verificaram que o aumento da resistência à compressão dos CPRs se dá de maneira progressiva, com variações de até 1 % de fibra, se mantendo praticamente inalterada após esse percentual.

Também foi possível perceber que o quartzito industrializado colaborou para um melhor ajuste da curva de empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, proporcionou um acréscimo de resistência à compressão média, se comparado com os resultados obtidos na Etapa 1. É importante destacar que o consumo de cimento dos CPRs na Etapa 2 foi menor que na Etapa 1 e que o procedimento de cura térmica à temperatura de 70° C, adotado na Etapa 2, pode ter colaborado também para a melhoria da resistência mecânica dos CPRs. Tal hipótese é também sustentada nos estudos realizados por Alkhalay et al. (2021). Ao produzirem CPRs com pós de quartzitos, eles constataram que, além do empacotamento das partículas, a cura normal à temperatura de 28° C contribuiu para o aumento da resistência à compressão em idades superiores a 28 dias, se comparado com o processo de cura térmica à temperatura de 90° C.

Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, o resultado médio obtido no CPR C/F foi ligeiramente superior ao resultado obtido no CPR S/F, com destaque para um dos corpos de prova de CPR C/F, que ultrapassou 50 GPa. O desvio padrão para ambas amostras foram satisfatórios, considerados de baixa variação.

Foi verificado, também, que o uso de fibras pouco contribuiu no incremento do módulo de elasticidade estático, pois os resultados médios obtidos nas duas amostras de CPRs ficaram relativamente próximos. Essa constatação também foi realizada por Rompa e Gidrão (2020) e Hassan et al. (2012), que, analogamente, estudaram CPRs sem fibras e CPRs com 2 % de fibras metálicas. É importante destacar que os resultados de módulo de elasticidade dinâmico foram superiores aos resultados de módulo de elasticidade estático.

Como se pode observar, as fibras metálicas impactaram significativamente no ganho de resistência à tração na flexão em prismas de CPRs, com incrementos superiores a 400 %. Em relação ao ensaio de tração por compressão diametral, os valores de resistência foram praticamente dobrados quando utilizadas as fibras nos CPRs. Esses ganhos expressivos de resistência à tração também foram verificados nas pesquisas de Jin et al. (2018), Abbas et al. (2015) e Hassan et al. (2012).

4.8.2.2 Correlações entre as propriedades físico-mecânicas dos CPRs – Etapa 2

Nas tabelas 5.18 e 5.19 são apresentadas as correlações entre as propriedades de resistência à compressão, massa específica, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico obtidos nas amostras de CPRs S/F e CPRs C/F, respectivamente. Não foram incluídas nesta análise os resultados de resistência à tração, devido ao baixo número de corpos de prova ensaiados.

As correlações no nível 0,05, p-valor < 0,05, são destacadas na Tabela 4.18. Nela se pode observar que existe uma forte correlação entre a maioria das variáveis analisadas, correspondentes aos CPRs S/F, exceto entre as propriedades de módulo de elasticidade estático e de resistência à compressão axial, que apresentaram uma fraca correlação.

Tabela 4.18 - Resumo das correlações obtidas entre as propriedades de resistência à compressão, massa específica, módulo dinâmico e módulo de elasticidade estático, referentes aos CPRs S/F – Etapa 2.

	RCU	ME	MED	MEE
RCU	---	$R^2 = 0,7055$	$R^2 = 0,6203$	$R^2 = 0,4497$
	---	p=0,005	p=0,018	p=0,107
ME	$R^2 = 0,7055$	---	$R^2 = 0,7161$	$R^2 = 0,6957$
	p=0,005	---	p=0,004	p=0,006
MED	$R^2 = 0,6203$	$R^2 = 0,7161$	---	$R^2 = 0,6987$
	p=0,018	p=0,004	---	p=0,005
MEE	$R^2 = 0,4497$	$R^2 = 0,6957$	$R^2 = 0,6987$	---
	p=0,107	p=0,006	p=0,005	---

Legenda: R^2 = coeficiente de correlação Pearson; p = análise de significância (p-valor); Células hachuradas = forte correlação entre as propriedades analisadas; ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; MED = Módulo elasticidade dinâmico; MEE = Módulo elasticidade estático.

Fonte: O Autor (2022)

As correlações no nível 0,05, p-valor < 0,05, estão destacadas na Tabela 4.19. Observa-se nela que existe uma forte correlação entre todas as variáveis analisadas, correspondentes aos CPRs C/F.

Tabela 4.19 - Resumo das correlações obtidas entre as propriedades de resistência à compressão, massa específica, módulo dinâmico e módulo de elasticidade estático, referentes aos CPRs C/F – Etapa 2.

	RCU	ME	MED	MEE
RCU	---	$R^2 = 0,8119$	$R^2 = 0,8079$	$R^2 = 0,7612$
	---	$p=0,000$	$p=0,000$	$p=0,002$
ME	$R^2 = 0,8119$	---	$R^2 = 0,8780$	$R^2 = 0,7854$
	$p=0,000$	---	$p=0,000$	$p=0,001$
MED	$R^2 = 0,8079$	$R^2 = 0,8780$	---	$R^2 = 0,6814$
	$p=0,000$	$p=0,000$	---	$p=0,007$
MEE	$R^2 = 0,7612$	$R^2 = 0,7854$	$R^2 = 0,6814$	---
	$p=0,002$	$p=0,001$	$p=0,007$	---

Legenda: R^2 = coeficiente de correlação Pearson; p = análise de significância (p-valor); Células hachuradas = forte correlação entre as propriedades analisadas; ME = Massa específica no estado endurecido; RCU = Resistência à compressão uniaxial; MED = Módulo elasticidade dinâmico; MEE = Módulo elasticidade estático.

Fonte: O Autor (2022)

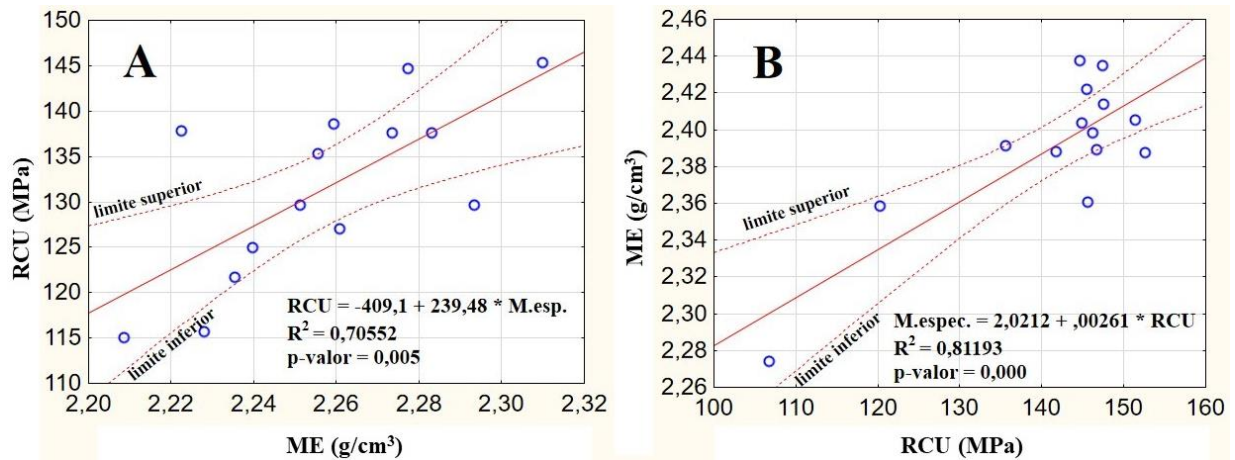
Na seção subsequente são apresentadas as correlações consideradas mais relevantes e que merecem ser discutidas e analisadas nesta pesquisa. As análises foram realizadas com auxílio do *software* Statistica 13.5®, considerando as seguintes hipóteses:

- H0: o coeficiente de correlação obtido não é estatisticamente significativo.
- H1: o coeficiente de correlação obtido é estatisticamente significativo.

4.8.2.3 Correlação entre resistência a compressão axial e massa específica dos CPR S/F e dos CPR C/F - Etapa 2

Os resultados individuais de massa específica no estado endurecido e de resistência à compressão axial dos CPRs foram correlacionados. Na Figura 4.39 são apresentadas as correlações dos 14 corpos de prova de CPR S/F (A) e dos 14 corpos de prova de CPR C/F (B), respectivamente.

Figura 4.39 - Correlação entre a resistência à compressão axial e massa específica no estado endurecido analisados nas amostras de CPR's S/F (A) e nas amostras de CPR C/F (B).



Fonte: O Autor (2022)

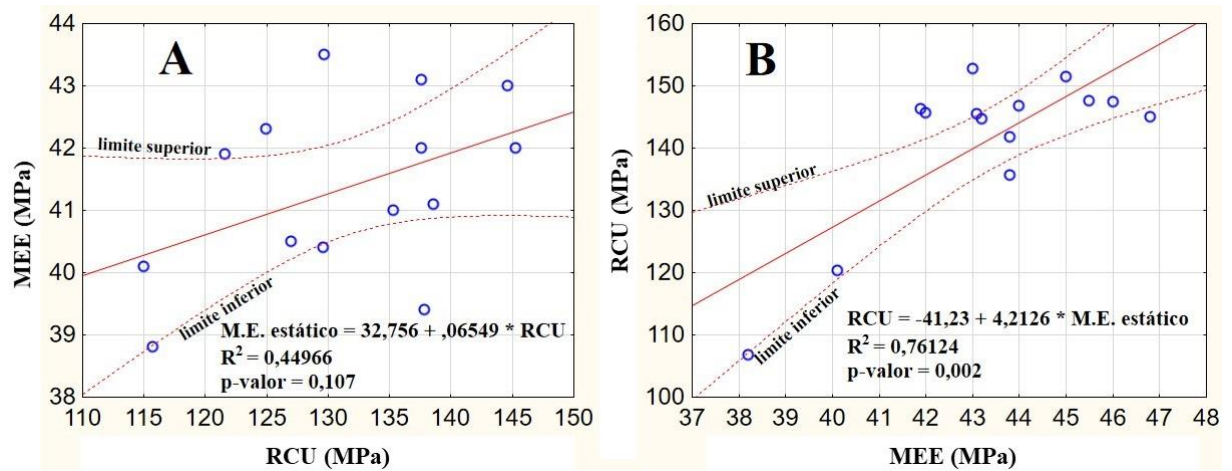
Legenda: RCU = Resistência à compressão uniaxial; ME = Massa específica no estado endurecido

Os resultados apresentados pelos CPR S/F e CPR C/F demonstraram que existe forte correlação entre as grandezas analisadas, resistência à compressão e massa específica, pois os coeficientes de Pearson foram significativos, de 0,7055 para o CPR S/F e de 0,8119 para o CPR C/F. Os testes de significância (p-valor) resultaram em 0,005 e 0,000. Assim sendo, é rejeitada a hipótese nula (H₀), pois que p-valor < α = 5 %, o que confirmou que o relacionamento linear entre as grandezas é significativo.

4.8.2.4 Correlação entre módulo de elasticidade estático e resistência a compressão axial dos CPR S/F e dos CPR C/F - Etapa 2

Os resultados individuais do módulo de elasticidade estático e da resistência à compressão axial dos CPRs foram correlacionados. Nas Figuras 4.40 A e B são apresentadas as correlações dos 14 corpos de prova de CPR S/F e dos 14 corpos de prova de CPR C/F, respectivamente.

Figura 4.40 - Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão axial analisados nas amostras de CPR's S/F (A) e nas amostras de CPR C/F (B) – Etapa 2.



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: RCU = Resistência à compressão uniaxial; MEE = Módulo de elasticidade estático.

Considerando as duas grandezas analisadas, módulo de elasticidade estático e resistência à compressão, temos que na amostra CPR S/F, apresentada pela Figura 4.40 A, foi obtido um p-valor de 0,107 (10,7 %). Assim, é aceita a hipótese nula (H_0), pois que $p\text{-valor} = 10,7 \% > \alpha = 5 \%$, do que se conclui que o relacionamento linear entre as grandezas não é estatisticamente significativo, o que pode ser comprovado devido à razoável correlação obtida no coeficiente de Pearson, = 0,4497.

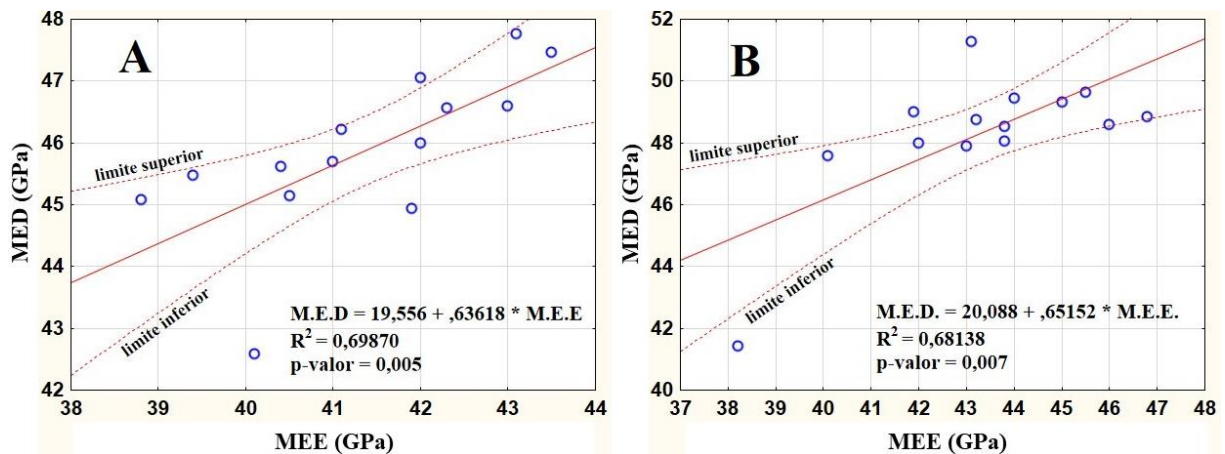
Por outro lado, foi possível verificar que existe uma forte correlação entre as propriedades de módulo de elasticidade estático e de resistência à compressão analisadas nas amostras de CPR C/F, conforme Figura 4.40 B, pois que o resultado do coeficiente de Pearson foi de 0,7612. Além disso, foi obtido um p-valor de 0,002 (0,2 %), o que, portanto, rejeita a hipótese nula (H_0), pois que o $p\text{-valor} = 0,2 \% < \alpha = 5 \%$, o que implica que o relacionamento linear entre as grandezas é significativo.

Mediante estas análises é possível concluir que as fibras metálicas exercem uma forte influência no comportamento elástico do concreto, refletindo de forma significativa na existência do relacionamento linear entre as propriedades de resistência à compressão X módulo de elasticidade estático. Por outro lado, no CPR S/F foram verificadas grandes dispersões entre os resultados de módulo de elasticidade estático e de resistência à compressão, pois as complexidades internas do concreto se refletem em grandes variabilidades nas suas propriedades mecânicas e elásticas dos concretos.

4.8.2.5 Correlação entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico dos CPR S/F e dos CPR C/F - Etapa 2

Os resultados individuais do módulo de elasticidade estático e do módulo de elasticidade dinâmico dos CPRs foram correlacionados. Nas Figuras 4.41 A e B são apresentadas as correlações dos 14 corpos de prova de CPR S/F e dos 14 corpos de prova de CPR C/F, respectivamente.

Figura 4.41 - Correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico analisados nas amostras de CPR's S/F (A) e nas amostras de CPR C/F (B) – Etapa 2.



Fonte: O Autor (2022)

Legenda: MED = Módulo de elasticidade dinâmico; MEE = Módulo de elasticidade estático.

Considerando as duas grandezas, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico, foi obtido um p-valor de 0,005 (0,5 %) e de 0,007 (0,7 %). Assim, restou rejeitada a hipótese nula (H_0), pois o p-valor = 0,5 % e 0,7 % < $\alpha = 5\%$ revelou que o relacionamento linear entre as grandezas é estatisticamente significativo. Estas correlações são consideradas moderadas, devido aos resultados dos coeficientes de Pearson, de 0,6987 e 0,68138, obtidos nos CPRs S/F e nos CPRs C/F, respectivamente.

4.9 CONCLUSÕES PARCIAIS

De posse dos resultados obtidos na Etapa 1, foi possível realizar uma análise comparativa dos CPRs produzidos com amostras de quartzitos coletados nos municípios de São Thomé das Letras-MG e Alpinópolis-MG.

Os ensaios indicaram que a alteração no traço da amostra ALP2 se refletiu de forma significativa nas propriedades físicas e mecânicas dos CPRs, motivo de esta amostra não ter sido considerada para a análise estatística dos resultados. Foi possível constatar que não existem diferenças significativas entre as amostras de quartzitos que impliquem alterações no comportamento mecânico dos CPRs. Tal hipótese foi confirmada por meio dos resultados das análises estatísticas de variância e da análise discriminante multivariada, realizadas nessa etapa da pesquisa.

Diante da necessidade de se melhorar os índices de compacidade das misturas de CPRs e de se reduzir o consumo de aglomerantes, foi proposta a realização de uma nova etapa de estudos, utilizando-se agregados de quartzitos industrializados. As frações de quartzitos obtidas pelas empresas S.A e SIOX, de São Thomé das Letras, possibilitaram a realização de melhores ajustes das proporções do traço, para que a curva de empacotamento ficasse mais próxima das curvas de referência propostas pela literatura especializada e pelo software EMMA. Na Etapa 2, portanto, o uso das partículas fracionadas de pó de quartzitos STL permitiu a obtenção de um melhor empacotamento e, conseqüentemente, o aumento das propriedades mecânicas de resistência, com menor consumo de cimento. Os melhores resultados dos CPRs atingiram resistência à compressão de 141,9 MPa, com um consumo de cimento de 755,0 kg/m³ de concreto, marcas que os enquadra na classe dos CUADs.

Nesta pesquisa, foi possível perceber a confiabilidade no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por ressonância acústica, não destrutivo, pois obteve-se resultados relativamente próximos, se comparados aos resultados de módulo de elasticidade estático, ensaio destrutivo, mostrando-se o primeiro método como uma boa alternativa, prática e rápida, para a determinação desta propriedade em amostras de concretos. A ressonância acústica provocada no corpo de prova por meio da excitação, utilizando martelo metálico, além de oferecer respostas confiáveis de propriedades elásticas, também pode contribuir para a obtenção indireta de resultados de massa específica do concreto, devido à forte correlação obtida entre os resultados de MED e ME.

O uso de fibras metálicas impactou significativamente no ganho de resistência à tração dos CPRs. De saída, nos resultados de resistência à compressão e de módulo de elasticidade, os incrementos de resistência foram razoáveis, demonstrando que concretos reforçados com este tipo de fibra são uma alternativa viável para a produção de estruturas especiais.

De maneira geral, os estudos tecnológicos realizados nas amostras de quartzitos provenientes dos municípios de São Thomé das Letras-MG e de Alpinópolis-MG apresentaram resultados satisfatórios quanto ao seu uso como agregado para a produção de CUADs.

5 CONCLUSÃO

Durante as visitas de reconhecimento nas minerações de quartzitos no Sul de Minas Gerais foram constatados três diferentes tipos de rejeitos: o Macio, o Duro e o Vidrado. Nas análises petrográficas foi possível constatar uma tendência dos rejeitos macios a ser friáveis. Fato este comprovado diante das dificuldades enfrentadas no laboratório para a produção das argamassas e concretos, devido à autofragmentação dos materiais durante o processo de mistura. Dessa forma, recomenda-se que os rejeitos macios, com tendência a friáveis, sejam utilizados para produção de agregados com frações finas e pulverulentas para CPRs. Já quanto aos quartzitos silicificados, duros e vidrados, recomenda-se que sejam destinados à produção de qualquer tipo de fração, incluindo agregados graúdos, para concretos convencionais.

As análises químicas dos quartzitos resultaram em elevados percentuais de quartzo deformado, na ordem de 95 %. Portanto, eles são considerados como potencialmente reativos. Das amostras analisadas pelo método acelerado em barras de argamassas, apenas duas amostras de quartzitos e uma amostra de diábasio indicaram um comportamento potencialmente reativo. Já os métodos acelerado e de longa duração em prismas de concreto se mostraram eficazes e foram condizentes com a potencialidade deletéria das amostras. Todas as amostras de quartzitos analisadas com auxílio de MEV foram diagnosticadas com o gel da RAS.

Os ensaios realizados nas amostras de CPRs mostraram a eficácia do uso de sílica ativa para a mitigação dos efeitos da patologia. Além de eles terem apresentado um baixo índice de expansibilidade média, não foram detectados produtos típicos da reação durante a análise em MEV. Entretanto, foram registrados picos de compostos sílico-alcálicos nas análises de EDX. Diante de tais indícios, é recomendada a realização de análises de RAS em prismas produzidos com CPRs pelos métodos acelerados e de longa duração.

Métodos de mitigação de RAA foram propostos nesta pesquisa para que os resíduos de quartzito possam ser utilizados como agregado alternativo em estruturas de concreto.

Nos estudos com os CPR, os resultados demonstraram a eficácia do uso de partículas fracionadas de pó de quartzito para a obtenção de um melhor empacotamento e, conseqüentemente, do aumento das propriedades mecânicas de resistência, com menor consumo de cimento. Os melhores resultados atingiram resistência à compressão de 141,9 MPa, com um consumo de cimento de 755,0 kg/m³ de concreto. A análise estatística discriminante demonstrou que não existem diferenças significativas entre as amostras de quartzito analisadas, incluindo a amostra de arenito JUNDÚ. O módulo de elasticidade dinâmico por ressonância

acústica mostrou-se uma alternativa viável de ensaio, visto que os resultados foram compatíveis aos obtidos no ensaio de módulo de estático, o que indica a boa correlação entre os métodos.

De maneira geral, os estudos tecnológicos realizados nas amostras de quartzitos provenientes do Sul de Minas culminaram em resultados satisfatórios a respeito do uso da rocha como agregado para a produção de CUADs. Os estudos ora realizados, com o posterior apoio de instituições que contribuem para a economia sul mineira, poderá fazer com que a comercialização deste produto possa vir a tornar-se economicamente viável no futuro. Um cenário de inegável contribuição para a mitigação dos problemas sociais, econômicos e ambientais decorrente da mineração no estado de Minas Gerais, principalmente quanto às volumosas pilhas de rejeitos que se formam onde os quartzitos são extraídos.

Sugestões de trabalhos futuros:

- A realização de novos estudos de dosagem e de empacotamento de partículas, com uso de diferentes materiais cimentícios suplementares, a fim de se otimizar o consumo de quartzitos, aumentar a resistência à compressão e reduzir o consumo de cimento;
- A realização de estudos sobre a capacidade pozolânica dos quartzitos, com recurso aos métodos de cura térmica, em temperaturas elevadas;
- A realização de ensaios de expansibilidade em prismas de CPRs pelos métodos acelerados e de longa duração;
- A realização de estudos para medir indicadores dos impactos ambientais negativos decorrente da produção dos CPRs, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages, *Construction and Building Materials*, Volume 75, 2015.

ABID M., HOU X., ZHENG W., HUSSAIN R. Z. High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. *Construction and Building Materials* 147. 2017.

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Balanço das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de ornamentação e revestimento em 2021. Disponível em: <www.abirochas.com.br/balancos/>. Acessado em: 22 ago. 2022.

ABNT NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2009.

ABNT NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro. 2018.

ABNT NBR 15577-2: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro. 2018

ABNT NBR 15577-3: Aggregates - Alkali-aggregate reactivity Part 3: Petrographic analysis for evaluation of the potential reactivity of aggregates with alkali compounds from concrete. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2018.

ABNT NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro. 2018.

ABNT NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro. 2018

ABNT NBR 15577-6: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro. 2018.

ABNT NBR 15577-7: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro. 2018.

ABNT NBR 15845-1: Rochas para revestimento. Parte 1: Análise petrográfica. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.

ABNT NBR 15845-5: Rochas para revestimento. Parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.

ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2017.

ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 16915: Agregados - Amostragem. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.

ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2016.

ABNT NBR 7222 – Concreto - Determinação da resistência a tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira De Normas Técnicas Rio de Janeiro, 2011.

ABNT NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2009.

AHMAD S.; HAKEEM I.; MASLEHUDDIN M. Development of UHPC Mixtures Utilizing Natural and Industrial Waste Materials as Partial Replacements of Silica Fume and Sand. *The scientific world journal*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/713531>

AHMED, S.; MAHAINI, Z.; ABED, F.; MANNAN, M.A.; AL-SAMARAI, M. Microstructure and Mechanical Property Evaluation of Dune Sand Reactive Powder Concrete Subjected to Hot Air Curing. *Materials* 2022, 15, 41. <https://doi.org/10.3390/ma15010041>

AİTCIN, P.C. Binders for durable and sustainable concrete. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology, 16).

AİTCIN, P-C. Concreto de alto desempenho, PINI, São Paulo, (2000).

AKHAVAN, A. C. The Quartz Page. Disponível em: http://www.quartzpage.de/gen_mod.html Acesso em: 01 setembro, 2022.

ALECRIM, A. V. Estudo do resíduo de quartzito foliado para emprego em estruturas de pavimento. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 2009.

ALKHALY, Y. R.; BDULLAH; HUSAINI; HASAN, M. The Design of Reactive Powder Concrete (RPC) Mixtures Using Aceh Quartzite Powder. *Key Engineering Materials*, 2021, ISSN: 1662-9795.

ANDERSON, Sweeney Williams. *Estatística Aplicada à Administração e Economia*. São Paulo: Pioneira, 2003.

ASTM C114-18. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM C-1260. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM C1856. Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance Concrete. ASTM International; 2017.

ASTM C215-02: standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. American Society For Testing Materials. West Conshohocken, 2008.

ASTM. E1876-01: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. American Society For Testing Materials. West Conshohocken, 2001.

BARBOSA, J. S. Aplicação do Concreto de Ultra Alto Desempenho em Viga Pré-moldada Protendida para Pontes. 2021. 263f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2021.

BARROS, S.V.A; MARCIANO, J.E.A.; FERREIRA, H.C.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A. Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior. *Construction and Building Materials*. Elsevier, v. 188, p. 344-351, 2016.

BASF. Manual Técnico Basf. Master Builders Solutions. 2014. Disponível em: <https://www.master-builders-solutions.com/pt-br/products>.

BEHLOUL, M.; BERNIER, G.; CHEYREZY, M. Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete (RPC). In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE*, 4., Paris, France. Anais...Paris. p. 1375-1381. 1996.

BENEZET, J. C.; BENHASSAINE A. The Influence of Particle Size on the Pozzolanic Reactivity of Quartz Powder. *Powder Technology*, Vol. 103, No. 1, 1999, pp. 26 29. doi:10.1016/S0032-5910(99)00010-8.

BESSAIES-BEY, H; KHAYAT K. H.; PALACIOS M.; SCHMIDT W.; ROUSSEL N. Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology. *Cement and Concrete Research*. 2022.

BINA, P. Concretos de pós reativos: uma revolução no conceito do concreto. Revista Técnica, edição 38, Janeiro de 1999.

BOADELLA, I.L.; GAYARRE, F.L.; GONZÁLEZ, J.M.S.; GÓMEZ-SOBERÓN, J.M.; PÉREZ, C.L.-C.; SERRANO-LOPEZ, M.A.; DE BRITO, J. The Influence of Granite Cutting Waste on The Properties of Ultra-High Performance Concrete. *Materials* 2019, 12, 634.

BRUNII, Adriano Leal. SPSS Aplicado à Pesquisa Acadêmica. 1º Ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

BUTTIGNOL T. E. T., SOUSA J. L. A. O., BITTENCOURT T. N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. *Ibracon Structures and Materials Journal*. Volume 10, Number 4, 2017. p. 957 – 971. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000400011>

CALEGARE, Álvaro J. de A. Introdução ao Delineamento de Experimentos. 2 Edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

CÂNDIDO, G.; FRANCKLIN JUNIOR, I. Análise da resistência à compressão axial em concretos produzidos com rejeitos de quartzitos de minerações do Sudoeste Mineiro. In: Simpósio Mineiro de Engenharia Ambiental-SIMEA, Passos-MG, 2009.

CASSIANI, J.; DUGARTE, M.; MARTINEZ-ARGUELLES, G. Evaluation of the chemical index model for predicting supplementary cementitious material dosage to prevent the alkali-silica reaction in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 275, p. 122158, 2021.

CASTRO, A.L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Revista Cerâmica*. 55: p. 18-32. 2009.

CHIODI FILHO, C.; ARTUR, A. C.; RODRIGUES, E. P. Aspectos geológicos, petrográficos e químicos de interesse para o aproveitamento econômico dos quartzitos foliados de São Thomé das Letras – Minas Gerais. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 24, n. 2, p. 163-171, 2005.

CHRIST, R. Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental. São Leopoldo, 2014. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Unisinos, São Leopoldo. 2014.

CHRIST, R.; PACHECO F; TUTIKIAN B.F; HELENE P. Aplicação do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) em Sistema Construtivo Habitacional no Brasil. *Concreto e Construção-IBRACON*, São Paulo, p. 67-70, 2019.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. Study of Pressure and Curing Temperature in Reactive Powder Concretes (RPC) with diferente amounts of Metallic Microfibers. *Revista de la Construcción* Vol. 12, n. 2, 2013.

COLLARES, E.G.; FRANCKLIN JUNIOR, I. Estudo de viabilidade do uso de rejeitos de minerações de quartzitos do Sudoeste Mineiro Como agregado. *REVISTA MINAS FAZ CIÊNCIA*. Belo Horizonte, p. 16-19, 2012.

COLLARES, E.G.; FRANCKLIN JUNIOR, I.; RAMIRIO, R.; PAMPLONA, D. Caracterização tecnológica de rejeitos de minerações de quartzitos do sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado na construção civil. In: 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Porto de Galinhas-PE, 2008.

COLLARES, E.; FRANCKLIN JUNIOR, I., CASTRO, L. A. Evaluation of the Aggregate Produced From Wastes of Quartzite Mining Sites to Use in Concrete. *Soils & Rocks*, v.35, p.27 - 36, 2012.

COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS - COMIG. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais – 1:1.000.000. COMIG/SEME. 2003.

CORRÊA, F.A.; COLLARES, A.C.Z.B.; COLLARES, E.G.; RIBEIRO, R.P.; REIS, F.M.D. Evaluation of mixtures of lateritic clayey soil with quartzite and stone powder for road purposes. *TRANSPORTES*, v. 28, n. 3, p. 228–237, 2020. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i3.2088>

COUTO, Tiago Andrade. Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

CYR M., POUHET R. Resistance to alkali-aggregate reaction (AAR) of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-activated Cements, mortars and concretes*. Ed. Elsevier. 2015. <http://dx.doi.org/10.1533/9781782422884.3.397>

DELPLACE, G.; HAJAR, Z.; SIMON, A. Precast thin shells made of UHPFRC for a large roof in a wastewater treatment plant near Paris. In: *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*. Hipermat, 2012.

DIAMOND S. Special issue on scanning electron microscopy of cements and concretes. *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, Issue 8, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.027>

DU J., MENG W., KHAYAT K. H., BAO Y., GUO P., LYU Z., ABU-OBEIDAH A., NASSIF H., WANG H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>

DUCTAL – Project. Disponível em < <https://www.ductal.com/en>>, acesso em 20 de junho de 2022.

DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Étude Expérimentale de la Déformation sous Contrainte et du Comportement à la Rupture du Béton de Poudres Réactives. In: *ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS – ITBTP*. Anais...n. 532, p. 112-121. 1995.

EKOLU, S.; RAKGOSI, G.; HOOTON, D. Long-term mitigating effect of lithium nitrate on delayed ettringite formation and ASR in concrete–Microscopic analysis. *Materials Characterization*, v. 133, p. 165-175, 2017.

ELKEM. User Guide Elkem Materials Mixture Analyser – EMMA. 2016.

EL-TAWIL S, TAI Y-S, MENG B, HANSEN W, LIU Z. Commercial production of nonproprietary ultra high performance concrete. Michigan Department of Transportation Research Administration; 2018.

ENAMI, R. M.; CARRAZEDO, R. Reforço de pilares de concreto com camisas de concreto de ultra alto desempenho. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 15, n. 65, p. 17-20, 2013.

FAN L, MENG W, TENG L, KHAYAT KH. Effects of lightweight sand and steel fiber contents on the corrosion performance of steel rebar embedded in UHPC. *Construct Build Mater*, 2020.

FEAM - Guia técnico ambiental da indústria de rochas ornamentais. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, 2015.

FEHLING E., LORENZ P. Characterization of rebars anchorage in UHPC. RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013 – October 1-3, 2013, Marseille, France.

FRANCKLIN JUNIOR, I. Estudo tecnológico em rejeitos de quartzitos do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto. 142 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

FRANCKLIN JUNIOR, I.; CASTRO MOTTA, L. A.; COLLARES, E. G.; DA SILVA, T. J. Estudo de concretos produzidos com agregado graúdo de quartzito proveniente de resíduos de minerações do sudoeste mineiro in: 52º congresso brasileiro do concreto, 2010, Fortaleza-CE. Anais do 52º congresso brasileiro do concreto, 2010.

FRANCKLIN JUNIOR, I.; CASTRO MOTTA, L. A.; COLLARES, E. G.; RAMIRIO, R. Caracterização tecnológica e estudo da reatividade potencial álcali-agregado em diferentes tipos de agregados de quartzitos do Sudoeste de Minas Gerais. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon, Salvador-BA, 2008.

FRANCKLIN JUNIOR, I.; MAIA, E. V. S., COLLARES, E.G. Determinação dos módulos estáticos de deformação e elasticidade em concretos produzidos com rejeitos de quartzitos do sudoeste mineiro. III Seminário Estadual de Iniciação Científica. 25 anos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, Belo Horizonte-MG. 2011.

FRANCKLIN JUNIOR, I.; RIBEIRO, R.P.; CORRÊA, F.A. Quartzite Mining Waste: Diagnosis of ASR Alkali-Silica Reaction in Mortars and Portland Cement Concrete. *Materials* 2021, 14, 7642. <https://doi.org/10.3390/ma14247642>.

FRANCKLIN JUNIOR, I; RIBEIRO, R.P.; DA SILVA, M.H.; AURELIANO, F. S.; COSTA, A.A.; GARCIA, V.L. Study of reactive powder concrete using quartzite tailings from the state of Minas Gerais-Brazil. *Procedia Manufacturing*, v. 38, p. 1758-1765, 2019.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC. Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1v. 1983. (Séries de Publicações Técnicas, 10).

GERALDO, R. H.; GONÇALVES, J. P.; CAMARINI, G. Production Process of an Eco-Friendly OnePart Alkali-Activated Binder. *MATERIALS RESEARCH*, v. 25, p. e20210433, 2022.

GESOGLU M, GÜNEYISI E, MUHYADDIN GF, ASAAD DS. Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: effect of fiber type and concentration. *Compos B Eng* 2016;103:74–83.

GILLOTT, J. E.; ROGERS, C. A. The behavior of silicocarbonatite aggregates from the Montreal area. *Cement and concrete research*, v. 33, n. 4, p. 471-480, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00956-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00956-0)

GITAHY, H. S. O problema dos agregados para os concretos da barragem de Jupia. IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Sao Paulo, 1963.

GONG J., MA Y., FU J., HU J., OUYANG X., ZHANG Z., H. Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review. *Composites Part B: Engineering*. Volume 241, 15 July, 2022.

GONZÁLEZ J. S.; BOADELLA I. L.; GAYARRE F. L.; PÉREZ C. L. C.; LÓPEZ M. S.; STOCHINO F. Use of Mining Waste to Produce Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete. *Materials* 2020, 13, 2457; doi:10.3390/ma13112457.

GRILO, S.M.S.; COLLARES, A.C.Z.B. Uso de rejeitos de mineração de quartzito e solos tropicais para pavimentação de baixo custo. In: COLLARES; E.G.; CARVALHO, R.C.R. (Org.). Um novo olhar para o desenvolvimento regional. Experiências vivenciadas em Minas Gerais. 1ªed. Curitiba: Prisma, v. 1, p. 41-58, 2017.

HAJAR Z.; LECOINTRE D.; PETITJEAN J.; RESPLENDINO J; SIMON A. Ultra-High-Performance Concretes: First recommendations and examples of application. *Concrete Structures: the Challenge of Creativity*. Symposium. 2004, France.

HAN, B.; DONG, S.; OU, J.; ZHANG, C.; WANG, Y.; YU, X.; DING, S. Microstructure related mechanical behaviors of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete. *Mater. Des.*, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.004>.

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese (Doutorado em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado—efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa. Dissertação de Mestrado apresentada na UFG, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P.; DAL MOLIM, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. Avaliação das propriedades Mecânicas e Análise da Microestrutura de Concretos Afetados pela RAA da UHE

Furnas. RAA 2006 – II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, setembro de 2006 (Ibracon).

HASPARYK, N.P.; Monteiro, P.J.M.; DAL MOLIN, D. C. C. Investigation of mechanical properties of mass concrete affected by alkali-aggregate reaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 21, p. 294, 2009.

HASSAN AMT, JONES SW, MAHMUD GH. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPC). *Construct Build Mater*, 2012.

HE Y.; MAO R.; LU L.; HU S. Hydration products of cement-silica fume-quartz powder mixture under different curing regimes. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* volume 32, pages598–602 (2017).

HIREMATH P. N., YARAGAL S. C. Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 2018.

HOOPS, D. W. Alkali-silica reaction in concrete. London: Thomas Telford, 183p. 1988.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Divisão do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas. Rio de Janeiro,1990.v.1. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoesregionais-do-brasil.html?edicao=16163&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: abr. 2022.

ICAAR - International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete . History. Disponível em: <http://icaar2020-2022.lnec.pt/history.html>. Acessado em: 16/08/2022.

IPEK M., YILMAZ K., UYSAL M. The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. *Constr. Build. Mater.* 2012.

JI T., C. CHEN, AND Y. Z. ZHUANG, "Evaluation method for cracking for cracking resistant behavior of reactive powder concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 45–49, 2012.

JIAO, Y.; ZHANG, Y.; GUO, M.; ZHANG, L.; NING, H.; LIU, S. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (UHPC) containing waste glass sand as partial replacement material. *J. Clean. Prod.* 2020, 277, 123501

JIN, L.; ZHANG, R.; TIAN, Y.; DOU, G.; DU X. Experimental investigation on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced ultra-high-strength concretes. *Construct Build Mater*, 2018.

KANG S.H., HONG S.G., MOON J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 115, January, 2019, Pag. 389-400. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.004>

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: 1º Simpósio Nacional de Agregados, São Paulo. Anais...São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986.

KIHARA, Y.; SCANDIUZZI, L. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In Congresso Brasileiro de Cimento. 1993.

KOBAYASHI, K.; TAKAGI, Y. Penetration of pressure-injected lithium nitrite in concrete and ASR mitigating effect. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, p. 103709, 2020.

KORMANN, A. C. M.; DAL MOLIN, D. C. C; PORTELLA, K. F. Uso de adições minerais em concretos submetidos a ensaios de reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004. Florianópolis. Anais... Florianópolis:IBRACON, 2004.

KRAHL, P. A.; GIDRÃO, G. M. S.; CARRAZEDO, R. Compressive behavior of UHPFRC under quasi-static and seismic strain rates considering the effect of fiber content. *Construction and Building Materials*, 2018.

KRAHL, P. A.; GIDRÃO, G. M. S.; CARRAZEDO, R. Cyclic behavior of UHPFRC under compression. *Cement and Concrete Composites*, 2019.

LEE, N. P.; CHISHOLM D. H. Reactive Powder Concrete. Study Report SR. 146, BRANZ Ltd, Judgeford, New Zealand, 2005.

LEEMANN, A.; LÖRTSCHER, L.; BERNARD, L.; LE SAOUT, G.; LOTHENBACH, B.; ESPINOSA-MARZAL, R. M. Mitigation of ASR by the use of LiNO₃-characterization of the reaction products. *Cement and concrete research*, v. 59, p. 73-86, 2014.

LI, Y.; ZHANG, Y.; YANG, E-H.; TAN, K.H. Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure. *Cement Concr Res* 2019;116:168–78.

LIU, S.; ZHU, M.; DING, X.; REN, Z.; ZHAO, S.; ZHAO, M.; DANG, J. High-Durability Concrete with Supplementary Cementitious Admixtures Used in Corrosive Environments. *Crystals* 2021, 11, 196. <https://doi.org/10.3390/cryst11020196>

LOWKE, D., STENGEL, T., SCHIEBL, P., GEHLEN, C. Control of Rheology, strength and fibre bond of UHPC with additions – Effect of packing density and addition type. In: 3^o International Symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials. Ed. Schimidt et al., March, 2012.

LUO, W.; WANG, H.; LI, X.; WANG, X.; WU, Z.; ZHANG, Y.; LIAN, X.; LI, X. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete with Coal Gangue as Sand Replacement. *Materials* 2022, 15, 1807. <https://doi.org/10.3390/ma15051807>

MACHADO, F.B. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da bacia do paraná no estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. UNESP – RIO CLARO. 2005.

MALLMANN, P. F. Concreto de pós reativos: adição de nanosílica. Trabalho de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.

MAYHOUBAB O. A., NASRA E. A. R., ALIA Y. A., KOHAIL M. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. *Ain Shams Engineering Journal*. Volume 12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016>

MENEZES, R. M. R. O. et al. Hydraulic binder obtained from recycled cement and sand powder. *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.* 11, 1178–1185, 2018.

MENG, W., KHAYAT, K.H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto-Microestrutura, Propriedades e Materiais*, IBRACON, 2014.

MIZUMOTO, C. *Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes*. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2009.

MOHAMMADI, A.; GHIASVAND, E.; NILI, M. Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. *Construction and Building Materials*, v. 258, p. 119567, 2020.

MOORE, David. *A Prática da Estatística Empresarial: como usar dados para tomar decisões*. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.

MUNHOZ, F.A.C. *Efeito das adições nas reações álcali-sílica e álcali-silicato*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2007.

NAAMAN A.E., WILLE K. The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): Five decades of progress. In: 3^o International Symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials. Ed. Schimidt et al., March, 2012. ISBN.: 978-3-86219-265-6

NAFEES, A.; JAVED, M.F.; MUSARAT, M.A.; ALI, M.; ASLAM, F.; VATIN, N.I. FE Modelling and Analysis of Beam Column Joint Using Reactive Powder Concrete. *Crystals* 2021, 11, 1372. <https://doi.org/10.3390/cryst11111372>

NOGUEIRA, K. A. *Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008*. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. 2010

OEY, T.; LA PLANTE, E.C.; FALZONE, G.; HSIAO, Y.H.; WADA, A.; MONFARDINI, L.; SANT, G. Calcium nitrate: A chemical admixture to inhibit aggregate dissolution and mitigate expansion caused by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, v. 110, p. 103592, 2020.

OLIVEIRA, C. O. ; BARBOSA, M. P. ; MACIEL, G. F. ; CASTRO, A. L. . Dosagem de um concreto de alto desempenho utilizando os conceitos de reologia. In: 55^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado/RS. *Anais do 55^o Congresso Brasileiro do Concreto*. São Paulo/SP: Instituto Brasileiro do Concreto, 2013.

OLIVEIRA, Francisco E. M. de. SPSS Básico para Análise de Dados. 2 Edição. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

PARSEKIAN G.A.; SHRIVE N.G.; BROWN T.G.; KROMAN J.; SEIBERT P.J.; PERRY V.H.; BOUCHER A.. Innovative ultra-high performance concrete structures. Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds), London, 2008. ISBN 978-0-415-47535-8

PAULON, V.A. Reações álcali-agregado em concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PINHEIRO, W.M.G. Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto. Campinas. 202p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 2003.

RAMIRIO, R.; PAMPLONA, D.; FRANCKLIN JUNIOR, I.; COLLARES E. G. Estudo comparativo de rejeitos de quartzitos com outros agregados comercialmente utilizados como material de construção do Sudoeste de Minas Gerais. Revista Ciência et Praxis. v.1, p.25 - 32, 2008.

RANDL N, STEINER T, OFNER S, BAUMGARTNER E, M'ESZOLY T. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. Construct Build Mater. 2014. 67:373–8.

REIS, F.M.D.; RIBEIRO, R.P.; REIS, M. J. Physical-mechanical properties of soil-cement bricks with the addition of the fine fraction from the quartzite mining tailings (State of Minas Gerais–Brazil). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, p. 1-10, 2020.

REIS, F.M.D.; RIBEIRO, R.P.; REIS, M.J.; REIS, J.C.; FRANCKLIN JUNIOR, I. Estudo da dosagem para confecção de tijolo solo-cimento utilizando rejeitos de quartzito como agregado miúdo. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos: EESC-USP, p. 49-56, 2019.

REIS, M. J. Avaliação tecnológica de rejeitos de minerações de quartzito do Sudoeste Mineiro como agregados em blocos para pavimentação. 2016 198 p. Dissertação (Mestrado) - Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Universidade do Estado de Minas Gerais, Passos, 2016.

REIS, M.J.; COLLARES, E.G.; REIS, F.M.D. Technological assessment of tailings from quartzite mining sites in Alpinópolis (Minas Gerais–Brazil) as aggregates in concrete block paving (CBP). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 77, n. 4, p. 1623-1637, 2018.

REN GM, WU H, FANG Q, LIU JZ. Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC. Construct Build Mater, 2018.

RIBEIRO, A.; HEILBRON, M. Estratigrafia e metamorfismo dos Grupos Carrancas e Andrelândia, sul de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32. Anais. Salvador, 1982.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of Reactive Powder Concretes. Cement and Concrete Research, 25, 1501-1511, 1995.

RILEM TC 219-ACS. RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1—Detection of Potential Alkali-Reactivity—60 ° C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. In: Nixon P., Sims I. (eds) RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New concrete Structures. vol 17. Springer, Dordrecht, 2016.

ROHDEN A. B., KIRCHHEIM A. P., DAL MOLIN D. Strength optimization of reactive powder concrete, *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 13, no. 5, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000500007>.

ROMPA, D. D. GIDRÃO, G. de M. S. Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPRFC). *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 73-88, abr./jun. 2020.

RUSSELL, H.G.; GRAYBEAL, B.A. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. U.S. Department of Transportation. Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296, 2013.

RUSSO, M. L. C. Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

ŠACHLOVÁ, Š.; KUCHAROVÁ, A.; PERTOLD, Z.; PŘIKRYL, R.; FRIDRICHOVÁ, M. Quantitative assessment of alkali silica reaction potential of quartz-rich aggregates: comparison of chemical test and accelerated mortar bar test improved by SEM-PIA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 76, n. 1, p. 133-144, 2017.

SANCHES, L.; KUPERMAN, S.C.; HELENE, P. Using the accelerated Brazilian concrete prism test (ABCPT) to evaluate alkali aggregate reaction (AAR). *Ibracon Structures and Materials Journal*. ISSN 1983-4195, number 4, p. 575-581, 2011.

SANCHEZ, L. F. M. Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos. Dissertação de mestrado, Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008. 168p.

SANJUÁN, M.Á.; ANDRADE, C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. *Appl. Sci.* 2021, 11, 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>

SHI C, WU Z, XIAO J, WANG D, HUANG Z, FANG Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construct Build Mater* 2015;101:741–51.

SHI, Z.; PARK, S.; LOTHENBACH, B.; LEEMANN, A. Formation of shlykovite and ASR-P1 in concrete under accelerated alkali-silica reaction at 60 and 80° C. *Cement and Concrete Research*, v. 137, p. 106213, 2020.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; RANA, A.; TIWARI, A. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *J. Clean. Prod.* 2016, 116, 223–235.

SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2022. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 23/08/2022.

STRACK, C. M.; BARNES, E.; RAMSEY, M. A.; WILLIAMS, R. K.; KLAUS, K. L.; MOSER, R. D. Impact of aggregate mineralogy and exposure solution on alkali-silica reaction product composition and structure within accelerated test conditions. *Construction and Building Materials*, v. 240, p. 117929, 2020.

SUJATHA, T.; BASANTHI, D. Modified Reactive Powder Concrete. *International Journal of education and applied research*. ISSN: 2348-0033. Siddhartha Engineering College, Vijayawada, AP, India. 2014

SUN, L.; ZHU, X.; KIM, M.; ZI, G. Alkali-silica reaction and strength of concrete with pretreated glass particles as fine aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 271, p. 121809, 2021.

TAPAS, M.J.; SOFIA, L.; VESSALAS, K.; THOMAS, P.; SIRIVIVATNANON, V.; SCRIVENER, K. Efficacy of SCMs to mitigate ASR in systems with higher alkali contents assessed by pore solution method. *Cement and Concrete Research*, v. 142, p. 106353, 2021.

TAVARES L. R. C., TAVARES JUNIOR J. F., COSTA L. M., BEZERRA, A. C. S., Cetlin P. R., Aguiar M. T. P. Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. 2020. *Scientific Reports*.

TENG L, ZHU J, KHAYAT KH, LIU J. Effect of welan gum and nanoclay on thixotropy of UHPC. *Cement Concr Res*, 2020.

THOMAS, M.D.A., FOURNIER, B., FOLLIARD, K.J., RESENDEZ, Y.A. Alkali-aggregate reactivity (AAR). *Facts book*. U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration, 2013a. 212p.

TIECHER, F. Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado. *Dissertação (Mestrado)*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TIECHER, F.; GOMES, M.E.; DAL MOLIN, D.C.; HASPARYK, N.P.; MONTEIRO, P.J. Relationship between degree of deformation in quartz and silica dissolution for the development of alkali-silica reaction in concrete. *Materials*, v. 10, n. 9, p. 1022, 2017.

TOULEMONDE F.; RESPLENDINO J., *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development*. London, 2011.

TREMBLAY, C.; BÉRUBÉ, M.A.; FOURNIER, B.; THOMAS, M.D.; FOLLIARD, K.J. Experimental investigation of the mechanisms by which LiNO₃ is effective against ASR. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 4, p. 583-597, 2010.

TRIOLA, Mario, F. *Introdução à Estatística*. São Paulo: LTC Editora, 1999.

TROUW, R. A. J; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. P. Evolução metamórfica e estrutural de uma área a sudeste de Minas Gerais, In: SBG, Cong. Brasileiro Geologia, 38. Anais. Camburiú, 1980.

TUTIKIAN, B. ; ISAIA, Geraldo C. ; HELENE, Paulo . Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 2, p. 1283-1325.

TUTIKIAN, B. F. Concreto de pós reativos rende prêmio à Unisinos. 2015. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/concreto-de-pos-reativos-unisinos/>>. Acessado em: 20/10/2015.

VALDUGA, L.; SGARBOSSA, F.; DAL MOLIN, D.C.C.; PAULON, V.A. Influência da forma do agregado, da relação água/cimento e da consistência da argamassa na verificação da potencialidade reativa do agregado. In: 47 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2005, Recife. Anais do 47 CBC. Recife, 2005. p. 118-128.

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. Análise experimental do concreto de pós-reativos: dosagem e propriedades mecânicas. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 33, 2006.

VANDERLEI, R.D. Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VOORT V.T.L., SULEIMAN MT, SRITHARAN S. Design and performance verification of UHPC piles for deep foundations. Iowa State University. Center for Transportation Research and Education; 2008.

VURST, V. D. F.; GRÜNEWALD, S.; FEYS D, LESAGE K, VANDEWALLE L, VANTOMME J, DE SCHUTTER G. Effect of the mix design on the robustness of fresh self-compacting concrete. Cement Concr Compos 2017.

WALLAU, W.; PIRSKAWETZ, S.; VOLAND, K.; MENG, B. Continuous expansion measurement in accelerated concrete prism testing for verifying ASR-expansion models. Materials and Structures, v. 51, n. 3, p. 1-15, 2018.

WANG, C.; XUE, G.; ZHAO, X. Influence of Fiber Shape and Volume Content on the Performance of Reactive Powder Concrete (RPC). Buildings, 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11070286>.

WU Z, KHAYAT KH, SHI C. How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC? Cement Concr Compos 2018; 90:193–201.

XIE T, FANG C, ALI MM, VISINTIN P. Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): an experimental study. Cement Concr Compos 2018;91:156–73.

YANG, R.; YU, R.; SHUI, Z.; GAO, X.; HAN, J.; LIN, G.; HE, Y. Environmental and economical friendly ultra-high performance-concrete incorporating appropriate quarry-stone powders. *Journal of Cleaner Production*, v. 260, p. 121112, 2020.

YAZICI H., YARDIMCI M. Y., AYDIN S. KARABULUT A. S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Constr. Build. Mater.* 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>.

YOO, D.-Y.; KIM, S.; PARK, G.-J.; PARK, J.-J.; KIM, S.-W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Compos. Struct.* 2017, 174, 375–388.

YU R., SPIESZ P., BROUWERS H.J.H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement & Concrete Composites*. 2015.

YUNSHENG, Z.; WEI, S.; SIFENG, L.; CHUJIE, J.; JIANZHONG, L. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors. *Cem. Concr. Compos.* 2008.

YURDAKUL, M. Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial-scale case study in the province of Bilecik, Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123339, 2020.

ZANNI H, CHEYREZY M, MARET V, PHILIPPOT S, NIETO P. Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ²⁹Si NMR. *Cement Concr Res* 1996;26(1):93–100.

ZEGARDLO, B.; SZEL ĄAG, M.; OGRODNIK, P. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes—The method of production and the interfacial transition zone. *Constr. Build. Mater.* 2016, 122, 736–742.

ZHANG L, DU W, WANG D, WANG F, FANG K, YU J, SHENG B. Syntheses of polycarboxylate superplasticizers: microwave induction versus conventional thermal induction. *Compos B Eng*, 2021.

ZHU L, WANG J-J, LI X, ZHAO G-Y, HUO X-J. Experimental and numerical study on creep and shrinkage effects of ultra high-performance concrete beam. *Compos B Eng* 2020.

APÊNDICE A

- DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA DOS QUARTZITOS –

AMOSTRA ALP 1

Muscovita Quartzito de coloração branca, laminado, algo micáceo, de granulação extremamente fina, com presença de planos pouco mais enriquecidos em lamelas de muscovita que facilitam o deslocamento (**obs.:** no caso da amostra analisada com apenas 2 cm de espessura, observa-se um plano interno que facilitaria um deslocamento e os externos que delimitam a placa). A amostra é fresca (rocha sã) e discretamente friável.

Apresenta textura granoblástica, de aspecto laminado, com granulação muito fina. Os grãos de quartzo e lamelas de muscovita são inequidimensionais, com comprimentos (estiramento) destacadamente maiores em relação à largura, conforme segue:

- dimensões dos grãos perpendicularmente à laminação entre 0,01 mm e 0,09 mm, com predominância entre 0,02 e 0,05 mm;
- dimensões dos grãos paralelos à laminação (estiramento dos grãos) entre 0,2 mm e 0,4 mm, podendo, esporadicamente atingir cerca de 1,0 mm em determinados microleitões mais quartzosos.

Composição mineralógica média e porcentagem:

Quartzo	94,0
Muscovita	5,7
Opacos (hematita/limonita/hidróxido de ferro)	0,3
Turmalina	Traços
Zircão	Traços

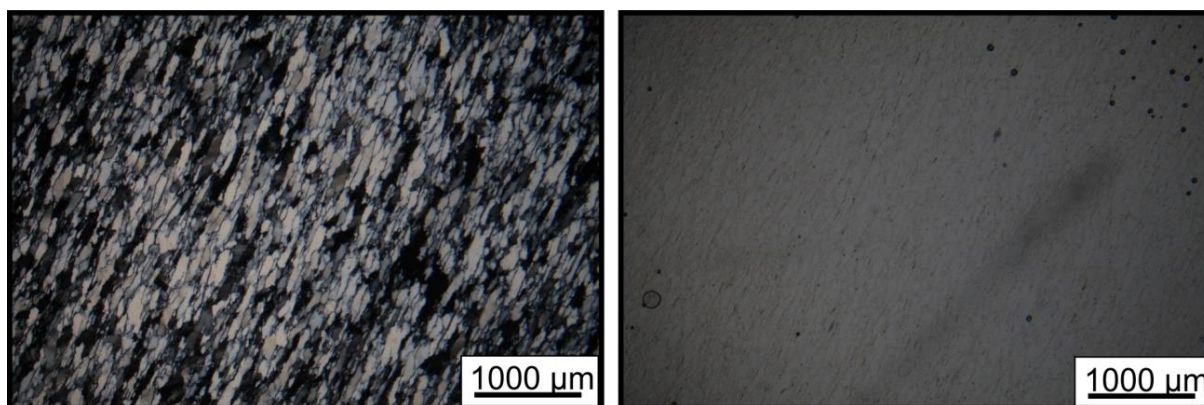
Microscopicamente os cristais de quartzo se apresentam fortemente estirados, laminados, com contatos lobulados, retilíneos a irregulares nas faces paralelas à laminação e irregulares a serrilhados nas extremidades dos alongamentos dos cristais. Exibem forte extinção ondulante, raramente microfissurados, podendo apresentar microinclusões de lamelas de muscovita.

A muscovita ocorre predominantemente em palhetas isoorientadas nas interfaces dos cristais de quartzo, podendo ser isoladas ou agrupadas segundo alinhamentos descontínuos ou

mesmo contínuos e bem definidos, situações em que facilitam o deslocamento entre os acamamentos da rocha.

Os opacos são de difícil determinação em virtude de suas minúsculas dimensões, provavelmente representados por hematita e limonita, além de hidróxidos de ferro (não apresentam magnetismo, o que eliminaria a magnetita). No geral apresentam aspecto pulverulento, principalmente concentrados junto aos agregados de cristais de muscovita. Ocorrem tanto como minúsculos grãos opacos (menores que 0,01 mm) quanto avermelhados/acastanhados ou, mais raramente, discretas manchas difusas de coloração amarelada a acastanhada normalmente associadas aos agregados/concentrados lineares de muscovita. Os cristais de turmalina e zircão são extremamente raros. Na Figura A 1 são apresentadas as fotomicrografias da amostra ALP 1.

Figura A 1 – Fotomicrografia da amostra ALP 1.



nicóis cruzados

nicóis descruzados

AMOSTRA ALP 2

Muscovita Quartzito de aspecto bandado definido pela alternância de leitos centimétrico de coloração branco-acinzentado e subcentimétricos de coloração levemente acastanhado. Os leitos esbranquiçados são mais enriquecidos em quartzo (leitos mais puros e menos intemperizados). Os leitos levemente acastanhados são pouco mais enriquecidos em minerais opacos, bem como efeitos de oxidação mais evidentes com geração de hidróxidos de ferro tidas como responsáveis pela leve coloração acastanhada exibida por estas bandas. Apesar das amostras serem aparentemente sãs, a presença de leitos com coloração levemente acastanhada evidenciaria alguns efeitos intempéricos pouco mais evidentes que a da amostra ALP 1.

No geral apresenta estrutura laminada, algo micáceo (discretamente mais empobrecida em muscovita que a amostra ALP 1), com textura granoblástica de granulação extremamente fina (na média mais fina que a ALP 1). Da mesma forma que a mostra ALP 1, os grão minerais são inequidimensionais com comprimento (estiramento) destacadamente superior à largura, conforme segue:

- dimensões dos grãos de quartzo perpendicularmente à laminação entre 0,01 mm e 0,05 mm, com predominância entre 0,02 e 0,04 mm;
- dimensões dos grãos paralelos à laminação (estiramento dos grãos) entre 0,07 mm e 0,15 mm, raramente atingindo 0,4 mm de extensão.

Obs.: comparativamente, a amostra ALP 2 se mostra estruturalmente mais heterogênea que a amostra ALP 1 no sentido de que a primeira apresenta discreta alternância entre leitos branco-acinzentados e levemente acastanhados, o que indicaria efeitos intempéricos mais evidentes.

Composição mineralógica média e porcentagem:

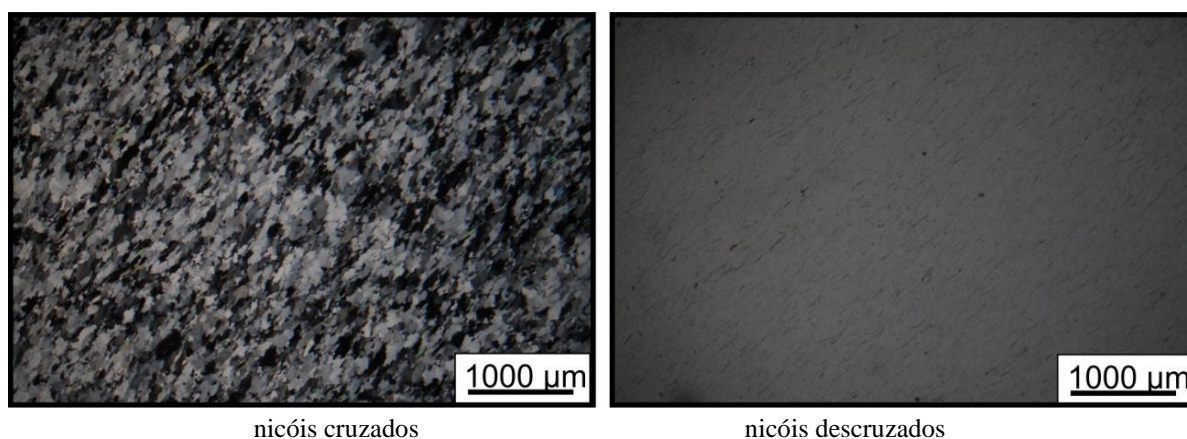
Quartzo	94,5
Muscovita	5,0
Opacos (hematita/limonita/hidróxido de ferro)	0,5
Turmalina	Traços
Zircão	Traços

Microscopicamente se diferencia da amostra **ALP 1** por apresentar microleitos isoorientados (com espessuras submilimétricas) mais ou menos contínuos pouco mais enriquecidos em lamelas de muscovita e de minerais opacos e hidróxidos de ferro. Os minerais opacos, de difícil identificação, devem corresponderem a hematita e limonita parcialmente oxidadas com geração de algumas manchas difusas de hidróxido de ferro. Os minerais opacos formam grãos extremamente pequenos de aspecto geral pulverulento.

Os cristais de quartzo, à semelhança da amostra ALP 1, se apresentam fortemente estirados, laminados, com contatos lobulados, retilíneos a irregulares nas faces paralelas à laminação e irregulares a serrilhados nas extremidades dos alongamentos dos cristais. Exibem forte extinção ondulante, raramente microfissurados, podendo apresentar microinclusões de lamelas de muscovita.

A muscovita ocorre predominantemente em palhetas isoorientadas nas interfaces dos cristais de quartzo, podendo ser isoladas ou agrupadas segundo alinhamentos descontínuos ou mesmo contínuos e bem definidos, caso dos microleitões mencionados, situações em que facilitam o deslocamento entre os acamamentos da rocha. Os cristais de turmalina e zircão são extremamente raros. Na Figura A 2 são apresentadas as fotomicrografias da amostra ALP 2.

Figura A 2 – Fotomicrografia da amostra ALP 2.



AMOSTRA ALP 3

É a amostra mais fresca (sã) e estruturalmente mais homogênea dentre as amostras ALP. Por outro lado, trata-se da mais laminável (maior fissilidade) e aparentemente mais friável que as outras duas amostras ALP 1 e ALP 2. A maior fissilidade poderia estar relacionada pela combinação do melhor desenvolvimento das lamelas de muscovita desta amostra (que podem superar a 1,0 mm de extensão) associadas às concentrações micáceas lineares mais cerradas, com o consequente aumento de planos de deslocamento. As maiores dimensões das lamelas/placas de muscovita desta amostra ALP-3 seria corroborada pela maior rugosidade presente nas suas superfícies de deslocamento.

Muscovita Quartzito de coloração branca, laminado, micáceo, de granulação extremamente fina, com presença de planos mais ou menos enriquecidos em lamelas de muscovita que facilitam o deslocamento.

Apresenta textura granoblástica, de aspecto laminado, com granulação muito fina. Da mesma forma que as duas mostras anteriores, os grão minerais são inequidimensionais com comprimento (estiramento) destacadamente superior à largura, conforme segue:

- dimensões dos grãos de quartzo perpendicularmente à laminação entre 0,01 mm e 0,04 mm;
- dimensões predominantes dos grãos de quartzo paralelos à laminação (estiramento dos grãos) entre 0,06 mm e 0,1 mm, podendo, localmente, exibirem dimensões pouco mais desenvolvidas com extensões de 0,3 a 0,5 mm. As dimensões das lamelas de muscovita são mais desenvolvidas em relação às amostras anteriores, podendo superar 1,0 mm.

Composição mineralógica média e porcentagem:

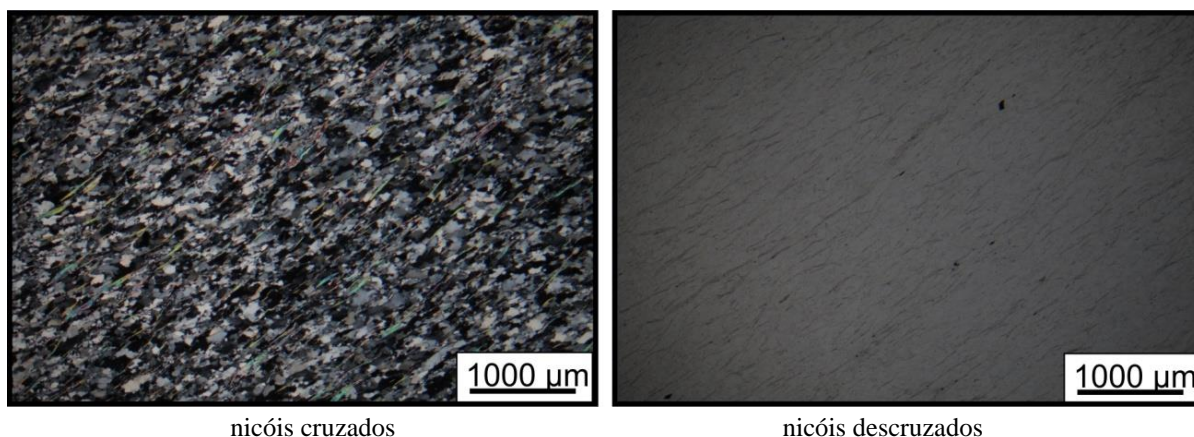
Quartzo	94,5
Muscovita	5,2
Opacos (hematita/limonita/hidróxido de ferro)	0,3
Turmalina	Traços
Zircão	Traços

Microscopicamente os cristais de quartzo, à semelhança das duas outras amostras ALP, se apresentam fortemente estirados, laminados, com contatos lobulados, retilíneos a irregulares nas faces paralelas à laminação e irregulares a serrilhados nas extremidades dos alongamentos dos cristais. Exibem forte extinção ondulante, raramente microfissurados, podendo apresentar microinclusões de lamelas de muscovita.

A muscovita, da mesma forma que nas anteriores, ocorre predominantemente em palhetas isoorientadas nas interfaces dos cristais de quartzo, podendo ser isoladas ou agrupadas segundo alinhamentos descontínuos ou mesmo contínuos e bem definidos, situações em que facilitam o deslocamento entre os acamamentos da rocha. Esta amostra, conforme mencionado, apresenta lamelas de muscovita com dimensões maiores que as das ALP- 1 e 2.

Os opacos, provavelmente representados pela hematita e limonita, formam cristais ultradiminutos, de aspectos pulverulentos com tendência de se concentrarem junto ou próximo às lamelas de muscovita. Localmente ocorrem pequenas e difusas manchas acastanhadas (hidróxidos de ferro) dispersas entre lamelas de muscovita e infiltrada nas interfícies de cristais de quartzo. Os cristais de turmalina e zircão são extremamente raros. Na Figura A 3 são apresentadas as fotomicrografias da amostra ALP 3.

Figura A 3 – Fotomicrografia da amostra ALP 3.



AMOSTRA STL 1

Muscovita Quartzito de coloração esbranquiçada a discretamente amarelo-acastanhada devido a presença de microleitos milimétricos a submilimétricos contínuos enriquecidos em micas e coloridos de castanho-avermelhado por óxidos/hidróxidos de ferro que se infiltram e se disseminam nas proximidades de seus contatos com as porções mais quartzosas da rocha.

Apresenta estrutura foliada/laminada bem proeminente, com textura granoblástica fina, predominantemente quartzoso com presença de discretos planos enriquecidos em muscovita lamelar, irregularmente espaçados, que facilitam a partição das placas. Os grãos minerais são inequidimensionais, com comprimentos (estiramento) destacadamente maiores em relação à largura, conforme segue:

- dimensões dos grãos perpendicularmente à laminação entre 0,04 mm e 0,4 mm, com predominância entre 0,1 e 0,3 mm;
- dimensões dos grãos de quartzo paralelos à laminação (estiramento dos grãos) entre 0,2 mm e 1,5 mm, com predominância entre 0,2 e 0,5 mm. As lamelas de muscovita apresentam dimensões bastante reduzidas, com médias entre 0,03 e 0,06 mm de extensão.

Obs.: comparativamente, as amostras deste muscovita quartzito (STL 1) são mais intemperizadas que os conjuntos das amostras dos outros dois muscovita quartzitos STL. Apesar de relativamente sã, e como descrito, as amostras deste muscovita quartzito apresenta

evidentes sinais de efeitos intempéricos, caracterizados pela presença de planos/níveis de coloração acastanhada que indicam oxidação de minerais opacos.

Composição mineralógica média e percentagem:

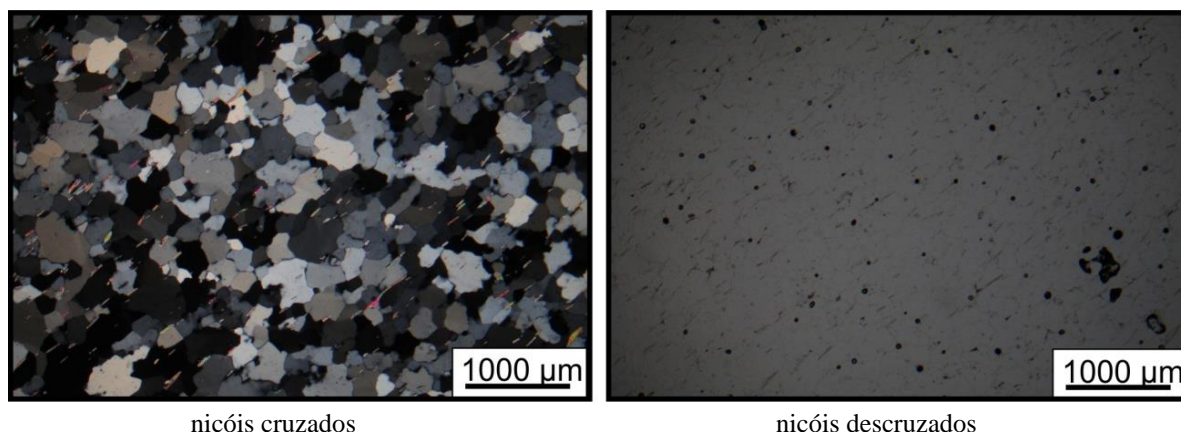
Quartzo	94,5
Muscovita	5,0
Opacos (magnetita/limonita/hidróxido de ferro)	0,5
Turmalina	Traços
Zircão	Traços
Rutilo	Traços

Microscopicamente os cristais de quartzo apresentam nítido estiramento, muitas vezes de aspecto laminado, isorientados, com contatos entre si lobulados, retilíneos a irregulares e mais raramente serrilhados. No geral predominam contatos mistos. A maioria dos cristais de quartzo apresenta extinção ondulante, sendo comuns agregados de quartzo com contatos poligonizados com fraca extinção ondulante. O grau de microfissuramento do quartzo é incipiente. São frequentes inclusões de minúsculas lamelas de muscovita e raras de opacos.

A muscovita ocorre predominantemente em palhetas isorientadas nas interfaces dos cristais de quartzo, podendo ser isoladas ou agrupadas segundo alinhamentos descontínuos e bem definidos, situações em que facilitam o deslocamento entre os acamamentos da rocha. Em alguns níveis mais intemperizados se mostram parcialmente sericitizadas.

Os opacos correspondem a magnetita (caracterizada pelo seu magnetismo), alguma limonita? (provavelmente magnetita oxidada), além da presença de manchas dadas por hidróxido de ferro com coloração castanha a avermelhada. A magnetita ocorre sob forma de minúsculos cristais arredondados a pouco alongados, isolados ou concentrados de forma mais ou menos pulverulenta nos níveis mais enriquecidos em palhetas de muscovita. Os cristais de turmalina, zircão e rutilo são bastante raros. Na Figura A 4 são apresentadas as fotomicrografias da amostra STL 1.

Figura A 4 – Fotomicrografia da amostra STL 1.



AMOSTRA STL 2

Muscovita Quartzito de coloração branca com planos de deslocamentos exibindo superfícies mais ou menos regulares com discreta tonalidade amarelada. Estas manchas, de aspecto difuso, refletem fraca oxidação do ferro provavelmente associado à magnetita.

Apresenta estrutura foliada/laminada proeminente, com textura granoblástica de granulação fina. Composicionalmente é essencialmente quartzoso com presença de níveis/planos relativamente enriquecidos em lamelas de muscovita isoorientadas e que facilitam a partição da rocha em placas com superfícies bem definidas. Como no caso da amostra anterior, os grãos minerais são inequidimensionais, com comprimentos (estiramento) destacadamente maiores em relação à largura, cujas dimensões são especificadas:

- dimensões dos grãos perpendicularmente à laminação entre 0,05 mm e 0,5 mm, com predominância entre 0,1 e 0,2 mm;
- dimensões dos grãos de quartzo paralelos à laminação (estiramento dos grãos) entre 0,2 mm e 1,0 mm, com predominância entre 0,2 e 0,45 mm. As lamelas de muscovita apresentam dimensões bastante reduzidas, com médias entre 0,03 e 0,05 mm de extensão, raramente atingindo 1,0 mm.

Obs.: os efeitos de alteração das amostras STL 2 analisadas são muito menores que o verificado no conjunto das amostras STL 1.

Composição mineralógica média e porcentagem:

Quartzo 95,0

Muscovita	4,6
Opacos (magnetita/limonita/hidróxido de ferro)	0,4
Turmalina	Traços
Zircão	Traços
Rutilo	Traços

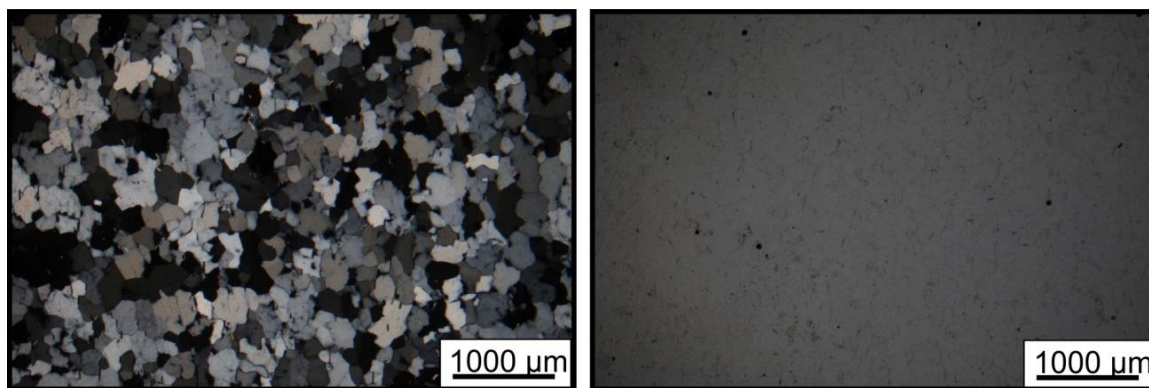
As características microscópicas são bastante similares às da amostra anterior (STL 1). Os cristais de quartzo apresentam nítido estiramento, muitas vezes de aspecto laminado, isoorientados, com contatos entre si lobulados, retilíneos a irregulares e mais raramente serrilhados, predominado, entretanto, os contatos mistos. No geral exibem extinção ondulante, e grau de microfissuramento incipiente. São frequentes inclusões de minúsculas lamelas de muscovita e raras de opacos.

A muscovita ocorre predominantemente em lamelas/palhetas isoorientadas nas interfaces dos cristais de quartzo, podendo ser isoladas ou agrupadas segundo alinhamentos descontínuos e bem definidos, situações em que facilitam o deslocamento entre os acamamentos da rocha. O grau de sericitização da muscovita é menos evidente que a da amostra STL 1.

Da mesma forma que a da amostra anterior, os opacos correspondem a magnetita (caracterizada pelo seu magnetismo), alguma limonita? (provavelmente magnetita oxidada), além da presença de manchas dadas por hidróxido de ferro (comparativamente em menores quantidades que as da lâmina STL 1) com coloração castanho-amarelada. A magnetita ocorre sob forma de minúsculos cristais arredondados a pouco alongados, isolados ou concentrados de forma mais ou menos pulverulenta nos níveis mais enriquecidos em palhetas de muscovita.

Os cristais de turmalina, zircão e rutilo são bastante raros. Na Figura A 5 são apresentadas as fotomicrografias da amostra STL 2.

Figura A 5 – Fotomicrografia da amostra STL 2.



nicóis cruzados

nicóis descruzados

AMOSTRA STL 3

Muscovita Quartzito de coloração branca com estrutura foliada a laminada, algo micáceo, de granulação fina, com presença de planos irregularmente espaçados (no caso das amostras analisadas com 2 a 3 cm de espaçamentos) pouco mais enriquecidos em lamelas de muscovita isoorientadas. A textura é granoblástica, localmente contendo discretos *ribbons* e filetes lenticulares descontínuos de agregados de quartzo poligonizados que em amostras de mão (aspecto macroscópico) exibem coloração branca levemente acinzentada.

Como no caso das amostras anteriores, são essencialmente quartzosos com presença de planos/níveis caracterizados por maior concentração de lamelas de muscovita isoorientadas.

Os grãos minerais são inequidimensionais, com comprimentos (estiramento) destacadamente maiores em relação à largura, cujas dimensões são especificadas:

- dimensões dos grãos perpendicularmente à laminação entre 0,1 mm e 0,6 mm, com predominância entre 0,2 e 0,4 mm;
- dimensões dos grãos de quartzo paralelos à laminação (estiramento dos grãos) entre 0,3 mm e 1,2 mm, com predominância entre 0,3 e 0,6 mm. Destaca-se, que nos *ribbons* e filetes com agregados de quartzo poligonizados as dimensões dos cristais de quartzo chegam a atingir dimensões entre 1,2 e 1,7 mm, e por vezes superam 2 mm. As lamelas de muscovita apresentam dimensões bastante reduzidas, com médias entre 0,03 e 0,05 mm de extensão.

Obs.: a amostra STL 3 é a mais sã (fresca) das três amostras STLs e, conseqüentemente, a mais coesa das três. Também apresenta granulação média pouco superior às duas outras. Destaca-se que a mostra STL 1 é a que apresenta maior fissilidade devido a presença de planos enriquecidos em muscovita contendo maiores teores de hidróxidos de ferro (indicaria maior efeito intempérico), o que a tornaria pouco mais friável que as STL 2 e STL 3.

Composição mineralógica média e porcentagem:

Quartzo	94,5
Muscovita	5,2
Opacos (magnetita/limonita/hidróxido de ferro)	0,3
Turmalina	Traços

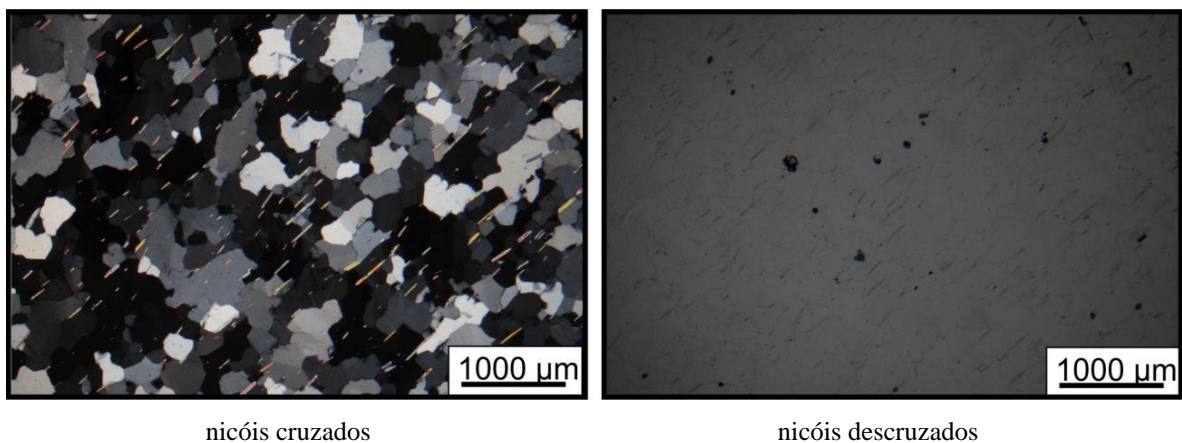
Zircão Traços
Rutilo Traços

As características microscópicas são bastante similares às das duas outras amostras STL. Os cristais de quartzo apresentam nítido estiramento, muitas vezes de aspecto laminado, isoorientados, com contatos entre si lobulados, retilíneos a irregulares e mais raramente serrilhados, predominado, entretanto, os contatos mistos. No geral exibem extinção ondulante, e grau de microfissuramento incipiente. São frequentes inclusões de minúsculas lamelas de muscovita e raras de opacos.

A muscovita ocorre predominantemente em lamelas/palhetas isoorientadas nas interfaces dos cristais de quartzo, podendo ser isoladas ou agrupadas segundo alinhamentos descontínuos e bem definidos, situações em que facilitam o deslocamento entre os acamamentos da rocha.

Os opacos correspondem a magnetita (caracterizada pelo seu magnetismo), alguma limonita? (provavelmente magnetita oxidada), além da presença de raros pontos de hidróxido de ferro com coloração acastanhada. A magnetita ocorre como minúsculos cristais arredondados a irregulares, isolados ou concentrados de forma mais ou menos pulverulenta nos níveis mais enriquecidos em palhetas de muscovita. Os cristais de turmalina, zircão e rutilo são igualmente bastante raros. Na Figura A 6 são apresentadas as fotomicrografias da amostra STL 3.

Figura A 6 – Fotomicrografia da amostra STL 3.

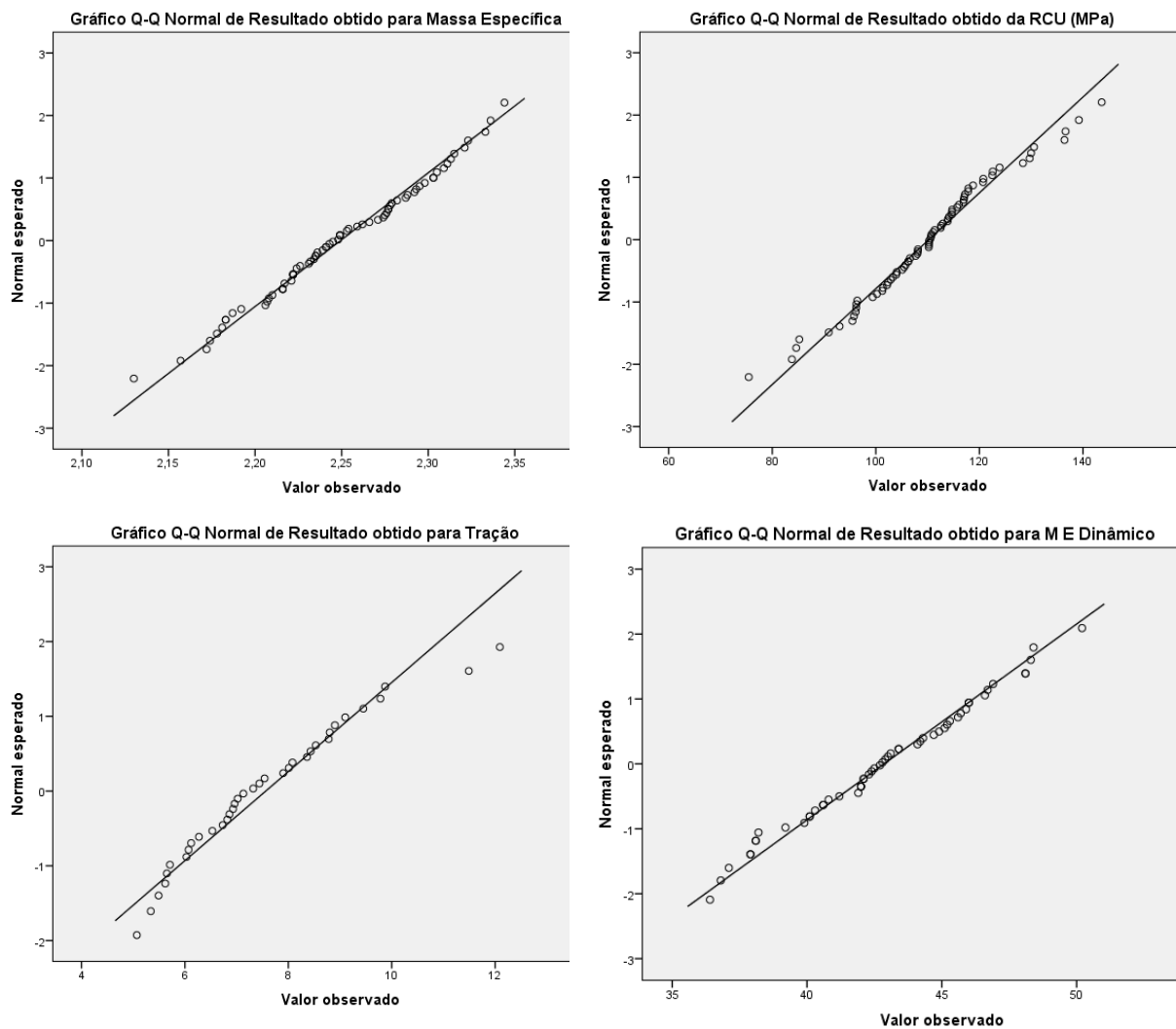


APÊNDICE B

- TESTE DE NORMALIDADE -

Os testes de normalidade foram realizados com auxílio do *software* SPSS 21.0[®] utilizando o método Kolmogorov-Smirnova. A distribuição dos dados referentes às normalidades nos ensaios de massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático, são apresentados na Figura.... e os resultados dos testes são apresentados na Tabela B 1.

Figura B 1 – Distribuição dos dados referentes às normalidades nos ensaios de massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático.



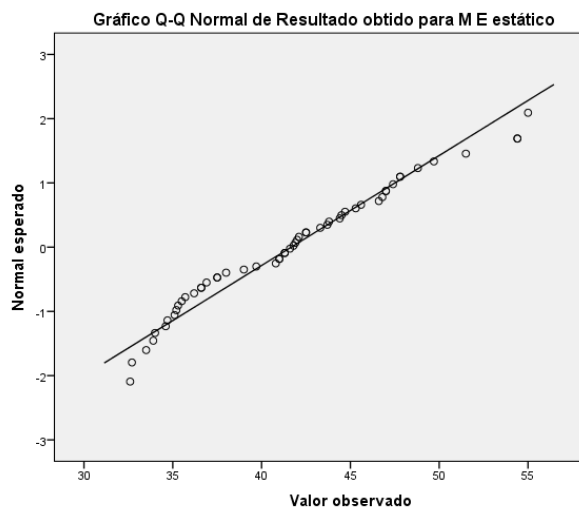


Tabela B 1 - Resultados dos testes de normalidade considerando o método Kolmogorov-Smirnov.

	Kolmogorov-Smirnov		
	Estatística	Graus de liberdade	p-valor
Resultado obtido para Massa Específica (g/cm^3)	0,062	72	0,20*
Resultado obtido para Resistência à compressão (MPa)	0,084	72	0,20*
Resultado obtido para Tração (MPa)	0,102	36	0,20*
Resultado obtido para módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	0,72	54	0,20*
Resultado obtido para módulo de elasticidade estático (GPa)	0,096	54	0,20*

Portanto, os dados referentes aos ensaios de massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático, apresentam normalidade, pois o p-valor = 0,200 (20 %) é maior do que $\alpha = 5\%$.