



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YANE COUTINHO LIRA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE BRITAGEM DOS AGREGADOS
NAS EXPANSÕES DA RAA

Recife

2019

YANE COUTINHO LIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE BRITAGEM DOS AGREGADOS
NAS EXPANSÕES DA RAA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Federal de Pernambuco, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas com ênfase em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- L768e Lira, Yane Coutinho.
Estudo da influência do processo de britagem dos agregados nas expansões da RAA/ Yane Coutinho Lira. - 2019.
172 folhas, il., quads., tabs., abr., sigl. e símb.
- Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Civil. 2. Reação álcali-agregado. 3. Britador. 4. Ensaio acelerado de barras de argamassa. 5. Ensaio acelerado de miniprismas de concreto. 6. Pó de agregado reativo. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-423

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE BRITAGEM DOS AGREGADOS
NAS EXPANSÕES DA RAA**

YANE COUTINHO LIRA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco e aprovada em 15 de agosto de 2019.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Dra. Nicole Pagan Hasparyk (Examinadora Externa)
FURNAS Centrais Elétricas S. A.

Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

À minha mãe, por tudo, sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Arnaldo Carneiro, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, orientação e apoio.

À Prof. Dra. Nicole Pagan Hasparyk, pelas valiosas contribuições ao trabalho e disponibilidade em sanar dúvidas.

Ao Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho, professor, mestre e amigo, pelas palavras e presença, mesmo que distante.

Ao Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo, pela ajuda durante o trabalho, preciosas observações e contribuições ao presente estudo.

À Universidade Federal de Pernambuco e ao Departamento de Engenharia Civil.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, pela bolsa concedida.

À Supermix, pelo fornecimento de materiais.

À Matchem, na pessoa de Henrique, pelo fornecimento do aditivo.

Ao ITEP, por disponibilizar equipamentos e instalações para a realização de ensaios.

À Cristóvão, pela companhia em tantos momentos. Sem sua ajuda, teria sido muito mais difícil e menos divertido.

Aos meus amigos da pós-graduação, em especial a Ronildo e Ayrton, pelos vários momentos compartilhados.

À Fernanda, a melhor companheira de estudos que eu poderia ter. Juntas dividimos muitos momentos e planos, e ainda vamos realizar muito.

À Rebecca, pela colaboração durante a pesquisa.

Ao Prof. Me. Rodrigo Mendes Patrício Chagas, pelos conselhos, ajuda e amizade em momentos decisivos da realização deste estudo.

À Marcelo e Filipe do LTM, por toda ajuda no processo de britagem, nos ensaios de DRX e análise granulométrica, além das discussões esclarecedoras e produtivas.

Aos técnicos Marcos e Jamilson, do ITEP, e Nadinho, da UFPE, pela disponibilidade e ajuda.

Ao professor Lauro Montefalco e a José Neto, pela ajuda na análise petrográfica.

A todos do Labtag, pela colaboração e ajuda na realização de ensaios.

À minha família, pela confiança e motivação.

Aos professores e colegas de curso, pelos ensinamentos compartilhados.

À Deus e a São Sebastião por iluminarem minha vida e me permitirem chegar a esse momento tão importante.

RESUMO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma patologia que ocorre quando álcalis presentes no cimento reagem com componentes reativos do agregado, formando um gel que, na presença de umidade, expande, o que pode levar a fissuras e posterior deterioração da estrutura. O meio mais utilizado para evitar sua ocorrência é a prevenção. Dentre as formas de prevenir, está a utilização de um agregado não reativo e para testar a reatividade do agregado, uma das técnicas mais usadas é o ensaio acelerado de barras de argamassa, uma vez que dura apenas 30 dias. Entretanto, estudos têm mostrado que este teste pode levar a falsos positivos ou falsos negativos. Portanto, para melhor compreender os fatores que podem afetar o resultado deste teste, o presente estudo teve como objetivo analisar a influência do tipo de britagem. Foi utilizado o britador de mandíbulas e de rolos para reduzir dois agregados à dimensão utilizada no ensaio, e os resultados foram comparados. Avaliou-se, também, a influência do tipo de britador com a utilização de adições em substituição ao cimento. Para tal, utilizou-se sílica ativa, nas porcentagens de 8% e 15%, e pó de agregado reativo, nas porcentagens de 10% e 20%, com e sem aditivo, a fim de verificar sua eficiência como agente mitigador das expansões da RAA e a influência do uso de aditivo. Em conjunto com o ensaio de barras, realizou-se análise petrográfica e ensaio acelerado de miniprismas de concreto, a fim de avaliar os resultados obtidos. Observou-se influência significativa do tipo de britador para as combinações de referência, devida à diferença nas áreas superficiais específicas e tamanhos das partículas geradas no processo de britagem. Esta influência mostrou-se variável dependendo do tipo e tamanho do agregado. As combinações com sílica e pó de agregado reativo, em geral, não foram influenciadas significativamente pelo tipo de britador utilizado. Foram obtidos resultados conflitantes para o ensaio de barras e de miniprismas, para as combinações com o uso de adições, indicando a influência do tamanho do agregado nos ensaios. Para as combinações com o uso de aditivo, houve aumento das expansões, mas não a um nível significativo. O tipo de britador mostrou-se como uma variável importante na análise de reatividade potencial de um agregado utilizando o ensaio de barras, podendo levar a classificações errôneas. Quando do uso de adições minerais, entretanto, esta variável não foi significativa.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Britador. Ensaio acelerado de barras de argamassa. Ensaio acelerado de miniprismas de concreto. Pó de agregado reativo.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction (AAR) is a pathology that occurs when the alkali present in cement reacts with reactive components of the aggregate, forming a gel which, in the presence of humidity, expands, what can lead to cracks and further deterioration of the structure. The best way to avoid its occurrence is prevention. Among the ways to prevent, it is the use of a non-reactive aggregates and, in order to test the reactivity of an aggregate, one of the most used techniques is the accelerated mortar bar test, once it takes only 30 days. Nevertheless, studies have shown that this test can have false positive or false negative results. Thus, in order to have a better understanding of factors that can affect the result of this test, the present study aimed to analyse the influence of the type of aggregate crushing. There were used jaw and roller crushers to reduce two aggregates to the dimension required by the test, and the results were compared. It was also evaluated the influence of the type of crusher with the use of mineral admixtures in replacement to cement. There were used silica fume in the percentages of 8% and 15%, and aggregate powder from reactive aggregate, in the percentages of 10% and 20% replacing cement, with and without chemical admixture, in order to verify its efficiency as a mitigating agent of AAR expansions and the influence of the use of the chemical admixture. Along with the mortar bar test, it was performed petrographic analysis and miniature concrete prism test, to evaluate the results obtained. It was observed a significant influence of the type of crusher for the reference combinations, due to the difference in the specific superficial areas and sizes of particles generated in the crushing process. This influence has showed to be variable depending on the type and size of the aggregate. The combinations with silica fume and reactive aggregate powder, in general, were not significantly influenced by the type of crusher used. There were obtained conflicting results for the mortar bar and the miniature concrete prism test for compositions with mineral admixtures, indicating the influence of the aggregate size in the expansion tests. For the combinations with the use of chemical admixture, there was an increase in expansions, but not up to a significant level. The type of crusher has showed as an important variable in the analysis of the reactive potential of an aggregate using the mortar bar test, and, if not considered, can lead to mistaken classifications. When using mineral admixtures, though, this variable was not significant.

Keywords: Alkali aggregate reaction. Crusher. Accelerated mortar bar test. Miniature concrete prism test. Reactive aggregate powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Ocorrência da reação álcali-agregado no mundo.....	27
Figura 2 –	Estruturas ao redor do mundo afetadas pela RAA.....	27
Figura 3 –	Fissuras em bloco de coroamento na Ponte Paulo Guerra em Recife – PE.....	31
Figura 4 –	(a) Bloco de fundação do Edifício Apolônio Sales em Recife. (b) Fundação de prédio afetada em Recife.....	31
Figura 5 –	Sintomas que podem ser observados em estruturas afetadas pela reação álcali-agregado.....	32
Figura 6 –	Esquema ilustrando os fatores necessários à ocorrência de RAA.....	33
Figura 7 –	Padrão fissuratório interno causado pela RAA.....	36
Figura 8 –	Efeito do teor de álcalis do concreto na expansão.....	39
Figura 9 –	Efeito da umidade relativa na expansão do concreto devida à reação álcali-agregado.....	40
Figura 10 –	(a) Sílica amorfa. (b) Sílica com estrutura cristalina.....	41
Figura 11 –	(a) Esquema da superfície do agregado. (b) Formação de grupos silanol..	42
Figura 12 –	(a) Formação de camada de ânions na superfície do agregado. (b) Álcalis reagindo com os ânions formados, produzindo gel sílico-alcálico.....	43
Figura 13 –	Força gerada pelo inchamento do gel no interior da matriz cimentícia.....	43
Figura 14 –	(a) Proporção péssima do agregado (A_{ag} = proporção de agregado reativo; $NaOH$ =quantidade de hidróxido alcalino por volume de agregado reativo). (b) Deslocamento da proporção péssima com a redução da alcalinidade.....	45
Figura 15 –	Resultados de expansão para agregados com presença de opala em diferentes faixas granulométricas.....	46
Figura 16 –	Mecanismo de quebra de britadores.....	48
Figura 17 –	Deformação de uma estrutura cristalina decorrente de tensões de tração ou compressão.....	49
Figura 18 –	Modelos de redução do tamanho de partículas.....	50
Figura 19 –	Fatura por britagem.....	51
Figura 20 –	Britador de mandíbulas.....	52
Figura 21 –	Esquema de britador de rolos.....	52

Figura 22 –	Possíveis formatos de partículas.....	53
Figura 23 –	Gráficos de expansão.....	54
Figura 24 –	Concentração de íons nas soluções dos poros a 6 meses com 0, 5, 10 e 15% de sílica ativa condensada.....	58
Figura 25 –	Concentração de íons nas fases sólidas a 6 meses com 0, 5, 10 e 15% de sílica ativa condensada.....	59
Figura 26 –	Composição química das principais adições minerais.....	60
Figura 27 –	Esquema mostrando o efeito de uma taxa rápida de formação do gel da RAA e uma taxa lenta de dissolução do gel em um período t.....	63
Figura 28 –	Efeito da RAA e atividade pozolânica de pós de agregados na resistência à compressão de concretos.....	64
Figura 29 –	Mapa geológico do estado de Pernambuco, com destaque para a cidade de Vitória de Santo Antão (1 – Vitória de Santo Antão; 2- Recife) e Jaboatão dos Guararapes.....	74
Figura 30 –	Características do maciço em pedreira na cidade de Vitória de Santo Antão.....	75
Figura 31 –	Agregado (a) Vitória de Santo Antão; (b) Jaboatão dos Guararapes.....	75
Figura 32 –	Fluxograma com as etapas da pesquisa.....	77
Figura 33 –	Composições analisadas no ensaio acelerado de barras de argamassa.....	77
Figura 34 –	Composições analisadas no ensaio acelerado de miniprismas de concreto.....	78
Figura 35 –	Britadores.....	82
Figura 36 –	Preparação da amostra do agregado Vitória para análise petrográfica.....	83
Figura 37 –	Frações granulométricas.....	84
Figura 38 –	Ensaio acelerado de barras de argamassa.....	87
Figura 39 –	Frações Granulométricas.....	89
Figura 40 –	Corpos de prova moldados com adições.....	90
Figura 41 –	Ensaio acelerado de miniprismas de concreto.....	92
Figura 42 –	Comparação das distribuições granulométricas dos materiais utilizados..	97
Figura 43 –	Curvas granulométricas de frações retidas nas peneiras de abertura de abertura 300 µm e 150 µm.....	99
Figura 44 –	Área superficial específica das frações 300 µm e 150 µm.....	100
Figura 45 –	Perda relativa de condutividade dos materiais analisados.....	101

Figura 46 –	Difratograma da brita Vitória.....	103
Figura 47 –	Difratograma da brita Jaboaão.....	103
Figura 48 –	Difratograma da sílica.....	104
Figura 49 –	Morfologia das partículas.....	106
Figura 50 –	Tamanho de partículas de diferentes agregados para faixas granulométricas.....	108
Figura 51 –	Agregado Vitória - Fotomicrografias a nicóis cruzados.....	110
Figura 52 –	(a) Fotomicrografia a nicóis cruzado evidenciando a extinção ondulante do quartzo (Qz).; (b) Quartzo recristalizado (Qz).....	111
Figura 53 –	Feições do agregado Jaboaão.....	113
Figura 54 –	Resultados de expansão do ensaio acelerado de barras para as composições de referência com britador de mandíbulas e rolos para o agregado Vitória e Jaboaão.....	116
Figura 55 –	Resultados de expansão do ensaio acelerado de barras para as composições de referência com britador de mandíbulas e rolos com repetição para o agregado Vitória.....	117
Figura 56 –	Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações de referência com o agregado Vitória.....	119
Figura 57 –	Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com o agregado Jaboaão.....	119
Figura 58 –	Resultados médios de expansão para as composições com sílica.....	122
Figura 59 –	Efeito da sílica na redução das expansões.....	123
Figura 60 –	Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com sílica.....	124
Figura 61 –	Resultados de expansão em barras de argamassa para as composições com pó de agregado reativo substituindo o cimento.....	126
Figura 62 –	Efeito do pó de agregado reativo na redução das expansões.....	127
Figura 63 –	Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com 20% de PAR.....	128
Figura 64 –	Resultados de expansão para as composições com 8% de sílica e aditivo..	131
Figura 65 –	Resultados de expansão para as composições com 15% de sílica e aditivo.....	131
Figura 66 –	Resultados de expansão para as composições com 10% de PAR e aditivo.	133

Figura 67 –	Resultados de expansão para as composições com 20% de PAR e aditivo.	133
Figura 68 –	Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com o agregado Vitória.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Características das diferentes normas relativas ao ensaio de barras acelerado.....	69
Tabela 2 –	Comparação das características dos diferentes ensaios para a determinação da reatividade potencial do agregado.....	72
Tabela 3 –	Classificação da forma do agregado de acordo com o índice de forma....	81
Tabela 4 –	Frações granulométricas para o ensaio acelerado.....	84
Tabela 5 –	Teor de aditivo obtido para cada combinação (com substituição em massa)	86
Tabela 6 –	Quantitativo de materiais nas combinações (porcentagem de adições em relação ao volume do cimento)	86
Tabela 7 –	Quantitativo de materiais nas combinações (porcentagem de adições em relação à massa do cimento)	87
Tabela 8 –	Limites normativos para as expansões referentes à RAA para o ensaio de barras.....	88
Tabela 9 –	Frações granulométricas para o ensaio dos miniprismas.....	89
Tabela 10 –	Resultados de massa unitária das misturas de agregados.....	91
Tabela 11 –	Quantitativo dos materiais utilizados nas combinações (porcentagem de adições em relação ao volume do cimento)	91
Tabela 12 –	Limites normativos para as expansões referentes à RAA para o ensaio de iniprismas.....	93
Tabela 13 –	Caracterização do aditivo à base de policarboxilatos.....	94
Tabela 14 –	Massas específicas dos ateriais.....	94
Tabela 15 –	Resultados de área superficial específica dos materiais.....	95
Tabela 16 –	Diâmetros característicos dos materiais utilizados.....	97
Tabela 17 –	Diâmetros característicos das frações de agregado analisadas.....	98
Tabela 18 –	Dados do ensaio de condutividade elétrica.....	101
Tabela 19 –	Caracterização química dos materiais utilizados por meio de espectrometria FRX (em %)	102
Tabela 20 –	Equivalente alcalino dos materiais utilizados	102
Tabela 21 –	Índice de forma dos agregados.....	105

Tabela 22 –	Relação entre o comprimento e a largura de face das partículas (relação de aspecto)	107
Tabela 23 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras na idade de 30 dias para as combinações de referência do agregado Vitória e Jaboaão...	118
Tabela 24 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de miniprismas para as combinações de referência do agregado Vitória e Jaboaão.....	120
Tabela 25 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras na idade de 30 dias para as combinações com sílica, avaliando a influência do tipo de britador.....	124
Tabela 26 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com sílica, avaliando a influência da porcentagem de adição.....	125
Tabela 27 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com PAR, avaliando a influência do tipo de britador.....	129
Tabela 28 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com PAR, avaliando a influência da porcentagem de adição.....	129
Tabela 29 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com sílica, avaliando a influência do aditivo.....	132
Tabela 30 –	Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com PAR, avaliando a influência do aditivo.....	134

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Usinas/Barragens afetadas pela RAA no Brasil.....	29
Quadro 2 –	Rochas, minerais e constituintes sintéticos reativos.....	34
Quadro 3 –	Reações pozolânicas e hidráulicas de MCS's.....	61
Quadro 4 –	Ensaio de caracterização física realizados nos materiais.....	78
Quadro 5 –	Combinações agregado/adição adotadas (porcentagem de adições em relação à massa do cimento).....	85
Quadro 6 –	Combinações agregado/adição adotadas (porcentagem de adições em relação ao volume do cimento).....	86
Quadro 7 –	Combinações agregado/adição adotadas (porcentagem de adições em relação à massa do cimento).....	90
Quadro 8 –	Caracterização Mineralógica.....	104
Quadro 9 –	Síntese da análise petrográfica do agregado Vitória para o grupo 1.....	111
Quadro 10 –	Síntese da análise petrográfica do agregado Vitória para o grupo 2.....	112
Quadro 11 –	Síntese da análise petrográfica para o agregado Jabotão.....	114
Quadro 12 –	Quadro resumo das classificações relativas à reatividade potencial e eficiência da mitigação das combinações aos 30 dias para o ensaio acelerado de barras de argamassa.....	136
Quadro 13 –	Quadro resumo das classificações relativas à reatividade potencial e eficiência da mitigação das combinações aos 56 dias (84 dias para o Agregado Jabotão) realizadas para o ensaio acelerado de miniprismas de concreto.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Acesita	Companhia Aços Especiais Itabira
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio – Grupo Votorantim
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.
EMBASA	Empresa Baiana de Água e Saneamento
ICAAR	International Conference in Alkali Aggregate Reaction in Concrete
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LABGEM	Laboratório de Gemologia
LABTAG	Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
LTM	Laboratório de Tecnologia Mineral
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
NEG LABISE	Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis
NBR	Norma Brasileira
NS	Não significativo no teste t de Student
PALEOLAB	Laboratório de Paleontologia
PAR	Pó de Agregado Reativo
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAC	Reação Álcali-Carbonato
RAS	Reação Álcali-Sílica
S	Significativo no teste t de Student

SABESP

Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

UHE

Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
BaO	Óxido de Bário
CaO	Óxido de Cálcio; Cal
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de Cálcio
C_3A	Aluminato Tricálcico; Fase Aluminato
C_2S	Silicato Dicálcico; Belita
C-S-H	Silicato Cálcico Hidratado
Cr_2O_3	Óxido de Cromo (III)
CuO	Óxido de Cobre (II)
Fe_2O_3	Óxido de Ferro (III)
Ga_2O_3	Óxido de Gálio (III)
K^+	Cátion Potássio
K_2O	Óxido de Potássio
Li_2CO_3	Carbonato de Lítio
LiF	Fluoreto de Lítio
LiOH	Hidróxido de Lítio
LiNO_3	Nitrato de Lítio
MgO	Óxido de Magnésio
MnO	Óxido de Manganês (II)
Na^+	Cátion Sódio
Na_2O	Óxido de Sódio
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$	Equivalente Alcalino
Nb_2O_5	Óxido de Nióbio (V)
NiO	Óxido de Níquel (II)
OH^-	Íon Hidroxila
PbO	Óxido de Chumbo
P_2O_5	Pentóxido de Fósforo

Rb_2O	Óxido de Rubídio
SiO_2	Óxido de Silício; Sílica
SO_3	Trióxido de enxofre; Óxido Sulfúrico
SO_4^{-2}	Ânion Sulfato
SrO	Óxido de Estrôncio
TiO_2	Dióxido de Titânio
ZnO	Óxido de Zinco
ZrO_2	Dióxido de Zircônio
V_2O_5	Pentóxido de Vanádio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA.....	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	HISTÓRICO.....	26
2.2	DEFINIÇÃO.....	32
2.2.1	Agregado Reativo	33
2.2.2	Teor de Álcalis do Cimento	36
2.2.3	Umidade	39
2.3	TIPOS DE RAA.....	40
2.4	MECANISMOS DA RAA.....	41
2.5	FATORES INTERVENIENTES.....	44
2.5.1	Teor e Dimensão Péssimos	44
2.5.2	Temperatura	46
2.5.3	Influência do Uso de Aditivos	47
2.6	COMINUIÇÃO DO AGREGADO.....	47
2.6.1	Processo de Fragmentação	48
2.6.2	Mecanismos de Fragmentação	49
2.6.3	Equipamentos de Britagem	51
2.6.4	Morfologia das Partículas	53
2.7	MITIGAÇÃO.....	55
2.7.1	Adições Minerais	56
2.7.1.1	Efeito das Adições Minerais.....	56
2.7.1.2	Fatores que Interferem no Efeito de Adições Minerais.....	59
2.7.1.2.1	<i>Finura</i>	59
2.7.1.2.2	<i>Teor Péssimo de Adição</i>	60
2.7.1.3	Tipos de Adições Minerais.....	60
2.7.2.3.1	<i>Pó de Agregado Reativo</i>	62

2.7.2	Adições Químicas.....	65
2.8	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL REATIVO E DA EFICIÊNCIA DA MITIGAÇÃO.....	67
2.8.1	Análise Petrográfica.....	67
2.8.2	Ensaio Acelerado das Barras de Argamassa.....	68
2.8.3	Ensaio de Prismas de Concreto.....	70
2.8.4	Ensaio Acelerado de Prismas de Concreto.....	70
2.8.5	Ensaio Acelerado dos Miniprismas de Concreto.....	71
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	73
3.1	MATERIAIS.....	73
3.1.1	Cimento.....	73
3.1.2	Agregado Graúdo.....	73
3.1.3	Agregado Miúdo.....	76
3.1.4	Água.....	76
3.1.5	Adições Minerais.....	76
3.1.6	Aditivo.....	76
3.2	MÉTODOS.....	76
3.2.1	Caracterização Física.....	78
3.2.2	Caracterização Química.....	79
3.2.3	Caracterização Mineralógica.....	80
3.2.4	Caracterização Morfológica.....	81
3.2.5	Cominuição do Agregado Graúdo.....	81
3.2.6	Avaliação da Reatividade Potencial e da Eficiência de Adições na Mitigação.....	82
3.2.6.1	Análise Petrográfica do Agregado.....	83
3.2.6.2	Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa.....	84
3.2.6.2.1	<i>Preparo dos Corpos de Prova.....</i>	84
3.2.6.3	Ensaio Acelerado dos Miniprismas de Concreto.....	89
3.2.6.3.1	<i>Preparo dos Corpos de Prova.....</i>	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	94
4.1.1	Massa Específica e Absorção.....	94
4.1.2	Área Superficial Específica e Distribuição Granulométrica.....	95

4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	100
4.2.1	Avaliação Indireta da Pozolanidade por Condutividade Elétrica.....	101
4.2.2	Espectrometria por Fluorescência de Raios X.....	102
4.3	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	103
4.4	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA.....	105
4.5	AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POTENCIAL E EFICIÊNCIA DE ADIÇÕES NA MITIGAÇÃO.....	110
4.5.1	Análise Petrográfica.....	110
4.5.1.1	Agregado Vitória.....	110
4.5.1.2	Agregado Jaboatão.....	112
4.5.2	Ensaio Acelerados.....	116
4.5.2.1	Composições de Referência.....	116
4.5.2.2	Combinações com Sílica.....	121
4.5.2.3	Combinações com Pó de Agregado Reativo.....	125
4.5.2.4	Composições com Aditivo.....	130
4.5.2.5	Considerações.....	135
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	137
5.1	CONCLUSÕES.....	137
5.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	140
	REFERÊNCIAS.....	142
	APÊNDICE A – TABELAS DE EXPANSÃO: ENSAIO ACELERADO DE BARRAS DE ARGAMASSA.....	155
	APÊNDICE B – TABELAS DE EXPANSÃO: ENSAIO ACELERADO DE MINIPRISMAS DE CONCRETO.....	169
	APÊNDICE C – REATIVIDADE POTENCIAL DA AREIA.....	172

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo. Entre as suas vantagens frente a outros materiais destaca-se a resistência à água, a facilidade de moldagem em diferentes formatos e tamanhos e sua disponibilidade e baixo custo (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A crença de que o concreto é um material eterno deu lugar ao conhecimento de que, ao longo do tempo, ele é instável, podendo alterar suas propriedades físicas e químicas de acordo com a interação dos seus constituintes e os condicionantes do meio ambiente (SOUZA e RIPPER, 1998). Dentre os vários mecanismos de deterioração que podem afetar a durabilidade de uma estrutura de concreto, destaca-se a reação álcali-agregado.

1.1 JUSTIFICATIVA

A reação álcali-agregado foi primeiro descrita por Stanton, na década de 1940 e, desde então, tem sido foco de inúmeras pesquisas. Trata-se de uma reação entre os álcalis do cimento e componentes reativos do agregado. Esta reação forma um gel que, na presença de umidade, se dilata e produz tensões na matriz cimentícia. Caso a pressão exercida seja maior do que a resistência à tração do concreto, ocorre o aparecimento de fissuras.

Gomes (2008) afirma que a reação álcali-agregado constitui-se, internacionalmente, no segundo maior investimento de recuperação de estruturas de concreto, com os efeitos da corrosão em primeiro lugar. Figueirôa e Andrade (2007) relatam que, de acordo com os organizadores da 13th International Conference in Alkali Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), realizada em 2008, estima-se que o custo anual de reabilitação e substituição de obras com RAA é de 2,6 bilhões de dólares.

Caso ocorra a reação, ainda não há como pará-la; tem-se, apenas, meios de desacelerá-la. A melhor forma de evitar esta patologia é, portanto, a prevenção. Pode-se, para tal, utilizar um agregado não reativo.

Foram desenvolvidos vários testes para determinar a reatividade do agregado, de modo que é possível utilizar com certo grau de segurança agregados comprovadamente não reativos. O mais utilizado é o ensaio acelerado das barras de argamassa, devido à sua rapidez, com a obtenção de resultados em 30 dias de ensaio. Contudo, vários autores têm obtido resultados falsos positivos ou falsos negativos. Desta forma, meios de compreender melhor os resultados obtidos no ensaio são necessários para sua correta interpretação e aplicabilidade.

Além disso, nem sempre há disponibilidade de outro agregado na região da obra, e métodos consagrados na mitigação da RAA, como o uso de adições minerais e químicas, podem não ser economicamente viáveis (CYR, RIVARD e LABRECQUE, 2009; HEWLETT, 2004). Como alternativa, apresenta-se a utilização de pós de agregados reativos, cujo uso vem sendo estudado desde a primeira publicação relativa à reação álcali-agregado, por Stanton (1940).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente estudo estão apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

A pesquisa objetivou analisar a influência do tipo de britador e, conseqüentemente, a morfologia das partículas britadas, assim como o comportamento das expansões quando do uso de adições minerais, nos resultados de ensaios acelerados para a determinação do potencial deletério de agregados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho estão destacados a seguir:

- Analisar a influência do tipo de britador nos resultados de expansão dos ensaios acelerados de barras de argamassa e de miniprismas de concreto, utilizando-se o britador de mandíbulas e o britador de rolos;
- Correlacionar os resultados dos ensaios acelerados com a análise petrográfica;
- Avaliar a influência do tipo de britador em combinações com o uso de sílica ativa e pó de agregado reativo;
- Analisar a influência do uso de pó de agregado reativo como mitigador da reação álcali-agregado, comparando sua ação com a da sílica ativa;
- Avaliar a influência do uso de aditivo na dispersão das adições e seu efeito nas expansões da RAA;
- Comparar os resultados obtidos pelo ensaio acelerado de barras com os obtidos pelo ensaio acelerado de miniprismas de concreto, verificando se há concordância.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos:

No Capítulo 1 apresenta-se uma introdução com a justificativa da pesquisa, relatando a importância do estudo da reação álcali-agregado, assim como o estudo de seus métodos de ensaio utilizados para uma correta análise deste fenômeno, além dos objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte da reação álcali-agregado. Aborda-se definição, tipos, mecanismo, fatores intervenientes e fragmentação de partículas de agregado. São descritas formas de mitigação da reação álcali-agregado, com destaque para as adições minerais e seu mecanismo de atuação e apresentam-se os métodos para determinação da reatividade potencial em agregados, argamassa e concreto e eficiência da mitigação quando do uso de adições.

No Capítulo 3 estão descritos os materiais utilizados, sua caracterização, os métodos, análises e ensaios utilizados, além de normas e procedimentos adotados.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados das análises e ensaios realizados.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões da pesquisa, seguidas de sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre as causas de manifestações patológicas no concreto, pode-se citar as causas intrínsecas, as quais são inerentes à estrutura e englobam tanto falhas humanas quanto causas naturais próprias ao concreto, e as causas extrínsecas, que são decorrentes de ações externas (SOUZA e RIPPER, 1998). As causas intrínsecas, especificamente as causas naturais, podem ser químicas, físicas, biológicas ou relativas à natureza porosa do concreto. Entre as reações químicas, destaca-se a reação álcali-agregado (RAA) que, quando classificada como reação álcali-sílica (RAS), trata-se de uma reação que ocorre entre os álcalis do cimento e certas formas de sílica reativa presentes no agregado. Tal reação leva à formação de um gel higroscópico e expansivo que, na presença de umidade, provoca tensões na matriz cimentícia, provocando a fissuração da estrutura. Uma vez desencadeada a reação, ainda não se conhece uma forma de mitigá-la, apenas de desacelerá-la, o que torna a prevenção a estratégia mais eficaz contra sua ocorrência. Neste trabalho, trata-se apenas da reação álcali-sílica, sendo aqui designada como reação álcali-agregado.

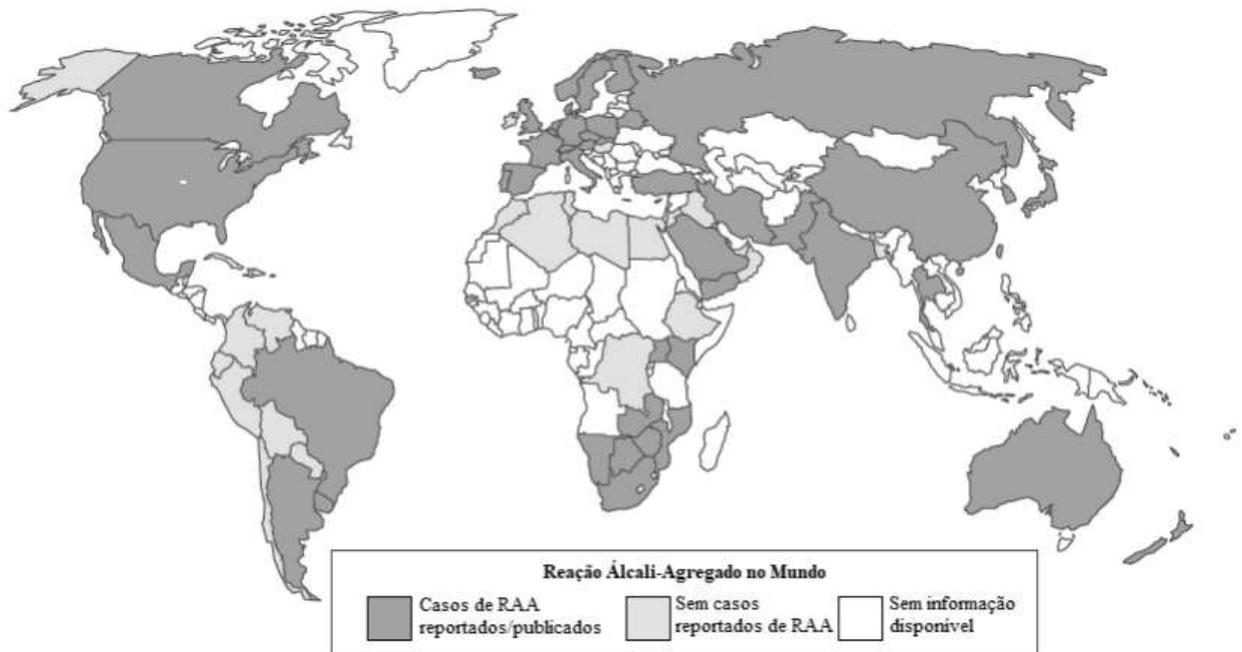
2.1 HISTÓRICO

Desde os tempos romanos, utilizam-se formas de concreto como material de construção durável. Apesar da grande durabilidade deste material, com o passar do tempo, observou-se que ele se deteriorava; buscou-se, então, identificar as causas responsáveis. No início do século XIX, observou-se que o gelo/degelo e a água do mar eram causas de deterioração de estruturas de concreto. Desta forma, o que não podia ser atribuído a estas causas permanecia sem explicação (SWAMY, 1992).

Entre 1920 e 1930, houve vários casos de fissuração severa em estruturas de concreto na Califórnia, Estados Unidos, apesar de serem construções recentes e que seguiram padrões aceitáveis de construção e controle de qualidade dos materiais. Blanks e Kennedy (1955 apud MEHTA e MONTEIRO, 2014) descreveram alguns dos primeiros casos de reação álcali agregado nos Estados Unidos. Em 1940, após estudar estes casos, Stanton (1940) demonstrou a existência de uma reação entre álcalis e agregado, sendo um processo deletério intrínseco aos materiais do concreto. Desde então, exemplos de ocorrência desta reação em diversas partes do mundo foram reportados, indicando que esta poderia ser uma das causas de deterioração em estruturas em contato com água, como pontes, barragens e diques (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Inúmeras pesquisas foram desenvolvidas para a identificação dos minerais deletérios, mecanismos da reação, diagnóstico, métodos de ensaio e avaliação dos efeitos da reação, primeiramente nos Estados Unidos e, em seguida, expandindo para a Europa, Canadá e outras partes do mundo. Em 1974, ocorreu a primeira conferência internacional para discutir acerca da reação álcali-agregado (ICAAR), em Copenhague, ocorrendo até os dias atuais (SWAMY, 1992). A Figura 1 ilustra os países nos quais já foram reportados casos de RAA e a Figura 2 apresenta alguns casos de ocorrência ao redor do mundo.

Figura 1 – Ocorrência da reação álcali-agregado no mundo.



Fonte: SIMS e POOLE, 2017.

Figura 2 – Estruturas ao redor do mundo afetadas pela RAA.



(a)

(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: (a) CHI, 2016; (b) THOMAS *et al.*, 2013; (c) (d) (e) (f) SIMS; POOLE, 2017.

(a) Shek Wu Hui Treatment plant, na China. A construção terminou em 1981 e em 1991 a RAA foi identificada. (b) Fissuras dos pilares com RAA, colmatados com resina epóxi, em usina hidrelétrica na Noruega. (c) Ponte em Paltanmäki, na Finlândia, com RAA penetrando através da laje do tabuleiro, com exsudação do gel. (d) Viaduto Marsh Mills, perto de Plymouth, Inglaterra, mostrando uma escavação para revelar o bloco de fundação severamente fissurado, muito abaixo do nível local do lençol freático. (e) Fissura em mapa em pavimento de concreto, na Alemanha. (f) Fissuras longitudinais devidas à RAA em elemento pré-moldado protendido na Austrália.

No Brasil, a usina Peti, de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), foi a primeira estrutura na qual se confirmou a existência de expansão do concreto decorrente de RAA, apresentando fissuras tipo “mapa” e alteamento de crista (ANDRIOLO, 2000; MAGALHÃES e MOURA, 1997). A primeira usina a ser monitorada para RAA foi a Usina Apolônio Sales (Moxotó) (ANDRIOLO, 2000). Em relação à prevenção, a Usina Hidroelétrica de Jupuíá (atualmente UHE Engenheiro Souza Dias) foi a primeira obra na qual foram adotadas medidas preventivas, ao identificar, ainda em estudos preliminares, a possibilidade de ocorrência da reação, durante o período de 1962 a 1969 (ANDRIOLO, 2000; BATTAGIN, I., BATTAGIN, A. e SBRIGHI NETO, 2009; OLIVEIRA, SALLES e ANDRIOLO, 1997). Devido às limitações existentes à época em relação aos cimentos comerciais, a CESP, proprietária da usina, optou por instalar uma usina de moagem do clínquer e um sistema de

produção de pozolanas para a produção do cimento a ser utilizado (OLIVEIRA, SALLES e ANDRIOLO, 1997). Nesta e em outras usinas de propriedade da CESP, o uso de pozolanas mostrou-se efetivo na prevenção de danos causados pela RAA, sendo exemplos de sucesso (BATTAGIN, I., BATTAGIN, A. e SBRIGHI NETO, 2009). O Quadro 1 apresenta algumas obras hidráulicas brasileiras afetadas pela RAA.

Quadro 1 – Usinas/Barragens afetadas pela RAA no Brasil.

UHE/Barragem	UF	Fim da Construção	Ano de Indícios/Evidências da RAA	Agregado	Companhias
Barragem de Peti	MG	1946	1964	Granito- gnaisse	CEMIG
Barragem Guanhões – UHE Salto Grande	MG	1953	2001	Gnaisse	
UHE Jaguará	SP	1971	1996	Quartzito	
UHE Jaguari	SP	1977	1985/1990	Gnaisse Milonitizado	CESP
UHE Ilha dos Pombos	RJ	1924	1991	Gnaisse	LIGHT Serviços de Eletricidade
UHE Santa Branca	SP	1960	1995	Biotita, Gnaisse Cataclástico	
UHE Paulo Afonso I	BA	1955	1978	Granito, biotita gnaisse e biotita granito	CHESF
UHE Paulo Afonso II	BA	1967	1978	Granito e anfibólio gnaisse	
UHE Paulo Afonso III	BA	1973	1978	Granito e biotita granito	
UHE Paulo Afonso IV	BA	1979	1985	Granito, biotita gnaisse, biotita granito, anfíbolito e anfibólio biotita gnaisse	
UHE Usina Apolônio Sales (Moxotó)	AL	1977	1980	Granito e biotita gnaisse	
UHE Pedra	BA	Barragem: 1968 Casa de força: 1978	1980	Granada granulito	
UHE Sobradinho	BA	1981	2000	Quartzito	
Barragem Reguladora Pedro Beicht	SP	1932	1965	Biotita gnaisse	SABESP
Barragem Atibainha	SP	1973	1992	Biotita gnaisse cataclástico	
Barragem Cascata	SP	1976	1992	Granito - gnaisse	
Barragem Jaguari	SP	1982	1992	Gnaisse milonitizado	
Barragem Paiva Castro	SP	1972	1992	Biotita granito-gnaisse	
Barragem Ribeirão do Campo	SP	1962	1992	Biotita gnaisse cataclástico	
Barragem de Tapacurá	PE	1975	1990	Granito e Gnaisse Cataclasados	COMPESA

UHE/Barragem	UF	Fim da Construção	Ano de Indícios/Evidências da RAA	Agregado	Companhias
Barragem Reguladora Billings-Pedra	SP	1937	1992	Granito	EMAE
Usina Elevatória de Traição	SP	1940	1980	Milonito	
Usina Elevatória de Pedreira	SP	1937	2000	Gnaiss/milonito	
Barragem de Pirapora	SP	1956	1998	Gnaiss	
Barragem Rio das Pedras	SP	1926	1992	Gnaiss/milonito	
UHE Rasgão	SP	1925	Nd	Granito/Filito	
UHE Furnas	MG	Barragem: 1963 Etapa 1: 1965 Etapa 2: 1974	1976	Quartzito	FURNAS Centrais Elétricas
UHE Mascarenhas de Moraes	MG	Etapa 1: 1957 Etapa 2: 1969	1994	Quartzito	
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho (antes UHE Estreito)	SP	Etapa 1: 1969 Etapa 2: 1972	1994	Quartzito	
UHE Porto Colômbia	MG	1973	1985	Basalto/Seixo de quartzito	
UHE Jurupará	SP	1970	1995	Gnaiss; biotita granito.	CBA
UHE Sá Carvalho	MG	1951	1995	Granito	Sá Carvalho S. A. (anteriormente Acesita)
Barragem Joanes II	BA	1971	1988	Gnaiss, migmatito e granulito	EMBASA

Fonte: Adaptado de ANDRIOLO, 2000; COUTO, 2008; GALLETI *et al.*, 1997; HASPARYK, 2011; MARQUES, 2009.

*Não disponível.

Além da grande quantidade de barragens e usinas hidrelétricas identificadas no Brasil com a presença de RAA, houve casos em outros tipos de estrutura, como por exemplo fundações, destacando-se os casos na cidade de Recife, Pernambuco.

O primeiro caso de RAA na capital pernambucana foi constatado na Ponte Paulo Guerra em 1999, tendo sido construída em 1977. A ponte apresentou sinais de deterioração no tabuleiro, superestrutura e subestrutura (HELENE, CARVALHO e PACHECO, 2017) e foi identificada a RAA nos blocos de coroamento da fundação, com forte fissuração em mapa, como visto na Figura 3, com fissuras de 5 mm e alcançando grandes profundidades (FIGUEIRÔA e ANDRADE, 2007; GOMES, 2008).

Figura 3 – Fissuras em bloco de coroamento na Ponte Paulo Guerra em Recife – PE.



Fonte: FIGUEIRÔA e ANDRADE, 2007; HELENE, CARVALHO e PACHECO, 2017.

Após o ocorrido na ponte, houve o desabamento do edifício Areia Branca, em 2004, no qual foram constatados indícios de ocorrência de reação álcali-agregado. Embora o laudo técnico tenha determinado que a RAA nas fundações tinha proporções insuficientes para produzir fissuração no concreto, tendo a ruína ocorrido por falhas construtivas (GUSMÃO *et al.*, 2005; PIRES SOBRINHO e OLIVEIRA, 2009), este fato fez com que várias edificações construídas há algum tempo buscassem vistoriar suas fundações (GOMES, 2008; SILVA, 2007); a partir disto, foram descobertos vários casos de RAA em elementos de fundação, blocos de coroamento ou sapatas, com estados fissuratórios variáveis, como apresentado na Figura 4. Em aproximadamente 20 edifícios residenciais e comerciais constatou-se o comprometimento da fundação pela reação álcali-agregado (SILVA, 2007).

Figura 4 – (a) Bloco de fundação do Edifício Apolônio Sales em Recife. (b) Fundação de prédio afetada em Recife.



(a)

(b)

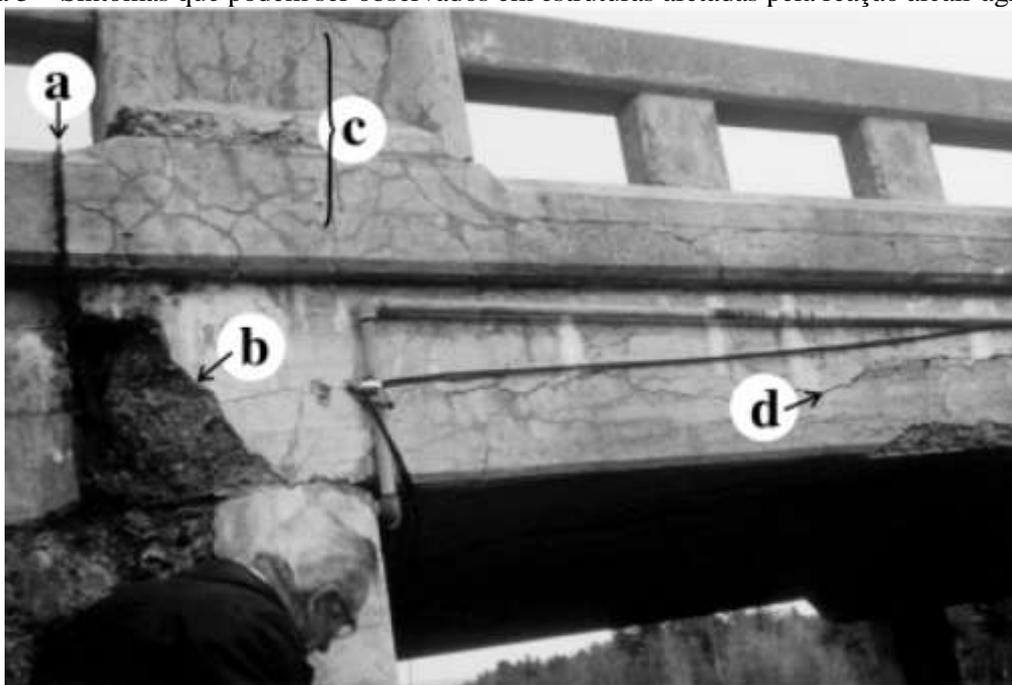
Fonte: (a) SILVA, 2007; (b) GOMES, 2008

2.2 DEFINIÇÃO

A RAA é uma reação que ocorre entre álcalis presentes no cimento e agregados reativos, produzindo um gel capaz de inchar ao adsorver água, provocando tensões que levam à expansão e formação de fissuras no concreto (LI, 2011). A quantidade de gel e a pressão causada por seu inchamento são variáveis e dependem de vários fatores, como temperatura, tipo e proporção dos materiais reativos e composição do gel. Em geral, essa pressão é suficiente para gerar microfissuração no concreto, que pode levar à ruptura da estrutura ou do elemento (SWAMY, 1992).

Esta patologia causa expansão e fissuração do concreto e diminui a resistência à tração e o módulo de elasticidade, o que pode comprometer a capacidade estrutural (LI, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014; SWAMY, 1992). Inicialmente, há deslocamentos, seguidos de fissuração, além de exsudação de gel viscoso, produto da reação (LI, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Em concreto simples, a RAA produz um padrão irregular de fissuras, semelhantes a fronteiras em um mapa, sendo conhecidas como fissuras em mapa. Já em concreto armado, as fissuras são paralelas à direção das barras (BLIGHT e ALEXANDER, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014; SWAMY, 1992). Alguns dos sintomas citados estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5 – Sintomas que podem ser observados em estruturas afetadas pela reação álcali-agregado.



Fonte: DEMERCHANT, FOURNIER e STRANG, 2000.

(a) Fechamento de juntas de expansão; (b) deslocamento do concreto; (c) fissuração em mapa e (d) fissuras longitudinais.

O gel proveniente da reação, quando fresco, é transparente ou amarronzado, com aspecto resinoso. Ao perder a umidade, torna-se branco, sendo confundido, por vezes, com depósitos carbonáticos, chamados de eflorescência (SWAMY, 1992). É um produto de composição variável, contendo silício, sódio e potássio e, em algumas situações, cálcio (FERREIRA, 2003). Cabe salientar que a formação do gel, por si só, não leva à fissuração. Isto acontece apenas quando há a absorção de água pelo gel, que leva à sua expansão. Caso a tensão provocada pelo gel seja maior que a capacidade resistente do concreto, ocorre o aparecimento de fissuras. Segundo a ACI 221.1R (ACI, 1998), as pressões geradas por expansão são da ordem de 4 MPa. Tem-se, portanto, que, para a ocorrência da RAA, é necessário que se tenha álcalis, agregado reativo e umidade, e, relativo a cada fator condicionante, existem aspectos a serem considerados, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema ilustrando os fatores necessários à ocorrência de RAA.



Fonte: Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014; PAN *et al.*, 2012.

A seguir, são discutidos estes fatores.

2.2.1 Agregado Reativo

Quanto mais quimicamente desorganizada e instável a estrutura dos minerais que compõem o agregado, maior a probabilidade de o agregado ser reativo (HELENE, CARVALHO e PACHECO, 2017). Dentre os minerais considerados reativos, destaca-se opala (uma forma hidratada e altamente desordenada de cristobalita), obsidiana, cristobalita, tridimita, calcedônia, sílex, andesita, riolito e quartzito tensionado ou metamórfico, em ordem decrescente de reatividade (HEWLETT, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2014). O quadro 2 apresenta um detalhamento destes minerais.

Quadro 2 – Rochas, minerais e constituintes sintéticos reativos.

Constituintes Reativos	Composição Química	Características Físicas
Opala	SiO ₂ nH ₂ O	Amorfa
Calcedônia	SiO ₂	Microcristalina a criptocristalina; normalmente fibrosa
Certas formas de quartzo	SiO ₂	Microcristalina a criptocristalina; Cristalina, mas intensamente fraturada, deformada e/ou preenchida com inclusões
Cristobalita	SiO ₂	Cristalina
Tridimita	SiO ₂	Cristalina
Vidro presente em riolitos, dacitos, latitos ou andesitos ou produtos de devitrificação criptocristalinos	Silicosos, com proporções menores de Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , alcalinos, e alcalinos terrosos	Vidro ou material criptocristalino como a matriz de rochas vulcânicas ou fragmentos em tufos
Vidros silicosos sintéticos	Silicosos, com proporções menores de álcalis, alumina e/ou outras substâncias	Vidro
Cloroféita ou argilominerais verdes	Argilominerais de magnésio, ferro e cálcio	Cristalinos
Zeólitas	Aluminossilicato hidratado de elementos alcalinos e alcalino- terrosos	Cristalina

Fonte: ABNT NBR 15577-3, 2018; MEHTA e MONTEIRO, 2014.

Esses minerais podem ser encontrados em xistos, arenitos, rochas carbonáticas com sílica, quartzitos, gnaisses, entre outras. Contudo, isto não indica que todas as rochas indicadas produzirão agregados reativos. A reatividade depende do tipo e quantidade dos minerais reativos existentes (THOMAS, FOURNIER e FOLLIARD, 2013).

Além destes minerais, quartzo microcristalino e criptocristalino, possivelmente deformado ou recristalizado também são formas consideradas reativas. Quartzo é considerado como microcristalino se possui dimensões inferiores a 100 micrômetros, e criptocristalino quando é menor que 10 micrômetros. Desta forma, o tamanho de grão de quartzo microcristalino possui grande área de superfície potencial, mas o do quartzo criptocristalino é ainda maior (FERNANDES *et al.*, 2016). A NBR 15577-3 (2018) considera que o quartzo microgranular e o microcristalino são equivalentes, tendo dimensão inferior a 0,15 mm.

Minerais pouco cristalinos ou amorfos, como a opala e a cristobalita, reagem rapidamente, podendo causar danos relativos à reação em apenas alguns anos quando em concentrações da ordem de 1%. Já variedades de quartzo microcristalino e criptocristalino, entre outras, levam

mais tempo para produzir dano e necessitam de concentrações maiores (THOMAS, FOURNIER e FOLLIARD, 2013).

Outras texturas observadas nos agregados também podem indicar sua reatividade potencial, como a presença de extinção ondulante e de subgrãos. A presença de um grande número de deslocamentos similares pode tornar a estrutura cristalina de um mineral ligeiramente curva. Como resultado, o cristal não se extingue de forma homogênea, o que é conhecido como extinção ondulante (PASSCHIER e TROUW, 1998). Subgrãos, por sua vez, são partes do cristal separadas das adjacências por bordas, com leve mudança na orientação cristalina de um subgrão para outro (PASSCHIER e TROUW, 1998). A borda é, desta forma, como um plano separando dois fragmentos do cristal que rotacionaram levemente entre si (PASSCHIER e TROUW, 1998).¹

Minerais como os feldspatos, piroxênios, anfibólios e micas, principais constituintes do granito, gnaisse, xisto, arenito e basalto, que são comumente utilizados como agregado graúdo no Brasil, são classificados como minerais inócuos (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Contudo, forças tectônicas de diferentes eras e intensidades afetaram estes agregados, sendo responsáveis pelo desenvolvimento de texturas capazes de tornar o agregado potencialmente reativo (ANDRIOLO, 2000). Tais forças tectônicas também acarretaram na deformação de estruturas rochosas, que se apresentam na forma de dobras, zonas de cisalhamento, foliações, lineações, juntas e falhas (MAGALHÃES e CELLA, 1998).

Prado (2008) estudou a influência da reatividade de vários agregados em relação à distância da área de extração para a Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE), que é uma região na qual se encontram estruturas geológicas desenvolvidas por atividade tectônica. As amostras mais próximas à zona de falha apresentaram intensa deformação do quartzo, desenvolvimento de subgrão, bandas de deformação e extinção ondulante e, por conseguinte, maiores expansões no ensaio acelerado das barras de argamassa.

Podem, também, estar associados processos metamórficos que têm influência a nível de grãos individuais, sendo dependentes de fatores como litologia, mineralogia, composição do fluido intergranular, tamanho dos grãos, permeabilidade, além de condições de temperatura e pressão (PASSCHIER e TROUW, 1998). A severidade e o tipo de metamorfismo controlarão quais minerais novos serão formados. Rochas metamórficas podem herdar estrutura e textura do seu

¹ A identificação destas texturas será abordada no tópico Análise Petrográfica.

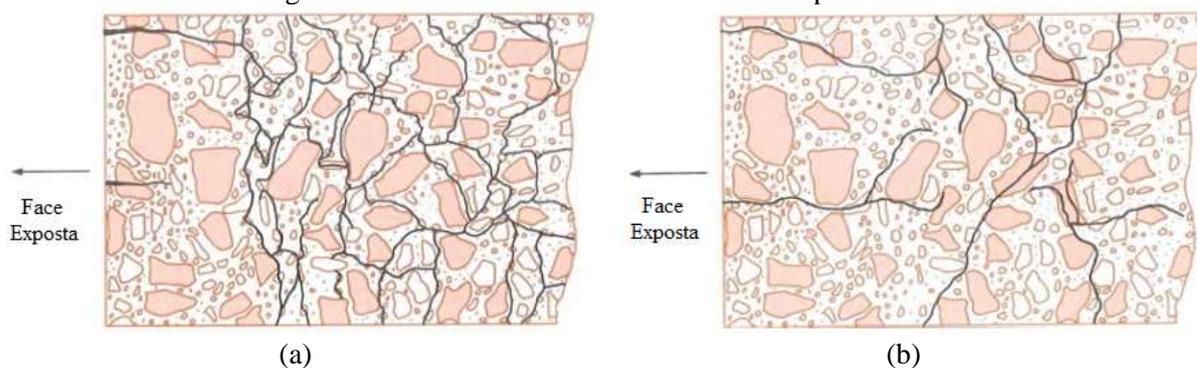
protólito, que é a rocha da qual se origina, nas quais quantidade de minerais e arranjo refletem sua natureza metamórfica atual (FERNANDES *et al.*, 2016).

Os materiais mais comuns formados por meio de metamorfismo de rochas ricas em argila ou areia são micas, cloritas, granadas e feldspatos. Contudo, durante o processo, o quartzo presente recristalizará parcial ou totalmente, o que pode produzir cristais de sílica criptocristalina nos contornos de grão. A deformação do quartzo sob condições dúcteis ou frágeis, assim como esforços tectônicos, podem introduzir tensões na estrutura cristalina, que podem ser reconhecidas microscopicamente como extinção ondulante, quando sob luz polarizada, evoluindo para subgrão para grandes valores de tensão (FERNANDES *et al.*, 2016; SIMS e POOLE, 2017).

Em relação ao padrão fissuratório, Hobbs (1988, apud SIMS e POOLE, 2017) sugeriu que a microfissuração interna pode ser característica, dependendo do agregado que contém o componente reativo, se miúdo ou graúdo. A Figura 7 apresenta este padrão para o tipo de agregado responsável pela ocorrência da RAA.

Observa-se que, para a fração reativa de agregado miúdo, a fissuração interna é mais conectada e generalizada, concentrando-se no interior do elemento estrutural. Para a fração reativa proveniente do agregado graúdo, as fissuras aparentes na face externa tendem a se aprofundar até o centro do elemento estrutural.

Figura 7 – Padrão fissuratório interno causado pela RAA.



Fonte: HOBBS, 1988 apud SIMS e POOLE, 2017.

(a) Padrão quando o componente reativo está na fração do agregado miúdo; (b) Padrão quando o componente reativo está no agregado graúdo.

2.2.2 Teor de Álcalis do Cimento

Os álcalis do cimento correspondem ao sódio e potássio, presentes em pequenas quantidades na forma de óxidos (Na_2O e K_2O , respectivamente). Desta forma, convencionou-se adotar um índice que expressa a alcalinidade do cimento, conhecido como equivalente alcalino. Este

índice, que varia entre 0,2 e 1,5%, é calculado levando-se em consideração os pesos moleculares dos óxidos de sódio e potássio, 62 e 94, em sequência, para obter uma porcentagem equivalente de Na_2O , conforme a Equação 1 (LI, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \% \text{K}_2\text{O} \quad \text{Eq. 1}$$

Ly *et al.* (2006) determinaram que o sódio tem maior contribuição nas expansões em relação ao potássio, de modo que deve-se ter precaução ao interpretar os álcalis totais expressos desta forma.

Os álcalis do cimento provêm de sua produção, especificamente, dentre outras fontes, do combustível utilizado na produção do clínquer (HEWLETT, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os álcalis Na_2O e K_2O têm como semelhança a preferência de se combinar a sulfatos e o produto, um sulfato alcalino, ser volátil no forno. A forma na qual os álcalis estão presentes no clínquer é importante, pois controla sua taxa de liberação durante as primeiras etapas de hidratação do cimento e, ao combinar com os sulfatos, afeta a disponibilidade de sulfatos e sua liberação durante as primeiras etapas da hidratação (HEWLETT, 2004). Contudo, apesar de os álcalis serem tratados conjuntamente, eles possuem diferenças significativas de comportamento. Tem-se que o sódio, no clínquer, se concentra, preferencialmente, na fase aluminato (C_3A) e o potássio é fracionado em belita (C_2S) (HEWLETT, 2004; SWAMY, 1992). Observa-se que os álcalis combinados aos sulfatos são facilmente solubilizáveis em água enquanto que aqueles concentrados nas fases aluminato e silicato são liberados mais lentamente no processo de hidratação (BATTAGIN, I., BATTAGIN, A. e SBRIGHI NETO, 2009).

Na hidratação do cimento, imediatamente após entrar em contato com a água, há a completa dissolução dos sulfatos alcalinos, liberando íons K^+ e Na^+ . O sulfato de cálcio dissolve até a saturação, liberando íons Ca^{2+} e mais íons SO_4^{2-} . Esta fase é conhecida como período de pré-indução (HEWLETT, 2004). A reatividade inicial do C_3A assim como a taxa de hidratação inicial dependem da qualidade e quantidade de álcalis presentes em sua rede cristalina: enquanto o K^+ aumenta a reatividade e acelera a hidratação, o Na^+ reduz a reatividade e a taxa de hidratação (HEWLETT, 2004).

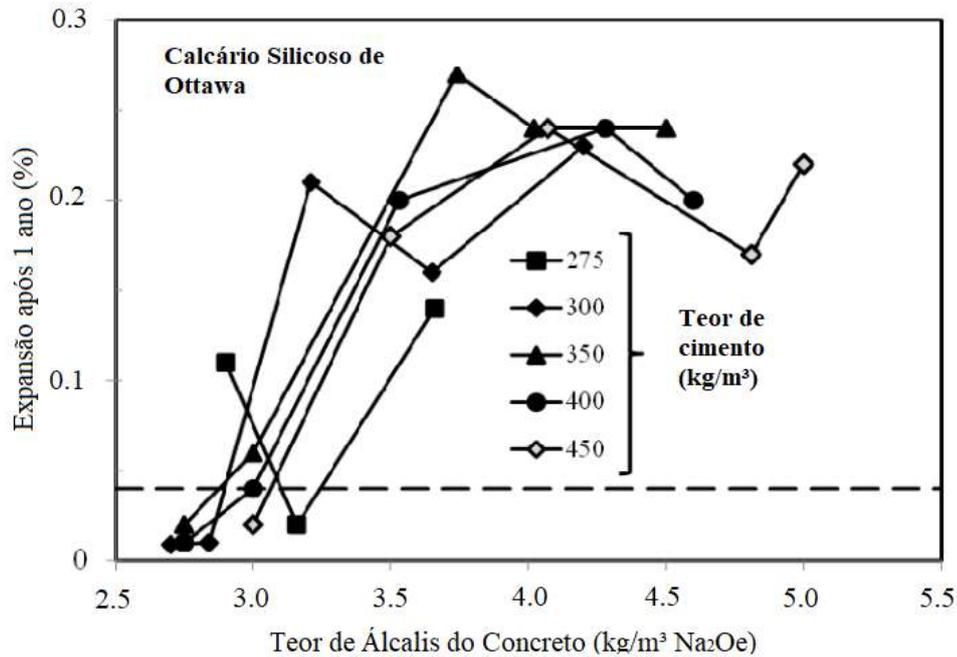
Vários estudos nos Estados Unidos mostraram que a utilização de cimentos com equivalente alcalino superior a 0,60%, em conjunto com agregados reativos, pode causar expansão significativa (LI, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Este valor foi adotado como limite em diversas especificações, como a ASTM C150M, de 2017 (ASTM C150, 2017; HEWLETT, 2004; SHETTY, 2005; TAYLOR, 1997). Um cimento que atende a esse limite é conhecido

como cimento com baixo teor de álcalis. A versão anterior da NBR 7211 (2005), que descreve requisitos de agregados para usos em concreto, indicava um teor máximo de álcalis de $3,0 \text{ kg/m}^3$ para agregados com expansões superiores a $0,10\%$, quando ensaiados pelo método acelerado das barras de argamassa. Contudo, há relatos de estruturas construídas com cimento de equivalente alcalino inferior a $0,25\%$ que apresentaram sintomas de reação álcali-agregado posteriormente, com taxas de pequena magnitude, como, por exemplo, a UHE de Furnas, cuja obra utilizou um cimento de equivalente alcalino de $0,23\%$ (CASTRO *et al.*, 1997a; SILVEIRA, 1997).

Desta forma, versões mais recentes das normas consideram que um cimento com baixo teor de álcalis como única medida preventiva para a RAA pode não ser efetivo, uma vez que não há como controlar o teor total de álcalis no concreto, com contribuições de álcalis de outras fontes (ASTM C150, 2019; THOMAS, FOURNIER e FOLLIARD, 2013). A versão mais recente da norma brasileira, de 2009, menciona que deve ser atendido o disposto na NBR 15577-1, que apresenta medidas preventivas de acordo com o risco de ocorrência da RAA em uma estrutura. O risco de ocorrência é determinado por meio da classificação da estrutura quanto à severidade e consequências da reação em situação de serviço e da classificação do grau de reatividade dos agregados. Limitar o teor de álcalis do concreto a valores inferiores a $2,4 \text{ kg/m}^3$ é uma das medidas indicadas para riscos baixos em estruturas cujas consequências da reação sejam, majoritariamente, econômicas e ambientais e minimamente do ponto de vista de segurança.

Além do cimento, pode haver contribuição de álcalis de outras fontes, como adições (cinzas volantes, escórias de alto-forno, sílica ativa, metacaulim) (BATTAGIN, I., BATTAGIN, A. e SBRIGHI NETO, 2009; LI, 2011), outros constituintes do concreto, como aditivos e agregados contendo minerais ricos em álcalis, como feldspatos e micas, ou fontes externas, como água do mar, químicos descongelantes ou águas superficiais ou subterrâneas em contato com as estruturas (BATTAGIN, I., BATTAGIN, A. e SBRIGHI NETO, 2009; LEE CHAU, 1989 e SWAMY e AL-ASALI, 1988 apud HEWLETT, 2004; SILVEIRA, 1997). Desta forma, deve-se atentar para a quantidade total de álcalis presentes no concreto, que deve ser inferior a $3,0 \text{ kg/m}^3$ (FOURNIER e BÉRUBÉ, 2011; LI, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014), como observado na Figura 8, na qual são apresentadas as expansões de prismas de concreto a 38°C após 1 ano, dosados com diferentes teores de cimento e álcalis. As expansões, neste caso, mantêm-se abaixo do limite estabelecido por norma (ASTM C 1260, 2014) quando o teor de álcalis do concreto é mantido abaixo de $3,0 \text{ kg/m}^3$ (THOMAS, FOURNIER e FOLLIARD, 2013).

Figura 8 – Efeito do teor de álcalis do concreto na expansão.



Fonte: THOMAS, FOURNIER e FOLLIARD, 2013.

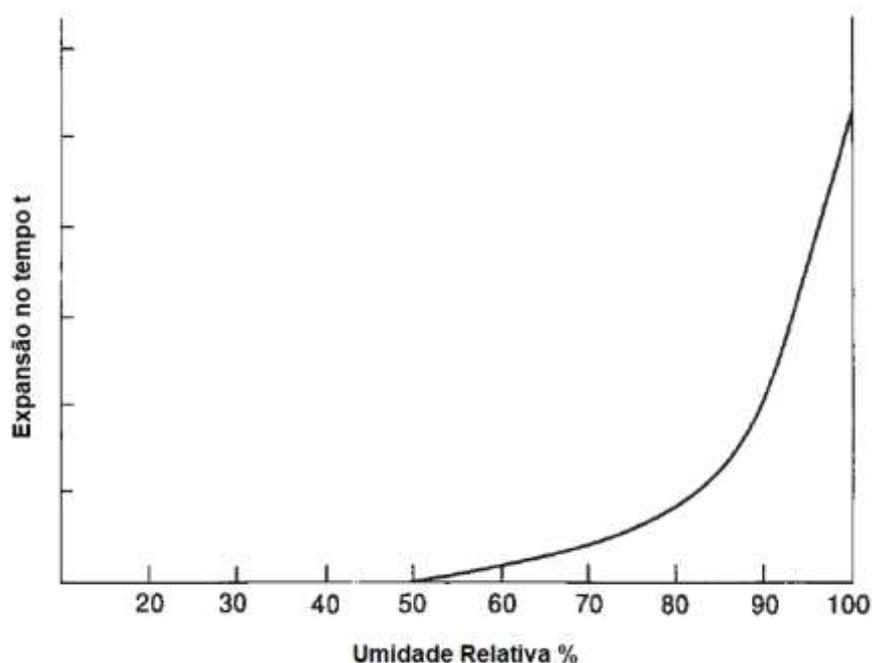
Quando os álcalis são liberados a partir do processo de hidratação, eles podem estar presentes de três formas, quais sejam na solução dos poros, na estrutura dos compostos hidratados produzidos ou no gel formado a partir da reação álcali-agregado (THOMAS, 2011).

2.2.3 Umidade

A presença de umidade é fator determinante, tanto para a ocorrência das reações químicas que envolvem a reação álcali-agregado, sendo o meio no qual estão dispersos os íons alcalinos e as hidroxilas, quanto para a absorção pelo gel formado. Desta forma, caso não haja presença de água, a deterioração é bastante reduzida. Nota-se, portanto, que a deterioração decorrente da RAA concentrar-se-á na superfície do elemento (LI, 2011; SHETTY, 2005; SWAMY, 1992).

Estudos mostram que os efeitos da reação álcali-agregado variam diretamente de acordo com a porcentagem de umidade relativa do concreto. Os experimentos indicam que, mantendo a umidade abaixo de 80%, o concreto exhibe pouca evidência de expansão devido à RAA; a expansão aumenta rapidamente caso a umidade seja superior a este valor, como esquematizado na Figura 9 (SIMS e POOLE, 2017; SWAMY, 1992; THOMAS, FOURNIER e FOLLIARD, 2013).

Figura 9 – Efeito da umidade relativa na expansão do concreto devida à reação álcali-agregado.



Fonte: SWAMY, 1992

2.3 TIPOS DE RAA

A reação álcali-agregado pode ser classificada em dois tipos: a Reação Álcali-Sílica (RAS) e a Reação Álcali-Carbonato (RAC).

A reação álcali-sílica é uma reação química que ocorre entre certos componentes silicáticos presentes no agregado, como opala, cherts, quartzo microcristalino, quartzo deformado, vidro vulcânico, vidros reciclados, e outros, e hidróxidos alcalinos provenientes da hidratação do cimento. Tal reação produz um gel com capacidade variável de dilatação decorrente da absorção de água e que pode causar fissuras e expansão do concreto (HEWLETT, 2004; NBR 15577-1, 2018).

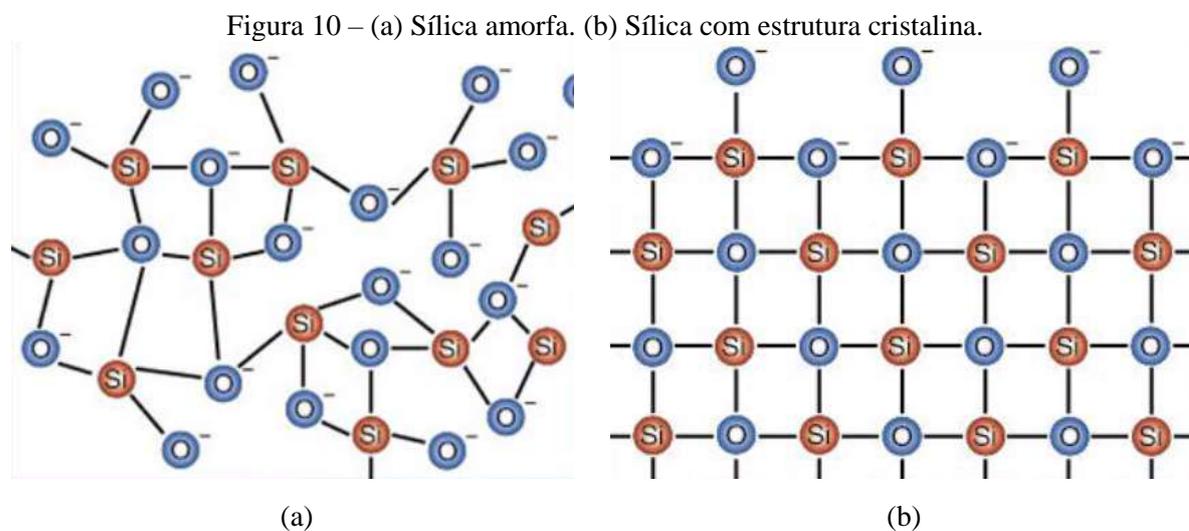
A reação álcali-carbonato, por sua vez, foi primeiro identificada por Swenson, em 1957, que observou que seções de pavimento de concreto, em Kingston, Ontario, exibiam expansões que fecharam as juntas e produziram fissuras nas placas em um período de seis meses após colocação (SWAMY, 1992). Esta reação ocorre em calcários dolomíticos ou dolomíticos calcínicos e os álcalis do cimento, acompanhada de desdolomitização, que, em certas condições, pode causar expansão, não havendo, portanto, formação de gel (NBR 15577-1, 2018; TIECHER, 2006).

Por muito tempo, classificou-se a reação álcali-agregado em três tipos, sendo o terceiro tipo conhecido como reação álcali-silicato. Porém, atualmente, este é reconhecido como um tipo mais complexo de RAS (HEWLETT, 2004; MINGSHU, 1992; SHAYAN *et al.*, 1992). Estudos recentes apontam que a reação álcali-carbonato ocorre apenas quando há a presença de sílica nos agregados carbonáticos (BEYENE *et al.*, 2013; BINAL, 2015; GRATTAN-BELLEW *et al.*, 2010; GRATTAN-BELLEW e CHAN, 2013; KATAYAMA, 1992, 2010; KATAYAMA, JENSEN e ROGERS, 2016). Segundo Katayama (1992), quartzo microcristalino estaria oculto no resíduo insolúvel de rochas carbonáticas. Desta forma, segundo os autores, a ocorrência da RAA estaria estritamente ligada à presença de sílica.

2.4 MECANISMOS DA RAA

Na reação álcali-agregado ocorre, inicialmente, uma reação entre o componente do agregado suscetível e as hidroxilas concentradas na solução dos poros, provenientes da ionização dos álcalis do cimento. Tem-se, portanto, que os álcalis são danosos por causa da liberação das hidroxilas, que ocorre na solução dos poros, e não pelos íons Na^+ e K^+ por si só, embora alguns sejam incorporados na estrutura do gel (SIMS e POOLE, 2017).

Dada a maior área de contato e estrutura desorganizada, a reação álcali-agregado ocorre de forma mais rápida em fases microcristalinas, criptocristalinas e amorfas. Em fases silicosas cristalizadas, o ataque acontece apenas na superfície, sendo lento e produzindo poucos íons silicato, que passam para a fase fluida (DENT GLASSER e KATAOKA, 1981). A Figura 10 ilustra exemplos de sílica amorfa e cristalina.



Fonte: COLLINS *et al.*, [s.d.]

A Figura 11a apresenta a superfície do agregado antes da reação. Como descrito por Dent Glasser e Kataoka (1981) e, subsequentemente, por Wang e Gillott (1991), inicialmente os íons hidroxila (OH^-), que estão presentes na solução dos poros, penetram na estrutura do agregado e rompem ligações siloxano ($\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si} \equiv$), formando grupos silanol ($\text{Si}-\text{OH}$), de acordo com a Equação 2 e Figura 11b. A quebra das ligações siloxano enfraquece a estrutura e, caso haja quantidade suficiente de hidróxidos alcalinos, há a produção de uma solução silicática alcalina (THOMAS, 2011).

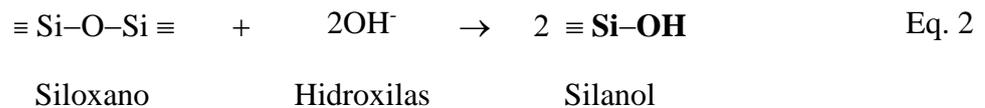
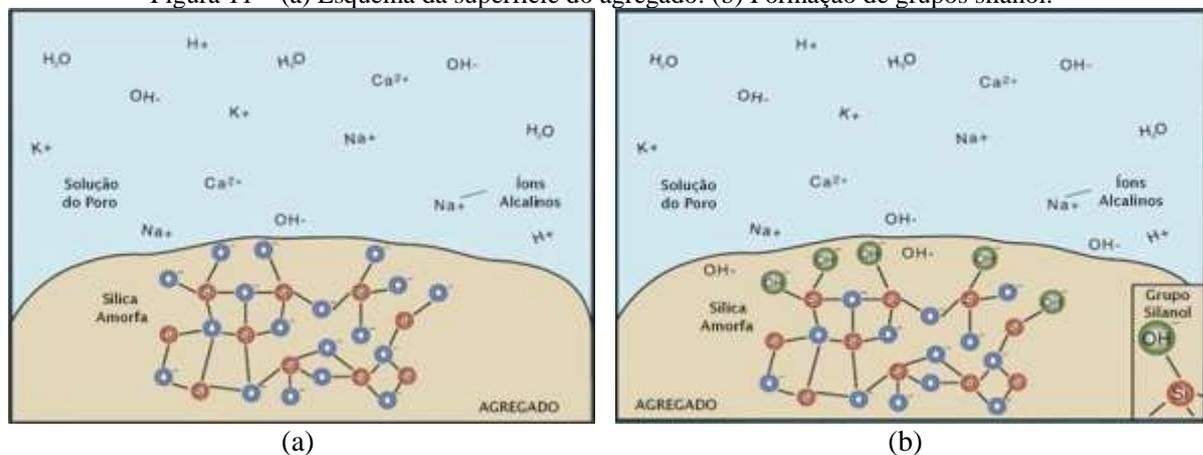
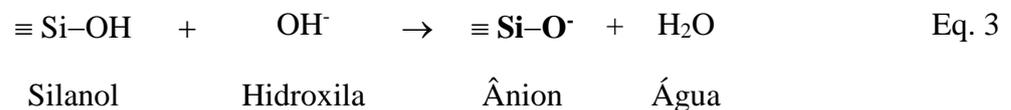


Figura 11 – (a) Esquema da superfície do agregado. (b) Formação de grupos silanol.



Fonte: COLLINS *et al.*, [s.d.]

Os grupos silanol formados também reagem com as hidroxilas numa reação ácido-base, formando espécies do tipo $\equiv \text{Si}-\text{O}^-$, como descrito na Equação 3 e Figura 12a. As cargas negativas são balanceadas pelos íons alcalinos (Na^+ , K^+) e, simultaneamente, penetram por difusão na estrutura.



Desta forma, é criada uma camada elétrica na superfície do agregado, composta por cátions e ânions, o que aumenta a concentração de cátions (álcalis) que reagirão com as espécies $\equiv \text{Si}-\text{O}^-$ formadas. Na ausência de cálcio, os álcalis e sílica permaneceriam em solução. Contudo, devido à disponibilidade de cálcio na forma de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), há a formação de um gel sílico-alcalino que contém pequenas quantidades de CaO (THOMAS, 2011), como visto na Equação 4 e Figura 12b.

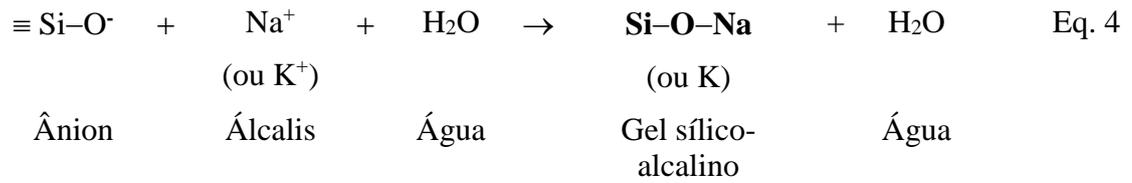
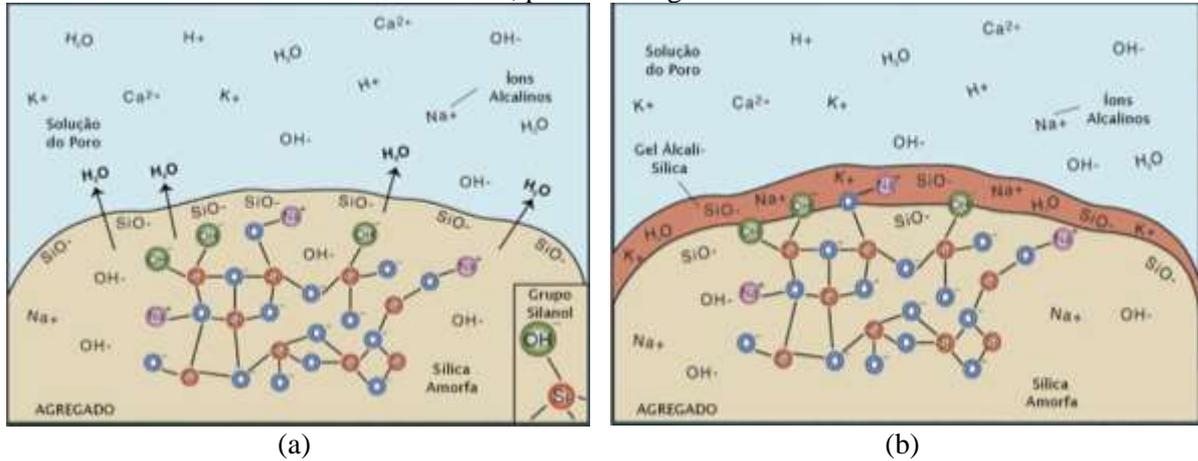


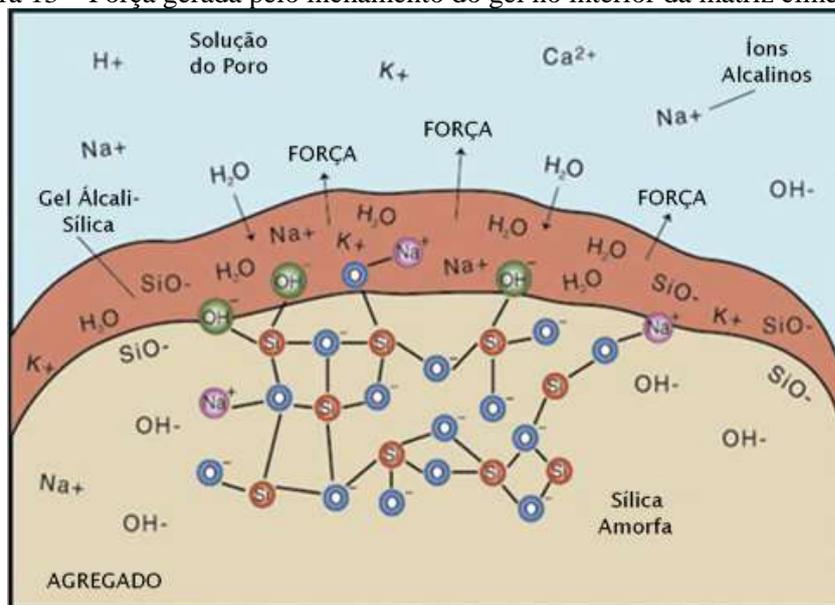
Figura 12 – (a) Formação de camada de ânions na superfície do agregado. (b) Álcalis reagindo com os ânions formados, produzindo gel sílico-alcalino.



Fonte: COLLINS *et al.*, [s.d.]

Os íons de silicato são impedidos de mover-se do agregado para a matriz cimentícia pelo gel, que forma uma barreira ao redor da partícula. Desta forma, a camada do produto de reação age como uma membrana osmótica, absorvendo água (DYER, 2014; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Seu inchamento promove tensões na matriz cimentícia, como observado na Figura 13, o que pode levar à posterior fissuração da estrutura (ICHIKAWA e MIURA, 2007).

Figura 13 – Força gerada pelo inchamento do gel no interior da matriz cimentícia.



Fonte: COLLINS *et al.*, [s.d.]

Com o tempo, a quantidade de cálcio no gel aumenta e uma porção de álcalis é liberada para a solução dos poros, o que implica a sua reciclagem e continuação da reação. Tal processo prolonga a reação, até, finalmente, haver a extinção dos álcalis e posterior estabilização das expansões decorrentes na estrutura.

2.5 FATORES INTERVENIENTES

Além dos fatores que são necessários à ocorrência da reação, quais sejam minerais reativos no agregado, álcalis e umidade, outros aspectos podem interferir, como descrito a seguir.

2.5.1 Teor e Dimensão Péssimos

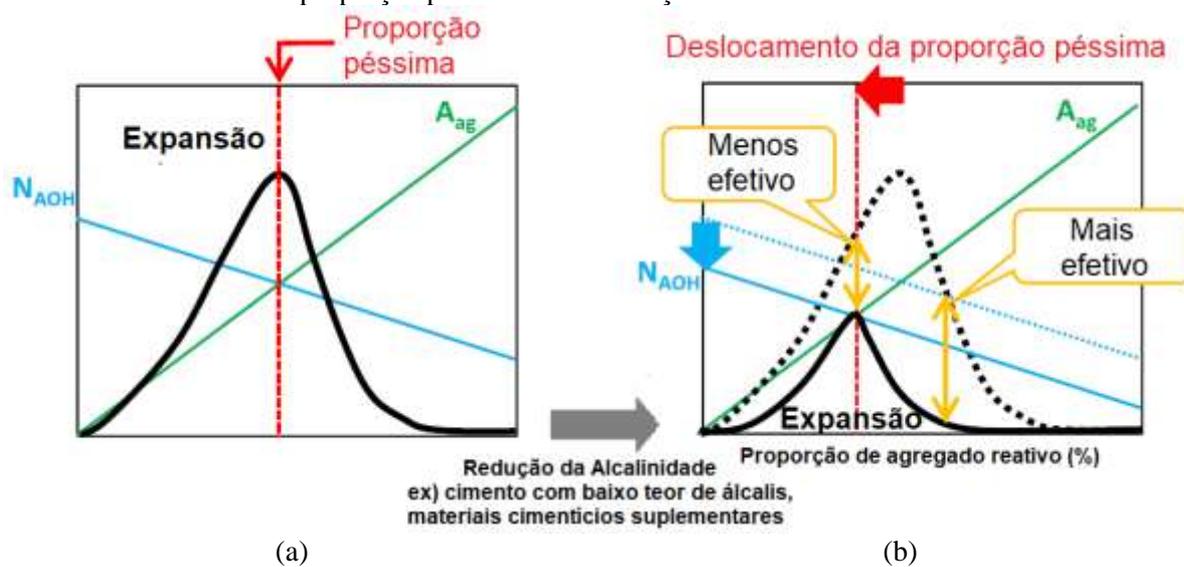
Alguns agregados reativos possuem uma relação linear em relação à ocorrência da RAA e as expansões decorrentes, ou seja, quanto maior a quantidade de minerais reativos no agregado, maior a expansão. Contudo, a maioria dos agregados possui um teor no qual ocorrem as maiores expansões. Teores acima ou abaixo deste acarretam uma menor expansão. Este teor é conhecido como teor péssimo (HEWLETT, 2004; LI, 2011), e é mais pronunciado em minerais de reação rápida, como a opala (HOBBS, 1978, 1988 apud HEWLETT, 2004).

Ichikawa (2009) explica que, quando a proporção de agregado reativo é maior do que a proporção péssima, a quantidade de álcalis por volume do agregado reativo torna-se insuficiente para que o gel formado exerça pressões capazes de superarem a resistência da matriz cimentícia. Já quando a proporção de agregado é menor do que a proporção péssima, a expansão diminui com a diminuição da quantidade do agregado reativo. Na proporção péssima há um equilíbrio entre as quantidades de álcalis e agregado reativo, de modo que as maiores expansões são alcançadas. Esta característica está ilustrada na Figura 14a.

Kawabata e Yamada (2017), contudo, apontam para a influência da concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros, indicando que a modificação deste fator também influencia na proporção péssima. Os autores afirmam que, utilizando-se de métodos para diminuir a alcalinidade, como o uso de cimentos com baixo teor de álcalis ou adições minerais, há um deslocamento da curva de teor péssimo do agregado, implicando menores expansões, como observado na Figura 14b.

Da mesma forma, tendo-se um teor fixo de agregado reativo, a expansão torna-se máxima em uma dada dimensão do agregado, acima ou abaixo da qual a expansão diminui, o que é conhecido como dimensão péssima.

Figura 14 - (a) Proporção péssima do agregado (A_{ag} = proporção de agregado reativo; N_{AOH} = quantidade de hidróxido alcalino por volume de agregado reativo). (b) Deslocamento da proporção péssima com a redução da alcalinidade.



Fonte: KAWABATA e YAMADA, 2017

A tendência geral é de que agregados maiores reduzam a expansão em idades iniciais e as aumentem posteriormente. Isto é visto, por exemplo, em recomendações na Noruega, nas quais indica-se multiplicar as expansões de agregados grandes em ensaios acelerados por um fator de correção para abarcar o potencial expansivo posterior (DUNANT e SCRIVENER, 2012).

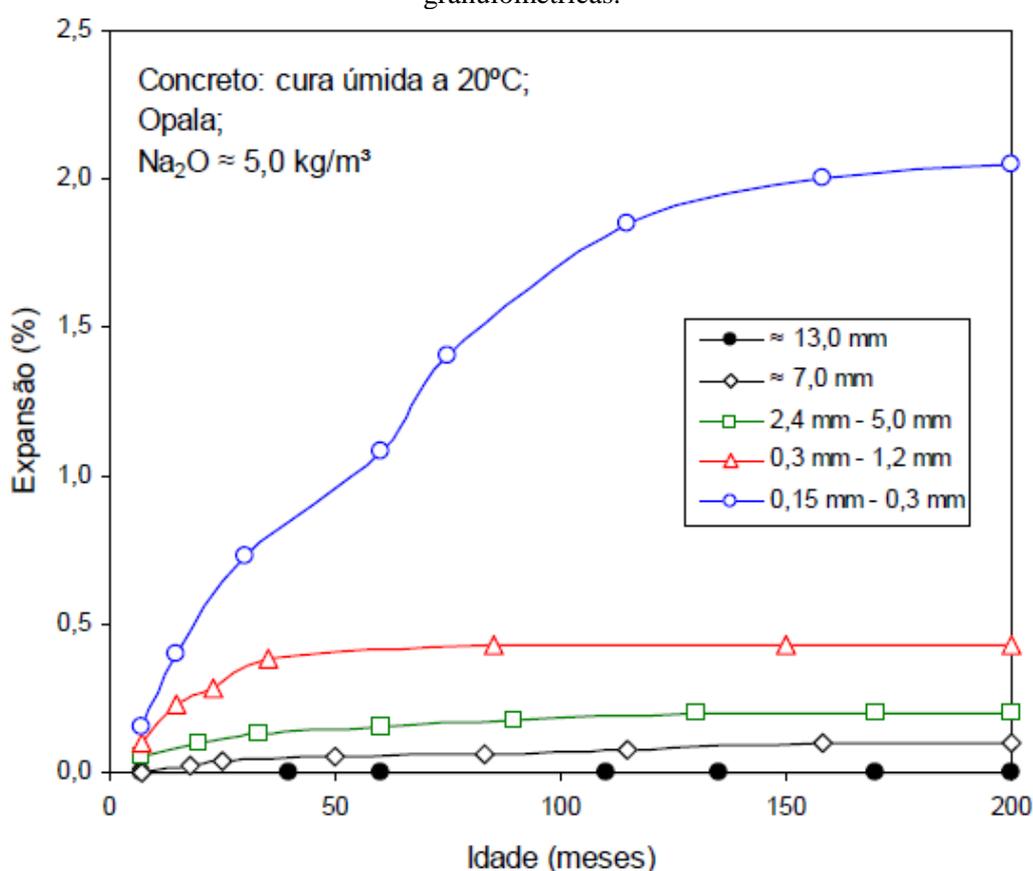
Entretanto, grande parte dos casos de expansão e fissuração devidos à reação álcali-agregado estão relacionados principalmente à granulometria característica da areia, com tamanhos de grão entre 1,0 e 5,0 mm. Ainda não há explicação satisfatória para tal fenômeno, mas conjectura-se que a menor adsorção de géis com maior relação sílica/álcalis e o alívio da pressão hidráulica na superfície da partícula reativa quando seu tamanho é muito pequeno podem explicar parcialmente essa particularidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Multon *et al.* (2008) estudaram, em areias britadas, mármore e calcário silicoso, três faixas granulométricas, 80-160 μm , 315-630 μm e 1,25 – 3,15 mm, e observaram que partículas mais grossas (1,25 – 3,15 mm) eram sete vezes mais reativas do que partículas mais finas (80-160 μm). Em uma análise mais ampla, considerando sete faixas granulométricas (0-80, 80-160, 160-315, 315-630, 630-1250, 1250-2500 e 1250-3150 μm), Multon *et al.* (2010) observaram, novamente, que as partículas mais grossas, neste caso entre 0,63 e 1,25 mm, apresentaram maiores expansões, enquanto partículas mais finas (abaixo de 80 μm) não apresentaram expansão. Este resultado também foi obtido por Silva (2016), que estudou a influência de cada faixa granulométrica utilizada no ensaio acelerado de barras, utilizando um agregado

classificado como gnaisse-diorítico, e observou que as faixas intermediárias resultavam em maiores expansões, especialmente a faixa entre 1,2 mm e 0,600 mm.

Em contrapartida, Diamond e Thaulow (1974) ao estudarem as expansões da opala em sete faixas dentro do intervalo 125 – 20 μm , observaram expansões em todas as faixas, com as frações mais finas apresentando expansões repentinas e rápidas. Hobbs (1988, apud COUTO, 2008) obteve resultado semelhante para agregados com opala, nos quais a faixa granulométrica com menores tamanhos apresentou maiores expansões, como observado na Figura 15.

Figura 15 – Resultados de expansão para agregados com presença de opala em diferentes faixas granulométricas.



Fonte: HOBBS, 1988, apud COUTO, 2008.

Estas diferenças observadas nas diversas pesquisas são justificadas devido à particularidade do agregado, sua natureza e composição: cada agregado possui um tamanho péssimo característico (MULTON *et al.*, 2010). Faz-se necessário, portanto, um estudo prévio para determinar esta característica no agregado em estudo.

2.5.2 Temperatura

Segundo experimentos realizados Gudmundsson e Ásgeirsson (1975), a expansão máxima de barras de argamassa foi obtida à temperatura de 38°C. Para temperaturas superiores, as

expansões foram menores. Uma possível explicação para isso seria a menor viscosidade do gel em elevadas temperaturas, o que poderia diminuir as expansões devido à redução de obstáculos à penetração do gel nos poros da matriz cimentícia (DYER, 2014).

Contudo, segundo Lindgård *et al.* (2012), o efeito da temperatura não deve ser analisado de forma isolada, uma vez que há uma ação simultânea com outros fatores.

2.5.3 Influência do Uso de Aditivos

Ainda não é clara a influência do uso de aditivos nas expansões decorrentes de RAA. Farias, Hasparyk e Andrade (2007) estudaram a utilização de aditivos com diversas bases nas expansões de barras no ensaio acelerado. Para barras moldadas apenas com o agregado e o aditivo, não houve alteração em relação às barras de referência no tocante à classificação. Porém, ocorreram variações da ordem de 17% nas expansões, seja diminuindo, seja intensificando a reação. Ao utilizar adições (sílica ativa e metacaulim), a classificação se manteve, contudo foram observadas mudanças significativas nas expansões aos 16 dias, o que mostra a influência do aditivo.

Hasparyk e Farias (2013) estudaram a influência do aditivo nas expansões de barras, avaliando o teor de aditivo recomendado pela norma e o teor ótimo. Observou-se que o teor ótimo é superior ao recomendado em norma, de modo que ensaiar conforme a norma pode subestimar as expansões observadas. Silva (2015) também estudou a utilização de aditivos de diversas bases, considerando três teores e dois tipos de adição (sílica ativa e metacaulim), por meio do ensaio acelerado de barras. A autora observou que, para o teor ótimo de aditivo, há aumento nas expansões em relação às barras de referência para todos os aditivos e adições utilizados.

2.6 COMINUIÇÃO DO AGREGADO

A cominuição, segundo Chaves e Peres (2009), é o conjunto de operações para a redução do tamanho de partículas de forma controlada e visando a alcançar um objetivo pré-determinado. A britagem e a moagem são as operações de cominuição, que diferem tanto na granulometria de partícula na qual atuam quanto no mecanismo de redução do tamanho. A seguir, discute-se acerca do mecanismo e processo de fragmentação das partículas, assim como equipamentos utilizados e morfologia das partículas geradas.

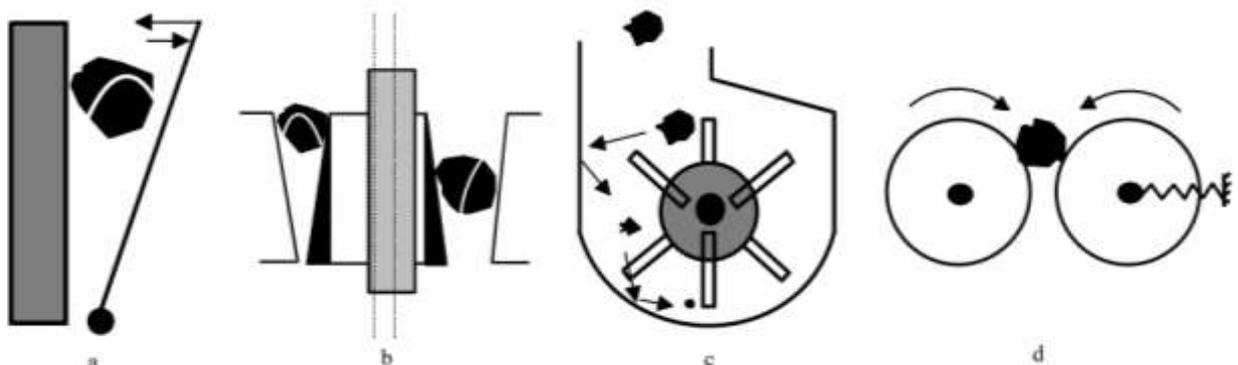
2.6.1 Processo de Fragmentação

O processo de fragmentação da rocha consiste em técnicas para reduzir um sólido de determinado tamanho em fragmentos menores por meio de ação mecânica externa e, às vezes, interna (LUZ e ALMEIDA, 2012).

O primeiro estágio desta fragmentação em uma pedreira ocorre nas atividades de lavra, ou seja, no desmonte da rocha, que é feito por meio de explosivos e a partir do qual são obtidos blocos de diferentes tamanhos, que se adequam para alimentar os equipamentos de britagem (FIGUEIRA, LUZ e ALMEIDA, 2010).

A etapa de britagem fragmenta os blocos provenientes da lavra até uma dimensão na qual eles possam proceder à moagem, para isto, passando por vários equipamentos (LUZ e ALMEIDA, 2012). A etapa de moagem reduz partículas maiores do que 50 – 150 mm. Britadores de mandíbulas, cone ou giratórios são usados na redução de tamanho inicial e para a redução de grãos de tamanho médio utilizam-se os britadores mencionados e ainda o britador de rolos (DRZYMALA, 2007). A Figura 16 apresenta um esquema de como é realizada a quebra de partículas nos britadores citados.

Figura 16 – Mecanismo de quebra de britadores.



Fonte: Adaptado de DRZYMALA, 2007
(a) Mandíbulas. (b) Cone. (c) Martelo. (d) Rolos.

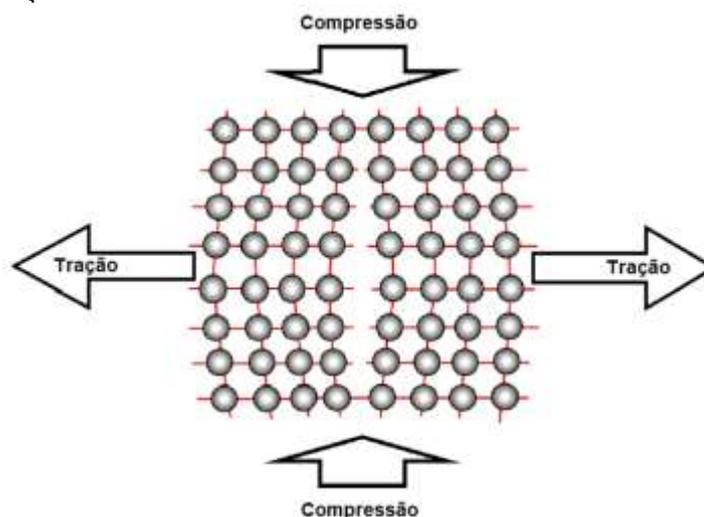
A britagem exige um volume de partícula no qual possa desenvolver seus mecanismos de quebra, já mencionados, de modo que exige volumes maiores. As partículas tendem a apresentar certa cubicidade e faces relativamente planas, uma vez que a fratura se desenvolve segundo as tensões principais de cisalhamento, que têm inclinação constante em relação à direção das tensões de compressão (CHAVES e PERES, 2009).

Ao contrário da britagem, que possui reduções de tamanho pequenas, a moagem proporciona grandes reduções, sendo, normalmente, feita em dois estágios: a grossa, em moinho de barras, e a fina, em moinho de bolas.

2.6.2 Mecanismos de Fragmentação

Grande parte dos minerais possui estrutura cristalina, com organização dos átomos em arranjos tridimensionais. O arranjo dos átomos é determinado pelo tamanho e tipo de ligações físicas e químicas que os mantém unidos na rede cristalina dos minerais. Estas ligações são mais fortes a pequenas distâncias; entretanto, podem ser quebradas ou tensionadas quando submetidas a forças externas, que podem ser de tração ou compressão (WILLS e FINCH, 2016), como observado na Figura 17.

Figura 17 – Deformação de uma estrutura cristalina decorrente de tensões de tração ou compressão.

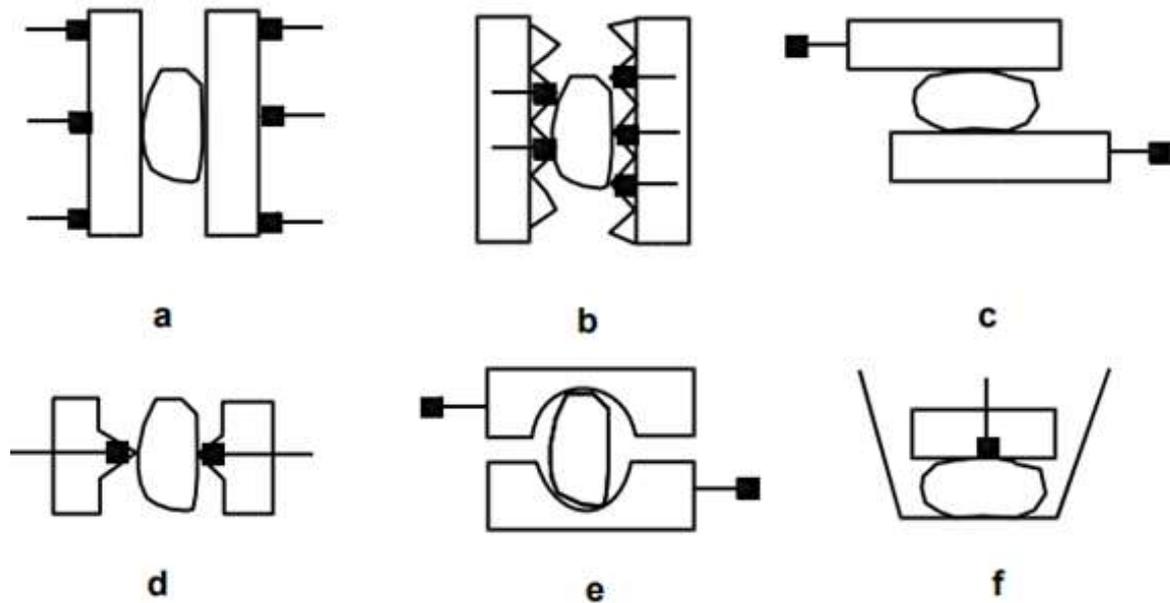


Fonte: WILLS e FINCH, 2016.

A ruptura em um material ideal acontece quando o limite de ruptura é ultrapassado, ou seja, as ligações de um plano são rompidas. Entretanto, não é o que acontece na prática, já que rochas e minerais são materiais heterogêneos, anisotrópicos e possuem falhas e fraturas, tanto em escala microscópica quanto macroscópica (TARJAN, 1981 apud LUZ e ALMEIDA, 2012).

A energia mecânica para realizar a fragmentação é aplicada por diferentes mecanismos, como esmagamento ou compressão, impacto e atrito, sendo a abrasão também considerada por alguns autores. A Figura 18 ilustra modelos de redução de tamanho. Normalmente, a britagem ocorre por compressão ou impacto e a moagem ocorre por abrasão e impacto (WILLS e FINCH, 2016).

Figura 18 – Modelos de redução do tamanho de partículas.



Fonte: MOKRZYCKI et al (1981 apud DRZYMALA, 2007).

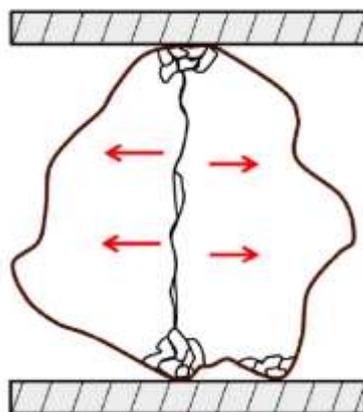
(a) Compressão. (b) Fratura. (c) Abrasão. (d) Compressão diametral. (e) Corte. (f) Esmagamento.

As teorias de fragmentação assumem que o material é frágil, mas alguns cristais são capazes de estocar energia sem romperem e liberá-la quando cessam as forças atuantes, transformando-a de energia potencial para energia elástica (EVERTSSON, 2000; WILLS e FINCH, 2016). Ao superar as forças de adesão do material, há a ruptura das ligações e desintegração das partículas (DRZYMALA, 2007). Quando ocorre a fratura, parte da energia armazenada é transformada em energia livre da superfície, sendo uma parte energia potencial dos átomos da nova superfície formada, e a outra parte dissociará na medida em que o cristal perde a tensão. Desta forma, em decorrência deste aumento de energia, as superfícies, quando recém formadas, são quimicamente mais ativas (EVERTSSON, 2000; WILLS e FINCH, 2016).

Ao submeter partículas irregulares a esforços de compressão, são geradas partículas grossas, resultantes da quebra por tensão, e finas, devidas à compressão no local de aplicação da carga, como observado na Figura 19. A quantidade de finos é reduzida diminuindo esta área de aplicação da carga.

Na quebra por impacto com esforços aplicados rapidamente, a partícula absorve mais energia do que a necessária para fraturar-se, fragmentando por tração. O produto deste tipo de quebra são partículas de tamanho e forma similares (WILLS e FINCH, 2016). A quebra por atrito decorre principalmente das interações entre partículas, podendo ocorrer até em britadores, quando a alimentação é feita rapidamente. A produção de finos, neste tipo de quebra, é maior (WILLS e FINCH, 2016).

Figura 19 – Fratura por britagem.



Fonte: WILLS e FINCH, 2016.

2.6.3 Equipamentos de Britagem

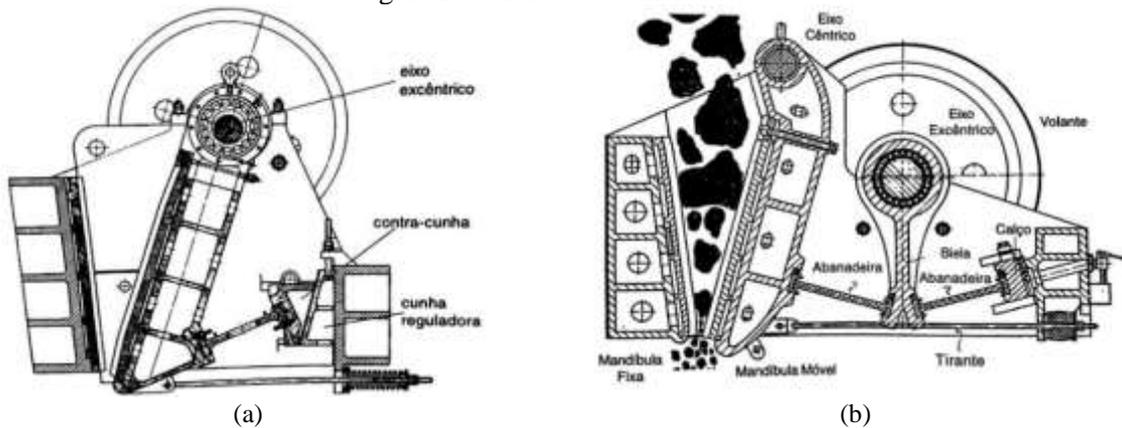
Dentre os tipos de britadores, destacam-se os britadores de mandíbulas, giratórios, de impacto e de rolos. Nos britadores de mandíbulas, é aplicada energia por meio de compressão das partículas; nos britadores giratórios, ocorre por compressão entre manto e cone; já nos de impacto, a energia cinética do impactor é aplicada à partícula, levando à fratura (CHAVES e PERES, 2009). Destacam-se a seguir os britadores de mandíbulas e de rolos.

- **Britadores de Mandíbulas**

O britador de mandíbulas possui uma placa metálica móvel (mandíbula móvel) que se move em movimento recessivo (afasta-se e aproxima-se) de uma placa metálica fixa (mandíbula fixa). O fragmento da rocha é inserido no espaço entre as mandíbulas e, a partir do movimento recessivo, é esmagado. Os fragmentos resultantes escoam para baixo até um ponto no qual ficam contidos pelas mandíbulas, sendo novamente esmagados em um novo movimento de aproximação da mandíbula (CHAVES e PERES, 2009; GUPTA e YAN, 2016).

Os britadores de mandíbulas possuem um ou dois eixos. Nos britadores de um eixo, a mandíbula móvel move-se em torno de um eixo excêntrico, executando um movimento circular. Já nos britadores de dois eixos, a mandíbula móvel movimenta-se em torno de um eixo cêntrico, cujo movimento é gerado pelo eixo excêntrico. Neste caso, a mandíbula móvel apenas realiza um movimento de arco de círculo, aproximando-se e afastando-se da extremidade inferior da mandíbula fixa (CHAVES e PERES, 2009). Estes mecanismos estão ilustrados na Figura 20.

Figura 20 – Britador de mandíbulas.



Fonte: (a) FAÇO - Rebritadores de Mandíbulas, s.d. apud CHAVES e PERES, 2009; (b) IBAG - Jaw Crushers, s.d. apud CHAVES e PERES, 2009.

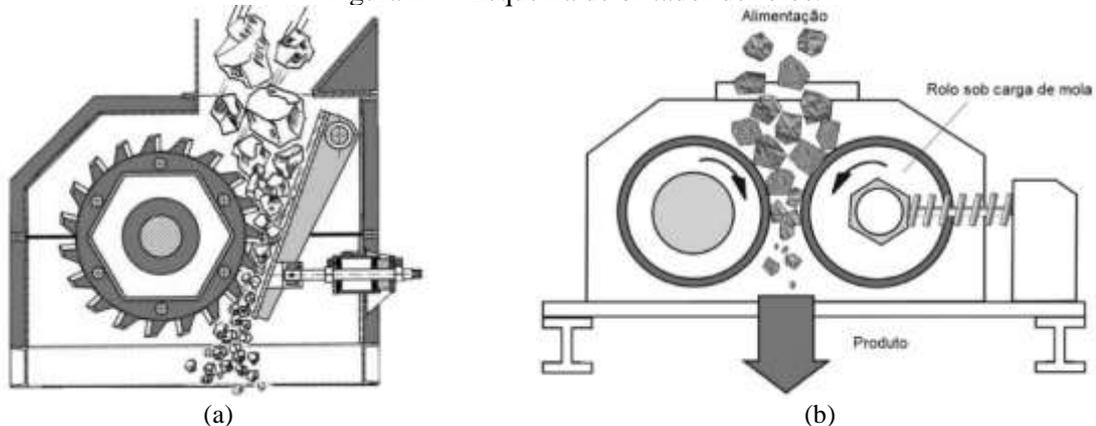
(a) Um eixo. (b) Dois eixos.

• Britador de Rolos

Os britadores de rolo tem seu uso reduzido industrialmente, principalmente devido a sua baixa capacidade e sua relação de redução limitada (CHAVES e PERES, 2009). Contudo, ainda são bastante utilizados para rochas pouco ou medianamente duras (LIEBERWIRTH, HILMANN e HESSE, 2017). Em laboratórios, são extensivamente usados (CHAVES e PERES, 2009).

Os britadores de rolos consistem em dois ou mais rolos que giram em direções opostas. Britadores com um rolo também existem, com um rolo girando contra um prato de quebra fixo (Figura 21a). Britadores com mais de dois rolos podem ser de dois tipos: rolos fixos a uma estrutura, com a possibilidade de ajuste lateral de um dos rolos para controlar o vão entre eles; e um dos rolos montado com uma mola (Figura 21b), o que ajuda a manter pressão uniforme em todo o comprimento dos rolos (GUPTA e YAN, 2016).

Figura 21 – Esquema de britador de rolos.

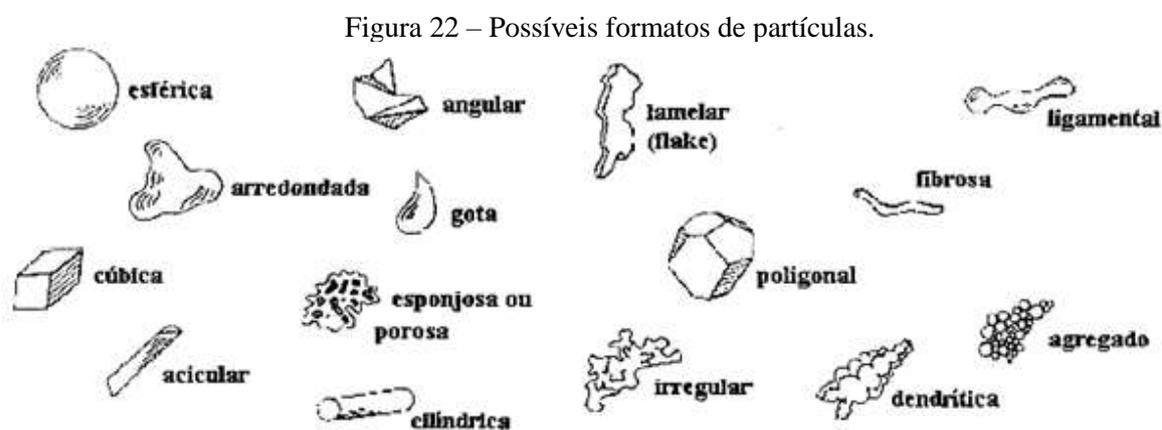


Fonte: (a) AUBEMA, [s.d.]; (b) GUPTA E YAN, 2016.

(a) Um rolo (dentado); (b) Dois rolos (lisos).

2.6.4 Morfologia das Partículas

Várias são as formas possíveis de partículas, sejam elas naturais ou provenientes de processos de britagem. A Figura 22 ilustra alguns dos formatos observados.



Fonte: GERMAN, 1994, apud PAPINI, 2003.

A britagem influencia na morfologia das partículas, na granulometria e na proporção de microfinos, fazendo com que estas reflitam características petrológicas e petrográficas próprias (GONÇALVES *et al.*, 2007; LUZ e ALMEIDA, 2012). Tem-se, por exemplo, que os quartzitos, gnaisses, arenitos estratificados e xistos produzem partículas lamelares, enquanto os basaltos, quando compactos, geram partículas de forma cúbica (LUZ e ALMEIDA, 2012).

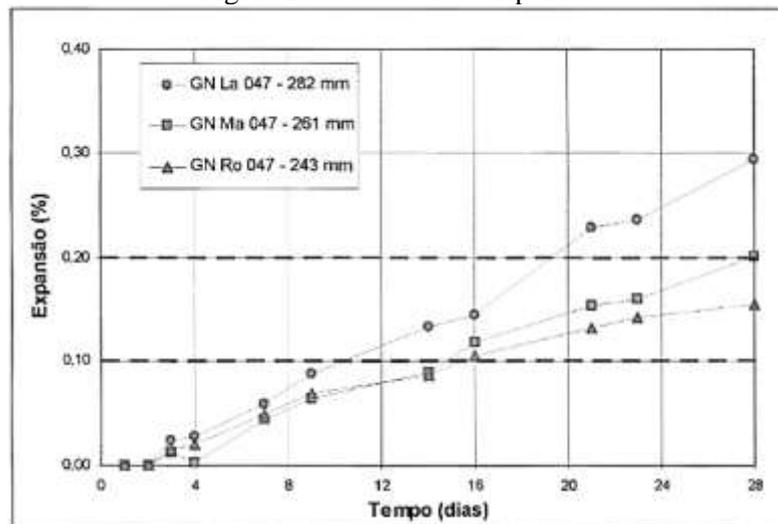
A mineralogia da rocha, xistosidade, existência de trincas ou intemperismo no maciço podem levar a uma tendência de a rocha britar em partículas lamelares. A experiência tem demonstrado que o processo de britagem em câmara cheia favorece a cubicidade do produto de britagem, uma vez que possibilita a britagem interparticular, o que faz com que as partículas lamelares sejam quebradas em formato cúbico (CHAVES e PERES, 2009).

Ramyar, Topal e Andiç (2005) estudaram o efeito do tamanho e angularidade de agregados naturais e britados, observando diferenças consideráveis nas expansões para agregados de tamanho intermediário (0,5 – 2,0 mm), além de ser mais evidente nesta dimensão a influência da angularidade, com efeito mais pronunciado para o agregado britado.

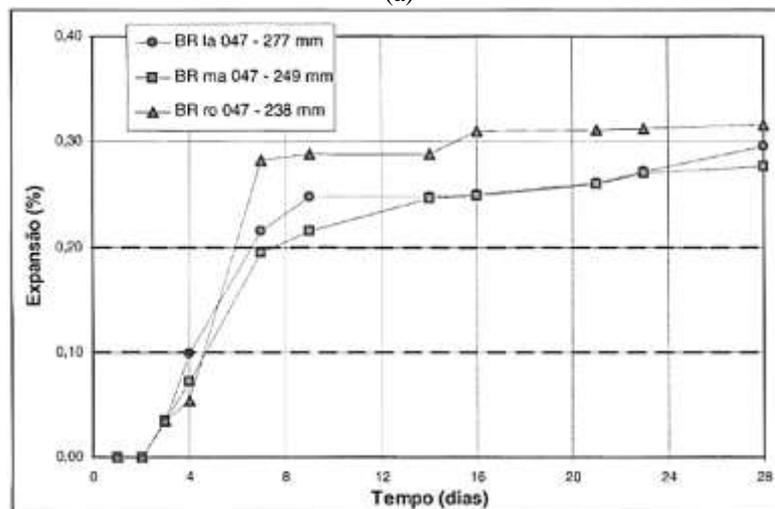
Valduga (2007) estudou a influência da morfologia de partículas de granito e basalto decorrente de diferentes métodos de britagem, por britador de mandíbulas, britador de rolos e abrasão Los Angeles. Para um granito, considerado não reativo, foram obtidos resultados de expansão maiores para a britagem por meio de abrasão Los Angeles, seguida do britador de mandíbulas

e de rolos, respectivamente. Esta tendência reflete a esfericidade das partículas, obtendo-se maiores expansões para partículas mais esféricas e menores para partículas mais lamelares. Já para um basalto considerado reativo, as maiores expansões foram obtidas para o britador de rolos, seguido do Los Angeles e por fim o britador de mandíbulas. Neste caso, é possível que a maior área superficial específica proveniente das partículas britadas pelo britador de rolos tenha interferido. A Figura 23 apresenta os gráficos de expansão para os dois casos.

Figura 23 – Gráficos de expansão.



(a)



(b)

Fonte: VALDUGA, 2007.

(a) Granito; (b) Basalto (La: Los Angeles, Ma: Mandíbulas; Ro: Rolos).

A morfologia das partículas interfere em várias propriedades do concreto, como trabalhabilidade e resistência à compressão, assim como em processos deletérios, como a reação álcali-agregado. O tipo de britagem, por sua vez, influencia no formato das partículas geradas. Desta forma, é importante um maior conhecimento da relação entre os diferentes equipamentos

de britagem, a forma da partícula gerada e as consequências advindas de seu uso em concreto em relação às características de interesse, como a reatividade potencial do agregado. No caso da reação álcali-agregado, este conhecimento torna-se fundamental, uma vez que, em geral, avalia-se a reatividade de um agregado por meio do ensaio acelerado de barras de argamassa. Neste ensaio, há a utilização de agregados graúdos britados até a dimensão de agregado miúdo, o que torna as diferentes morfologias decorrentes de diferentes modos de britagem uma variável na análise dos resultados. Optou-se por utilizar o britador de mandíbulas e o de rolos, por sua maior disponibilidade em laboratórios.

2.7 MITIGAÇÃO

Medidas para minimizar o risco de ocorrência da RAA consistem em eliminar um dos fatores essenciais. Anteriormente, focava-se na utilização de um cimento com baixo teor de álcalis. Esta medida, contudo, pode não ser efetiva caso haja outras fontes de álcalis, seja dos constituintes do concreto, seja de fontes externas (SIMS e SOTIROPOULOS, 1989 apud HEWLETT, 2004; NIXON, COLLINS e RAYMENT, 1979). Com relação à umidade, limitando-a a um valor abaixo de 80%, como visto na Figura 9, diminui-se as expansões referentes à RAA (ASGEIRSSON, 1986; LI, 2011; SWAMY, 1992). Atualmente, o uso de adições apresenta-se como uma alternativa bastante utilizada.

Outras alternativas para minimizar a probabilidade de ocorrência da RAA são objeto de estudo de diversos autores. A utilização de um revestimento externo impermeabilizante ao concreto é citada por Li (2011) e Shetty (2005) como uma opção que pode ser efetiva na redução dos efeitos da RAA, uma vez que impede a absorção de água. Para agregados levemente reativos, Mehta e Monteiro (2014) citam a substituição de 25 a 30% da quantidade total de agregado por agregado inócuo como opção.

Sabe-se que a RAA ocorre na interface entre a pasta e a superfície do agregado. Distribuições de Na_2O , K_2O , SiO_2 e CaO ao redor do agregado mostram quantitativamente que a camada de reação está numa faixa de 300 μm (LI, 2011). Desta forma, Li (2011) afirma que se pode utilizar revestimentos controladores de difusão nos agregados, os quais são compostos de cimento Portland de rápida pega, areia silicosa tratada (silicato dealcalinizado) e aditivos químicos. Misturam-se estes materiais à água e o produto é utilizado para revestir os agregados reativos antes da mistura do concreto. Segundo o autor, com o uso desta técnica, tem-se a redução e o retardamento dos efeitos da reação álcali-agregado.

Opções mais utilizadas para prevenir a ocorrência da RAA, as adições minerais e adições químicas são tratadas a seguir.

2.7.1 Adições Minerais

As adições minerais, também conhecidas como materiais cimentícios suplementares (MCS), são materiais que, ao serem utilizados em conjunto com o cimento Portland, contribuem para as propriedades do concreto endurecido por meio de atividade pozolânica ou hidráulica, ou ambos. Muitas têm propriedades pozolânicas, o que significa que, na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentícias (THOMAS, 2013). Diversos estudos têm demonstrado que a utilização de MCS, como sílica ativa, metacaulim, cinza volante, escória de alto forno, entre outros, pode inibir a ocorrência da reação álcali-agregado (KAWABATA e YAMADA, 2017). De acordo com Thomas (2011), o material mais eficiente é a sílica ativa, seguida do metacaulim, cinza volante com baixo teor de cálcio e escória.

De acordo com Thomas (2011), a quantidade de MCS requeridos geralmente aumenta com o aumento dos seguintes fatores:

- Teor de álcalis provenientes do cimento;
- Teor de álcalis dos MCS;
- Relação CaO/SiO_2 nos MCS;
- Reatividade dos agregados.

Os métodos de ensaio mais comumente utilizados para avaliar a eficácia de materiais cimentícios suplementares no controle da RAA são o ensaio acelerado de barras de argamassa (NBR 15577-5; ASTM C 1567) e o ensaio dos prismas de concreto (NBR 15577-6; ASTM C 1293) (THOMAS, 2011).

A seguir, estão descritos os efeitos das adições minerais responsáveis por sua eficiência na mitigação da reação álcali-agregado.

2.7.1.1 Efeito das Adições Minerais

Logo após a descoberta da reação álcali-agregado, observou-se que a adição de um material de granulometria reduzida e reativo, como pozolanas, poderia prevenir a expansão causada pela utilização de um agregado reativo, em se tratando da reação álcali-sílica. Na Islândia, por exemplo, há apenas disponibilidade de agregados reativos e cimento com alto teor de álcalis.

Para prevenir a ocorrência de reação álcali-agregado, convencionou-se adicionar teores de 7% a 8% de sílica ativa ao cimento Portland comercializado (ASGEIRSSON, 1986; LI, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quando usadas em quantidades adequadas, as adições podem ser efetivas contra a reação álcali-agregado. Contudo, dependendo da quantidade utilizada e de outros fatores intrínsecos à adição, seu efeito pode ser mais catastrófico do que os da RAA (DUCHESNE e BERUBÉ, 1994). Devido à maior reatividade da sílica ativa, por exemplo, considerada uma superpozolana, a porcentagem utilizada para prevenir a RAA é inferior à utilizada para outras pozolanas (HEWLETT, 2004).

Duchesne e Berubé (1994) observaram que, para agregados altamente reativos, a utilização de 20% de cinza volante pulverizada com alto teor de álcalis ou 5% de sílica ativa resultou em expansões maiores do que as obtidas em concretos sem adição. Além disso, os autores também determinaram que 10% de sílica ativa com alto teor de álcalis pode não ser suficiente para reduzir as expansões a níveis satisfatórios, enquanto que a mesma quantidade de sílica ativa com baixo teor de álcalis é suficiente. Estes resultados demonstram a complexidade da utilização de adições no controle da RAA assim como a importância de determinar-se a porcentagem ótima para casos específicos. Salienta-se que a pozolana é mais eficaz quando utilizada substituindo um percentual do cimento ao invés de usada como adição (HEWLETT, 2004).

Hewlett (2004) aponta algumas características das pozolanas associadas ao seu efeito em relação à reação álcali-agregado, tais como:

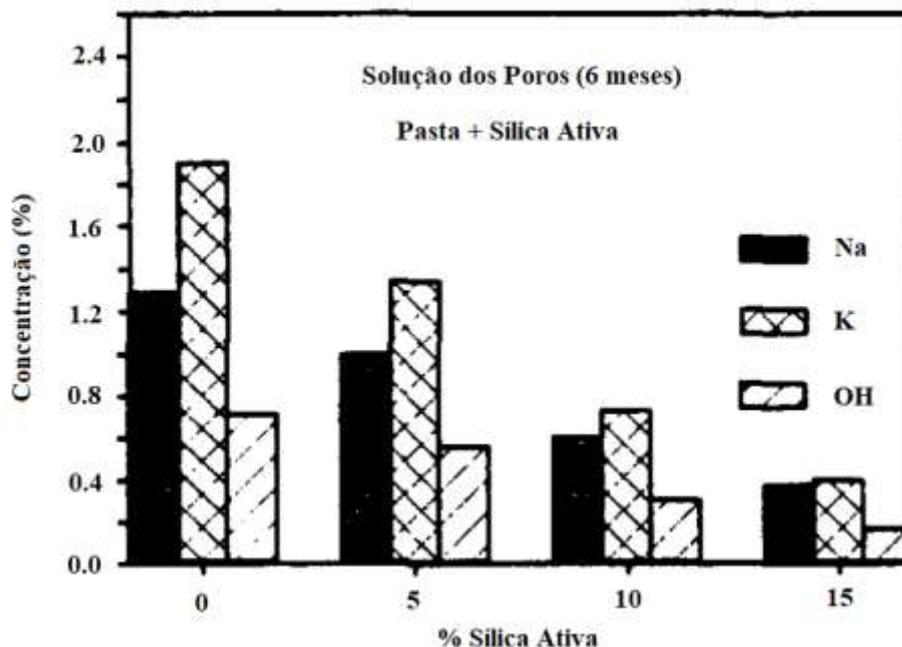
- Menor permeabilidade e, conseqüentemente, menor mobilidade de íons;
- Menor alcalinidade e pH na solução dos poros;
- Menor quantidade de portlandita;
- Maior quantidade de álcalis nos hidratos;
- Menor razão C/S do C-S-H.

A seguir, cada característica é discutida.

Permeabilidade: a reduzida permeabilidade decorrente da utilização de adições desacelera a reação, retardando o transporte de álcalis e também diminuindo a entrada de íons alcalinos provenientes do meio externo (DURAND *et al.*, 1990; HEWLETT, 2004; LI, 2011).

Alcalinidade: há uma diminuição dos álcalis e hidroxilas presentes na solução dos poros decorrente da adição de materiais pozzolânicos, os quais são consumidos pela reação pozzolânica, formando C-S-H (LI, 2011), como apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Concentração de íons nas soluções dos poros a 6 meses com 0, 5, 10 e 15% de sílica ativa condensada.

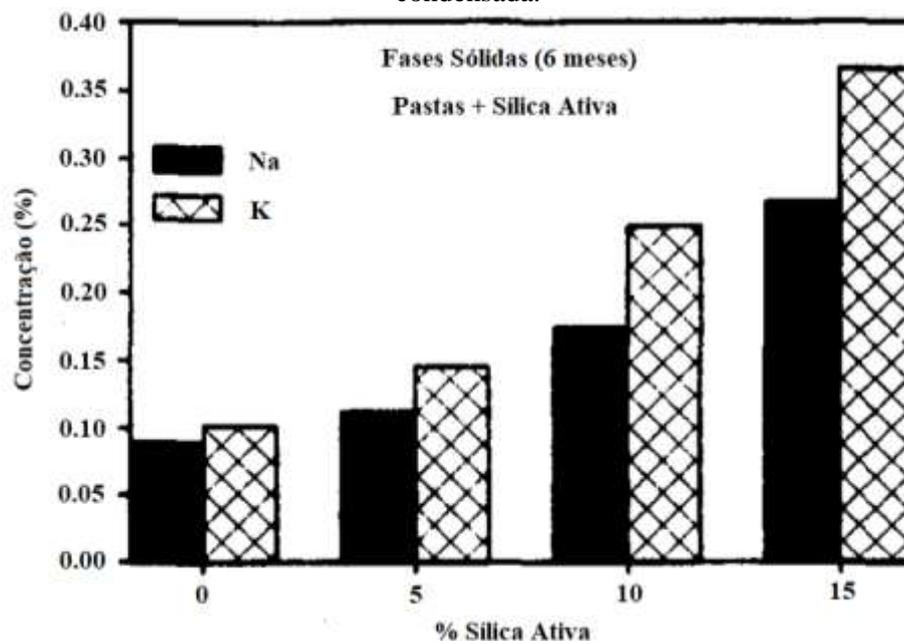


Fonte: DURAND *et al.* (1990).

Quantidade de Portlandita: Segundo Chatterji (1979), a presença de hidróxido de cálcio (Portlandita) é essencial para a ocorrência da RAS, hipótese que tem sido apoiada por diversas pesquisas (DIAMOND, 1989 apud HEWLETT, 2004). Tem-se que, para um dado agregado reativo e cimento Portland, quanto maior a substituição por pozzolanas, menor a quantidade de portlandita e, conseqüentemente, menores as expansões (HEWLETT, 2004).

Aumento da concentração de álcalis nos hidratos e relação C/S: à medida que os álcalis são absorvidos pelos hidratos, há a diminuição de sua concentração na solução dos poros. A adição de materiais pozzolânicos diminui a relação C/S do C-S-H, possibilitando a absorção dos álcalis em sua estrutura. A relação C/S também influencia na carga do C-S-H: menores relações levam a cargas elétricas menores e a estrutura tende a absorver cátions enquanto maiores relações levam a cargas elétricas maiores, com tendência à absorção de ânions (SWAMY, 1992). Em uma pasta de cimento comum, essa incorporação é da ordem de 15%, enquanto em pastas com cimento e adição, este valor chega a 95% (BHATTY e GREENING, 1986 apud HEWLETT, 2004). Este efeito pode ser comprovado na Figura 25.

Figura 25 – Concentração de íons nas fases sólidas a 6 meses com 0, 5, 10 e 15% de sílica ativa condensada.



Fonte: DURAND *et al.*, 1990.

2.7.1.2 Fatores que Interferem no Efeito de Adições Minerais

Alguns fatores podem afetar a ação de adições minerais, seja potencializando os resultados benéficos em relação à mitigação da RAA, seja acarretando em resultados opostos aos esperados. A seguir, alguns destes fatores são abordados.

2.7.1.2.1 Finura

Muitos resultados sugerem que pozolanas, assim como sílica reativa, geram reações pozolânicas ou deletérias expansivas, dependendo da finura das partículas (HEWLETT, 2004). Desta forma, se o material silicoso tiver dimensões reduzidas e estiver bem distribuído na matriz cimentícia, a borda de reação formada é de pequena espessura e distribuída uniformemente, de modo que não é possível detectar uma possível expansão (HEWLETT, 2004). Contudo, caso os grãos tenham dimensões de grãos de areia, a espessura da borda de reação é maior e a expansão é significativa (HEWLETT, 2004). Desta forma, tem-se que aglomerações de pozolana com dimensão de areia podem se comportar como agregados reativos e exemplos de danos causados têm sido reportados (THOMAS, 2011).

Pesquisas mostraram que a eficácia das pozolanas em relação à RAA é devida à sua habilidade de reagir com os álcalis antes do que as partículas reativas com dimensão de areia ou agregado graúdo. Essa habilidade é dependente da finura e da dispersão da pozolana na matriz cimentícia, podendo, inclusive, contribuir para a expansão da RAA (DIAMOND, 1983).

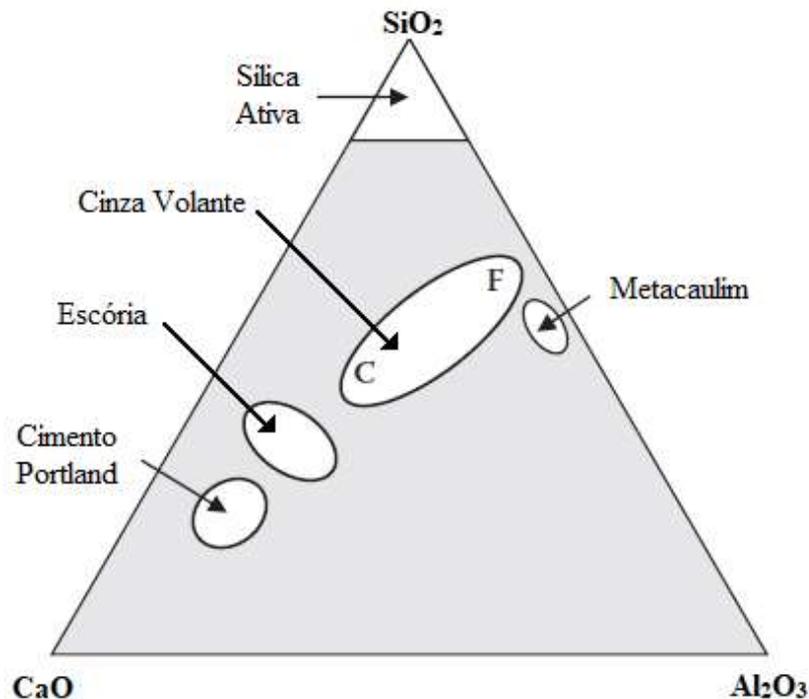
2.7.1.2.2 Teor Pésimo de Adição

Efeito causado por uma substituição de cimento por pozolana inadequada e consiste no aumento rápido da quantidade de álcalis e do pH da solução dos poros associado a um retardado início da reação pozolânica (HEWLETT, 2004). O efeito péssimo da sílica ativa pode acontecer com alguns agregados e com outros não (HEWLETT, 2004).

2.7.1.3 Tipos de Adições Mineraias

Vários são os tipos de adições utilizadas na mitigação da reação álcali-agregado, como sílica ativa, metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno. A composição destes materiais varia conforme esquematizado na Figura 26.

Figura 26 – Composição química das principais adições mineraias.



Fonte: THOMAS, 2013.

As partículas de sílica ativa e cinza volante são esféricas. Contudo, as partículas de sílica são cerca de 100 vezes mais finas do que as de cinza volante. Já o metacaulim e a escória necessitam de moagem para poder ser inseridos no concreto, o que faz com que suas partículas sejam mais angulares (THOMAS, 2013).

A hidráulidade de um MCS aumenta com o aumento da quantidade de cálcio. Desta forma, a sílica, que normalmente possui mais de 90% de sua composição de SiO_2 , é um material puramente pozolânico, sem propriedades hidráulicas. Em contrapartida, a escória tem ação hidráulica, com pouca ou nenhuma atividade pozolânica, como observado no Quadro 3.

Quadro 3 – Reações pozolânicas e hidráulicas de MCS.

MCS	Pozolanicidade	Hidraulicidade	Quantidade de Cálcio
Sílica Ativa	XXXXX		Baixa (<1%)  Alta (>30%)
Metacaulim	XXXXX		
Cinza volante com baixo teor de CaO	XXXX		
Cinza volante com alto teor de CaO	XXX	XX	
Escória	X	XXXX	

Fonte: THOMAS, 2013.

O nível de substituição necessário para controlar as expansões devidas à RAA aumenta com a diminuição da quantidade de SiO_2 , aumento da quantidade de CaO , aumento da quantidade de álcalis do MCS, aumento dos álcalis disponíveis no concreto e aumento da reatividade do agregado (THOMAS, 2013). Materiais cimentícios suplementares com baixa quantidade de sílica, mas alta quantidade de cálcio e álcalis devem ser usados em níveis de substituição mais altos do que MCS com alta quantidade de sílica e baixa quantidade de cálcio e álcalis.

A sílica ativa é a sílica não cristalina ultrafina produzida em fornos de arco elétrico como subproduto da produção de ligas de metais de silício e ferro-silício. As partículas de sílica têm diâmetro médio entre 0,1 e 0,2 μm e área superficial específica entre 15000 a 25000 m^2/kg , medida por adsorção de nitrogênio. Esta adição é muito eficiente para controlar as expansões decorrentes da RAA e a quantidade requerida é influenciada pela quantidade de álcalis disponíveis no concreto (THOMAS, 2013).

A cinza volante é o subproduto da queima de combustível em uma estação de geração de eletricidade. Esta pode ser do tipo F ou C, dependendo da quantidade de cálcio e da soma de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , sendo a classe C com alta quantidade de cálcio e a classe F com baixa quantidade de cálcio. A escória é um subproduto da produção do ferro para a fabricação de aço. O metacaulim, por sua vez, é produzido pela ativação térmica de argila caulinítica.

As adições mencionadas têm seu uso consolidado, tanto para evitar a ocorrência da reação álcali-agregado quanto para melhorar propriedades do concreto, como a resistência. Outras pozolanas têm sido estudadas e seus efeitos em relação à RAA analisados, como por exemplo a cinza da casca de arroz e a cinza do bagaço da cana de açúcar. Hasparyk (1999) estudou a utilização de cinza da casca de arroz, concluindo que este material pode ser considerado uma adição mineral pozolânica eficiente no combate à RAA. Aguas (2014), por sua vez, analisou a influência do bagaço da cana de açúcar nas expansões da RAA, avaliando a substituição de

cimento por teores de 8% e 12%. A autora observou que as expansões não foram reduzidas com o uso deste material.

Uma outra opção é a utilização de finos de agregado reativo, material conhecido como Pó de Agregado Reativo (PAR), cujos estudos remontam à publicação de Stanton (1940). Contudo, apesar de esta solução ter sido utilizada em algumas obras, ainda não é correntemente aplicada.

Uma revisão sobre a uso deste material e sua ação mitigadora em relação à reação álcali-agregado é apresentada a seguir.

2.7.1.3.1 *Pó de Agregado Reativo*

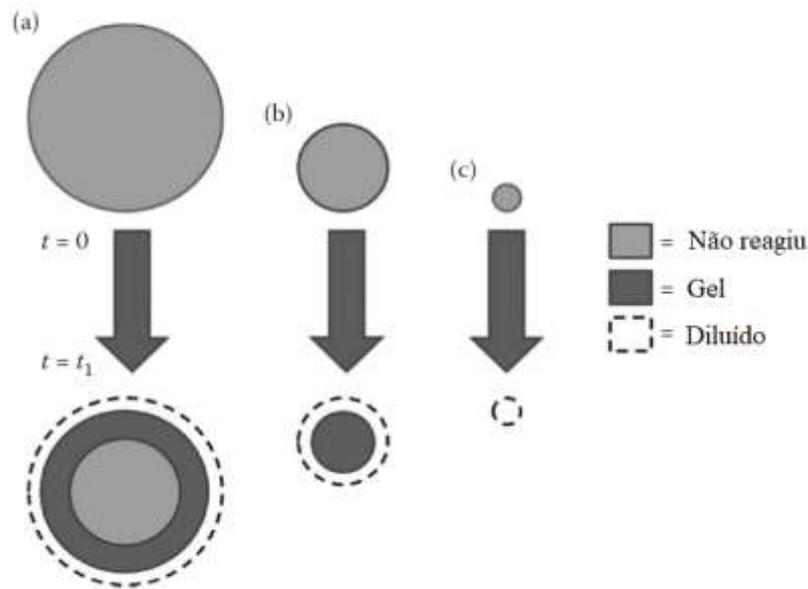
Muitos autores apontam a semelhança entre a reação álcali-agregado e a reação pozolânica (HOU, STRUBLE e KIRKPATRICK, 2004; THOMAS, 2011). Taylor (1997) afirma que a química destas reações é a mesma, com efeitos diferentes devido à diferença no tamanho de partículas do material silicoso. Elas diferem entre si na escala de tempo em que acontecem e na ocorrência de expansão. Enquanto na reação pozolânica o produto formado (C-S-H) é rígido, na RAA ele é viscoso. Além disso, o produto da reação pozolânica está uniformemente distribuído na matriz cimentícia, enquanto que o gel formado pela RAA concentra-se na superfície do agregado (LINDGÅRD *et al.*, 2012). Para as partículas de pequenas dimensões, a dissolução do gel de RAA é rápida, permitindo que os grupos silicato dissolvidos possam reagir com os íons de cálcio para produzir C-S-H, que contribui para o desenvolvimento de resistência (DYER, 2014).

A falta de expansão na reação pozolânica pode ser devida à finura dos materiais, além da distribuição homogênea do produto da reação na matriz cimentícia. Com a presença de partículas de agregado reativo, há a acumulação de depósitos de gel em sua superfície, em locais pontuais, que podem se tornar locais de expansão (THOMAS, 2011).

Desde Stanton (1940), é observada a importância do tamanho e granulometria das partículas de agregado, uma vez que ele determinou que, se um agregado reativo tem suficiente finura (partículas inferiores a 180µm, de acordo com seu estudo) não ocorre expansão. No trabalho no qual aponta a existência de reação entre os álcalis do cimento e o agregado, o autor sugere que, quando o agregado tem tamanho reduzido, esta reação é dissipada na matriz cimentícia de um modo que não causa grandes forças reativas ou a reação é em grande parte finalizada antes de o concreto alcançar o fim de pega. Dyer (2014) afirma que, em pequenas partículas, a porção reativa é convertida em gel, significando que a posterior diluição contribuirá para reduzir a

expansão. Já no caso de grandes partículas, sua grande área superficial e volume significam que apenas uma parte dos componentes reativos reagirão, como observado na Figura 27.

Figura 27 – Esquema mostrando o efeito de uma taxa rápida de formação do gel da RAA e uma taxa lenta de dissolução do gel em um período t_1 .



Fonte: DYER, 2014.

- (a) Grandes partículas produzem consideráveis volumes de gel ao reagir; (b) Partículas menores são inteiramente convertidas em gel, que gradualmente dissolve; (c) Partículas muito pequenas são totalmente dissolvidas em um período relativamente curto de tempo.

Cyr, Rivard e Labrecque (2009) apontam que a utilização de agregados reativos em granulometria reduzida promove uma reação pozolânica ao invés da reação álcali-agregado, sendo o agregado a fonte de sílica reativa, tal qual em MCS convencionais. Os autores inferem que ambos os materiais apresentarão comportamento similar quando usados em materiais à base de cimento. Andriolo (2000) cita que as partículas finas levam a uma redução de álcalis disponíveis nas proximidades da superfície do agregado. Tais efeitos foram observados em diversos estudos, descritos a seguir.

Em 1985, para a obra da Barragem Urugua-I, na Argentina, que foi realizada em conjunto com o Laboratório de Concreto da Itaipu Binacional, foi utilizada a adição do subproduto de britagem de basalto como fino na produção de concreto rolado (BRAGA *et al.*, 1991). Estudos realizados por Oliveira, Salles e Andriolo (1995) determinaram a eficiência de fílers originados da britagem de rochas na minimização de expansões devidas à reação álcali-agregado. Além disso, durante os estudos para a construção da Barragem Capanda, em Angola, a Odebrecht, junto com o Laboratório de Itaipu e o engenheiro Albert Ossipov, do Moscow Scientific Research Center Hydroproject Institute, realizaram estudos complementares para avaliação da eficiência do “pó de pedra” na mitigação da RAA, observando uma ação benéfica dos finos

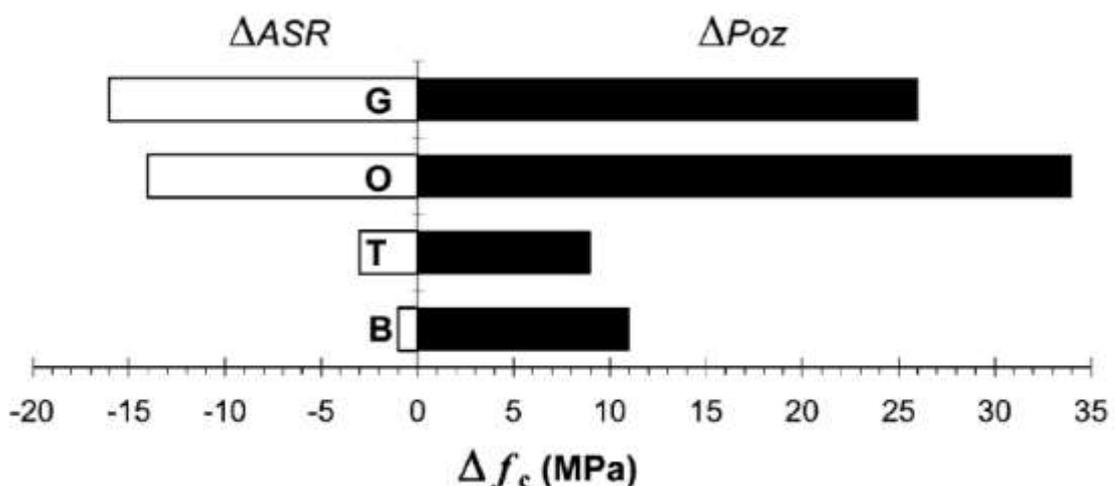
($\leq 0,075\mu$) no combate a este fenômeno para concreto compactado a rolo (ANDRIOLO e SCHMIDT, 1992; BRAGA *et al.*, 1991; KREMPEL e ANDRIOLO, 1995).

Alves *et al.* (1997) investigaram o uso de quartzito, utilizado na UHE Corumbá I, na forma de pó em substituição ao cimento como possível inibidor das expansões causadas pela RAA. Observaram uma redução nas expansões, além de capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, apesar da obtenção de valores abaixo daqueles obtidos para materiais pozzolânicos tradicionais. Salles, Oliveira e Andriolo (1997) fizeram análise similar com finos de britagem do basalto, observando certa atividade pozzolânica do material.

Almeida (1991, apud CASTRO, 1997b) afirma que os finos britados se tornariam aglutinantes devido à energia eletrostática liberada na quebra das moléculas, durante o processo de britagem. Com o tempo, há a estabilização desta característica, uma vez que as moléculas tendem a se reaproximar. Baseados neste conceito, Castro *et al.* (1997a) avaliaram a influência da idade pós-moagem na qual o pó foi utilizado na expansão por RAA, concluindo que as menores expansões eram observadas com a utilização de finos 60 dias após a moagem.

Carles-Gibergues *et al.* (2008) estudaram a inserção do Pó de Agregados Reativos (PAR) com diferentes finuras em prismas de concreto produzidos com os mesmos agregados (G, O, T, B), observando que houve a redução ou supressão de expansões devidas à RAA, supressão de fissuras superficiais e o contrabalanceamento à perda de resistência à compressão proveniente da RAA, como observado na Figura 28.

Figura 28 – Efeito da RAA e atividade pozzolânica de pós de agregados na resistência à compressão de concretos.



Fonte: CARLES-GIBERGUES *et al.*, 2008.

Thomas (2011) relatou que, em trabalho não publicado do laboratório no qual trabalhava, utilizando vidro Vycor (elevado teor de sílica) na granulometria de areia, este agiu como agregado reativo, resultando em grandes expansões, enquanto que, substituindo 20% do cimento, em dimensões inferiores a 100 μm , atuou como uma pozolana, evitando expansões.

Cyr, Rivard e Labrecque (2009) substituíram teores de 10% e 20% de areia por pós reativos de diferentes agregados com dimensões inferiores a 80 μm e diferentes superfícies específicas. Ao realizar o ensaio de autoclave acelerado, seguindo a norma francesa, observaram reduções de expansão de até 78% em comparação às argamassas de referência, além de uma tendência de maior efetividade da prevenção de expansões com o aumento da área superficial específica dos pós.

Li, He e Hu (2015) comentam que a produção de energia hidrelétrica na extensão superior do rio Yalong é importante para o fornecimento de energia e o desenvolvimento da parte oeste da China. Contudo, sabe-se que o arenito local é reativo e não há disponibilidade de adições minerais na área, sendo necessário seu transporte de outros locais, o que encareceria qualquer obra. Esta situação motivou os autores a estudar o pó deste agregado como mitigador da RAA, concluindo que este possibilita a supressão das expansões pela reação. Os autores observaram, também, que o pó apresentou efeito de nucleação e efeito de atividade pozolânica. Enquanto o efeito de nucleação favoreceu a produção de portlandita na pasta de cimento, o efeito da atividade pozolânica resultou no consumo de portlandita.

Apesar da vasta gama de pesquisas apontando a viabilidade do uso de PAR como mitigador da reação álcali-agregado, há, também, resultados conflitantes. Um exemplo é a pesquisa de Diamond e Thaulow (1974), que, utilizando agregado com opala, estudaram faixas entre 125 μm e 20 μm , observando que, para todas as faixas, houve aumento das expansões, com expansões máximas na faixa entre 30 μm e 20 μm . Esta, portanto, pode ser uma característica do agregado utilizado, sendo importante o estudo detalhado dos finos de agregado reativo para conhecer suas propriedades.

2.7.2 Adições Químicas

De acordo com Ramachandran (1998), adições químicas podem influenciar a trabalhabilidade, aprisionamento de ar, taxa de hidratação, corrosão, exsudação e desenvolvimento da resistência de um concreto. Além disso, sabe-se que algumas adições químicas são eficazes contra a reação álcali-agregado. Pesquisas sobre este tema datam da década de 50, quando McCoy e Caldwell

(1951, apud ZAPATA-SLAWETA e OWSIAK, 2016) estudaram o potencial inibidor de mais de 100 compostos, concluindo que os compostos de lítio são os mais eficazes.

Diamond (1999) destaca que, dentre os compostos de lítio, deve-se atentar para a dosagem de LiOH, LiF e Li₂CO₃, uma vez que, ao dissolverem, resultam na formação de LiOH, proporcionando aumento de pH. Desta forma, a dosagem desses compostos deve ser tal que o aumento do pH seja contrabalanceado pelo seu efeito positivo em relação à formação de gel da RAA; caso contrário, haverá o aumento das expansões. Em contrapartida, o uso de LiNO₃, segundo o autor, não apresenta este problema, não aumentando, desta forma, o potencial para RAA devido a este fator.

Tremblay *et al.* (2007) demonstraram a influência do tipo de agregado na quantidade de lítio necessária para suprimir as expansões devidas à RAA. Desta forma, como a eficácia do lítio, segundo os autores, está atrelada ao agregado, é necessário realizar testes para determinar a dosagem adequada para o agregado utilizado.

Hasparyk (2005) estudou o efeito do lítio em testemunhos de concreto de obra já afetados por RAA, observando a redução das expansões residuais em cerca de 40%, além de destacar a importância do momento de aplicação, uma vez que, dependendo das expansões já atingidas, o efeito do lítio pode ser demorado ou não tão satisfatório. Cândido (2009), por sua vez, estudou a eficiência dos tipos de tratamento, determinando que, para concreto, as maiores reduções de expansão foram obtidas com a saturação superficial de lítio, enquanto que, para argamassa, todos os tratamentos utilizados reduziram as expansões a níveis próximos.

Em relação ao mecanismo de ação do lítio, há várias teorias que tentam explicar o efeito do lítio na redução das expansões. Owsiak e Zapala-Slaweta (2013) citam que o efeito do lítio pode estar conectado com a crescente estabilidade da sílica reativa, devido ao menor pH da solução de poros. Folliard, Thomas e Kurtis *et al.* (2003) também citam que o lítio pode alterar a composição do produto da RAA, resultando em um produto menos expansivo, reduzir a dissolução da sílica, diminuir a repolimerização da sílica e silicatos e reduzir as forças repulsivas entre partículas coloidais do gel de RAA. Nesse aspecto, Hasparyk (2005) e Schneider *et al.* (2008) observaram que o lítio é capaz de afetar a estrutura dos produtos da reação álcali-agregado, produzindo compostos com incorporação de lítio e menor capacidade de expansão. Feng *et al.* (2010) sugeriram que há a formação de uma camada de cristais de Li-Si e gel de RAA com presença de lítio e baixa quantidade de cálcio, que formam uma estrutura na qual o gel preenche os espaços entre os cristais ou repousa sobre estes. Esta camada forma

uma barreira que impede a difusão das hidroxilas. Desta forma, ainda não há consenso em relação ao mecanismo de ação, uma vez que as teorias explicam parcialmente fenômenos que ocorrem com a adição do lítio.

Ramachandran (1998) menciona alguns compostos orgânicos, também testados por McCoy e Caldwell, que têm eficácia na redução de expansões, como metilcelulose e proteína hidrolisada. Shetty (2005) também cita o pó de alumínio como eficaz em relação à RAA.

As adições, tanto químicas quanto minerais, são um dos métodos mais utilizados e eficazes para evitar a ocorrência da RAA. Deve-se atentar, contudo, para a correta porcentagem de utilização no concreto, uma vez que, em quantidade insuficiente, não haverá diminuição significativa das expansões ou a adição pode ter efeito contrário, intensificando a reação. Além disso, as adições têm custos elevados em relação aos outros componentes do concreto e sua disponibilidade é limitada em várias partes do país, o que deve ser considerado quando da escolha do método de mitigação.

2.8 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL REATIVO E DA EFICIÊNCIA DA MITIGAÇÃO

Os métodos de teste para identificar o potencial para a reação álcali-agregado podem ser, entre outros, procedimentos visuais e microscópicos, para averiguar a presença de minerais reconhecidamente reativos, ou testes de expansão, para acelerar e quantificar as consequências físicas da reação (HEWLETT, 2004). Os testes de expansão podem ser realizados em argamassa e concreto e também são utilizados para avaliar a eficiência da mitigação quando do uso de adições.

A seguir estão exemplificados alguns métodos que são, atualmente, os mais utilizados.

2.8.1 Análise Petrográfica

A análise petrográfica tem como objetivo examinar os agregados de modo a descrever sua estrutura, textura e composição mineral, identificando componentes minerais potencialmente reativos (ABNT NBR 15577-3, 2018; LUZ e ALMEIDA, 2012; SIMS e NIXON, 2003) e deve ser o primeiro passo na avaliação da reatividade de um agregado.

Diversos estudos objetivaram identificar quais seriam os parâmetros que influenciariam no desencadeamento da RAA. Rodrigues (1994), por exemplo, aponta para a quantidade de quartzo microgranular ($< 0,15$ mm), a granulometria da matriz rochosa e dos cristais de quartzo

($\geq 0,15$ mm) e as medidas de ângulo de extinção ondulante, que podem indicar o grau de deformação da rocha. A NBR 15577-3 (2018) indica que deve ser observada na análise petrográfica a presença e quantidade de quartzo microgranular e de minerais suscetíveis à RAA, como calcedônia, tridimita, cristobalita e opala; texturas indicativas de deformação, como recristalização do quartzo e pertita em chama e o ângulo de extinção ondulante.

Os feldspatos apresentam texturas que indicam a alteração da rocha, como a mimerquita e a pertita em chama. A mimerquita é um intercrescimento entre o plagioclásio e o quartzo, também conhecido como quartzo vermiforme, enquanto a pertita é o crescimento do plagioclásio no ortoclásio. Além disso, a presença de sericitização também é um indicador da alteração da rocha. Em relação ao quartzo, tem-se a recristalização, que se trata de um rearranjo e modificação dos cristais por meio de migração e modificação dos contornos de grão, resultando em mudança no tamanho do cristal; e a extinção ondulante, que é a extinção irregular de um único cristal sob luz polarizada devido a distorções na rede cristalina com alta concentração de defeitos (PASSCHIER e TROUW, 1998).

Wigum (1995), ao estudar diferentes tipos de rocha, concluiu que a diminuição do tamanho do grão do quartzo aumenta a reatividade, uma vez que há um aumento na área superficial dos grãos de quartzo disponíveis para a reação.

Grattan-Gellew (1987, apud SWAMY, 1992) sugere que a aparente relação da extinção ondulante com a reatividade potencial é devida ao quartzo microcristalino, uma vez que rochas sujeitas a metamorfismo, que provoca a extinção ondulante, frequentemente têm recristalização do quartzo como microcristalino.

2.8.2 Ensaio Acelerado das Barras de Argamassa

O ensaio acelerado de barras de argamassa foi baseado no estudo de Oberholster e Davies (1986), no National Building Research Institute (NBRI), na África do Sul, na década de 1980, no qual eles aperfeiçoaram o que havia sido proposto previamente por Van Aardt e Visser, em 1982. Desde então, diversos países e seus respectivos institutos de normatização fizeram adaptações para atender à sua realidade, incorporando resultados de pesquisas recentes.

No Brasil, este método é descrito pela NBR 15577-4: 2018. O ensaio consiste na determinação da susceptibilidade de um agregado em participar da reação álcali-sílica por meio da variação de comprimento de barras de argamassa (NBR 15577-4, 2018). São moldadas barras de argamassa de dimensões 25 x 25 x 285 mm, as quais são imersas por um período de 28 dias em

uma solução de 1 N de NaOH a 80°C. Durante este período, as expansões são mensuradas. A norma 15577-1: 2018 estabelece que, caso as expansões sejam iguais ou superiores a 0,19% após o período de imersão, o agregado será considerado potencialmente reativo. A NBR 15577-5: 2018 trata deste ensaio quando da utilização de adições para mitigar a reação.

A norma americana ASTM C 1260: 2014 também trata do ensaio de barras acelerado. O procedimento das normas é semelhante, contudo, os limites estabelecidos pela ASTM são diferentes: se as expansões aos 16 dias forem inferiores a 0,10%, o agregado é considerado inócuo; para expansões superiores a 0,20%, o agregado é classificado como potencialmente deletério; caso as expansões estejam entre 0,10% e 0,20%, é necessária a obtenção de informações suplementares acerca do agregado. Já a ASTM C 1567:2013 aborda o uso de adições na realização deste ensaio.

A norma europeia para este método, RILEM AAR – 2, assemelha-se ainda mais à norma americana, tanto no procedimento quanto nos limites admitidos. Contudo, a RILEM AAR – 2 também admite a utilização de corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm e, neste caso, expansões superiores a 0,08% requerem precauções para minimizar o risco de ocorrência da reação (NIXON e SIMS, 2016).

A Tabela 1 apresenta uma comparação das características de diferentes normas que tratam do ensaio acelerado em barras de argamassa.

Tabela 1 – Características das diferentes normas relativas ao ensaio de barras acelerado.

	ASTM C 1260 (2014) (Estados Unidos)	RILEM AAR-2 (Europa)¹	NBR 15577-4: 2018 (Brasil)
Relação água/cimento (em massa)	0,47	0,47	0,47
Na₂O_{eq}	Não especificado	1,0%	0,9 ± 0,1%
Relação cimento/agregado	1: 2,25	1: 2,25	1: 2,25
Tamanho do agregado (mm)	0,15-4,75	0,125-4,0	0,15-4,75
Tamanho das barras (mm)	25 x 25 x 285	25 x 25 x 285 ou 40 x 40 x 160	25 x 25 x 285
Cura antes da leitura 0 (após 24 h do desmolde)	24 h em água a 80°C	24 h em água a 80°C	24 h em água a 80°C
Solução de Imersão	1 M a 80°C	1 M a 80°C	1 M a 80°C
Período de imersão (dias)	14	14	28
Critério de reatividade	>0,2% em 14 dias (Entre 0,1 – 0,2% necessário mais informações)	>0,2% em 14 dias (Entre 0,1 – 0,2% necessário mais informações)	>0,19% em 28 dias

Fonte: Adaptado de Bektas, Wang e Ceylan, 2009.

¹ RILEM AAR – 2 (SIMS e NIXON, 2003).

Este ensaio têm sido criticado por diversos autores por apresentar falsos-positivos e falsos-negativos e, portanto, não representar o que acontece em campo (BÉRUBÉ e FOURNIER, 2003; DEMERCHANT, FOURNIER e STRANG, 2000; GOLMAKANI e HOOTON, 2016, 2019; GRATTAN-BELLEW, 1997; IDEKER *et al.*, 2012; THOMAS *et al.*, 2006). Isto significa que há ocorrências nas quais um agregado, classificado como inócuo a partir do ensaio de prismas de concreto e de seu desempenho em campo, foi classificado como reativo por este método; do mesmo modo, agregados sabidamente reativos, foram classificados como inócuos.

A explicação para os resultados falsos-positivos recai nas severas condições do ensaio: o agregado é cominuído até dimensões características de agregado miúdo (0,15-4,75 mm); a temperatura do ensaio, de 80°C; a solução alcalina de alta concentração (1N), fornecendo álcalis, não sendo estas, contudo, condições realísticas de campo.

2.8.3 Ensaio de Prismas de Concreto

O ensaio de prismas de concreto é tido como o método que obtém os resultados mais confiáveis acerca da reatividade potencial de um agregado (SANCHEZ, 2008). No Brasil, este método é detalhado na NBR 15577-6:2018.

O ensaio consiste em moldar prismas de concreto, de dimensões 75 x 75 x 285 mm, utilizando agregados com granulometria entre 19,0 mm e 4,75 mm e aumentando o equivalente alcalino da mistura para 1,25%. Caso se esteja estudando a reatividade do agregado graúdo, utiliza-se um agregado miúdo inócuo e vice-versa. Os prismas devem ser acondicionados em recipientes e mantidos a 38°C por 12 meses, com a realização de leituras periódicas. Para o estudo da mitigação da reação por meio do uso de alguma adição, o ensaio deve ser prolongado por mais 12 meses. O agregado é considerado reativo caso as expansões após 12 meses sejam superiores a 0,04%.

A ASTM C1293:2018a e a RILEM AAR-3 também tratam deste ensaio, tendo procedimentos e limites similares. A RILEM AAR-3, entretanto, considera como limite o valor de 0,03% para 12 meses e 0,04% para 24 meses.

2.8.4 Ensaio Acelerado de Prismas de Concreto

O ensaio de prismas acelerado busca diminuir o elevado tempo do ensaio de prismas. Os prismas têm mesma dimensão daqueles utilizados no ensaio de prismas tradicional, assim como o mesmo procedimento. O que diferencia estes métodos é a temperatura na qual os corpos de

prova são armazenados: no ensaio normal a temperatura é de 38°C e no acelerado, 60°C. Este incremento na temperatura permite reduzir o tempo de ensaio para 20 semanas.

A norma brasileira NBR 15577:7 descreve este ensaio e determina um limite de 0,03% para as expansões. Já a norma europeia, RILEM AAR-4, especifica limites de 0,02% em 15 semanas e/ou 0,03% em 20.

2.8.5 Ensaio Acelerado dos Miniprismas de Concreto

O ensaio de miniprismas de concreto, proposto por Latifee e Rangaraju (2015), foi desenvolvido como uma alternativa aos ensaios convencionais para a determinação do potencial deletério de um agregado, aliando a rapidez, que é a vantagem do método das barras de argamassa, e o fato de não ser necessário reduzir a dimensão do agregado até a dimensão característica de areia (AASHTO TP 110-14, 2016).

Dentre os parâmetros do ensaio, destacam-se a dimensão dos prismas produzidos, de 50 x 50 x 285 mm, além das frações de agregado, que variam de 12,5 mm a 4,75 mm e relação água/aglomerante de 0,45. Os prismas são produzidos com incremento de álcalis, atingindo $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ de 1,25%, e imersos em uma solução de 1 N de NaOH, na qual permanecem por 56 dias (ou 84 dias, no caso de agregados que reagem lentamente). Este método é normatizado pela AASHTO TP 110-14 e estabelece o limite de 0,04% aos 56 dias. Caso as expansões estejam em uma faixa próxima ao limite, recomenda-se realizar medições até os 84 dias para identificar melhor o comportamento do agregado.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as condições dos diferentes ensaios citados, com base nas normas brasileiras, e, no caso do método dos miniprismas, a norma da AASHTO, para a determinação da reatividade potencial do agregado.

É importante notar que todos os métodos de ensaio têm suas limitações. Até o método dos prismas de concreto, considerado o mais confiável, apresenta problemas relativos à lixiviação que ainda não foram contornados. Desta forma, é importante aliar mais de um método para obter resultados mais confiáveis, além de utilizar informações disponíveis sobre o comportamento dos agregados em campo.

Tabela 2 – Comparação das características dos diferentes ensaios para a determinação da reatividade potencial do agregado.

	Método das Barras de Argamassa	Método dos Prismas de Concreto	Método Acelerado dos Prismas de Concreto	Método dos Miniprismas de Concreto
Norma	NBR 15577-4: 2018	NBR 15577-6: 2018	NBR 15577-7: 2018	AASHTO TP 110-14: 2016
Relação água/cimento (em massa)	0,47	0,45	0,45	0,45
Na₂O_{eq}	0,9 ± 0,1%	1,25%	1,25%	1,25%
Relação cimento/agregado ou Volume de agregado graúdo no estado compactado seco	1: 2,25	70,0 ± 0,2%	70,0 ± 0,2%	65%
Tamanho do agregado (mm)	0,15-4,75	4,75-19,0	4,75-19,0	4,75-12,5
Tamanho das barras (mm)	25 x 25 x 285	75 x 75 x 285	75 x 75 x 285	50 x 50 x 285
Cura antes da leitura 0 (após 24 h do desmolde)	24 h em água a 80°C	24 h em cura úmida	24 h em cura úmida	24 h em água a 80°C
Ambiente de Exposição	Imerso em solução de NaOH a 1 M a 80°C	38°C 100% U.R.	60°C 100% U.R.	Imerso em solução de NaOH a 1 M a 60°C
Período de imersão (dias)	28	365	140	56
Critério de reatividade	>0,19% em 28 dias	>0,04% em 365 dias	>0,03% em 140 dias	>0,04% em 56 dias

Fonte: Autora, 2019.

Neste trabalho, utilizou-se métodos para a análise do agregado, da argamassa e do concreto. Para as combinações com argamassa, utilizou-se o ensaio acelerado de barras de argamassa. Para a análise no concreto, optou-se por utilizar o método acelerado dos miniprismas de concreto, por sua maior rapidez em relação aos outros ensaios em concreto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, estão descritos os materiais utilizados na pesquisa, assim como planejamento, métodos, ensaios e procedimentos adotados. Inicialmente, foi realizada a caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais, seguida da determinação da reatividade potencial dos agregados, por meio de análise petrográfica, ensaio acelerado das barras de argamassa e ensaio acelerado de miniprismas de concreto, além da determinação da eficiência de mitigação com o uso de adições minerais.

3.1 MATERIAIS

A seguir estão descritos os materiais utilizados na pesquisa.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI – Cimento de alta resistência inicial, da marca Nacional, escolhido por não apresentar adições pozolânicas, as quais inibem a ocorrência de reação álcali-agregado.

3.1.2 Agregado Graúdo

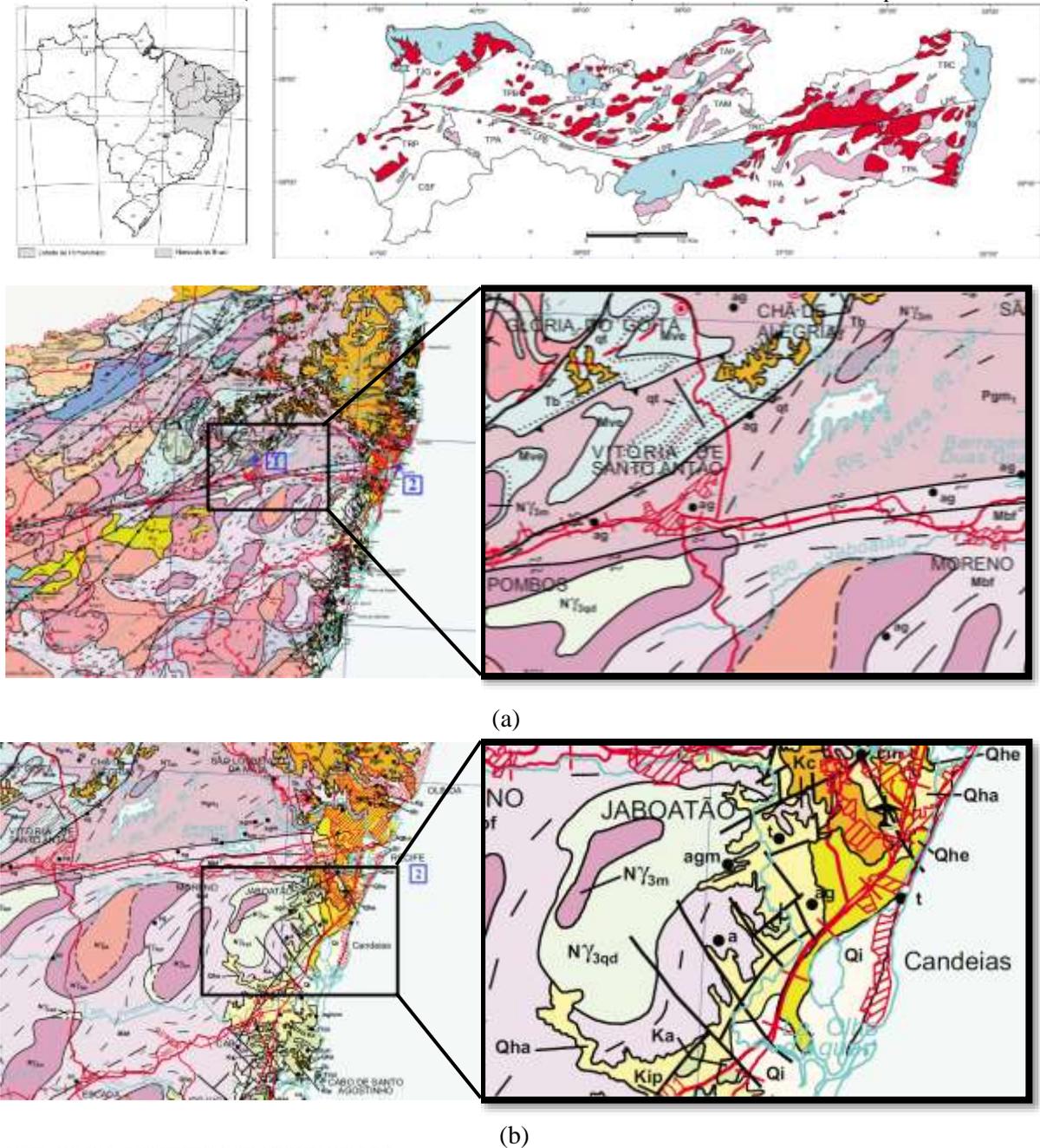
Foram utilizadas duas britas como agregado graúdo, uma delas reativa e a outra não-reativa. A brita tida como reativa é proveniente de pedreira localizada na cidade de Vitória de Santo Antão – PE, referida, neste trabalho, como Agregado Vitória. A adoção deste agregado se deu pelos resultados obtidos por Prado (2008).

Em seu trabalho, Prado (2008) estudou a influência da proximidade das rochas à Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPL) e sua reatividade potencial. Dentre os resultados obtidos, destaca-se a maior reatividade das rochas coletadas em pedreira da cidade de Vitória de Santo Antão, distante apenas 750 m da zona de falha.

A brita tida como não-reativa é proveniente de pedreira localizada em Jaboatão dos Guararapes – PE, sendo referida, neste trabalho, como Agregado Jaboatão.

Na Figura 29 encontra-se um mapa geológico do estado de Pernambuco, com destaque para a cidade de origem dos agregados.

Figura 29 – Mapa geológico do estado de Pernambuco, com destaque para a cidade de Vitória de Santo Antão (1 – Vitória de Santo Antão; 2- Recife) e Jaboatão dos Guararapes.



Fonte: GOMES, 2001.

(a) Vitória de Santo Antão. (b) Jaboatão dos Guararapes. (c) Classificação geológica de área na qual a pedra se localiza.

Como indicado por Fernandes *et al.* (2016), informação geológica de campo é essencial para identificar com maior precisão o tipo de rocha e a correta aplicação da nomenclatura. Desta

forma, foi realizada visita à pedreira em Vitória, com a presença de um geólogo, para auxiliar na identificação da rocha e em sua análise petrográfica. A Figura 30 ilustra o maciço rochoso da pedreira.

Figura 30 – Características do maciço em pedreira na cidade de Vitória de Santo Antão.



Fonte: Autora, 2019.

Foram observadas bandas graníticas cortadas por veios pegmatíticos. O bandamento apresentava direção 260° , direção leste/oeste com caimento para o sul. A orientação justifica a classificação como rocha metamórfica.

A Figura 31 ilustra macroscopicamente os agregados utilizados na pesquisa.

Figura 31 – Agregado (a) Vitória de Santo Antão; (b) Jaboatão dos Guararapes.



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2019.

3.1.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na confecção dos miniprismas de concreto foi areia quartzosa, proveniente da cidade de Barreiros – PE. Este agregado foi testado em relação à sua reatividade, de acordo com o ensaio acelerado de barras de argamassa, norma NBR 15577:2018, sendo classificado como inócuo, apresentando expansões, aos 30 dias, de 0,08%. O gráfico de expansão pode ser observado no Apêndice C.

3.1.4 Água

Foi utilizada água destinada ao consumo humano, fornecida pela Compesa (Companhia Pernambucana de Saneamento), para a realização de ensaios de caracterização e água destilada para os ensaios de reatividade potencial, obtida no Laboratório de Saneamento Ambiental – LSA, da Universidade Federal de Pernambuco.

3.1.5 Adições Minerais

Foram utilizados dois materiais como adição na presente pesquisa: sílica ativa (em pó) e pó de agregado reativo (PAR), proveniente de britagem por meio de britador de rolos (Pó Rolos) e mandíbulas (Pó Mandíbulas) do agregado Vitória e passante na peneira de abertura 150 µm. Desta forma, neste trabalho, ao referir-se a Pó Rolos e Pó Mandíbula, tratar-se-á, sempre, do agregado Vitória.

3.1.6 Aditivo

Para as misturas com adição, utilizou-se o superplastificante fornecido pela Matchem, cuja base é de policarboxilatos. A faixa de utilização indicada pelo fabricante é de 0,2% a 1,5% sobre a massa do cimento.

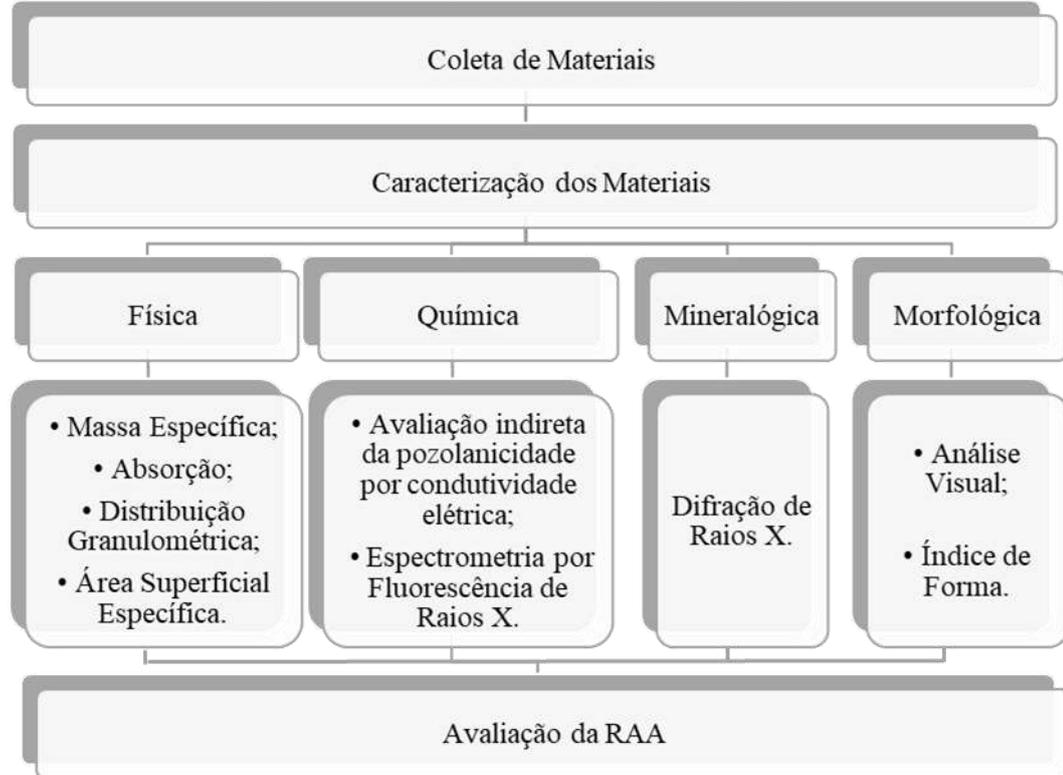
3.2 MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se a coleta do material, seguida de sua caracterização. Procedeu-se, então, aos estudos para avaliação da RAA, que consistem na análise petrográfica, ensaio acelerado de barras de argamassa e ensaio acelerado de miniprismas de concreto. A Figura 32 apresenta um fluxograma destacando as etapas da pesquisa.

Em relação ao ensaio acelerado de barras de argamassa, foram analisadas combinações com os dois agregados, Vitória e Jaboatão, a fim de determinar seu potencial reativo. Para o agregado Vitória, avaliou-se, também, a eficiência da mitigação utilizando-se sílica e PAR. As adições

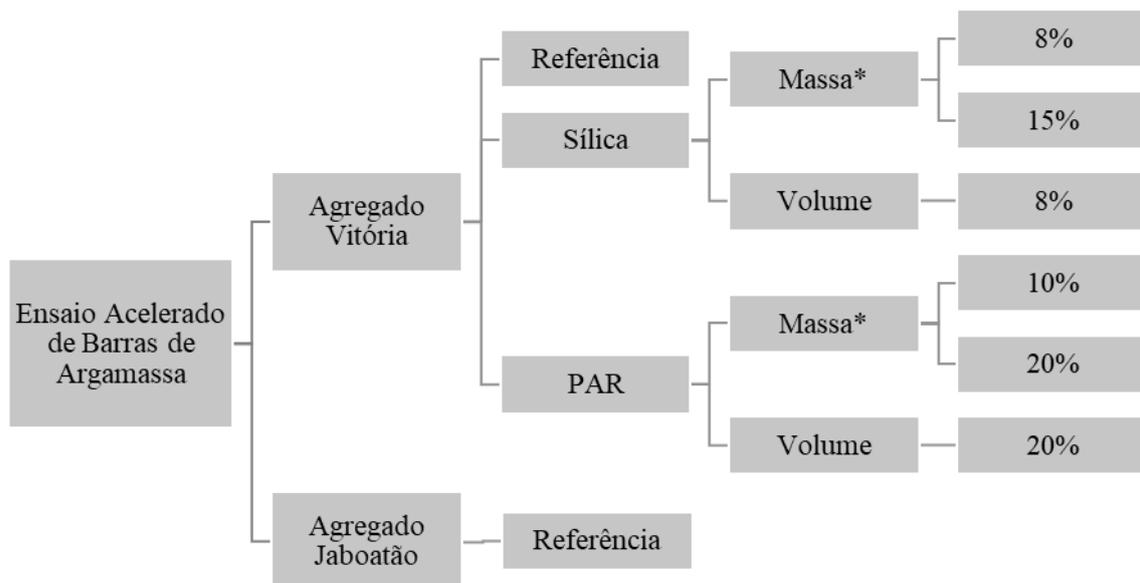
foram empregadas em substituição ao cimento em duas condições: em massa e em volume, assim como com o uso de aditivo. A Figura 33 apresenta as combinações analisadas.

Figura 32 – Fluxograma com as etapas da pesquisa.



Fonte: Autora, 2019.

Figura 33 – Composições analisadas no ensaio acelerado de barras de argamassa.

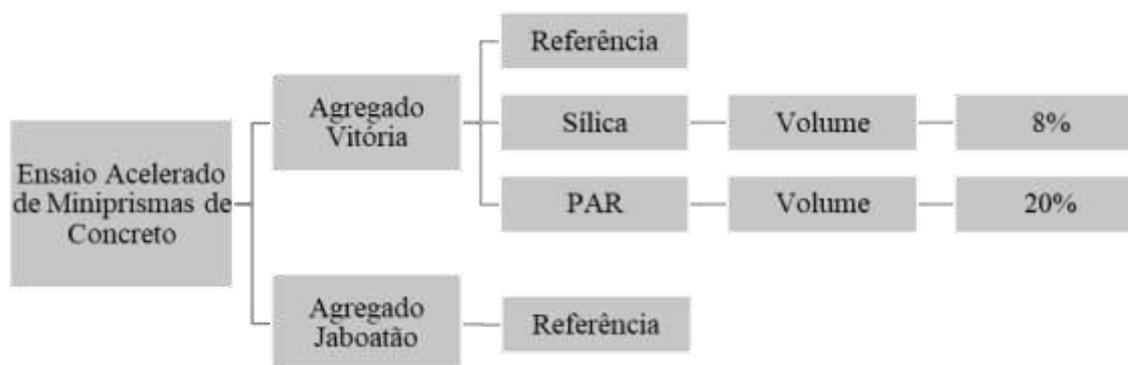


Fonte: Autora, 2019.

*As substituições das adições em massa foram feitas com e sem a incorporação de aditivo.

Para o ensaio acelerado de miniprismas de concreto, utilizou-se combinações de referência para ambos os agregados. A substituição de cimento por adições, neste ensaio, deu-se em volume. A Figura 34 esquematiza as combinações analisadas.

Figura 34 – Composições analisadas no ensaio acelerado de miniprismas de concreto.



Fonte: Autora, 2019.

Os teores de 8% e 15% de substituição de cimento por sílica foram escolhidos por se tratarem de limites extremos de porcentagem normalmente utilizados na prática, sendo 8% um valor normalmente utilizado e 15% um valor considerado alto, mas ainda utilizado. Para o PAR, as porcentagens de 10% e 20% foram determinadas com base no estudo de Cyr, Rivard e Labrecque (2009), que utilizaram esses valores de pó substituindo o agregado miúdo. No presente trabalho, esses teores foram testados em substituição ao cimento.

Descreve-se, a seguir, os ensaios realizados.

3.2.1 Caracterização Física

O quadro 4 apresenta os ensaios realizados nos materiais utilizados na pesquisa e respectivas normas.

Quadro 4 – Ensaio de caracterização física realizados nos materiais.

Ensaio	Norma	Materiais ensaiados
Massa Específica	ABNT NBR 16605:2017	Cimento, Sílica, PAR
	ABNT NBR NM 53:2009	Agregado Graúdo
	DNER-ME 194:1998	Agregado Miúdo
Absorção	ABNT NBR NM 53:2009	Agregado Graúdo
Área Superficial Específica (Método de Blaine)	ABNT NBR 16605:2017	Cimento, Sílica, PAR
Área superficial específica (Método de adsorção de nitrogênio – BET)	-	Cimento, Sílica, PAR
Distribuição Granulométrica	Por espalhamento de luz laser	-
	Por peneiramento	NBR NM 248: 2003

Fonte: Autora, 2019.

A massa específica do cimento, sílica e PAR foi determinada utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier e como reagente, querosene, seguindo o procedimento da ABNT NBR 16605:2017. Para o agregado graúdo, utilizou-se o procedimento exposto na ABNT NBR NM 53: 2009, com a imersão do agregado e mensuração do peso do agregado seco, na condição saturado superfície seca e imerso. A massa específica do agregado miúdo foi realizada com o frasco de Chapman, como especificado na norma DNER-ME 194:1998.

Utilizando-se do aparelho de permeabilidade ao ar Blaine, foi determinada a área superficial específica do cimento, da sílica e dos PAR. Este método consiste na mensuração do tempo requerido para uma quantidade de ar fluir através de uma camada do material e seu procedimento é descrito pela ABNT NBR 16372:2015. Para esta análise, os materiais foram testados na mesma granulometria em que são utilizados na produção dos corpos de prova. Em complementação a esta análise, foi realizada a determinação da área superficial específica utilizando o método de fisorção segundo Brunauer-Emmett-Teller (BET), mais indicado para materiais muito finos. Este método baseia-se na adsorção de gases na superfície externa e interna de materiais porosos. Os materiais foram peneirados utilizando a peneira de abertura 200 μm para a preparação das amostras.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi determinada por peneiramento, de acordo com a ABNT NBR NM 248: 2003, apenas para obter o módulo de finura e seu enquadramento no critério do ensaio dos miniprismas. Para o cimento, sílica e PAR, foi realizada a granulometria a laser. Esta análise foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Foi utilizado um granulômetro a laser Malvern, modelo Mastersizer 2000, cujo limite nominal inferior de detecção é 10 nm e o superior é 2000 μm . A análise foi realizada via úmida, utilizando o acessório Hydro 2000MU. Os resultados apresentados correspondem à média de três leituras das amostras.

A sílica foi preparada de duas formas: (i) a amostra dispersa em água (as-ground); (ii) a amostra dispersa em meio alcalino (pH 10). Para a condição (ii) de análise, foi produzida uma polpa com 0,57 g do material e 20 ml da solução com pH 10. A polpa foi condicionada por 1 minuto de agitação manual e 5 minutos de descanso (sem agitação).

3.2.2 Caracterização Química

A atividade pozolânica da sílica e dos PAR foi avaliada indiretamente utilizando-se o método de condutividade elétrica. Como observado por Luxán *et al.* (1989) e Payá *et al.* (2001), a reação

entre o Ca(OH)_2 e uma pozolana diminui a condutividade elétrica de uma suspensão, o que é atribuído à fixação deste material na superfície da partícula de pozolana.

Esta análise foi realizada no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes – Labtag e baseou-se no procedimento proposto por Payá *et al.* (2001) e adaptado por Basto (2018). O método consiste em inserir uma amostra de 4 g do material a ser analisado em uma solução insaturada de hidróxido de cálcio (800 mg por litro de água deionizada), a 60°C, e coletar medidas de condutividade elétrica desta solução, avaliando a quantidade de Ca(OH)_2 fixada pelo material em um intervalo de 1000 segundos. Esta temperatura foi adotada de modo a simular a temperatura inicial de hidratação do cimento. A partir do ensaio, obtém-se a curva de variação da condutividade elétrica e de perda de condutividade com o tempo.

A análise química foi realizada no Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis – NEG LABISE, na UFPE. Foram ensaiadas amostras de cimento, sílica e brita por meio de espectrometria por fluorescência por raios X (FRX).

As amostras, com tamanho de partícula inferior a 75 μm , foram secas em estufa a 110°C. Uma porção de cada amostra, após seca, foi retirada e levada a uma mufla, onde permaneceu por 2 horas a 1000°C, de modo a determinar a perda ao fogo. Outra porção de cada amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio (30 toneladas), e analisada em espectrômetro de fluorescência de raios X Rigaku, modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados da varredura semi-quantitativa foram recalculados para 100%, com a incorporação do valor da perda ao fogo.

3.2.3 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica se deu por meio de Difração de Raios – X, realizada nas amostras de sílica e de brita.

A análise de difração de raios X (DRX) foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM da UFPE, adotando-se o método do pó. As amostras foram cominuídas com a ajuda de almofariz e pistilo de porcelana a um tamanho de partícula inferior a 75 μm .

Utilizou-se o equipamento Bruker D2 PHASER, operando com voltagem de 30 kV, corrente de 10 mA ($P=300\text{ W}$), radiação $\text{Cu-K}\alpha = 1,54060\text{ \AA}$ e usando o detector Bruker-AXS-Lynxeye. Os parâmetros adotados foram: faixa de varredura (2θ) de 4 a 80°, passo do goniômetro de 0,02019°, rotação constante da amostra de 10 rpm, abertura da fenda primária de 0,4 mm, fca

de 3 mm e tempo de contagem por passo de 0,5 segundo. As amostras foram indexadas usando o aplicativo DIFFRAC.EVA, com o banco de dados COD (REV 89244 20131011).

3.2.4 Caracterização Morfológica

A caracterização morfológica foi realizada utilizando-se do ensaio de índice de forma, seguindo a ABNT NBR 7809:2019, e por meio de observação utilizando estereomicroscópio ótico.

O ensaio de índice de forma foi realizado com o agregado retido na peneira de abertura 9,5 mm, uma das frações utilizadas no ensaio acelerado de miniprismas de concreto. O ensaio consiste na medição, com auxílio de paquímetro, do comprimento e espessura dos grãos de uma amostra, utilizando-se uma amostra com, no mínimo, 200 grãos para cada fração analisada. Este ensaio é indicado para grãos com dimensões superiores a 9,5 mm. Como foi utilizada apenas uma fração, uma vez que era a única com tamanho mínimo para a realização do ensaio, foram medidos 200 grãos desta dimensão. De acordo com Silva (2012), pode-se classificar a forma do agregado, considerando o comprimento (c) e a espessura (e) como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação da forma do agregado de acordo com o índice de forma.

Razão	Forma
$c/e < 1,8$	Cúbica
$c/e > 1,8$	Alongada
$c/e > 2,4$	Lamelar
$c/e > 3,0$	Alongada-Lamelar

Fonte: Autora, 2019.

O estereomicroscópio ótico foi utilizado para observar a morfologia das partículas do agregado britado por britador de rolos e mandíbulas, na granulometria utilizada no ensaio de barras de argamassa. A análise visual foi realizada no Laboratório de Paleontologia – PALEOLAB do Departamento de Geologia da UFPE, utilizando estereomicroscópio ótico Zeiss, modelo Discovery v.8 com câmera acoplada e aquisição de imagens por meio do software AxioVision.

3.2.5 Cominuição do Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado necessitou ser cominuído, a fim de atender às granulometrias requeridas para os ensaios acelerados. Para o ensaio acelerado de barras de argamassa, foi necessário reduzir o agregado à granulometria de areia (passando pela peneira de abertura 4,8 mm). Já para o ensaio acelerado dos miniprismas de concreto, reduziu-se o agregado à fração passante na peneira de abertura 12,5 mm. Para tal, foram utilizados dois tipos de britadores: britador de mandíbulas e britador de rolos.

A britagem com britador de mandíbulas foi realizada no ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco. O britador utilizado, de um eixo, está apresentado na Figura 35 (a). Foi utilizado o britador de rolos do Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM, na UFPE, como ilustrado na Figura 35 (b). Como este britador era de britagem secundária, foi feita uma britagem inicial em britador de mandíbulas, para então prosseguir à britagem por meio de rolos.

Figura 35 – Britadores.



(a)



(b)

Fonte: Autora, 2019.
(a) Mandíbulas; (b) Rolos.

3.2.6 Avaliação da Reatividade Potencial e da Eficiência de Adições na Mitigação

A reatividade potencial de um agregado pode ser determinada por meio de vários métodos e analisando-se diferentes situações. Pode-se analisar apenas o agregado, a interação do agregado com a pasta de cimento, com o uso de barras de argamassa, ou a interação do agregado com argamassa, por meio de prismas de concreto.

Neste trabalho, foi utilizada uma técnica para cada tipo de situação mencionada. Para a análise do agregado, foi feita análise petrográfica; para o estudo da interação pasta-agregado, foi realizado o ensaio acelerado de barras de argamassa; e, para a interação argamassa-agregado, optou-se pelo ensaio acelerado de miniprismas de concreto. Os ensaios acelerados também foram utilizados para determinar a eficiência da mitigação com o uso de adições minerais. A descrição dos respectivos estudos está apresentada a seguir.

3.2.6.1 Análise Petrográfica do Agregado

Para a análise petrográfica do agregado, foi realizado procedimento para obtenção de amostra representativa.

A partir do volume total de agregado Vitória armazenado, foram demarcados 15 pontos regularmente distribuídos, sendo removida a fração superficial e retirada uma porção de cada local. Seguiu-se, então, ao quarteamento da amostra até obter uma quantidade suficiente, a qual foi submetida à análise por um geólogo, sendo separadas 4 amostras com diferentes feições da rocha para a preparação das lâminas, como observado na Figura 36.

Figura 36 – Preparação da amostra do agregado Vitória para análise petrográfica.



Fonte: Autora, 2019.

(a) Agregado armazenado. (b) Demarcação de 15 pontos no montante inicial para a retirada de porções. (c) Quarteamento do agregado. (d) Amostras submetidas à análise petrográfica.

Para o agregado Jaboatão, procedimento similar foi realizado, com a obtenção de quatro amostras para análise. A análise petrográfica foi realizada no Laboratório de Gemologia (LABGEM), na UFPE.

3.2.6.2 Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa

O ensaio de barras de argamassa foi realizado seguindo-se os procedimentos descritos nas normas ABNT NBR 15577-4 (2018) e ABNT NBR 15577-5 (2018), para a análise da reatividade potencial e eficiência de mitigação, respectivamente. Estes ensaios baseiam-se na moldagem de conjuntos de três corpos de prova de argamassa para cada combinação de agregado/aglomerante adotada. Mensura-se, então, a variação de comprimento das barras quando submetidas a um meio alcalino e temperatura elevada para determinar sua susceptibilidade à reação álcali-agregado.

3.2.6.2.1 Preparo dos Corpos de Prova

Para a preparação dos corpos de prova o agregado, já cominuído, foi separado granulometricamente de acordo com as frações especificadas em norma, descritas na Tabela 4 e ilustradas na Figura 37.

Tabela 4 – Frações granulométricas para o ensaio acelerado.

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT NBR 15577-4 (2018).

Figura 37 – Frações granulométricas.



Fonte: Autora, 2019.

Após o peneiramento, as amostras foram lavadas em água corrente, de modo a eliminar os finos provenientes da britagem, e secas em estufa. Tal procedimento foi feito para o agregado cominuído pelo britador de mandíbulas e pelo britador de rolos.

Em sequência à preparação do agregado, foram confeccionados conjuntos de 3 barras de argamassa, de acordo com o procedimento descrito na ABNT NBR 15577-4:2018 e ABNT NBR 15577-5:2018, conforme combinações apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Combinações agregado/adição adotadas (porcentagem de adições em relação à massa do cimento).

Agregado	Britador	Combinação	Identificação
Agregado Vitória	Mandíbulas (M)	Referência (R)	RM
		8% Sílica (S)	SM
		8% Sílica (S) + Aditivo (A)	SAM
		15% Sílica (SS)	SSM
		15% Sílica (SS) + Aditivo (A)	SSAM
		Pó 10% (P)	PM
		Pó 10% (P) + Aditivo (A)	PAM
		Pó 20% (PP)	PPM
	Pó 20% (PP) + Aditivo (A)	PPAM	
	Rolos (R)	Referência (R)	RR
		8% Sílica (S)	SR
		8% Sílica (S) + Aditivo (A)	SAR
		15% Sílica (SS)	SSR
		15% Sílica (SS) + Aditivo (A)	SSAR
		Pó 10% (P)	PR
		Pó 10% (P) + Aditivo (A)	PAR
Pó 20% (PP)		PPR	
Pó 20% (PP) + Aditivo (A)	PPAR		
Agregado Jaboatão (J)	Mandíbulas (M)	Referência (R)	JM
	Rolos (R)	Referência (R)	JR

Fonte: Autora, 2019.

Note-se que as adições foram empregadas em substituição à massa do cimento. No caso da sílica ativa, houve peneiramento devido às aglomerações visíveis, utilizando-se a fração passante na peneira de abertura 200 μm .

Os resultados obtidos a partir do ensaio de barras mostraram reduções das expansões a níveis seguros para todas as porcentagens de adições. Ao analisar o fator econômico, tomou-se o teor de 8% de sílica, o menor teor, pelo alto custo desta adição, e 20% de pó, pela maior substituição do cimento, material mais caro da composição do concreto, para a análise com os miniprismas. Também foram moldadas barras de argamassa com o uso de adições em volume, conforme Quadro 6, de modo a poder comparar os resultados com os obtidos no ensaio de miniprismas de concreto, uma vez que, neste, as substituições foram realizadas em volume. Neste caso, as porcentagens em volume equivalem a 6,3% e 18,2% de sílica ativa e PAR, respectivamente. Não se utilizou aditivo, também para fins comparativos, uma vez que no ensaio de miniprismas, assim especifica a norma AASHTO TP 110-14:2016.

Quadro 6 – Combinações agregado/adição adotadas (porcentagem de adições em relação ao volume do cimento).

Agregado	Britador	Combinação	Identificação
Agregado Vitória	Mandíbulas	8% Sílica (S) (volume - V)	SMV
		20% Pó (PP) (volume - V)	PPMV
	Rolos	8% Sílica (S) (volume - V)	SRV
		20% Pó (PP) (volume - V)	PPRV

Fonte: Autora, 2019.

A ABNT NBR 15577-5:2018 estabelece que, quando houver substituição parcial do cimento, pode ser necessária a utilização de aditivo. Neste caso, deve-se utilizar uma quantidade tal que mantenha a consistência da argamassa dentro de uma faixa de $\pm 7,5\%$ em relação à consistência da argamassa preparada apenas com cimento. Para determinar a quantidade de aditivo necessária às combinações com sílica e PAR adicionadas em relação à massa do cimento, realizou-se o ensaio da mesa de consistência, de modo a mensurar o índice de consistência, de acordo com a ABNT NBR 7215:2019. Obteve-se como resultado de referência o valor de 131,5 mm, de modo que o intervalo de consistência admissível é de 121,6 - 141,4 mm. Os resultados de espalhamento e dos teores de aditivo obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Teor de aditivo obtido para cada combinação (com substituição em massa).

Combinação	Teor de Aditivo (%)	Espalhamento (mm)
Referência	-	131,5
SAM/ SAR	0,15 %	140,0
SSAM/ SSAR	0,90 %	141,0
PAM/ PAR	0,30 %	139,5/140,5
PPAM/ PPAR	0,60 %	126,0/132,5

Fonte: Autora, 2019.

As barras de argamassa, de dimensão 25 x 25 x 285 mm, foram confeccionadas com um traço de 1:2,25 e relação água/aglomerante de 0,47, como apresentado na Tabela 6 para substituição em volume e na Tabela 7 para substituição em massa. Nas combinações com substituição parcial, a adição foi previamente acrescida ao cimento e a mistura foi homogeneizada.

Tabela 6 – Quantitativo de materiais nas combinações (porcentagem de adições em relação ao volume do cimento).

	Cimento (g)	Agregado (g)	Sílica (g)	PAR (g)	Água (ml)	Aditivo (g)
SMV	414,85	990	25,15	-	206,8	-
SRV	414,85	990	25,15	-	206,8	-
PPMV	359,71	990	-	80,29	206,8	-
PPRV	359,71	990	-	80,29	206,8	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela 7 – Quantitativo de materiais nas combinações (porcentagem de adições em relação à massa do cimento).

	Cimento (g)	Agregado (g)	Sílica (g)	PAR (g)	Água (ml)	Aditivo (g)
RM	440,0	990	-	-	206,8	-
SM	404,8	990	35,2	-	206,8	-
SAM	404,8	990	35,2	-	206,8	0,66
SSM	374,0	990	66,0	-	206,8	-
SSAM	374,0	990	66,0	-	206,8	3,96
PM	396,0	990	-	44,0	206,8	-
PAM	396,0	990	-	44,0	206,8	1,19
PPM	352,0	990	-	88,0	206,8	-
PPAM	352,0	990	-	88,0	206,8	2,11
RR	440,0	990	-	-	206,8	-
SR	404,8	990	35,2	-	206,8	-
SAR	404,8	990	35,2	-	206,8	0,66
SSR	374,0	990	66,0	-	206,8	-
SSAR	374,0	990	66,0	-	206,8	3,96
PR	396,0	990	-	44,0	206,8	-
PAR	396,0	990	-	44,0	206,8	1,19
PPR	352,0	990	-	88,0	206,8	-
PPAR	352,0	990	-	88,0	206,8	2,11
JM	440,0	990	-	-	206,8	-
JR	440,0	990	-	-	206,8	-

Fonte: Autora, 2019.

O procedimento de mistura e moldagem foi realizado de acordo com a norma. As barras foram mantidas em cura por 24 h, após as quais houve o desmolde. Após a identificação, as barras foram imersas em água destilada a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, com o aumento gradativo da temperatura por um período de 4 horas até alcançar 80°C ($\approx 14^\circ\text{C}/\text{hora}$). Tal procedimento é importante de modo a evitar fissurações provenientes do choque térmico. Passadas 24 horas, contadas a partir da imersão em água, as barras foram retiradas, procedeu-se à leitura inicial com relógio comparador, e colocadas em solução de NaOH a 80°C e concentração de 1 N. Este procedimento está ilustrado na Figura 38.

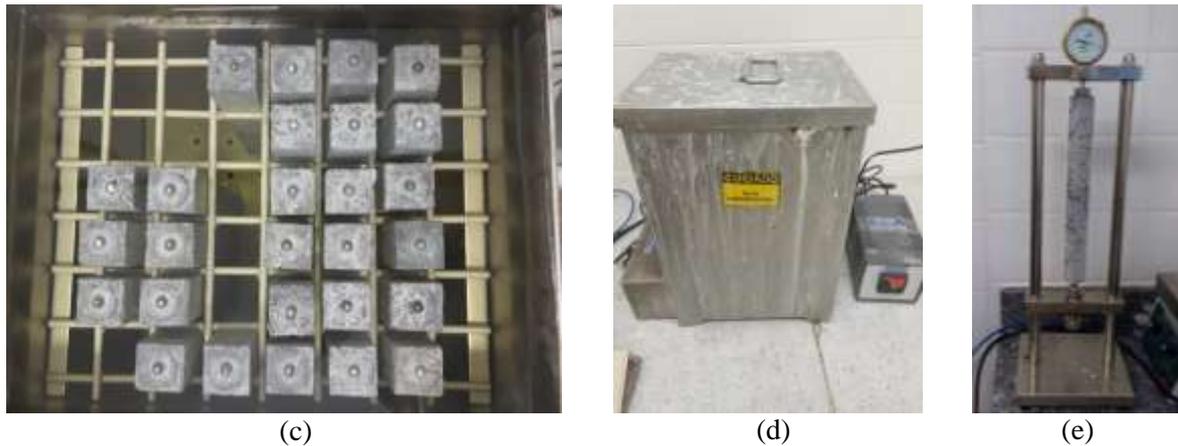
Figura 38 – Ensaio acelerado de barras de argamassa.



(a)



(b)



(c)

(d)

(e)

Fonte: Autora, 2019.

(a) Corpos de prova envoltos em plástico durante a cura para evitar perda de água. (b) Barras de argamassa desmoldadas e identificadas. (c) Corpos de prova imersos em solução de NaOH 1 N a 80°C. (d) Banho térmico. (e) Leitura das expansões realizada com relógio comparador.

Foram realizadas leituras aos 16 e 30 dias, como indicado pela ABNT NBR 15577-4 (2018), além de leituras intermediárias à mesma hora do dia. Para o cálculo da expansão, utilizou-se a Equação 5, a seguir.

$$E = \frac{L_i - L_0}{L_n} \cdot 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

E: Expansão longitudinal em mm/m;

L_0 : Leitura inicial da barra, após imersão em água destilada, em mm;

L_i : Leitura na idade do ensaio, em mm;

L_n : Comprimento efetivo da barra em mm.

As médias das variações foram calculadas a partir do desvio relativo máximo (DRM). De acordo com a ABNT NBR 15577-4 (2018), para valores de expansão de até 0,10%, aos 30 dias, o DRM deve ser de até 40% da média das barras. Quando superior a 40%, deve ser calculada nova média desconsiderando os valores da barra discrepante. Para valores de expansão acima de 0,10% aos 30 dias, o DRM deve ser de até 20% da média das barras.

Os limites de expansão apresentados na norma estão expostos na tabela 8.

Tabela 8 – Limites normativos para as expansões referentes à RAA para o ensaio de barras.

Norma	Idade	Limite	Classificação
ABNT NBR 15577-1 (2018)	30 dias	< 0,19	Potencialmente inócuo
		Entre 0,19 e 0,40	Potencialmente reativo grau R1
		Entre 0,41 e 0,60	Potencialmente reativo grau R2
		> 0,60	Potencialmente reativo grau R3

Fonte: ABNT NBR 15577-1 (2018).

Quando se utiliza agentes mitigadores, o limite permanece o mesmo para a norma brasileira aos 30 dias ($< 0,19$ – mitigação eficiente).

A análise estatística dos resultados deste ensaio foi realizada utilizando-se o teste t de Student para um nível de significância de 5%.

3.2.6.3 Ensaio Acelerado dos Miniprismas de Concreto

O ensaio acelerado dos miniprismas de concreto foi realizado conforme a norma da AASHTO TP 110-14, de 2016, devido à sua maior rapidez em relação aos outros ensaios utilizando concreto. Neste ensaio, são moldados conjuntos de três corpos de prova de concreto para cada combinação de agregado/aglomerante adotada, e então medida a variação de comprimento dos prismas submetidos a um meio alcalino e temperatura elevada para determinar a sua susceptibilidade à reação álcali-agregado.

3.2.6.3.1 Preparo dos Corpos de Prova

Após a britagem, o agregado foi separado granulometricamente, de acordo com as frações especificadas em norma, descritas na Tabela 9 e ilustradas na Figura 39.

Tabela 9 – Frações granulométricas para o ensaio dos miniprismas.

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa
Passante	Retido	%
12,5 mm	9,5 mm	57,5
9,5 mm	4,75 mm	42,5

Fonte: AASHTO TP 110-14, 2016.

Figura 39 – Frações Granulométricas.



Fonte: Autora, 2019.

A seguir, foi realizada a dosagem do concreto e moldagem dos prismas, de acordo com o procedimento descrito na AASHTO TP 110-14 (2016) e conforme combinações apresentadas no Quadro 7. A sílica foi peneirada devido às aglomerações visíveis e a fração passante na peneira de abertura 200 μm foi utilizada.

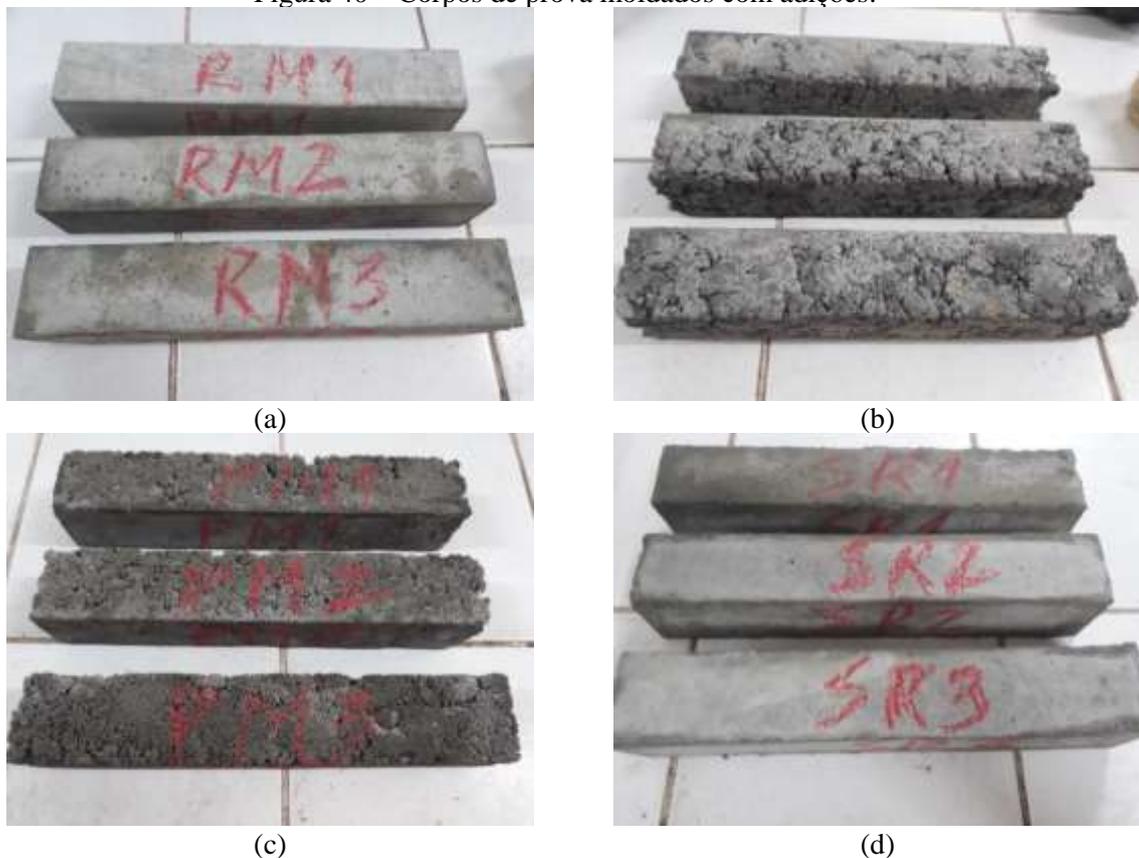
Quadro 7 – Combinações agregado/adição adotadas (porcentagem de adições em relação à massa do cimento).

Agregado	Britador	Combinação	Identificação
Agregado Vitória	Mandíbulas (M)	Referência (R)	RM
		8% Sílica (S)	SM
		Pó 20% (PP)	PPM
	Rolos (R)	Referência (R)	RR
		8% Sílica (S)	SR
		Pó 20% (PP)	PPR
Agregado Jaboaão (J)	Mandíbulas (M)	Referência (R)	JM
	Rolos (R)	Referência (R)	JR

Fonte: Autora, 2019.

Ao preparar o concreto com adição de sílica ativa e PAR, notou-se que este apresentava-se muito seco. Como a norma especifica que não sejam utilizados aditivos, os corpos de prova foram moldados. Contudo, apresentavam aspecto irregular e com imperfeições, em comparação à combinação de referência, como observado na Figura 40 (a), (b) e (c). Desta forma, optou-se por reduzir o teor de adição e realizar a substituição em volume, obtendo-se, assim, superfície mais homogênea e compacta, como observado na Figura 40 (d).

Figura 40 – Corpos de prova moldados com adições.



Fonte: Autora, 2019.

(a) Referência; (b) Sílica em substituição ao cimento em massa; (c) PAR em substituição ao cimento em massa; (d) Sílica em substituição ao cimento em volume.

A fim de realizar a dosagem do concreto, as porções de agregado foram misturadas e foi determinada a massa unitária compactada da mistura, de acordo com a AASHTO T 19/T 19M:2017a, apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de massa unitária das misturas de agregados.

Combinação	Britador	Massa Unitária (g/cm³)
Agregado Vitória	Mandíbulas	1,56
	Rolos	1,59
Agregado Jaboatão	Mandíbulas	1,56
	Rolos	1,56

Fonte: Autora, 2019.

A norma AASHTO TP 110-14 (2016) determina que o consumo de cimento para a dosagem dos corpos de prova deve ser de 420 kg/m³. O volume de agregado graúdo por unidade de volume de concreto deve ser de 0,65 e a relação água/cimento de 0,45 em massa. A água utilizada deve ser a Tipo IV, descrita na ASTM D1193-18 como água destilada. O equivalente alcalino do concreto deve ser aumentado para 1,25% em massa de cimento por meio da adição de NaOH à água de amassamento. Nas combinações com substituição parcial, a mistura adição-cimento foi previamente homogeneizada. As quantidades dos materiais estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Quantitativo dos materiais utilizados nas combinações (porcentagem de adições em relação ao volume do cimento).

	Cimento (kg)	Agregado (kg)	Areia (kg)	Sílica (g)	PAR (g)	Água (ml)	NaOH (g)
RM	1,281	3,093	2,500	-	-	576,5	2,00
SM	1,208	3,093	2,500	73,29	-	576,5	1,92
PM	1,047	3,093	2,500	-	234,02	576,5	1,66
RR	1,281	3,160	2,420	-	-	576,5	2,00
SR	1,208	3,160	2,420	73,29	-	576,5	1,92
PR	1,047	3,160	2,420	-	234,02	576,5	1,66
JM	1,281	3,090	2,385	-	-	576,5	2,00
JR	1,281	3,090	2,385	-	-	576,5	2,00

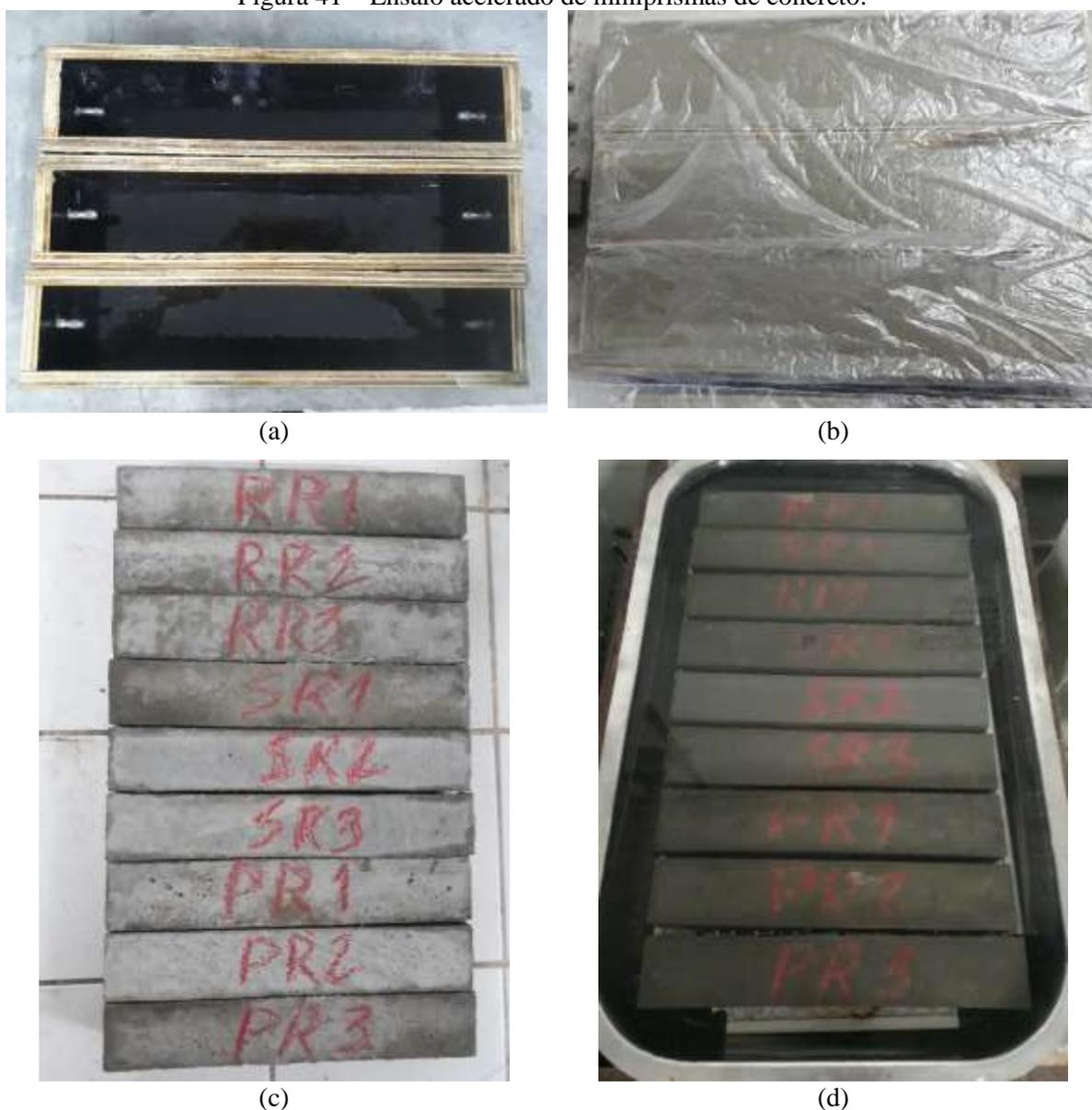
Fonte: Autora, 2019.

O procedimento de mistura se deu de acordo com a ASTM C192/C192M-18. Devido à reduzida quantidade de materiais, foi utilizada uma argamassadeira com capacidade de 20 litros e não foi medido o abatimento. Inicialmente, foi colocado o agregado graúdo e uma porção da água, seguido do agregado miúdo, que foram misturados brevemente. Então, acrescentou-se o cimento e o resto da água de amassamento, na qual estava disperso o hidróxido de sódio. Após 3 minutos de mistura, a argamassadeira foi desligada e deixou-se a mistura descansar por mais

3 minutos, seguidos de mais 2 minutos finais de mistura. Procedeu-se à moldagem dos prismas, realizando duas camadas com 25 golpes cada.

Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida por 24 h e em seguida desmoldados, identificados e imersos em água destilada. A água, inicialmente à temperatura ambiente, teve sua temperatura elevada gradativamente até 60°C ($\approx 20^\circ\text{C}/\text{hora}$), de modo a evitar fissuras por choque térmico. Passadas 24 horas, contadas a partir da imersão em água, os prismas foram retirados, procedeu-se à leitura inicial com relógio comparador, e colocados em solução de NaOH a 60°C e concentração de 1 N. Este procedimento está ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Ensaio acelerado de miniprismas de concreto.



Fonte: Autora, 2019.

(a) Moldes preparados. (b) Corpos de prova envoltos em plástico durante a cura para evitar perda de água. (c) Prismas desmoldados e identificados. (d) Corpos de prova imersos em solução de NaOH 1 N a 60°C.

Foram realizadas leituras aos 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42 e 56 dias, como estabelecido pela AASHTO TP 110-14 (2016). Para o cálculo da expansão, utilizou-se a Equação 5. A Tabela 12 apresenta os limites normativos para a classificação do agregado.

Tabela 12 – Limites normativos para as expansões referentes à RAA para o ensaio de miniprismas.

Norma	Idade	Limite	Classificação	Taxa de Expansão Média em duas Semanas (entre as semanas 8 e 12)¹
AASHTO TP 110 (2014)	56 dias	≤0,030	Não reativo	-
		0,031 – 0,040	Potencialmente inócuo	≤0,010 para 2 semanas
		0,031 – 0,040	Potencialmente reativo	>0,010 para 2 semanas
		0,041 – 0,120	Moderadamente reativo	-
		0,121 – 0,240	Muito reativo	-
		> 0,240	Altamente reativo	-

Fonte: AASHTO TP 110-14 (2016).

¹Calculada a partir da expansão em 12 semanas menos a expansão a 8 semanas dividido por 2 (referente a dois períodos de duas semanas cada).

Quando se utilizam materiais para mitigar a RAA, os limites são alterados: abaixo de 0,020%, considera-se a mitigação como eficiente e acima de 0,025% como ineficiente; entre 0,020% e 0,025%, tem-se como incerta a classificação, sendo sugerida a repetição do ensaio com maiores dosagens dos materiais mitigadores.

A análise estatística dos resultados deste ensaio foi realizada utilizando-se o teste t de Student para um nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os materiais utilizados na pesquisa foram submetidos a ensaios para determinar suas características, excetuando-se o aditivo, o qual teve sua caracterização realizada e fornecida pelo fabricante, como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Caracterização do aditivo à base de policarboxilatos.

Parâmetro avaliado	Especificação	Método	Resultados
Aspecto	Líquido	Visual	Aprovado
Cor	Marrom Claro	Visual	Aprovado
pH (puro) – 25°C	4,50 a 6,50	ABNT NBR 10908:2008	5,64
Massa específica – 25°C (g/cm³)	1,055 a 1,095	ABNT NBR 10908:2008	1,075
Teor de Sólidos (%)	33,00 a 37,00	ABNT NBR 10908:2008	35,21

Fonte: Fabricante.

Apresenta-se, a seguir, os resultados e discussão da caracterização física, química, mineralógica e morfológica dos materiais, assim como ensaios realizados para avaliação da RAA.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A seguir, estão apresentados os resultados de caracterização física dos materiais.

4.1.1 Massa Específica e Absorção

As massas específicas dos materiais utilizados e absorção dos agregados graúdos estão expostas na Tabela 14.

Tabela 14 – Massas específicas dos materiais.

Material	Massa Específica (g/cm³)	Absorção (%)
Cimento	3,08	-
Sílica Ativa	2,20	-
Pó Mandíbulas	2,81	-
Pó Rolos	2,81	-
Agregado Vitória	2,77	0,39
Agregado Jabotão	2,68	0,72
Areia	2,64	-

Fonte: Autora, 2019.

Observa-se, analisando as massas específicas dos materiais, que o valor de massa específica da sílica é 28,6% inferior ao valor para o cimento, como já esperado. Já a massa específica dos PAR é 8,8% inferior à do cimento. Esta característica foi relevante para determinar se a substituição ocorreria por massa ou volume. Para a sílica, por exemplo, a diferença é mais significativa quanto maior for o volume de argamassa ou concreto produzido. Para o ensaio acelerado de barras de argamassa, que utiliza pequenas quantidades de material na produção das barras, a argamassa com substituição de cimento por sílica em massa apresentou-se mais

seca, sem o uso de aditivo, quando comparada à argamassa de referência. Entretanto, ainda permitia a moldagem e obtenção de barras com boa homogeneidade. No ensaio dos miniprismas de concreto, que necessita de maior quantidade de materiais, os prismas produzidos, como observado na Figura 40 (b), apresentaram superfície irregular, com grande quantidade de vazios, comprometendo a fixação dos pinos ao concreto. Desta forma, a melhor condição seria aquela com o uso de aditivos na presença dessa adição. Entretanto, de forma a seguir fielmente o método de ensaio, que não prescreve aditivos, neste trabalho o teor de adição empregado foi reduzido e a substituição foi feita, portanto, em volume. Nessa condição aplicada, o concreto se tornou mais trabalhável, com superfície homogênea (Figura 40 (d)).

Verifica-se que o agregado Vitória apresentou maior massa específica. Esta característica pode ser explicada pela sua composição mineralógica, com grande quantidade de biotita e hornblenda, que possuem maior massa específica em relação aos outros minerais presentes².

A partir da análise da tabela, nota-se que o agregado Jaboaão possui absorção 84,6% maior do que a absorção do agregado Vitória. Este valor pode indicar maior fissuração do agregado Jaboaão e, conseqüentemente, maior vulnerabilidade em relação à solução alcalina; também pode indicar a presença de minerais que, em sua estrutura, comportem a absorção de água, como minerais de argila, por exemplo a sericita, que foi observada em maior quantidade no agregado Jaboaão a partir de análise petrográfica³.

4.1.2 Área Superficial Específica e Distribuição Granulométrica

No tocante à área superficial específica, a Tabela 15 apresenta os resultados utilizando o método Blaine e BET.

Tabela 15 – Resultados de área superficial específica dos materiais.

Material	Área superficial específica (m ² /kg)	
	Blaine	BET
Cimento	460,71 ± 7,32	3.546,5
Sílica Ativa	735,94 ± 8,77	20.285,0
Pó Mandíbulas	173,79 ± 1,83	1.892,4
Pó Rolos	160,32 ± 0,26	1.826,1

Fonte: Autora, 2019.

Os resultados obtidos apontam para a maior área superficial específica da sílica em relação ao cimento, o que já era esperado, uma vez que a sílica apresenta partículas de dimensões inferiores às do cimento. O ensaio BET, sendo o mais adequado para partículas muito finas, como as do

² Composição mineralógica apresentada do tópico 4.3.

³ Discutida em detalhe no tópico 4.5.1.

cimento e da sílica, apresenta resultados mais representativos, uma vez que mensura a superfície de poros internos, o que é evidenciado pelos resultados superiores aos do Blaine.

Com relação aos PAR, observou-se, para os dois ensaios, uma maior área superficial específica para o pó mandíbulas em relação ao pó rolos, provavelmente devido a diferenças entre a morfologia das partículas.

Determinou-se a distribuição granulométrica do cimento, sílica e PAR. Para a sílica, por sua capacidade de aglomerar-se, o ensaio foi realizado com e sem agente dispersante. Contudo, os resultados foram semelhantes.

A sílica analisada apresentou 89,40% e 87,26% do material inferior a 75 μm , com e sem dispersante, respectivamente, o que assinala a semelhança dos resultados. Entretanto, este material é conhecido por sua extrema finura, confirmada por meio dos resultados de área superficial específica já discutidos. Desta forma, a distribuição granulométrica refere-se às aglomerações de partículas deste material, que deveriam ter sido minimizadas pelo uso do dispersante. Romano *et al.* (2008) obtiveram curvas granulométricas semelhantes ao utilizar misturador rotacional com baixa energia de cisalhamento, com uma porcentagem da sílica acima de 75 μm , resultado que pode ser relacionado com as curvas obtidas no presente estudo, utilizando-se agitação manual. Os autores indicaram que, para esta energia de agitação, foram obtidos aglomerados de diâmetro médio de 20 μm . Desta forma, o resultado desta pesquisa assemelha-se ao obtido por estes autores, sendo, possivelmente, devido à ineficácia da dispersão dos aglomerados.

De acordo com German (1996), a aglomeração de partículas é natural, uma vez que faces compartilhadas reduzem a energia total da superfície. Este autor correlacionou a massa específica, área superficial específica, determinada por meio de BET, e D50, determinado por meio de técnicas como granulometria a laser e sedimentação, criando uma equação para calcular a quantidade de partículas aglomeradas em um pó submetido a análise automática de distribuição granulométrica. De acordo com a sua equação, a amostra sem dispersante teria conglomerados de 2.322.120 partículas, enquanto que com dispersante este número seria de 1.857.888, representando uma liberação de 464.232 partículas, equivalente a 20%⁴. Maas, Ideker e Juenger (2007) afirmam que essa quantidade de partículas aglomeradas é possível para sílica densificada, comercializada desta forma para facilitar seu transporte e distribuição.

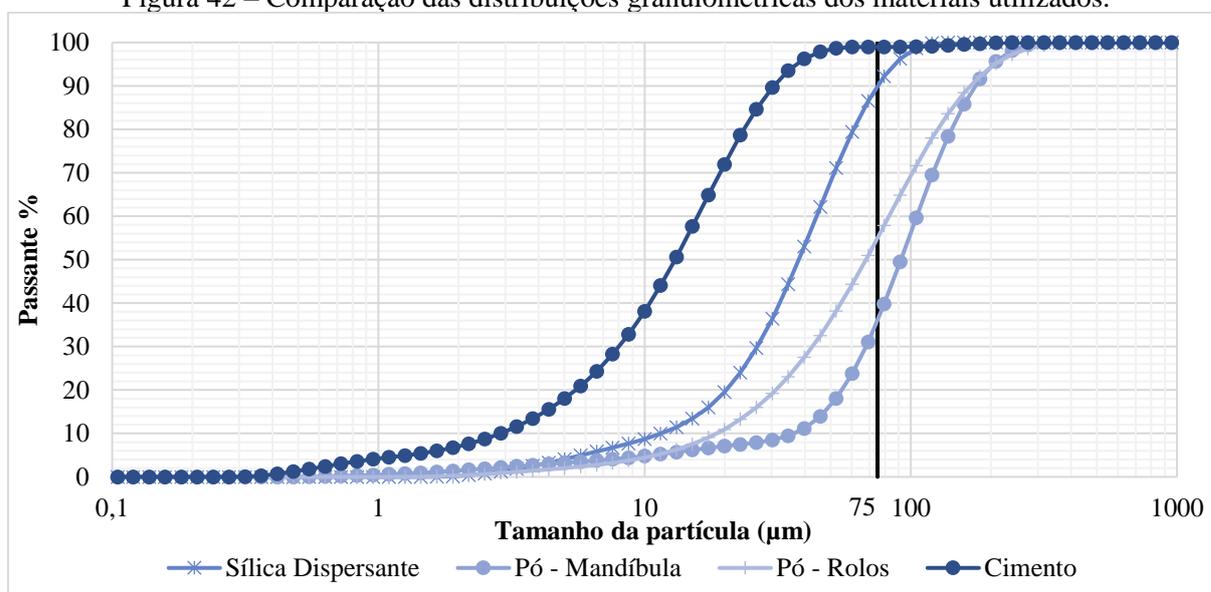
⁴ D50 das aglomerações sem dispersante: 40,91; D50 das aglomerações com dispersante: 37,98.

Considerados os erros inerentes aos ensaios e magnificados pelo cálculo, percebe-se que a aglomeração das partículas de sílica se dá em grandes proporções e sua dispersão foi ineficiente.

Diamond e Sahu (2006) afirmam que, em misturas convencionais, grandes quantidades de aglomerados permanecem no concreto. Nesse sentido, alguns autores, como Diamond (1997), Diamond e Sahu (2006), Pettersson (1992), Shayan, Quick e Lancucki (1993) também apontam para a influência dos aglomerados grandes e não dispersos de sílica, que podem se comportar como agregados reativos, reagindo e formando gel expansivo quando a concentração de álcalis é suficientemente alta.

A Figura 42 ilustra as curvas granulométricas dos materiais ensaiados. A Tabela 16 apresenta os diâmetros característicos do cimento e dos pós mandíbulas e rolos.

Figura 42 – Comparação das distribuições granulométricas dos materiais utilizados.



Fonte: Autora, 2019.

Tabela 16 – Diâmetros característicos dos materiais utilizados.

Material	D10	D50	D90	S
	µm	µm	µm	m ² /kg
Cimento	3,30	14,94	35,05	991,00
Pó Mandíbulas	41,84	105,36	200,01	180,00
Pó Rolos	21,48	77,86	191,89	154,00

Fonte: Autora, 2019.

Verifica-se que o material com menor granulometria é o cimento, seguido pelo pó rolos e pó mandíbulas, não considerando a sílica, neste caso, uma vez que o resultado se refere a aglomerações, e não partículas individuais. A fração inferior a 75 µm é de 98,94%, 35,42% e 54,45 para o cimento, pó mandíbulas e pó rolos, respectivamente. Nota-se que as partículas do pó mandíbulas são maiores, em relação às do pó rolos, o que também pode ser percebido

analisando os diâmetros característicos. Contudo, a área superficial específica, determinada por este método, está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios Blaine e BET, com o pó proveniente do britador de mandíbulas com maior área superficial específica do que o obtido com britador de rolos. Isto pode se dever à característica lamelar das partículas: como a granulometria a laser determina o tamanho de partículas por meio da medição da variação angular na intensidade da luz difundida, é possível que as medidas das partículas tenham se realizado, em sua maioria, na face achatada do agregado, proporcionando resultados de diâmetro maiores do que os reais; também pode estar relacionado ao modo de cálculo da área superficial específica por esse método. O cálculo utiliza o diâmetro de Sauter, que é o diâmetro da esfera que possui relação volume/superfície igual à de todas as partículas.

Também foi feita a análise granulométrica a laser para as frações retidas nas peneiras de abertura 300 μm e 150 μm , para agregados obtidos por britador de mandíbulas e rolos. As curvas granulométricas obtidas estão ilustradas nas Figuras 43 (a) e (b), para a fração 300 μm e para os agregados Vitória e Jaboaão, respectivamente. As Figuras 43 (c) e (d) apresentam as curvas granulométricas para a fração 150 μm e os agregados Vitória e Jaboaão, respectivamente.

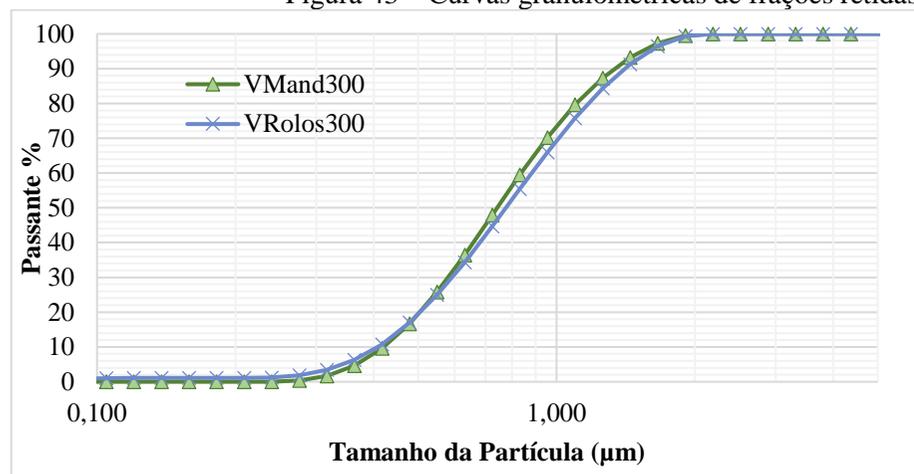
Ao analisar as curvas para ambos os agregados e granulometrias, observa-se que a curva para os agregados obtidos pelo britador de mandíbulas está mais à esquerda, o que indica partículas menores, quando se compara com agregados provenientes de britador de rolos, cuja curva está mais à direita. Este fato também é observado ao analisar os diâmetros característicos, expostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Diâmetros característicos das frações de agregado analisadas.

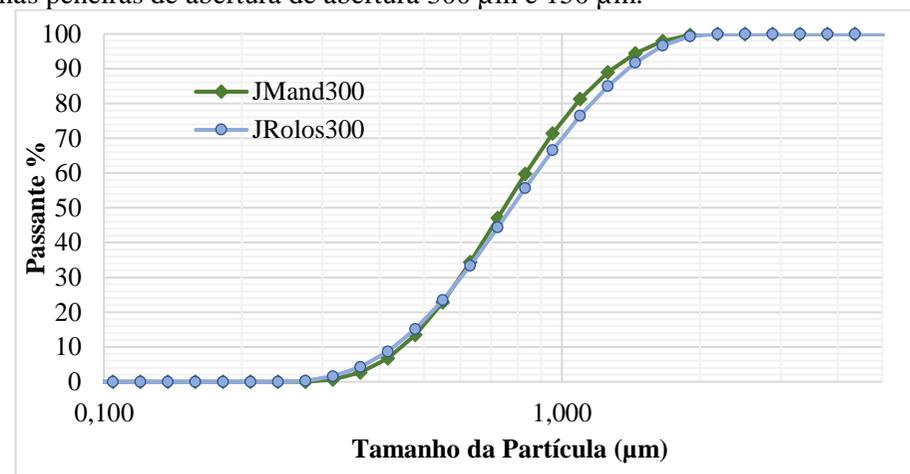
Material	D10	D50	D90	S
	μm	μm	μm	m^2/kg
VMAND150	163,83	284,37	476,59	25,80
VROLOS150	184,33	318,90	533,49	23,10
JMAND150	172,01	298,90	503,08	23,70
JROLOS150	188,19	317,17	520,08	22,50
VMAND300	420,88	742,37	1334,23	8,83
VROLOS300	408,94	775,88	1404,94	9,40
JMAND300	448,38	747,60	1287,45	8,61
JROLOS300	430,14	775,70	1390,26	8,54

Fonte: Autora, 2019.

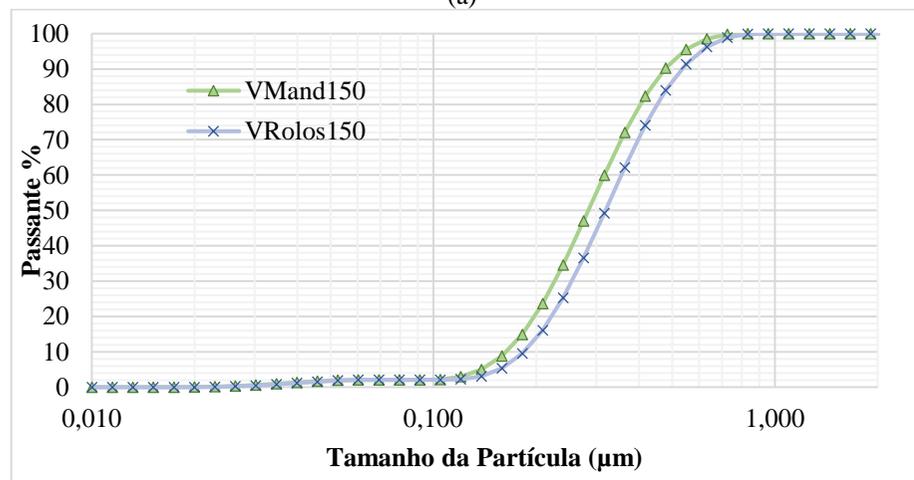
Figura 43 – Curvas granulométricas de frações retidas nas peneiras de abertura de abertura 300 μm e 150 μm .



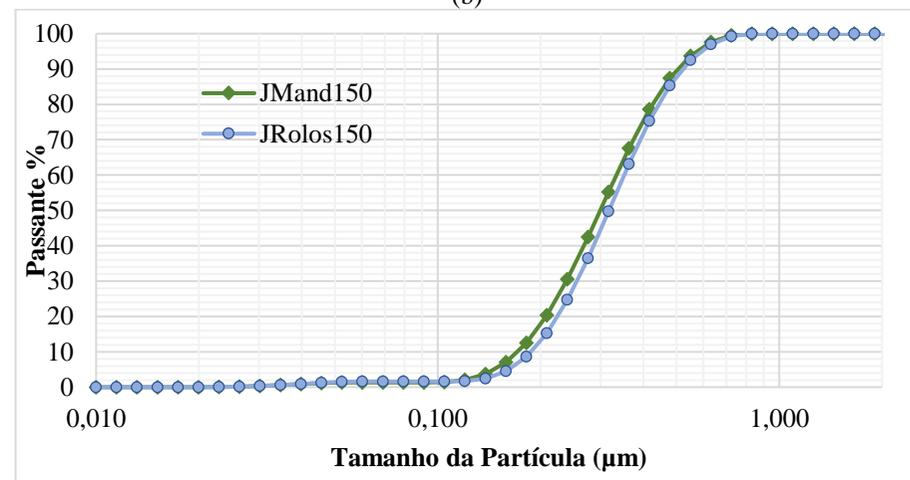
(a)



(b)



(c)



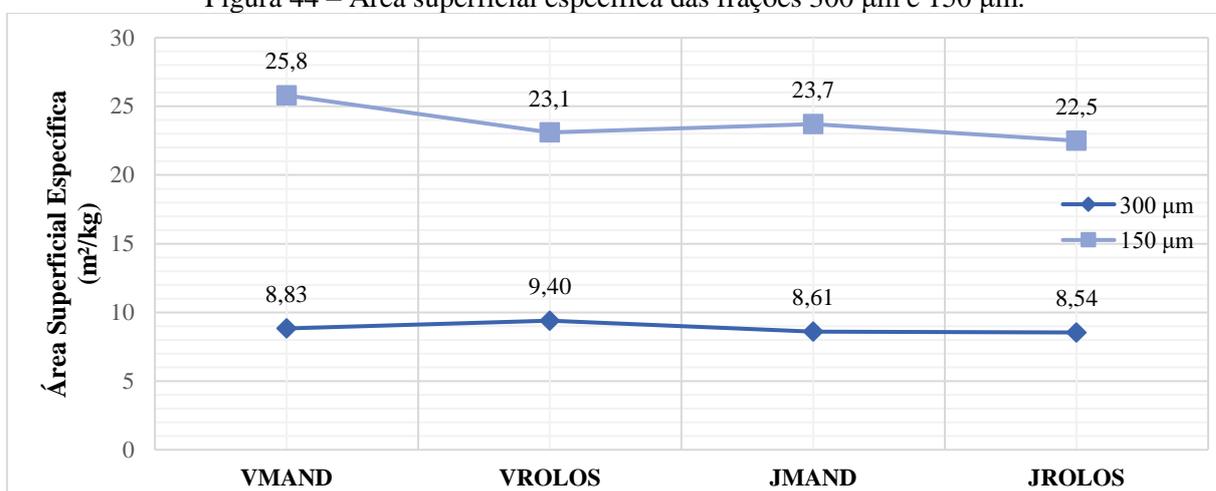
(d)

Fonte: Autora, 2019.

(a) Fração retida na peneira de abertura 300 μm para o agregado Vitória; (b) de abertura 300 μm para o agregado Jaboatão; (c) de abertura 150 μm para o agregado Vitória; (d) de abertura 150 μm para o agregado Jaboatão (VMand: Agregado Vitória Mandíbulas; VRolos: Agregado Vitória Rolos; JMand: Agregado Jaboatão Mandíbulas; JRolos: Agregado Jaboatão Rolos).

A partir da tabela, verifica-se a mesma tendência para 150 μm : menores diâmetros para o britador de mandíbulas e para o agregado Vitória. Para 300 μm , observa-se que, para o D10, os agregados mandíbulas possuem maior dimensão; para os diâmetros D50 E D90, em contrapartida, os agregados rolos possuem maior dimensão. Ao comparar os dois agregados, para o D10 as dimensões se apresentaram maiores no agregado Jaboatão, enquanto que para o D50 e D90 as dimensões são maiores para o agregado Vitória. Este resultado indica que as partículas provenientes do britador de mandíbulas são menores na fração 150 μm , o que é confirmado pelos resultados de área superficial específica, presentes na Tabela 17 e na Figura 44. A diferença de resultados para os agregados pode ser devida a características morfológicas, decorrentes do processo de britagem, assim como características intrínsecas, como mineralogia.

Figura 44 – Área superficial específica das frações 300 μm e 150 μm .



Fonte: Autora, 2019.

A área superficial específica para as frações provenientes do britador de mandíbulas é maior do que para as frações provenientes do britador de rolos. A exceção é para a fração 300 μm rolos do agregado Vitória, cuja área superficial específica se apresentou maior do que para a fração mandíbulas. Tal fato pode ser devido a uma discrepância na amostra analisada.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química consistiu na avaliação indireta da pozolanicidade por condutividade elétrica e no ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X, cujos resultados estão apresentados a seguir.

4.2.1 Avaliação Indireta da Pozolanicidade por Condutividade Elétrica

A atividade pozolânica das adições foi avaliada indiretamente por meio da condutividade elétrica. A partir do ensaio, foram calculadas as perdas de condutividade, assim como a variação entre condutividade inicial e final para cada tempo, como apresentado na Tabela 18. A Figura 45 apresenta as curvas de perda de condutividade dos materiais analisados.

Tabela 18 – Dados do ensaio de condutividade elétrica.

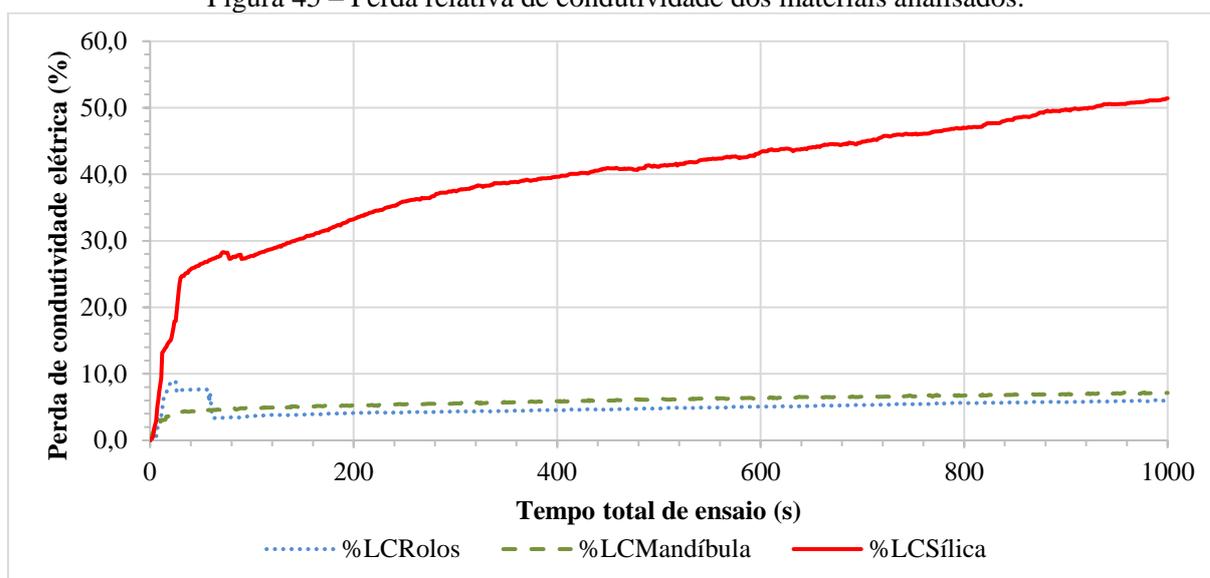
Tempo (s)	%LC			Δ		
	Mand.	Rolos	Sílica	Mand.	Rolos	Sílica
100	4,58	3,68	28,43	0,25	0,18	1,45
1000	7,32	6,27	54,24	0,37	0,32	2,77

Fonte: Autora, 2019.

LC: Perda de condutividade relativa em porcentagem;

Δ : variação entre a condutividade inicial e final para cada tempo.

Figura 45 – Perda relativa de condutividade dos materiais analisados.



Fonte: Autora, 2019.

Nota-se que há um grande declínio da condutividade com a inserção de sílica na solução, representando uma queda de 54,24% em relação ao valor inicial. Para o pó mandíbulas e rolos esta queda é bastante branda, representando 7,32% e 6,27%, respectivamente. O pó mandíbulas apresentou perda de condutividade levemente maior em relação ao pó rolos, o que indica maior atividade pozolânica. Observou-se que a tendência de perda de condutividade pela sílica se mantém, ou seja, com a continuação do ensaio, possivelmente haveria a continuação da curva; os pós, por outro lado, parecem aproximar-se da estabilidade. O pó rolos apresentou comportamento distinto no início do ensaio, provavelmente devido à inserção e dissolução do material.

4.2.2 Espectrometria por Fluorescência de Raios X

A espectrometria FRX permitiu determinar a composição química dos materiais utilizados, apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Caracterização química dos materiais utilizados por meio de espectrometria FRX (em %).

Parâmetro Analisado	Cimento	Limite (ABNT NBR 16697:2018)	Agregado Vitória	Agregado Jaboaão	Sílica	Limite (ABNT NBR 13956-1:2012)
SiO ₂	15,62		58,15	60,10	94,28	≥ 85,0
Al ₂ O ₃	3,96		15,89	15,58	0,40	-
CaO	64,34		5,19	3,76	0,83	-
K ₂ O	1,12		4,26	6,33	0,53	-
Na ₂ O	0,39		3,16	2,60	0,12	-
MgO	1,20	≤ 6,5	2,47	1,91	0,41	-
Fe ₂ O _{3t}	2,82		7,44	6,22	0,17	-
TiO ₂	0,27		1,26	1,18	nd*	-
SO ₃	5,83	≤ 3,5	0,09	0,07	0,09	-
P ₂ O ₅	0,70		0,93	0,70	0,08	-
MnO	nd*		0,12	0,09	nd*	-
Cr ₂ O ₃	0,02		nd*	0,02	0,01	-
NiO	0,01		nd*	nd*	tr**	-
CuO	0,01		0,01	nd*	tr**	-
ZnO	0,03		0,02	0,02	tr**	-
Rb ₂ O	tr**		0,02	0,03	nd*	-
SrO	0,07		0,08	0,06	tr**	-
ZrO ₂	0,01		0,04	0,05	nd*	-
BaO	nd*		0,14	0,14	nd*	-
PbO	nd*		0,01	nd*	tr**	-
V ₂ O ₅	nd*		nd*	0,01	nd*	
Ga ₂ O ₃	nd*		nd*	0,01	nd*	
Nb ₂ O ₅	nd*		nd*	0,01	nd*	
P.F.	3,58	≤ 4,5	0,70	1,09	3,06	≤ 6,0
TOTAL	100,00		100,00	100,00	100,00	

Fonte: Autora, 2019.

*Não detectado

**Traços

A partir da composição apresentada, pode-se calcular o equivalente alcalino, de acordo com a equação 1, determinando a contribuição de álcalis de cada material. Desta forma, tem-se que o cimento, os agregados Vitória e Jaboaão e a sílica apresentam equivalente alcalino de 1,13%, 5,96%, 6,77% e 0,47%, respectivamente, como apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Equivalente alcalino dos materiais utilizados.

Material	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}
Cimento	0,39	1,12	1,13
Agregado Vitória	3,16	4,26	5,96
Agregado Jaboaão	2,60	6,33	6,77
Sílica	0,12	0,53	0,47

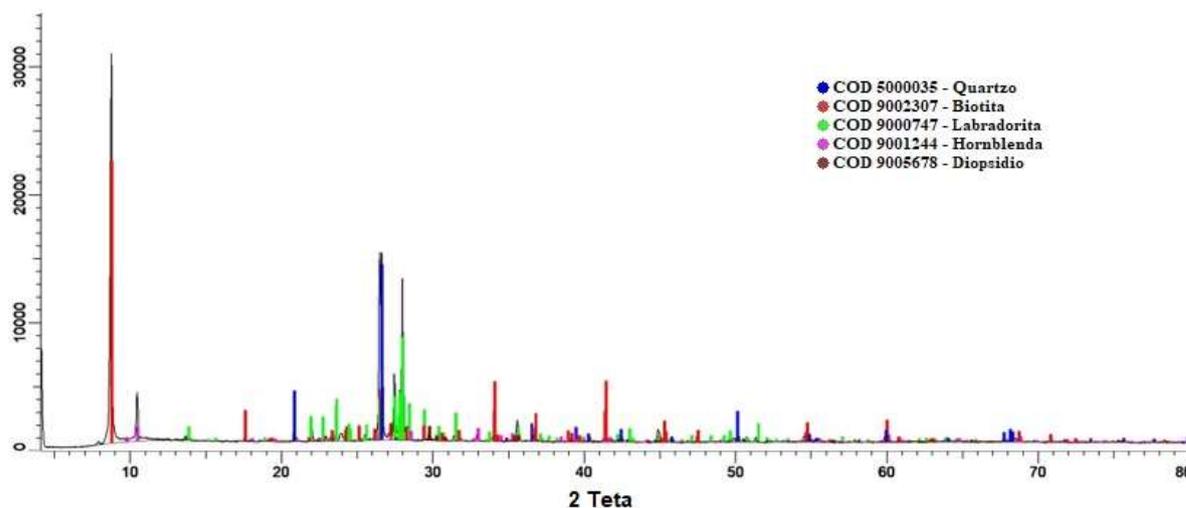
Fonte: Autora, 2019.

Apesar de o valor do equivalente alcalino do cimento ser superior ao indicado para um cimento padrão pela ABNT NBR 15577-4:2018, de $(0,90 \pm 0,1) \%$, este cimento foi utilizado em todas as combinações, de modo que a comparação se mantém válida. Observa-se que a sílica possui baixo equivalente alcalino. Por outro lado, os agregados possuem valor significativo de equivalente alcalino, o que pode influenciar nos ensaios de potencial reativo, caso haja a liberação dos álcalis pelos agregados.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

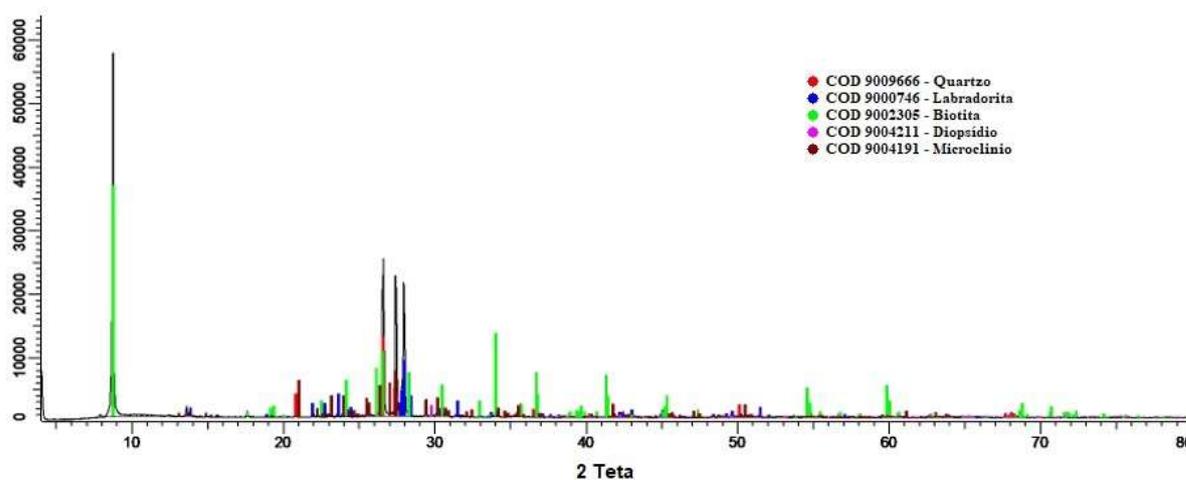
A partir da Difração de Raios X, foi possível obter os difratogramas das amostras de brita e sílica analisadas, apresentados nas Figuras 46, 47 e 48.

Figura 46 – Difratograma da brita Vitória.



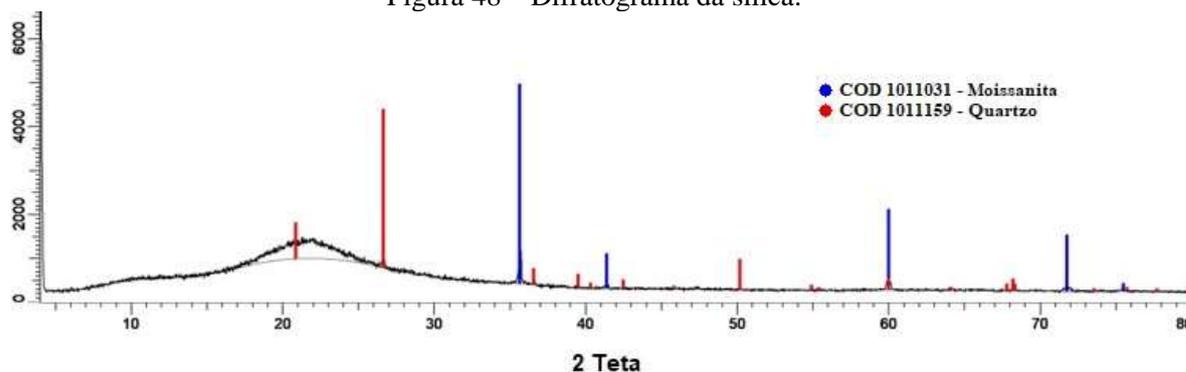
Fonte: Autora, 2019.

Figura 47 – Difratograma da brita Jaboatão.



Fonte: Autora, 2019.

Figura 48 – Difratoograma da sílica.



Fonte: Autora, 2019.

Ao analisar os padrões de difração, pode-se constatar a presença de quartzo, biotita, labradorita, hornblenda e diopsídio na amostra de brita Vitória; quartzo, labradorita, biotita, diopsídio e microclínio na amostra de brita Jaboaão e quartzo e moissanita na amostra de sílica, como especificado na Quadro 8.

Quadro 8 – Caracterização Mineralógica.

Amostra	Composição Mineralógica
Brita Vitória	Quartzo (SiO_2) Biotita ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$) Labradorita ($(\text{Ca},\text{Na})(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_8$) Hornblenda ($(\text{Ca},\text{Na})_{2-3}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_5(\text{Al},\text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$) Diopsídio ($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$)
Brita Jaboaão	Quartzo (SiO_2) Labradorita ($(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$) Biotita ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) Diopsidio ($\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$) Microclínio (KAlSi_3O_8)
Sílica	Quartzo (SiO_2) Moissanita (SiC)

Fonte: Autora, 2019.

O difratograma da amostra de sílica ativa apresenta o halo amorfo entre 15° e 30° , também obtido por Silva (2015) e Hoppe Filho *et al.* (2017), entre vários outros autores, o que aponta a não cristalinidade da sílica utilizada. Já os agregados possuem composição mineralógica similar; entretanto, o agregado Vitória possui, em sua constituição, hornblenda, enquanto o agregado Jaboaão possui microclínio, que é um feldspato alcalino. Este resultado está em consonância com o resultado da caracterização química, que identificou maior quantidade de K_2O no agregado Jaboaão.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

O índice de forma dos agregados Vitória e Jaboaão cominuídos por britador de mandíbulas e de rolos foi calculado e os resultados estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Índice de forma dos agregados.

Agregado	Índice de Forma
Agregado Vitória – Mandíbulas	2,66
Agregado Vitória – Rolos	2,29
Agregado Jaboaão – Mandíbulas	2,30
Agregado Jaboaão – Rolos	2,45

Fonte: Autora, 2019.

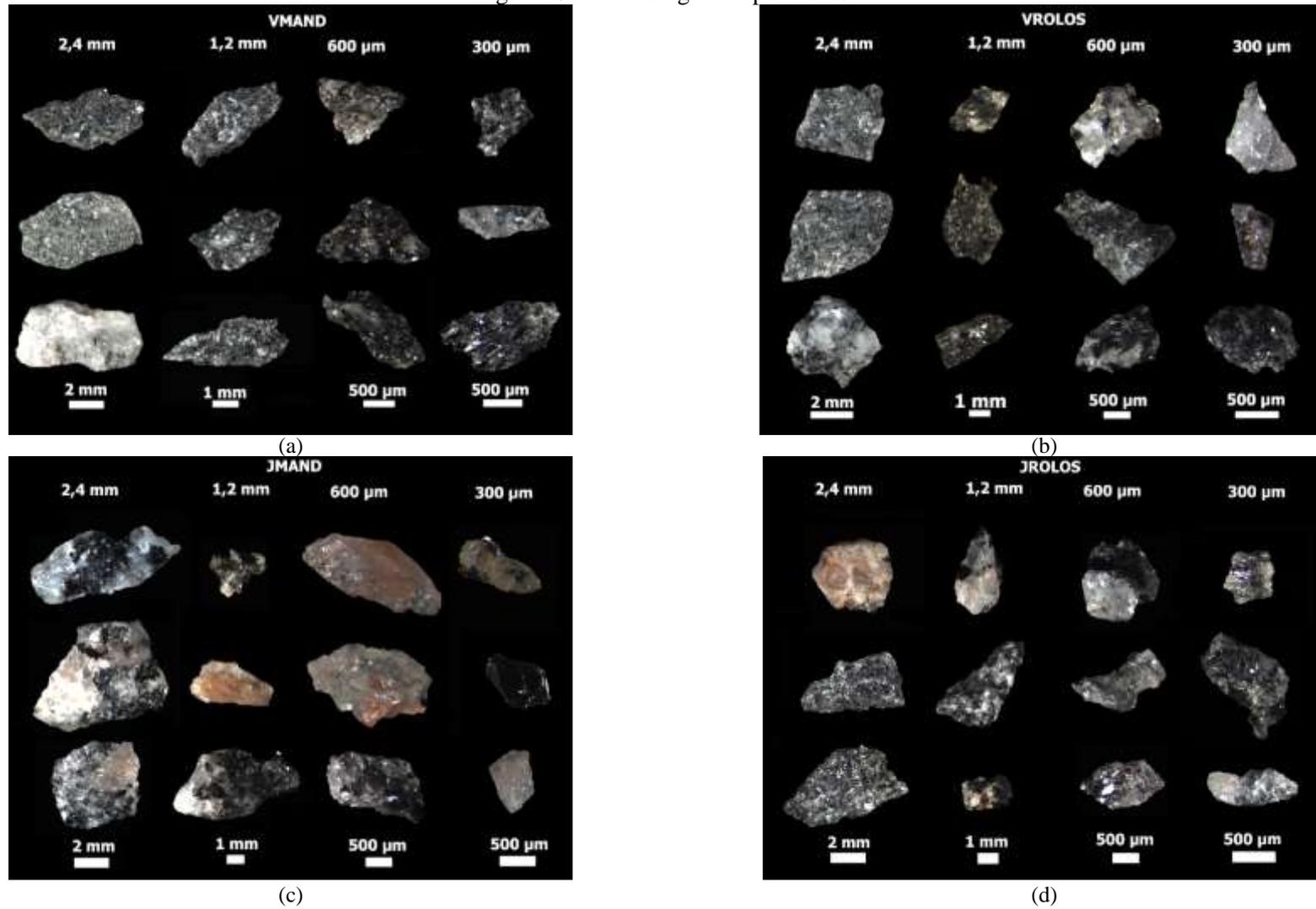
Os resultados obtidos apontam para tendências diferentes entre os dois agregados. Para o agregado Vitória, foi observado um maior índice de forma com o britador de mandíbulas em relação ao britador de rolos. Tal fato implica diferenças de classificação da forma, sendo as partículas do agregado Vitória mandíbulas classificadas como lamelares e as do agregado Vitória rolos classificadas como alongadas. Por conseguinte, há uma maior área superficial específica para o agregado Vitória mandíbulas.

O agregado Jaboaão, em contrapartida, possui maior índice de forma para o britador de rolos do que para o britador de mandíbulas, o que resulta em partículas classificadas como lamelares para o agregado Jaboaão rolos e maior área superficial específica. A diferença de áreas superficiais específicas pode resultar em diferenças no ensaio de reatividade potencial.

Em relação ao agregado na dimensão utilizada no ensaio de barras de argamassa, foram analisadas as frações 2,4 mm, 1,2 mm, 600 μm e 300 μm e comparadas as partículas de acordo com o tipo de britador utilizado. A Figura 49 ilustra partículas decorrentes de britagem por britador de mandíbulas e rolos do agregado Vitória e Jaboaão. Para cada fração analisada, foram medidas as dimensões de face das partículas, e calculada a relação de aspecto, utilizando-se a razão entre o comprimento e a largura observados. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 22.

A partir da análise das fotos apresentadas na Figura 49, observa-se, para o agregado Vitória mandíbulas, a predominância de partículas de grandes dimensões e alongadas, ou seja, uma das dimensões visualizadas é consideravelmente maior do que a outra. A relação de aspecto também aponta esta tendência, com o aumento da discrepância entre medidas ao se diminuir o tamanho da partícula, chegando a uma medida ser quase o dobro da outra para a dimensão de 300 μm (relação de 1,94, relativa à razão entre o comprimento e a largura da face da partícula).

Figura 49 – Morfologia das partículas.



Fonte: Autora, 2019.

Agregado Vitória (a) após britagem por britador de mandíbulas (VMAND); (b) após britagem por britador de rolos (VROLOS); Agregado Jabotão (c) após britagem por britador de mandíbulas (JMAND); (d) após britagem por britador de rolos (JROLOS).

Tabela 22 – Relação entre o comprimento e a largura de face das partículas (relação de aspecto).

	Agregado Vitória		Agregado Jabotão	
	Mandíbulas	Rolos	Mandíbulas	Rolos
2,4 mm	1,72	1,28	1,62	1,55
1,2 mm	1,81	1,52	1,88	1,75
600 µm	1,88	1,57	2,12	1,82
300 µm	1,94	1,65	2,13	2,07

Fonte: Autora, 2019.

O agregado Vitória rolos, por sua vez, possui partículas com morfologia mais cúbica em relação às partículas do agregado mandíbulas, como também observado pelos valores da relação de aspecto. Assim como o agregado Vitória mandíbulas, há o aumento do valor desta relação com a diminuição do tamanho da partícula, também com valor máximo para a dimensão de 300 µm.

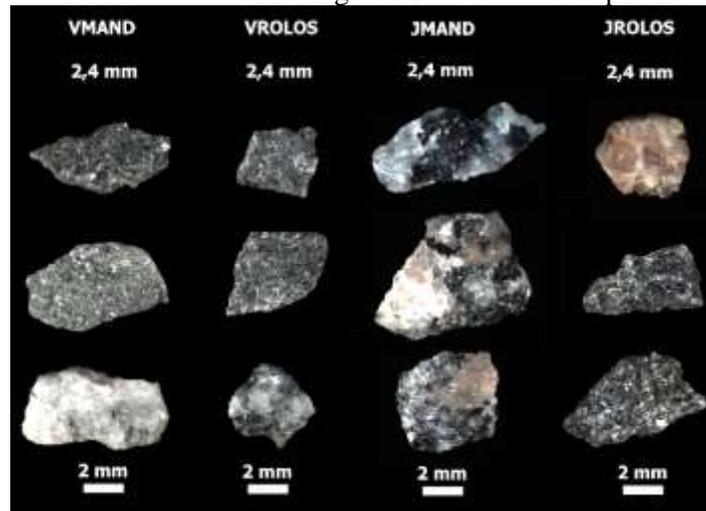
Ao comparar estas partículas, nota-se que, para todas as dimensões analisadas, a relação de aspecto para o agregado Vitória mandíbulas é maior do que a relação para o agregado Vitória rolos, indicando partículas mais alongadas. Tem-se, para as partículas de dimensão 300 µm, que é a que possui valores de relação de aspecto mais altos, uma dimensão 94% e 65% maior em relação à outra, para o agregado mandíbulas e rolos, respectivamente.

Para o agregado Jabotão, observa-se que, tanto as partículas cominuídas por britador de mandíbulas quanto por britador de rolos, têm formato alongado. A partir da relação de aspecto, tem-se, novamente, um maior alongamento das partículas com a diminuição de seu tamanho. Contudo, os valores para o agregado Jabotão mandíbulas e rolos são próximos, o que difere do ocorrido para o agregado Vitória.

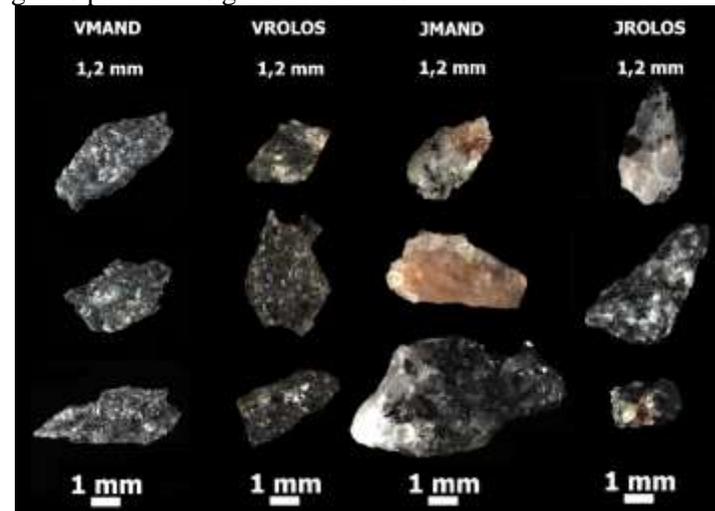
Ao analisar os dois agregados, comparando os tipos de britagem, percebe-se que, para o britador de mandíbulas, a relação de aspecto é maior no agregado Vitória apenas para a dimensão de 2,4 mm, sendo maior no agregado Jabotão para as dimensões 1,2 mm, 600 µm e 300 µm; para o britador de rolos, em todas as dimensões há um valor maior de relação de aspecto para o agregado Jabotão; isto indica que, em geral, há maior alongamento das partículas deste agregado em relação às do agregado Vitória.

É importante analisar-se, também, o tamanho das partículas para cada granulometria estudada, que interfere na reatividade potencial do agregado determinada pelo ensaio acelerado de barras. A Figura 50 apresenta as partículas de dimensão 2,4 mm, 1,2 mm, 600 µm e 300 µm dos agregados Vitória e Jabotão. Tem-se as partículas para cada agregado e processo de britagem postas lado a lado, visando a analisar comparativamente tamanho e características morfológicas pertinentes.

Figura 50 – Tamanho de partículas de diferentes agregados para faixas granulométricas.



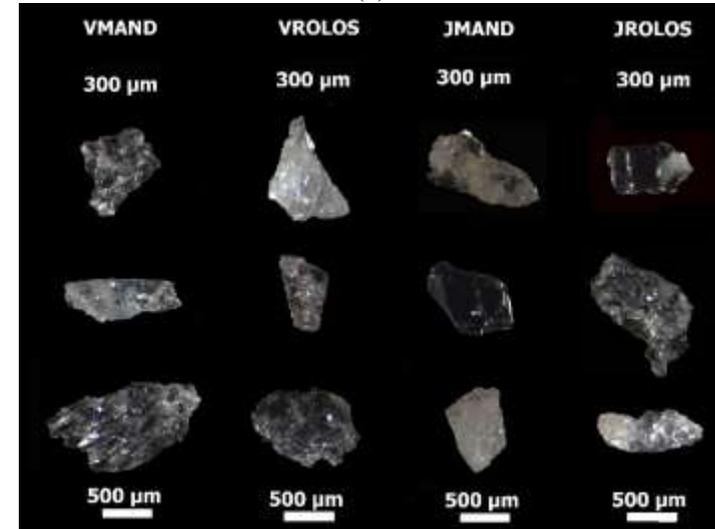
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora, 2019.

(a) 2,4 mm; (b) 1,2 mm; (c) 600 µm; (d) 300 µm.

Nota-se que as partículas de 2,4 mm cominuídas pelo britador de rolos possuem menor dimensão em relação às partículas cominuídas pelo britador de mandíbulas. Ao comparar as partículas do agregado Vitória, é visível o maior alongamento e dimensão para mandíbulas e maior cubicidade para rolos; para o agregado Jaboaão, o alongamento parece semelhante para ambos os tipos de britagem. O observado está de acordo com os valores de relação de aspecto obtidos. A partir da análise da imagem, é perceptível que as partículas do agregado Jaboaão mandíbulas são maiores em relação a todas as outras, o que somente pode ser notado a partir da análise visual, uma vez que o índice de forma retorna uma relação entre as dimensões de uma partícula. Independentemente do tamanho, caso duas partículas possuam relações semelhantes entre suas dimensões, resultarão em relações de aspecto semelhantes.

Para a fração 1,2 mm, observa-se maior regularidade do tamanho em relação à fração anterior. Contudo, é perceptível leve diferença, com a dimensão do agregado Vitória mandíbulas maior do que a do Vitória rolos. Em relação ao agregado Jaboaão, percebe-se que, para o agregado Jaboaão mandíbulas, há presença de partículas de dimensões muito superiores. O formato de todas as partículas é alongado. As observações feitas também corroboram com as relações de aspecto obtidas.

A fração 600 μm também apresenta maior regularidade dimensional. Observa-se que as partículas do agregado Vitória rolos são levemente maiores que as partículas do agregado Vitória mandíbulas; as partículas do agregado Jaboaão mandíbulas são muito maiores do que as partículas do agregado Jaboaão rolos, assim como em relação às partículas do agregado Vitória. A morfologia das partículas mantém-se alongada e as observações concordam com os resultados de relação de aspecto. A análise de tamanho se mostra importante, uma vez que não poderia ser determinada a presença de partículas de dimensões superiores às demais apenas pela aferição da relação de aspecto.

A análise das partículas de 300 μm indica semelhança de tamanhos entre as partículas Jaboaão mandíbulas e rolos; além disso, percebe-se maior alongamento nas partículas Vitória mandíbulas em relação às partículas Vitória rolos, estas apresentando menor dimensão. Os resultados estão de acordo com as relações de aspecto calculadas. Contudo, ao analisar os diâmetros característicos expostos na Tabela 15, tem-se que, para o D10, os agregados mandíbulas são maiores e para o D50 e o D90, os agregados rolos são maiores. Neste caso, pode ter havido influência da terceira dimensão, a qual não foi analisada na caracterização morfológica das partículas entre 2,4 mm e 300 μm .

4.5 AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POTENCIAL E EFICIÊNCIA DE ADIÇÕES NA MITIGAÇÃO

A reatividade potencial foi analisada por análise petrográfica, ensaio acelerado de barras e ensaio acelerado dos miniprismas de concreto. Os resultados obtidos estão descritos a seguir.

4.5.1 Análise Petrográfica

A análise petrográfica foi realizada nos dois agregados, Vitória e Jaboaão, a partir da análise de lâminas delgadas polidas sob microscópio de luz refletida. A descrição petrográfica está apresentada a seguir.

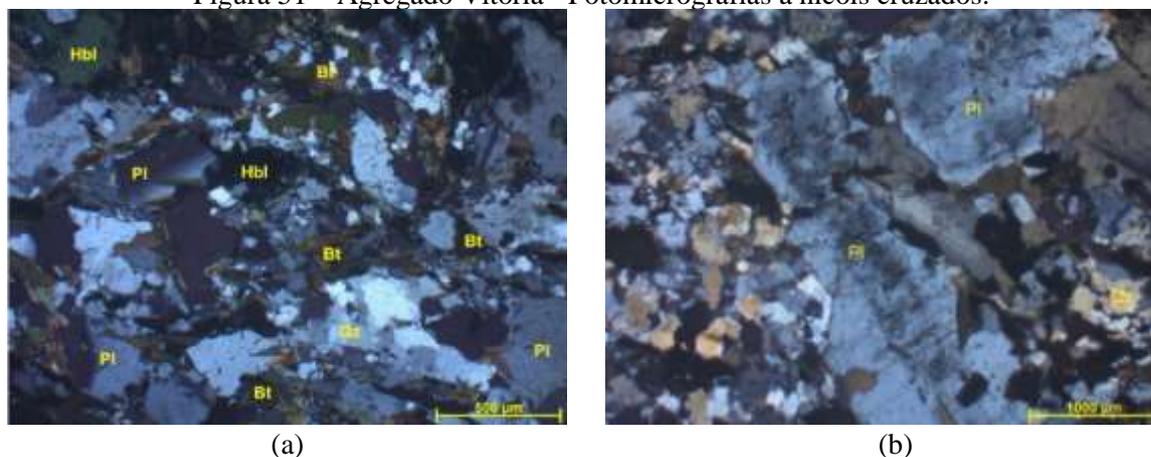
4.5.1.1 Agregado Vitória

Foi feita a análise petrográfica de sete amostras, separadas em quatro grupos devido a suas características macroscópicas semelhantes. Os resultados desta análise permitiram separá-las em dois grupos, um cuja coloração é predominantemente escura (Grupo 1) e outro que possui porções escuras e claras (Grupo 2), uma vez que possuem descrições petrográficas semelhantes.

As amostras em questão são rochas metamórficas, sendo o grupo 1 classificado como ortognaisse de composição diorítica, com estrutura gnáissica, e o grupo 2 como ortognaisse de composição granodiorítica, com estrutura milonítica, ambos com granulação média.

O grupo 1 possui como minerais principais plagioclásio, hornblenda e biotita, e como minerais secundários quartzo, titanita, epidoto, apatita e minerais opacos. As feições deletérias observadas são quartzo microgranular e extinção ondulante, como ilustrado na Figura 51. As amostras apresentam microfissuração moderada. O quadro 9 sintetiza as características petrográficas observadas.

Figura 51 – Agregado Vitória - Fotomicrografias a nicóis cruzados.



Fonte: Autora, 2019.

(a) Extinção ondulante e (b) os pequenos cristais de quartzo (Qz), além de plagioclásio (Pl), e presença de hornblenda (Hbl) e biotita (Bt).

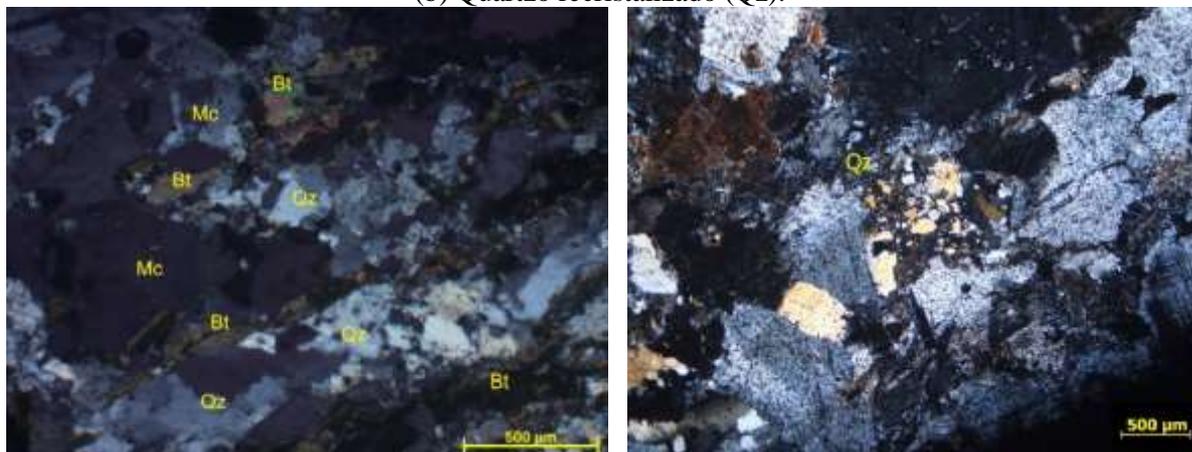
Quadro 9 – Síntese da análise petrográfica do agregado Vitória para o grupo 1.

Características Microscópicas – Grupo 1		
Mineralogia	Principal	Plagioclásio, hornblenda e biotita
	Subordinada	Quartzo, titanita, epidoto, apatita e minerais opacos
	Reativa/ Deletéria	Quartzo microgranular e extinção ondulante
Cor	Coloração predominantemente preta com porções esbranquiçadas	
Estrutura	Gnáissica	
Textura	Inequigranular	
Granulação	Média	
Feldspatos	Presentes (>5%)	
Alteração	Não observada	
Porcentagem de quartzo microgranular	2%	
Deformação do Agregado	Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante >30° e quartzo microgranular)	
Propriedade físico-mecânica	Rocha coerente	
Forma dos minerais	Subédrica a anédrica	
Tipo de Rocha	Metamórfica	
Protólito	Rocha ígnea básica	
Classificação Petrográfica	Ortognaisse de composição diorítica	
Reatividade Potencial	Potencialmente inócuo	

Fonte: Autora, 2019.

O grupo 2, por sua vez, possui como minerais principais microclina, quartzo, biotita e plagioclásio e como minerais secundários epidoto, titanita, apatita, biotita, hornblenda e minerais opacos. As feições deletérias observadas são extensa formação de quartzo microgranular, formação de subgrão, alguns cristais fitados e extinção ondulante, além de alteração no feldspato, com a presença de mimerquita, mesopertita, pertita em chama e sericita. A Figura 52 apresenta algumas destas feições.

Figura 52 – (a) Fotomicrografia a nicóis cruzado evidenciando a extinção ondulante do quartzo (Qz).; (b) Quartzo recrystalizado (Qz).



(a)

(b)

Fonte: Autora, 2019.

O microbandamento observado neste grupo se trata de biotita e hornblenda intercalada por quartzo e feldspato. Também foi observada a presença de sílica amorfa preenchendo fissuras no quartzo e a presença de clorita, que é um mineral de alteração da biotita. As amostras possuem microfissuração moderada. O Quadro 10 apresenta uma síntese das características petrográficas do Grupo 2.

Quadro 10 – Síntese da análise petrográfica do agregado Vitória para o grupo 2.

Características Microscópicas – Grupo 2		
Mineralogia	Principal	Microclina, quartzo, biotita e plagioclásio
	Subordinada	Epidoto, titanita, apatita, biotita, hornblenda e minerais opacos
	Reativa/ Deletéria	Quartzo microgranular, extinção ondulante, formação de subgrão
Cor	Coloração com porções escuras e claras	
Estrutura	Milonítica	
Textura	Inequigranular	
Granulação	Média	
Feldspatos	Presentes (> 5%)	
Alteração	Mimerquita, pertita e sericita	
Porcentagem de quartzo microgranular	16%	
Deformação do Agregado	Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante > 30°, quartzo microgranular e formação de subgrão)	
Propriedade físico-mecânica	Rocha coerente	
Forma dos minerais	Subédrica a anédrica	
Tipo de Rocha	Metamórfica	
Protólito	Rocha ígnea básica	
Classificação Petrográfica	Ortognaisse de composição granodiorítica	
Reatividade Potencial	Potencialmente reativo	

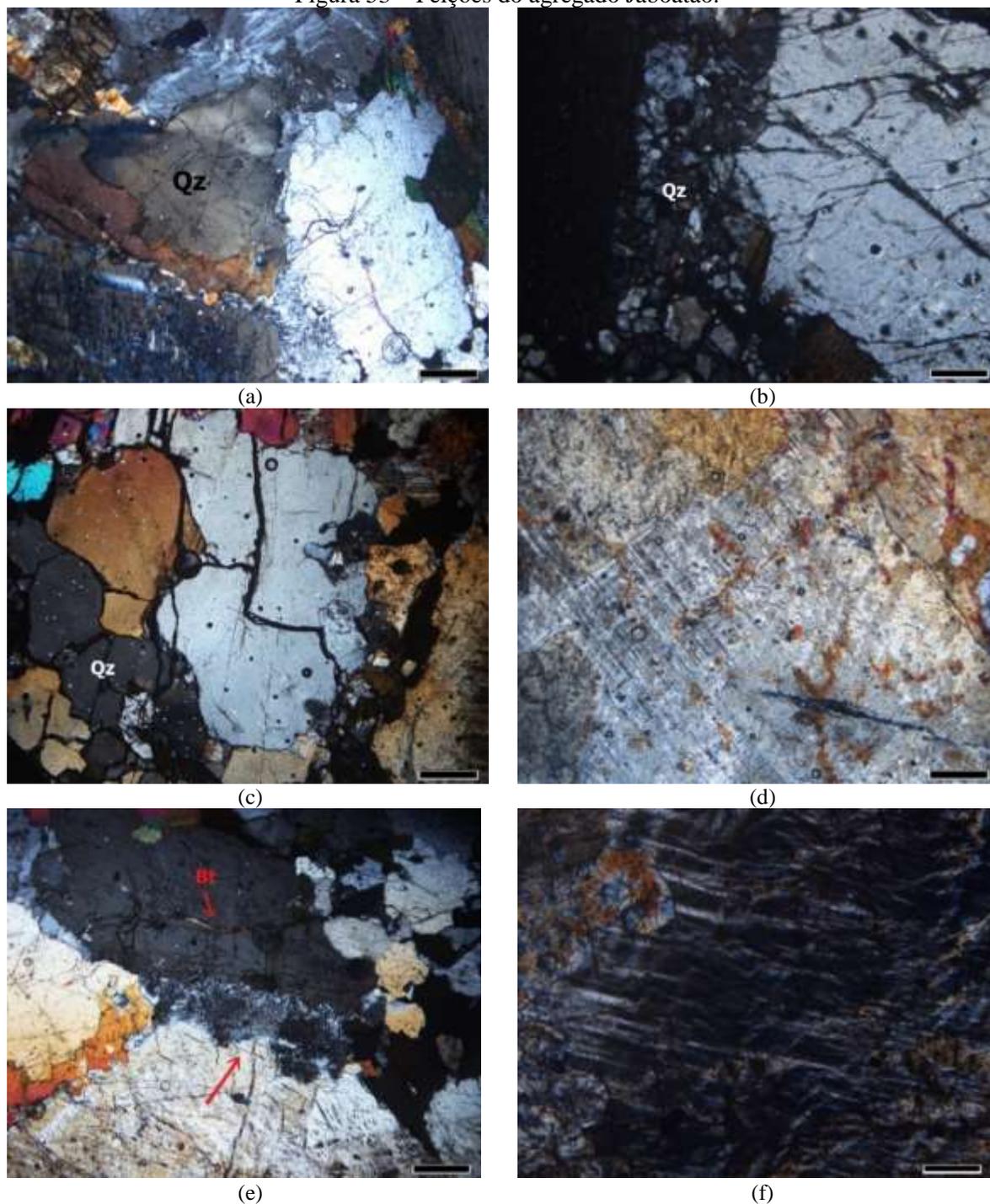
Fonte: Autora, 2019.

4.5.1.2 Agregado Jabotão

O agregado analisado é uma rocha ígnea que varia de granodiorito a tonalito, de granulação média e coloração clara com porções rosa. Apresenta como minerais principais plagioclásio e quartzo e como minerais subordinados, microclina, biotita, hornblenda, zircão, clorita, titanita e minerais opacos. A microclina foi observada em grandes fenocristais, com inclusões de biotita e minerais opacos. O quartzo apresenta extinção ondulante e pouca quantidade de recristalização, além de microfissuração, como observado na Figura 53 (a), (b) e (c). Quanto aos feldspatos, apresentam sericitização e presença de mimerquita e pertita em chama, como visto na Figura 53 (d), (e) e (f). Também foi observada microfissuração nos cristais de feldspato.

Os cristais apresentam textura ideomórfica, ou seja, cristais com faces desenvolvidas. As amostras analisadas apresentam microfissuração moderada, com fissuras preenchidas por biotita, como observado na Figura 53 (e).

Figura 53 – Feições do agregado Jabotão.



Fonte: Autora, 2019.

(a) Extinção ondulante do quartzo (Qz) – Barra: 500 μ m, Aumento: 4x; (b) Quartzo microgranular e feldspato microfissurado (Qz) – Barra: 200 μ m, Aumento: 10x; (c) Quartzo fraturado (Qz) – Barra: 500 μ m, Aumento: 4x; (d) Mega cristal de plagioclásio alterado para sericita - Barra: 500 μ m, Aumento: 4x; (e) Seta superior indicando fratura preenchida por biotita (Bt) e seta inferior indicando a presença de mimerquita - Barra: 200 μ m, Aumento: 10x.; (f) Pertita em chama - Barra: 200 μ m, Aumento: 10x.

O quadro 11 apresenta uma síntese da análise petrográfica do agregado.

Quadro 11 – Síntese da análise petrográfica para o agregado Jaboaão.

Características Microscópicas – Agregado Jaboaão		
Mineralogia	Principal	Plagioclásio e quartzo
	Subordinada	Microclina, biotita, hornblenda, zircão, clorita, titanita e minerais opacos
	Reativa/ Deletéria	Quartzo microgranular e extinção ondulante
Cor	Coloração predominantemente clara, com porções rosas	
Estrutura	Maciça	
Textura	Idiomórfica a subdiomórfica	
Granulação	Média	
Feldspatos	Presentes (>5%)	
Alteração	Mimerquita, pertita em chama e sericita	
Porcentagem de quartzo microgranular	<5%	
Deformação do Agregado	Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante > 30°, quartzo microgranular)	
Propriedade físico-mecânica	Rocha muito coerente	
Forma dos minerais	Subédrica a anédrica	
Tipo de Rocha	Ígnea plutônica	
Classificação Petrográfica	Granodiorito a Tonalito	
Reatividade Potencial	Potencialmente inócuo	

Fonte: Autora, 2019.

De acordo com as análises realizadas, observa-se que, nos dois agregados, houve presença de minerais de alteração secundária e texturas de exsolução no feldspato. Essas texturas devem ser identificadas, como indicado pela ABNT NBR 15577-3 (2018); entretanto não devem ser primordiais na classificação do agregado, uma vez que não há completo entendimento de sua ação em relação à reatividade potencial do agregado. Prado (2008), por exemplo, observou inexistência de correlação entre a presença de minerais de alteração secundária, como a sericita, e texturas de exsolução, como mimerquita e pertita, no aumento das expansões no ensaio acelerado de barras de argamassa.

Da mesma forma, a extinção ondulante não deve ser fator preponderante na classificação do agregado, e sim uma indicação da alteração da rocha, uma vez que estudos apontam para a reduzida influência desta característica no potencial reativo, como os trabalhos de Barisone e Restivo (1992), French (1992) e Grattan-Bellew (1992). Diversos autores atribuem a maior reatividade potencial de agregados à deformação da rocha e consequente presença de quartzo microcristalino (BARISONE e RESTIVO, 1992; RAMOS *et al.*, 2016; RODRIGUES, 1994;

SHAYAN, 1993), o que está presente nas normas relativas à análise petrográfica, como a ABNT NBR 15577-3 (2018) e a ASTM C295 (2018) e foi principal fator na classificação dos agregados.

Desta forma, a partir da análise petrográfica, classificou-se o agregado Vitória em potencialmente reativo, devido à grande quantidade de quartzo microgranular (16%). Neste agregado, também foi observada presença de ângulo de extinção superior a 30° e texturas secundárias do feldspato; o agregado Jaboaão foi classificado como potencialmente inócuo, uma vez que a porcentagem de quartzo microcristalino é inferior a 5%, apesar de ser observado ângulo de extinção ondulante superior a 30°. Note-se, contudo, que o agregado Vitória possui uma porção considerada potencialmente inócua. A classificação deste agregado como potencialmente reativo baseia-se na predominância da porção reativa. Entretanto, este fato pode ter influência nos ensaios de reatividade potencial e no desempenho de estruturas em campo, dependendo da amostra de agregados utilizada.

Um fator importante a ser analisado é a liberação de álcalis pelo agregado, o que pode interferir na química da solução dos poros e, conseqüentemente, no progresso da reação álcali-agregado (LEEMANN e HOLZER, 2005; WANG *et al.*, 2008). Wang *et al.* (2008) apontam que a taxa de liberação de álcalis pode ser influenciada pelo tipo de agregado. De fato, Bérubé *et al.* (2002), Ferraz *et al.* (2017) e Soares *et al.* (2016) em seus estudos, determinaram que, em solução alcalina, mais álcalis são liberados dos feldspatos, e depreenderam que os feldspatos podem ser uma fonte de álcalis com o tempo. Os agregados analisados possuem os minerais do grupo dos feldspatos como os principais constituintes, o que pode influir nos ensaios de reatividade potencial. Soares *et al.* (2016) indicaram que o tamanho das partículas dos agregados e a solução alcalina utilizada também interferem na liberação de álcalis pelo agregado, determinando que, quanto menor o tamanho, maior a liberação e que há maior liberação de íons K⁺ em soluções de 1N de NaOH. Lu *et al.* (2006) determinaram que, quanto menor a granulometria e maior a temperatura, maior e mais rápida é a liberação de álcalis pelos agregados. Já Menéndez *et al.* (2016) destacaram a importância do tempo de ensaio na extração de álcalis. Estes resultados têm grande importância, uma vez que o ensaio acelerado de barras de argamassa é realizado com a cominuição do agregado; nesse ensaio, assim como no de miniprismas de concreto, há a imersão das barras e prismas em solução de 1N de NaOH a 80°C e 60°C, por 28 dias e 54 dias, respectivamente. Em conjunto com a grande quantidade de minerais de feldspato presentes nos agregados analisados, há possibilidade de contribuição de álcalis por parte dos agregados, intensificando, portanto, os resultados de expansão dos ensaios.

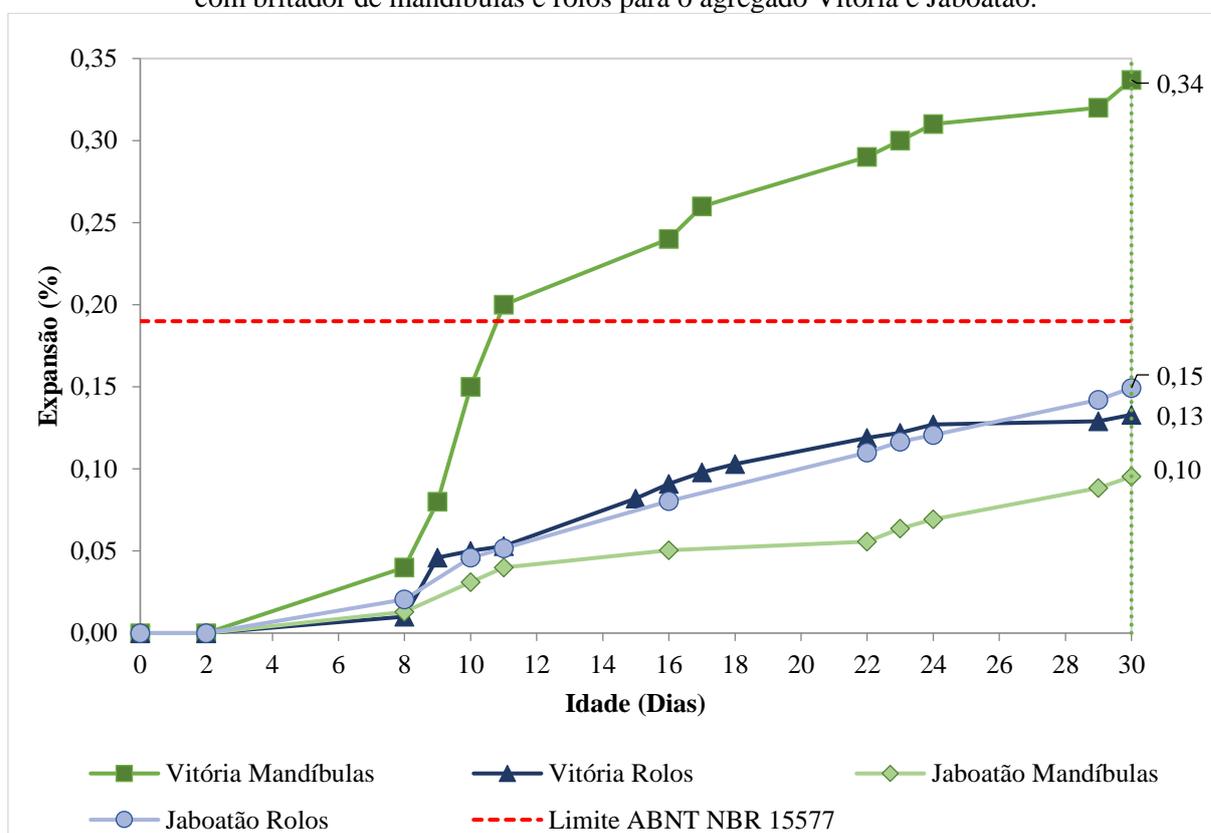
4.5.2 Ensaios Acelerados

A partir do ensaio acelerado de barras de argamassa, realizado de acordo com a ABNT NBR 15577-4:2018 e ABNT NBR 15577-5:2018, e do ensaio acelerado dos miniprismas de concreto, descrito na norma AASHTO TP 110-14:2016, obteve-se os resultados de expansão para cada composição analisada, apresentados a seguir.

4.5.2.1 Composições de Referência

As composições de referência para o agregado Vitória e Jabotão utilizando o britador de mandíbulas e de rolos apresentaram valores de expansão distintos, como visto na Figura 54.

Figura 54 – Resultados de expansão do ensaio acelerado de barras para as composições de referência com britador de mandíbulas e rolos para o agregado Vitória e Jabotão.



Fonte: Autora, 2019.

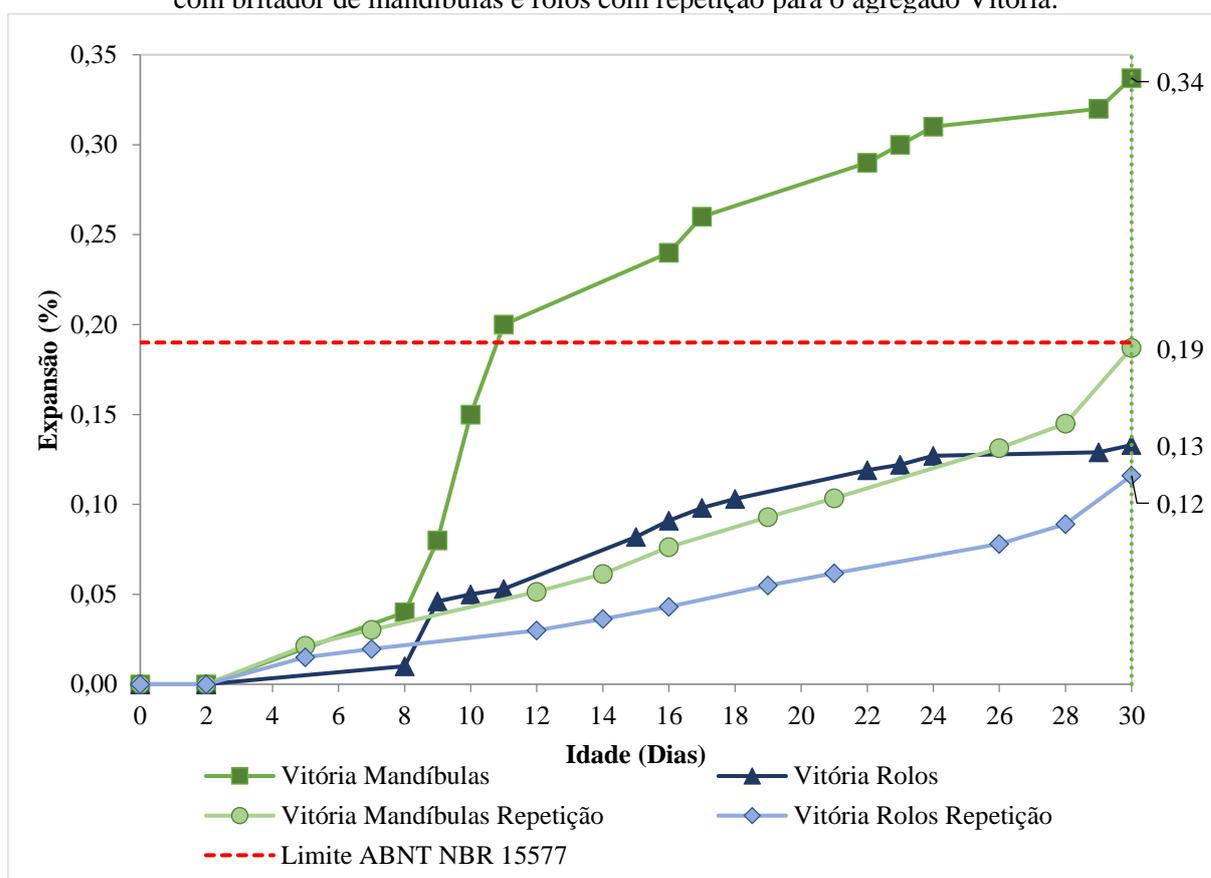
Verifica-se que as expansões obtidas para as barras com o agregado Vitória proveniente de britador de mandíbulas foram superiores às obtidas para o agregado produzido com o britador de rolos. O valor obtido para britador de mandíbulas classifica o agregado como potencialmente reativo, de acordo com os critérios da ABNT NBR 15577-1 (2018). Contudo, para o britador de rolos, as expansões obtidas permitem classificá-lo como potencialmente inócuo.

O valor obtido para britador de mandíbulas está em consonância com os resultados de Prado (2008) e Silva (2009) que, utilizando agregados da mesma região, obtiveram expansões de 0,35% e 0,48% aos 30 dias, consideradas altas.

O agregado Jaboatão apresentou comportamento potencialmente inócuo, uma vez que as expansões se situaram abaixo do limite normativo aos 30 dias. Ao contrário do que ocorreu com o agregado Vitória, para o agregado Jaboatão a composição rolos apresentou expansões maiores do que a composição mandíbulas, o que pode indicar que há influência do tipo de agregado na morfologia das partículas produzidas por diferentes britadores e, conseqüentemente, nas expansões. As combinações classificam-se como potencialmente inócuas, de acordo com a norma brasileira.

Ao analisar os valores obtidos para o agregado Vitória, observa-se grande discrepância entre os resultados para os diferentes britadores utilizados, de modo que o ensaio foi refeito. Os resultados da repetição estão apresentados na Figura 55.

Figura 55 – Resultados de expansão do ensaio acelerado de barras para as composições de referência com britador de mandíbulas e rolos com repetição para o agregado Vitória.



Fonte: Autora, 2019.

Nota-se que houve menor discrepância entre os resultados obtidos para os diferentes britadores. A tendência de maior expansão para o agregado mandíbulas se mantém, assim como a classificação, com a composição mandíbulas identificada como potencialmente reativa e a composição rolos como potencialmente inócua. A diferença entre as expansões é, provavelmente, consequência do uso de diferentes lotes de amostras de agregado para a moldagem dos corpos de prova. Esta diferença é mais pronunciada para a composição mandíbulas, uma vez que a composição rolos apresenta expansão similar aos 30 dias. Desta forma, percebe-se a complexidade do agregado, com a obtenção de expansões bastante distintas para amostras diferentes de um mesmo lote. Esta complexidade já havia sido observada na análise petrográfica, com a presença de uma porção do agregado reativa e, em menor quantidade, uma porção inócua.

As combinações subsequentes, utilizando adições, foram produzidas a partir da amostra inicial do agregado Vitória, cujas expansões aos 30 dias foram iguais a 0,34% e 0,13% para agregado mandíbulas e rolos, respectivamente; as comparações foram realizadas considerando estes valores. O agregado Jaboaão, por mostrar comportamento inócua no ensaio, não foi testado com outras combinações.

Analisando-se estatisticamente os valores obtidos, utilizando o teste t de Student, tem-se que, para um nível de significância de 5%, há uma diferença significativa nos resultados com o uso de diferentes tipos de britadores, tanto para o agregado Vitória, na combinação inicial e na repetição, quanto para o agregado Jaboaão, como observado na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras na idade de 30 dias para as combinações de referência do agregado Vitória e Jaboaão.

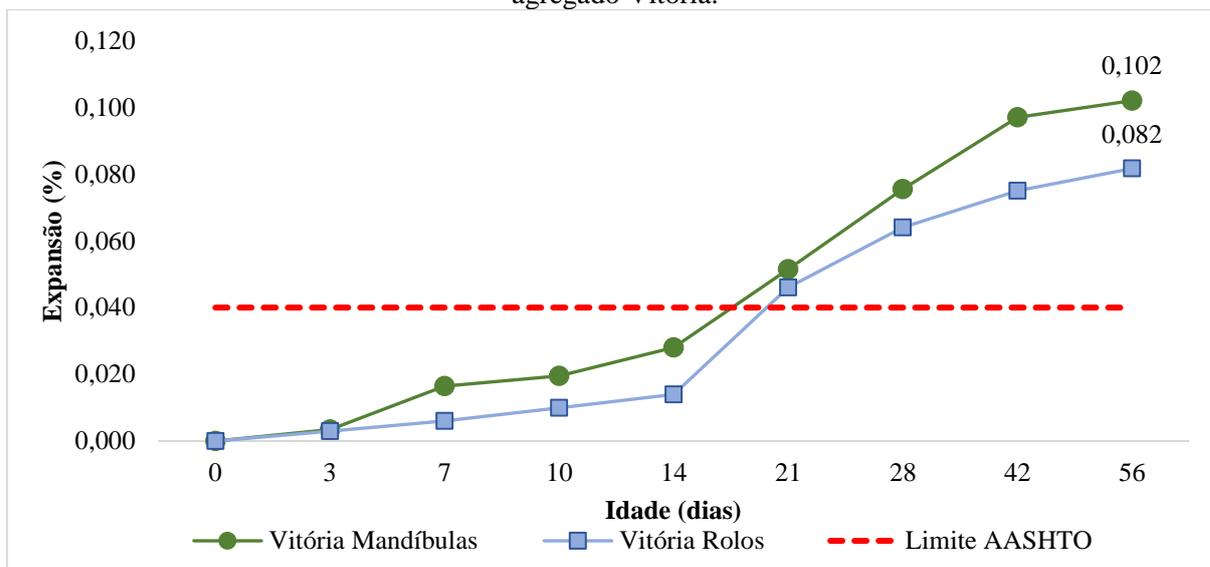
Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.*
Vitória Mandíbula	0,337	$2,51 \cdot 10^{-3}$	6,899	4,302	0,0204	S
Vitória Rolos	0,132	$8,45 \cdot 10^{-5}$				
Vitória Mandíbula Repetição	0,187	$6,19 \cdot 10^{-4}$	4,302	3,182	0,0230	S
Vitória Rolos Repetição	0,116	$1,96 \cdot 10^{-4}$				
Jaboaão Mandíbula	0,095	$7,03 \cdot 10^{-5}$	-9,231	2,776	0,0008	S
Jaboaão Rolos	0,149	$3,23 \cdot 10^{-5}$				

Fonte: Autora, 2019.

*S: Significativo; NS: Não significativo.

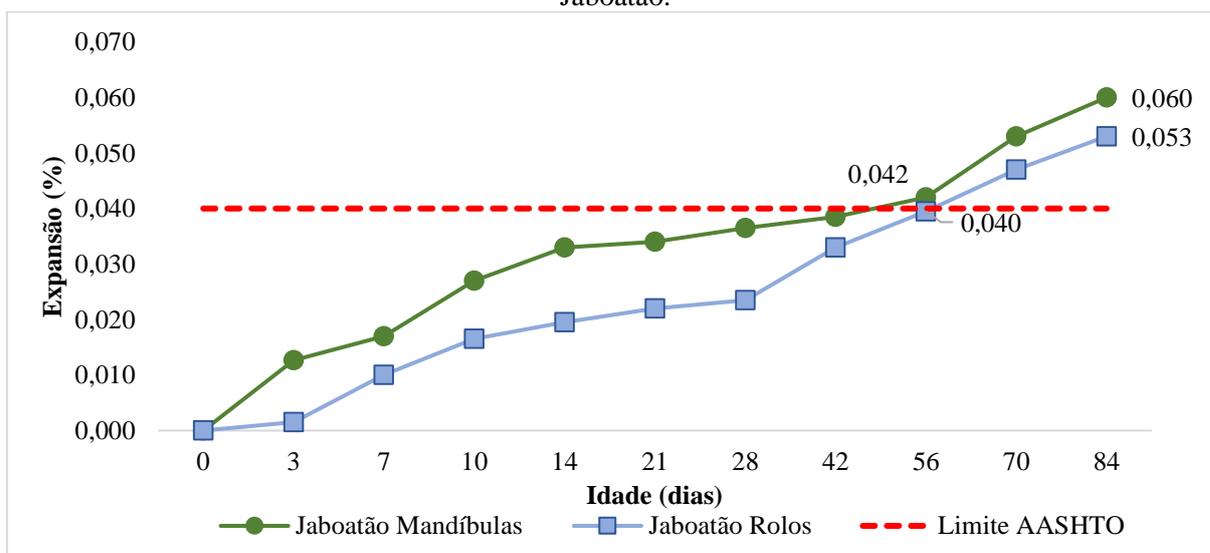
Em relação ao ensaio acelerado dos miniprismas de concreto, as Figuras 56 e 57 apresentam os gráficos de expansão das combinações de referência para os agregados Vitória e Jaboaão, respectivamente.

Figura 56 – Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações de referência com o agregado Vitória.



Fonte: Autora, 2019.

Figura 57 – Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com o agregado Jaboaão.



Fonte: Autora, 2019.

A partir da análise do gráfico, nota-se que a tendência observada no ensaio acelerado de barras de argamassa mantém-se neste ensaio. A combinação com agregados cominuídos por britador de mandíbulas para o agregado Vitória apresenta expansão cerca de 20% maior em relação à combinação por britador de rolos. Contudo, neste ensaio, ambas as combinações foram classificadas como moderadamente reativas, de acordo com a norma da AASHTO. Este resultado pode indicar a maior influência do modo de britagem no resultado do ensaio acelerado de barras de argamassa.

Em relação ao agregado Jaboaão, nota-se que ambas as combinações apresentaram resultados de expansão próximos ao limite estabelecido pela AASHTO, de 0,040%, aos 56 dias. Desta forma, as leituras foram continuadas até os 84 dias, e foi mensurada a taxa de expansão média entre as semanas 8 e 12, como exposto na Tabela 12. Estas taxas foram de 0,009 e 0,006 para a composição mandíbulas e rolos, respectivamente, classificando-as em potencialmente inócuas. Tal resultado está em consonância com os resultados obtidos no ensaio acelerado de barras e na análise petrográfica.

Os resultados também foram analisados estatisticamente, como apresentado na Tabela 24. Para o agregado Jaboaão, a análise foi feita para 56 e 84 dias, de modo a comparar com o agregado Vitória na mesma idade e analisar os resultados na idade final de ensaio.

Tabela 24 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de miniprismas para as combinações de referência do agregado Vitória e Jaboaão.

Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
Vitória Mandíbula (56 dias)	0,102	$2,00 \cdot 10^{-6}$	5,014	4,303	0,0375	S
Vitória Rolos (56 dias)	0,082	$4,63 \cdot 10^{-5}$				
Jaboaão Mandíbula (56 dias)	0,042	$3,20 \cdot 10^{-5}$	0,470	4,302	0,6844	NS
Jaboaão Rolos (56 dias)	0,040	$2,45 \cdot 10^{-5}$				
Jaboaão Mandíbula (84 dias)	0,060	$4,50 \cdot 10^{-6}$	1,522	12,706	0,3702	NS
Jaboaão Rolos (84 dias)	0,053	$3,20 \cdot 10^{-5}$				

Fonte: Autora, 2019.

Observa-se que, para o agregado Vitória, o uso de diferentes britadores teve influência significativa nas expansões no ensaio de miniprismas, como também observado para o ensaio acelerado de barras. Em contrapartida, esta variável não se mostrou significativa para o agregado Jaboaão, tanto na idade de 56 dias quanto na idade de 84 dias, ao contrário do que ocorreu no ensaio de barras, o que pode indicar que esta influência depende do agregado utilizado.

A partir da análise dos ensaios, nota-se que houve diferença significativa nas expansões alterando o tipo de britador, principalmente para o ensaio de barras, modificando, inclusive, a classificação quanto à reatividade potencial, como observado para a combinação Vitória rolos. Sabendo-se que, de acordo com a análise petrográfica, este agregado é considerado potencialmente reativo, pode-se inferir que, neste caso, o tipo de britagem pode levar à classificação errônea pelo método das barras, ocorrendo um falso negativo. Entretanto, observa-se que, para o agregado Jaboaão, embora as combinações de referência tenham obtido expansões abaixo do limite para classificação como potencialmente reativo, a composição rolos apresentou expansão cerca de 56% maior do que a composição mandíbulas. Este comportamento divergente pode indicar influência do tipo de agregado.

No caso em questão, tem-se que o agregado Vitória é proveniente de rocha metamórfica, com estrutura gnáissica a milonítica. As estruturas metamórficas conferem um bandamento à rocha, que pode resultar em planos preferenciais de quebra, produzindo partículas mais lamelares. Desta forma, com a britagem por meio de britador de mandíbulas, houve a formação de partículas lamelares. Com o britador de rolos houve a formação de partículas alongadas; contudo, como foi necessária rebritagem para atingir as dimensões necessárias ao ensaio, as partículas lamelares podem ter se partido, formando partículas um pouco mais cúbicas, o que pode ser observado por meio da análise das relações de aspecto. Disto, resultaram as maiores expansões para a combinação mandíbulas, com partículas mais lamelares e maior área superficial específica, como observado para as partículas de 150 μm .

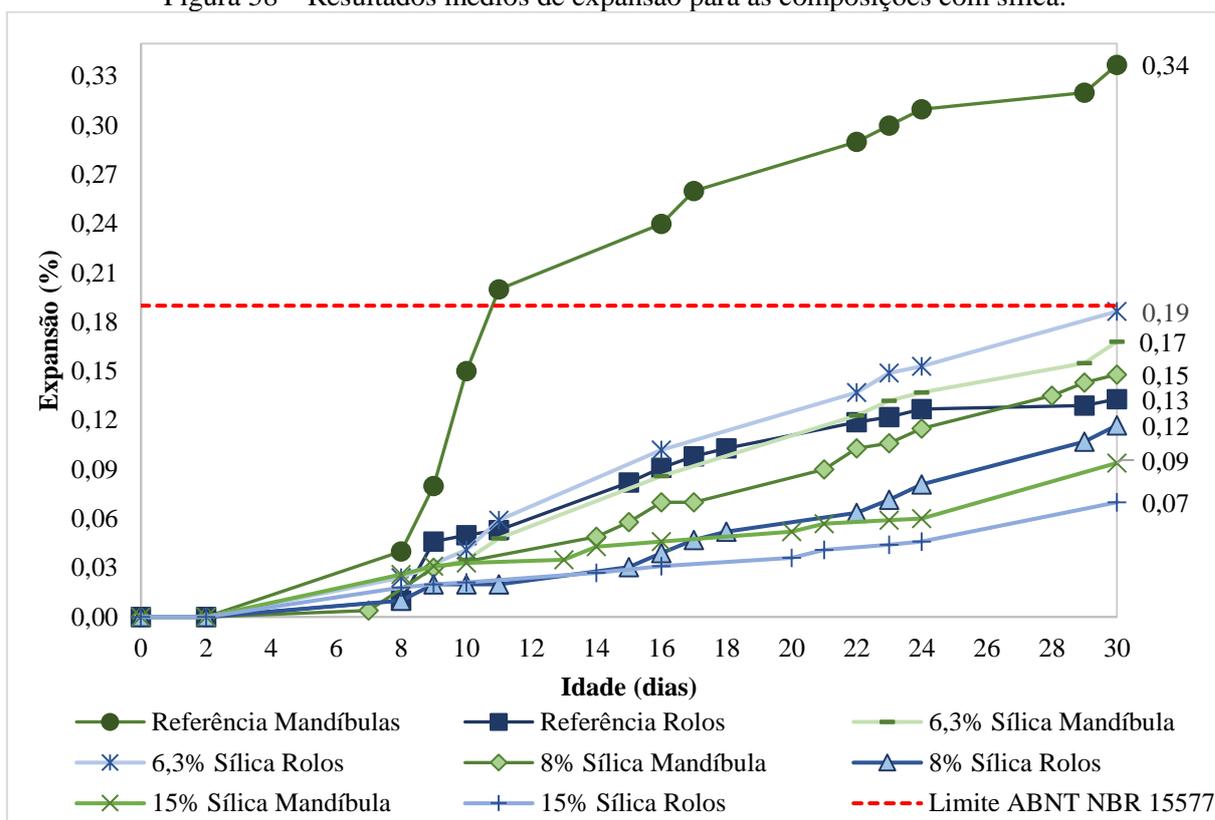
O agregado Jaboaão, por sua vez, é proveniente de rocha ígnea e possui estrutura maciça. Segundo Frazão e Paraguassu (1998), rochas de estrutura maciça tendem a formar partículas cúbicas após o processo de britagem. Contudo, eles afirmam que, para esta estrutura e dimensões menores, a tendência é a de formação de partículas mais alongadas e lamelares. Desta forma, formaram-se partículas alongadas para o britador de mandíbulas e lamelares para o britador de rolos. O alongamento das partículas é confirmado pelos resultados de relação de aspecto. As análises de tamanho também indicam que as partículas do agregado Jaboaão mandíbulas são maiores em relação àquelas da combinação rolos. A diferença de tamanho também pode ter influência nas expansões, uma vez que o maior tamanho implica menor área superficial específica. As características morfológicas e de tamanho em relação à britagem são, portanto, inerentes ao tipo de rocha utilizado.

O resultado obtido no ensaio de miniprismas confirma os obtidos no ensaio de barras e na análise petrográfica. A diferença de expansão para as combinações mandíbulas e rolos foi significativa para o agregado Vitória, embora não tão pronunciada quanto no ensaio de barras. O reduzido tamanho das partículas no ensaio de barras e, conseqüentemente, sua maior área superficial específica podem ter resultado na discrepância entre as expansões; esta diferença foi minimizada no ensaio de miniprismas devido às maiores faixas granulométricas utilizadas, resultando em superfícies específicas totais similares.

4.5.2.2 Combinações com Sílica

As composições com sílica utilizaram apenas o agregado Vitória. As expansões das barras com sílica, com substituição de 8% em massa e volume (6,3% em massa) do cimento e em massa na porcentagem de 15%, estão apresentadas na Figura 58.

Figura 58 – Resultados médios de expansão para as composições com sílica.



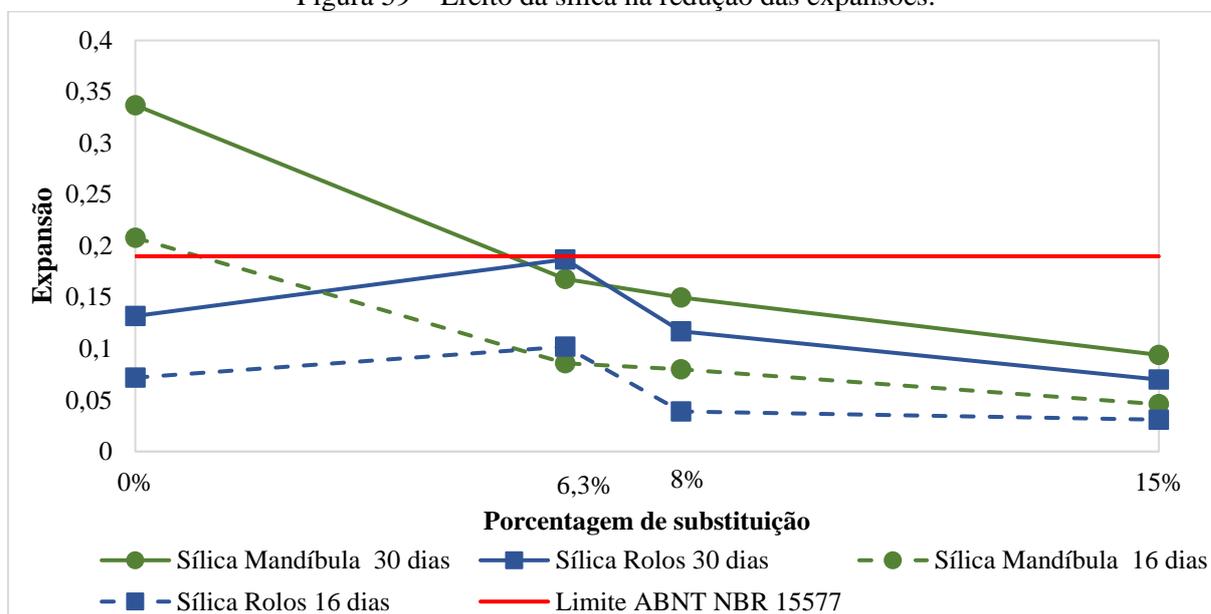
Fonte: Autora, 2019.

Analisando a expansão aos 30 dias, tem-se que o comportamento para as composições de referência se mantém, com as composições de mandíbulas com expansões maiores do que as de rolos; a exceção é a composição com 8% de sílica em volume (6,3% em massa), na qual houve comportamento contrário, apesar de expansões próximas. Com a utilização de 8% de sílica ativa em massa, observou-se que houve redução significativa das expansões. Considerando a norma brasileira, as expansões mantiveram-se abaixo de 0,19% aos 30 dias o que classifica a mitigação como eficiente. Para as barras com 15% de sílica, as expansões também foram mitigadas em relação à amostra de referência. Houve uma diminuição de cerca de 56% e 72% das expansões para as composições mandíbulas com uso de 8% e 15% de sílica, respectivamente; para as composições rolos, houve diminuição de cerca de 11% e 47%, com uso de 8% e 15% de sílica.

O teor de 8% de sílica ativa (em volume de substituição) na composição mandíbulas não foi capaz de mitigar as expansões a níveis aceitáveis; atingiu, de qualquer forma, reduções da ordem de 50%. Na composição rolos, esse mesmo teor não mitigou as expansões e, além disso, não produziu qualquer redução; nessa condição, as expansões foram intensificadas quando

comparadas à amostra de referência. A ação da sílica ativa pode ser melhor observada na Figura 59, que ilustra as expansões em relação à porcentagem de sílica em massa, aos 30 e 16 dias.

Figura 59 – Efeito da sílica na redução das expansões.



Fonte: Autora, 2019.

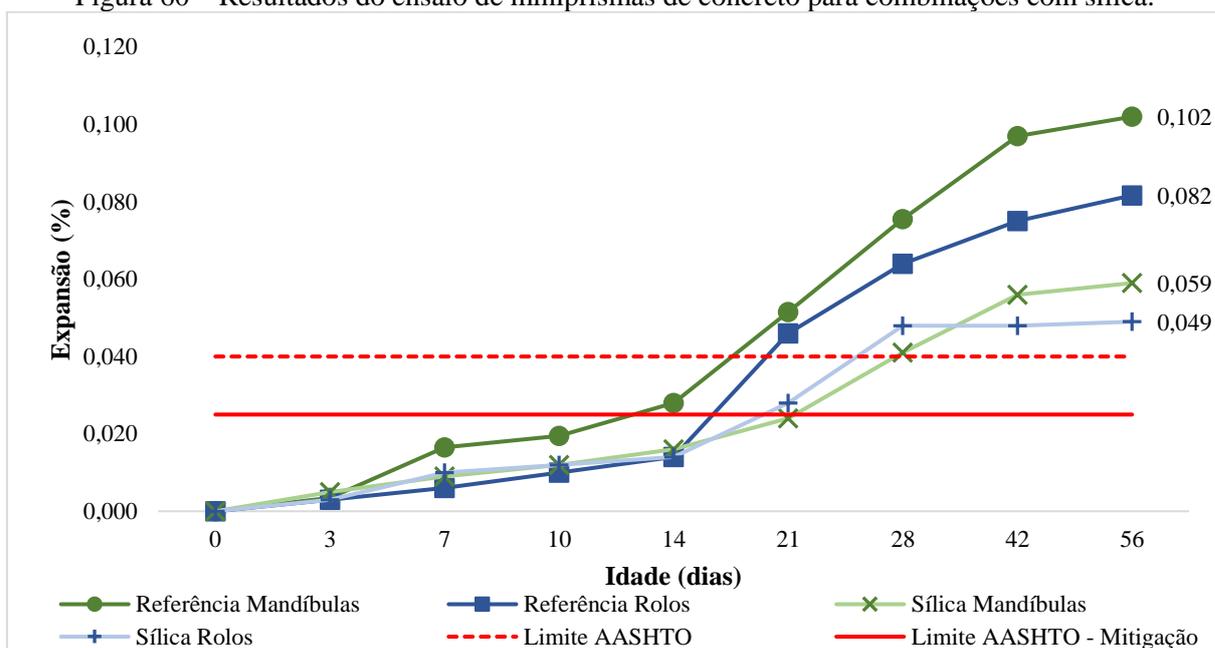
Percebe-se que há um aumento expressivo das expansões entre as idades de 16 e 30 dias. Para a combinação mandíbulas, há uma redução significativa das expansões com o acréscimo de sílica; a composição rolos, em contrapartida, apresenta aumento das expansões para a porcentagem de 8% em volume, correspondente a 6,3% em massa, em relação à combinação de referência. Para as demais porcentagens, houve diminuição das expansões. Tal comportamento já foi observado por outros autores, como por exemplo Boddy e Hooton (2000) e Duchesne e Bérubé (1994, 2001), que constataram mitigação insuficiente e até mesmo aumento das expansões para baixos teores de sílica ativa em substituição ao cimento.

Observa-se que, para os teores de sílica de 8% e 15%, foi possível reduzir as expansões para valores abaixo do limite estabelecido pela ABNT NBR 15577-1 (2018).

A Figura 60 ilustra as expansões obtidas no ensaio de miniprismas de concreto para as combinações com sílica substituindo em 8% o volume de cimento.

Os resultados presentes no gráfico demonstram, assim como as combinações de referência, a manutenção da tendência de maiores expansões para combinação com agregados cominuídos por britador de mandíbulas.

Figura 60 – Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com sílica.



Fonte: Autora, 2019.

Com o uso da sílica, houve uma diminuição das expansões em cerca de 42% e 40% para a combinação mandíbulas e rolos, respectivamente. Apesar desta diminuição, as combinações mantiveram a classificação de moderadamente reativas, com mitigação ineficiente. Este resultado pode indicar a ineficiência da porcentagem de sílica ativa adotada em mitigar as expansões devidas à RAA, podendo ter ocorrido um falso negativo no ensaio acelerado de barras de argamassa para a composição mandíbulas.

Os resultados da análise estatística estão apresentados nas Tabelas 25 e 26, avaliando a influência do tipo de britador e da porcentagem de adição, respectivamente.

Tabela 25 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras na idade de 30 dias para as combinações com sílica, avaliando a influência do tipo de britador.

Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa						
Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
8% Sílica Mandíbulas	0,148	$7,95 \cdot 10^{-5}$	3,572	4,303	0,0702	NS
8% Sílica Rolos	0,117	$9,80 \cdot 10^{-5}$				
15% Sílica Mandíbulas	0,094	$1,80 \cdot 10^{-4}$	2,276	12,706	0,2635	NS
15% Sílica Rolos	0,070	$4,90 \cdot 10^{-5}$				
8% Sílica Volume Mandíbulas	0,168	$3,43 \cdot 10^{-5}$	-3,869	3,182	0,0305	S
8% Sílica Volume Rolos	0,187	$2,45 \cdot 10^{-5}$				
Ensaio Acelerado de Miniprismas de Concreto						
Sílica Mandíbula	0,059	$1,80 \cdot 10^{-5}$	3,162	12,706	0,1950	NS
Sílica Rolos	0,049	$2,00 \cdot 10^{-6}$				

Fonte: Autora, 2019.

Tabela 26 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com sílica, avaliando a influência da porcentagem de adição.

Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
8% Sílica Mandíbulas	0,148	$7,95 \cdot 10^{-5}$	5,048	4,303	0,0371	S
15% Sílica Mandíbulas	0,094	$1,80 \cdot 10^{-4}$				
8% Sílica Rolos	0,117	$9,80 \cdot 10^{-5}$	5,815	4,303	0,0283	S
15% Sílica Rolos	0,070	$4,90 \cdot 10^{-5}$				

Fonte: Autora, 2019.

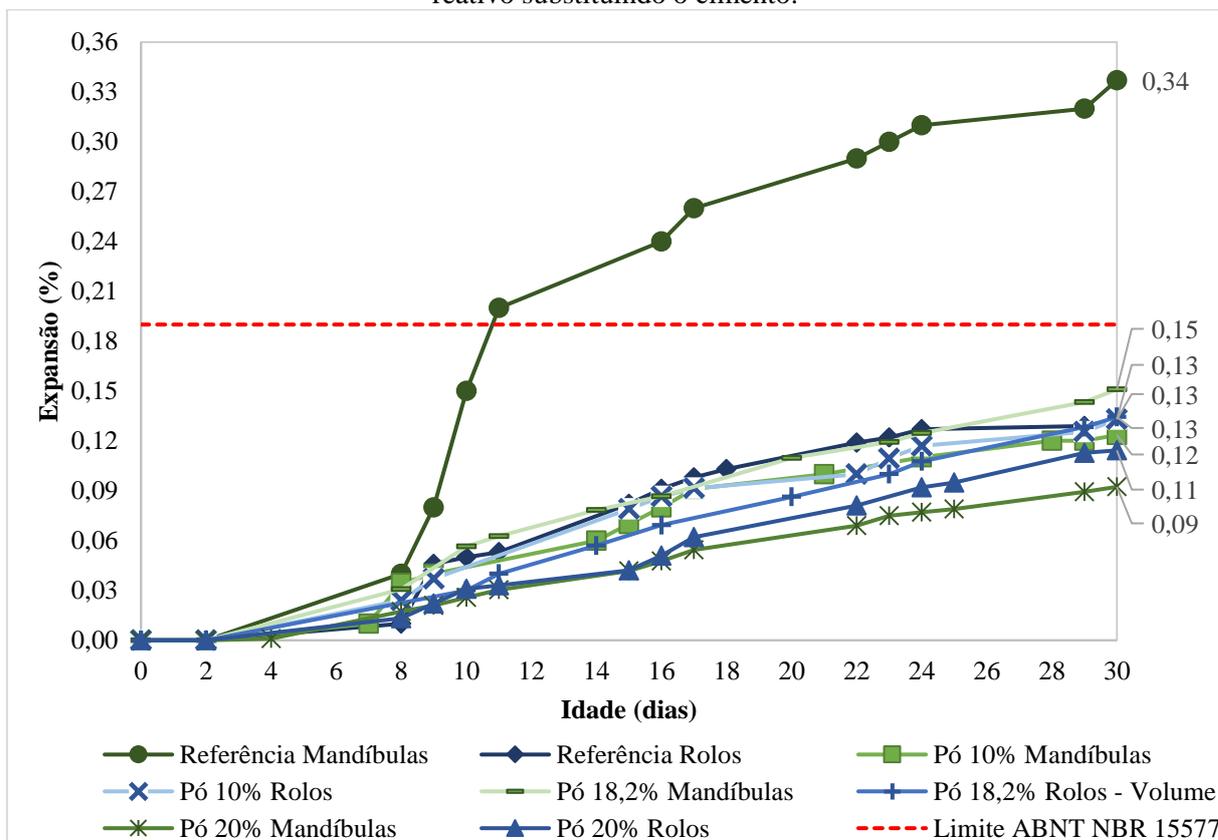
Observa-se que o tipo de britador não influencia de forma significativa as combinações com 8% e 15% de sílica, para o ensaio acelerado de barras de argamassa. Entretanto, esta influência é significativa para a combinação com 8% em volume (6,3% em massa). A progressão do p-valor para as diferentes porcentagens de sílica indica a diminuição da influência do tipo de britador com o aumento da porcentagem de adição de sílica ativa. Os resultados do ensaio de miniprismas de concreto também não foram influenciados significativamente pelo tipo de britador. Referente à porcentagem de sílica ativa utilizada, este é um fator relevante no resultado das expansões no ensaio acelerado de barras de argamassa.

Com relação ao uso da sílica ativa, utilizada nas porcentagens de 8% e 15% em massa substituindo o cimento, houve uma mitigação eficaz das expansões provenientes da RAA no ensaio acelerado de barras, observando-se expansões menores para a combinação rolos, provavelmente pelos motivos expostos para a combinação de referência. A porcentagem de 8% foi substituída em massa e volume, sendo 8% em volume equivalente a 6,3% em massa; neste caso, foram observadas grandes expansões, com a combinação rolos excedendo, inclusive, o valor de expansão de referência. O ensaio acelerado de miniprismas de concreto retornou resultados contraditórios. Em ambas as combinações, neste ensaio, houve redução das expansões, porém insuficiente para mitigar a níveis aceitáveis. Este resultado pode indicar a aglomeração da sílica, acarretando em efeito deletério. Diamond, Sahu e Thaulow (2004) apontam que a dispersão de aglomerações de sílica depende da eficiência das ações de quebra e cisalhamento para elas transmitidas durante o processo de mistura. Como a mistura ocorreu em argamassadeira, é possível que não tenha havido energia suficiente para promover a desagregação dos aglomerados.

4.5.2.3 Combinações com Pó de Agregado Reativo

Para as composições com PAR provenientes de britadores distintos, utilizou-se apenas o agregado Vitória. Esta adição foi usada em substituição ao cimento nas porcentagens de 10% em massa e 20% em massa e volume (18,2% em massa), e foram obtidas as expansões, para o ensaio acelerado de barras de argamassa, apresentadas na Figura 61.

Figura 61 – Resultados de expansão em barras de argamassa para as composições com pó de agregado reativo substituindo o cimento.



Fonte: Autora, 2019.

Observa-se que os resultados obtidos foram bastante similares, com as composições mandíbulas com 10%, 18,2% e 20% em massa, com expansões de 0,12%, 0,15% e 0,09% aos 30 dias; as composições rolos apresentaram 0,13%, 0,13% e 0,11%, respectivamente.

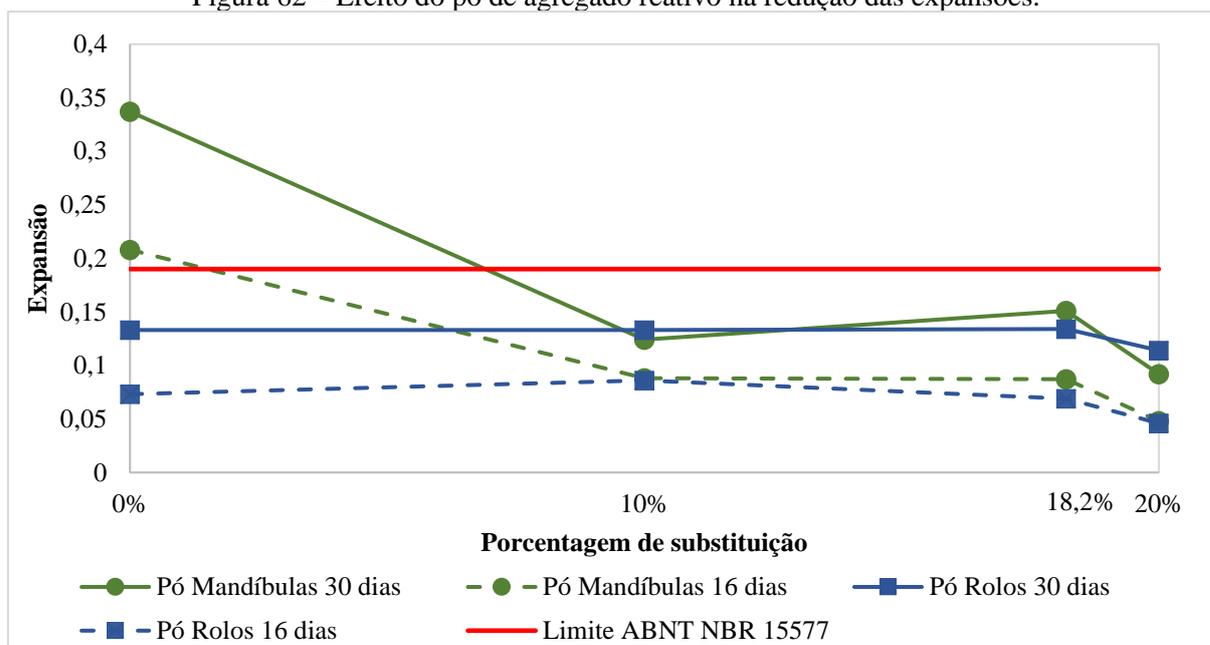
Para as barras com uso de PAR, aquelas com agregado britado por britador de mandíbulas e pó mandíbulas resultaram em expansões inferiores às do agregado e pó obtidos por britador de rolos, à exceção da combinação com 20% de pó em volume (18,2% em massa). Este comportamento se opõe ao observado nas combinações de referência e com sílica, o que pode ser devido a diferenças de morfologia e área superficial específica das partículas dos pós. Analisando-se a partir do parâmetro da norma brasileira, nas combinações com 10% de PAR a mitigação foi eficiente. Houve diminuição de cerca de 63% da expansão para a combinação mandíbulas em relação à combinação de referência; contudo, para a combinação rolos, a expansão foi a mesma, o que pode ser devido à granulometria do pó rolos ou à sua área superficial específica, que é menor do que a do pó mandíbulas, de acordo com os resultados dos ensaios Blaine e BET. Com a utilização de 20% de pó, a redução nas expansões foi de cerca de 73% e 14% para a combinação mandíbulas e rolos, respectivamente. Os valores de expansão

destas combinações foram inferiores ao limite estabelecido pela norma brasileira, apontando para a eficiência na mitigação.

Observa-se que as curvas de expansão para ambos os britadores e porcentagens mantiveram o mesmo comportamento, assim como expansões semelhantes aos 30 dias, o que indica efeito semelhante, independentemente da morfologia das partículas do pó.

Cabe mencionar que os valores de expansão obtidos com o uso de PAR foram semelhantes aos obtidos com a utilização de sílica ativa, o que é um resultado peculiar já que a sílica ativa é uma superpozolana. Este comportamento, entretanto, pode ser explicado pela aglomeração das partículas de sílica, o que proporcionou uma menor área superficial específica e, conseqüentemente, menor eficácia na mitigação das expansões. A Figura 62 apresenta a ação do pó de agregado reativo, destacando a redução de expansões para as porcentagens utilizadas.

Figura 62 – Efeito do pó de agregado reativo na redução das expansões.



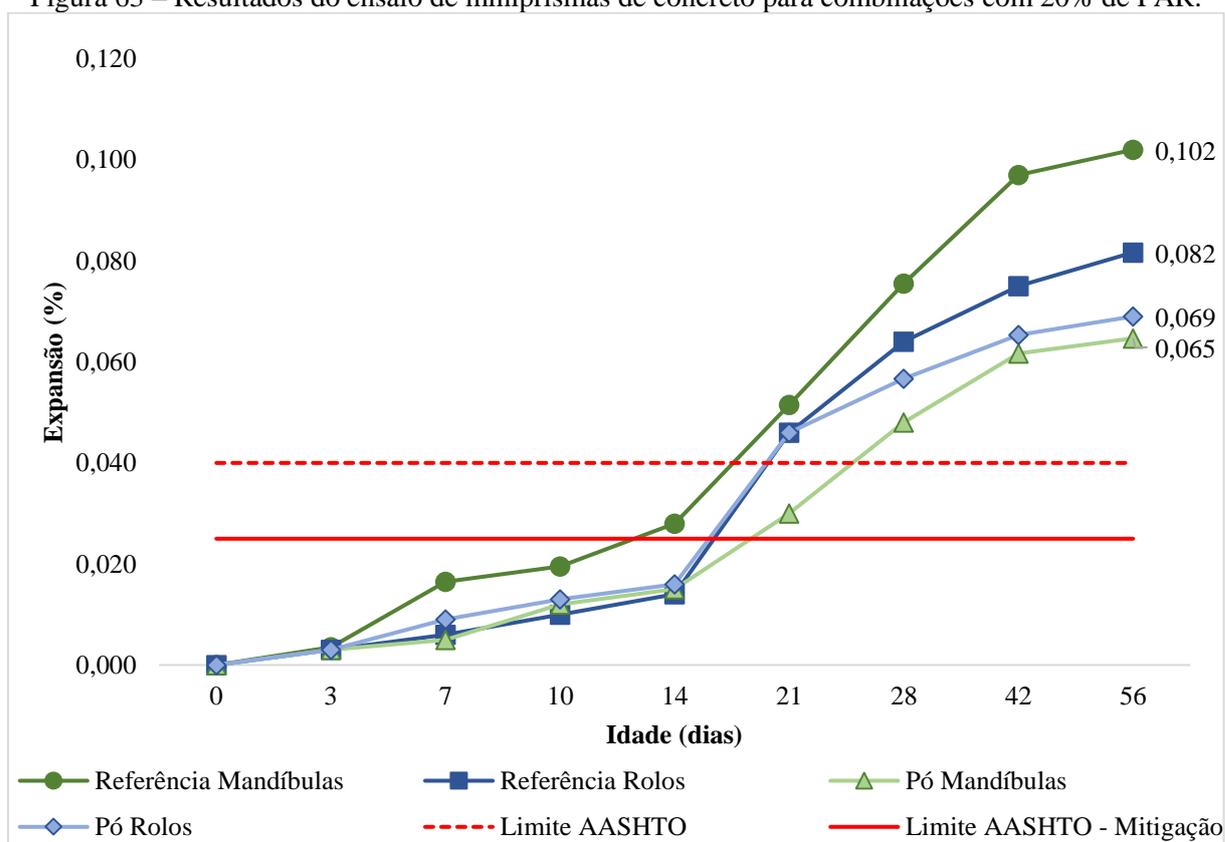
Fonte: Autora, 2019.

Houve um decréscimo pronunciado das expansões para a combinação mandíbulas, enquanto na combinação rolos a redução foi pouco expressiva. Nota-se que, assim como com a sílica, houve uma grande redução das expansões para a combinação mandíbulas, enquanto que a composição rolos teve pequenas reduções. Com a adição de 10% de pó rolos, a expansão manteve-se a mesma em relação à combinação de referência, como mencionado anteriormente. Como o comportamento das curvas é similar para a sílica ativa e o pó de agregado reativo, infere-se que ambos têm efeito semelhante e/ou a morfologia das partículas utilizando-se diferentes britadores influenciou sobremaneira no efeito das adições utilizadas.

O comportamento observado para a sílica ativa também é visto para o pó de agregado reativo, com o aumento das expansões com a substituição em volume (18,2% em massa). Para a composição mandíbulas, a expansão obtida foi maior do que a composição com 10% de pó, enquanto a composição rolos apresentou expansão abaixo da obtida para 10%.

Em relação ao ensaio ao ensaio acelerado de miniprismas, obteve-se as expansões apresentadas na Figura 63 para as combinações com 20% de pó em volume.

Figura 63 – Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com 20% de PAR.



Fonte: Autora, 2019.

Os resultados com o uso de PAR demonstram uma redução nas expansões da ordem de 36% e 16% para as combinações mandíbulas e rolos, respectivamente. Além disso, a combinação rolos alcançou expansões ligeiramente superiores em relação à combinação mandíbulas. Estas tendências também foram observadas no ensaio acelerado de barras de argamassa. Contudo, as combinações, que tiveram mitigação eficiente no ensaio acelerado de barras de argamassa, neste ensaio apresentaram mitigação ineficiente.

Os resultados obtidos no ensaio dos miniprismas de concreto para a sílica e o pó de agregado reativo contradizem os obtidos no ensaio de barras de argamassa. É possível que, devido ao maior tempo de ensaio, tenha havido uma contribuição significativa de álcalis por parte dos

feldspatos, fazendo com que a quantidade de sílica e pó não fosse suficiente para mitigar a reação. Além disso, devido ao maior volume de material, pode ser que a energia de mistura, realizada em argamassadeira, não tenha sido suficiente para homogeneizar os materiais, permitindo a presença de aglomerações de sílica e do pó, que agem de forma deletéria.

O teste t de Student foi utilizado para a análise estatística do tipo de britador e porcentagem de adição utilizados e os resultados estão apresentados nas Tabela 27 e 28, respectivamente.

Tabela 27 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com PAR, avaliando a influência do tipo de britador.

Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa						
Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
10% Pó Mandíbulas	0,124	$1,25 \cdot 10^{-5}$	-3,528	12,706	0,1758	NS
10% Pó Rolos	0,133	$2,00 \cdot 10^{-6}$				
20% Pó Mandíbulas	0,092	$3,29 \cdot 10^{-4}$	-1,862	3,182	0,0797	NS
20% Pó Rolos	0,114	$8,93 \cdot 10^{-5}$				
20% Pó Volume Mandíbulas	0,151	$1,11 \cdot 10^{-4}$	2,087	2,776	0,1052	NS
20% Pó Volume Rolos	0,134	$8,03 \cdot 10^{-5}$				
Ensaio Acelerado de Miniprismas de Concreto						
Pó Mandíbula	0,065	$2,33 \cdot 10^{-6}$	-0,922	4,303	0,4540	NS
Pó Rolos	0,069	$64,00 \cdot 10^{-6}$				

Fonte: Autora, 2019.

Tabela 28 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com PAR, avaliando a influência da porcentagem de adição.

Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
10% Pó Mandíbulas	0,124	$1,25 \cdot 10^{-5}$	2,893	4,303	0,1016	NS
20% Pó Mandíbulas	0,092	$3,29 \cdot 10^{-4}$				
10% Pó Rolos	0,133	$2,00 \cdot 10^{-6}$	3,365	4,303	0,0781	NS
20% Pó Rolos	0,114	$8,93 \cdot 10^{-5}$				

Fonte: Autora, 2019.

A partir dos resultados, observa-se que o tipo de britador não influencia de forma significativa as combinações com pó de agregado reativo, tanto para o ensaio de barras de argamassa quanto para o ensaio de miniprismas de concreto. A progressão do p-valor para as diferentes porcentagens utilizadas indica o aumento da influência do tipo de britador com o aumento da porcentagem de PAR, o inverso do que ocorreu com a sílica. A porcentagem utilizada também não se mostrou significativa para esta adição. Observou-se que o decréscimo das expansões, comparando-se as combinações com 10% e 20% de PAR em massa, não foi proporcional ao acréscimo de adição. Desta forma, infere-se que, para este agregado, a porcentagem ótima utilizando-se o pó deste material como adição, encontra-se em torno de 10%.

O pó de agregado reativo provou ser capaz de reduzir as expansões no ensaio de barras, sendo utilizado nas porcentagens de 10% e 20% em substituição ao cimento em massa. Para a

porcentagem de 10%, houve maior expansão para a combinação rolos, ao contrário do que ocorreu para as combinações referência e sílica, nas quais a composição mandíbulas apresentou maiores expansões. Este comportamento pode decorrer da maior área superficial específica do pó mandíbulas, observada nos ensaios de Blaine, BET e granulometria a laser, e maior atividade pozolânica deste pó, observada no ensaio de condutividade elétrica. A porcentagem de 20% foi substituída em massa e volume, observando-se maiores expansões para a substituição em volume, equivalente a 18,2% em massa, o que era esperado. Nota-se um valor discrepante para a combinação mandíbulas em volume, com expansão maior do que para substituição de 10% em massa, enquanto que a combinação rolos manteve a mesma expansão obtida para a substituição de 10%. Os resultados obtidos para todas as porcentagens utilizadas são próximos, indicando que a porcentagem de PAR utilizado não exerce grande influência nos resultados, o que foi atestado pela análise estatística.

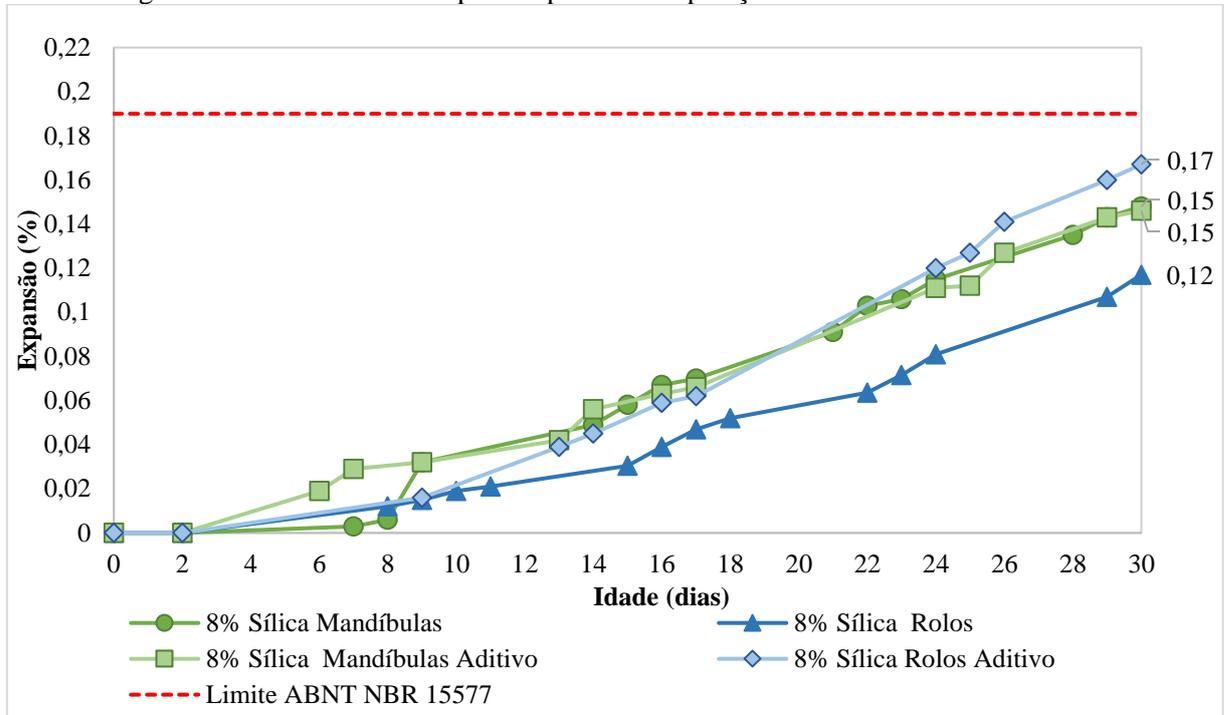
Os resultados do ensaio de miniprismas, novamente, contradizem o exposto para o ensaio de barras. As expansões foram superiores ao limite da norma, classificando a mitigação como ineficiente. Pedersen (2004) afirma que partículas muito finas de certos tipos de rocha podem reagir pozolanicamente, aumentando a quantidade de C-S-H da matriz cimentícia. Contudo, segundo o autor, certos finos de rocha que não são pozolânicos, desenvolvem esta característica a temperaturas de 80°C, o que pode ser significativo ao utilizar um método com esta temperatura, como é o caso do ensaio de barras, podendo resultar em um falso negativo. Desta forma, é possível que a mitigação observada no ensaio de barras tenha sido devida à influência da temperatura, que intensificou as propriedades pozolânicas dos pós, resultando em um falso negativo. No ensaio de miniprismas, realizado a 60°C, estes finos teriam reagido de forma menos intensa, similarmente ao observado no ensaio de condutividade, realizado à mesma temperatura, não sendo suficiente para diminuir as expansões a um patamar aceitável. Além disso, devido ao maior tempo de ensaio, pode ter havido a contribuição de álcalis por parte do agregado. Faz-se necessário um maior estudo acerca do pó de agregado reativo, utilizando-se de outros ensaios para aferir sua ação na matriz cimentícia.

4.5.2.4 Composições com Aditivo

Com o objetivo de analisar o efeito dispersivo do aditivo nas adições minerais utilizadas, foram moldadas barras de argamassa utilizando o agregado Vitória e mensuradas suas expansões. Para

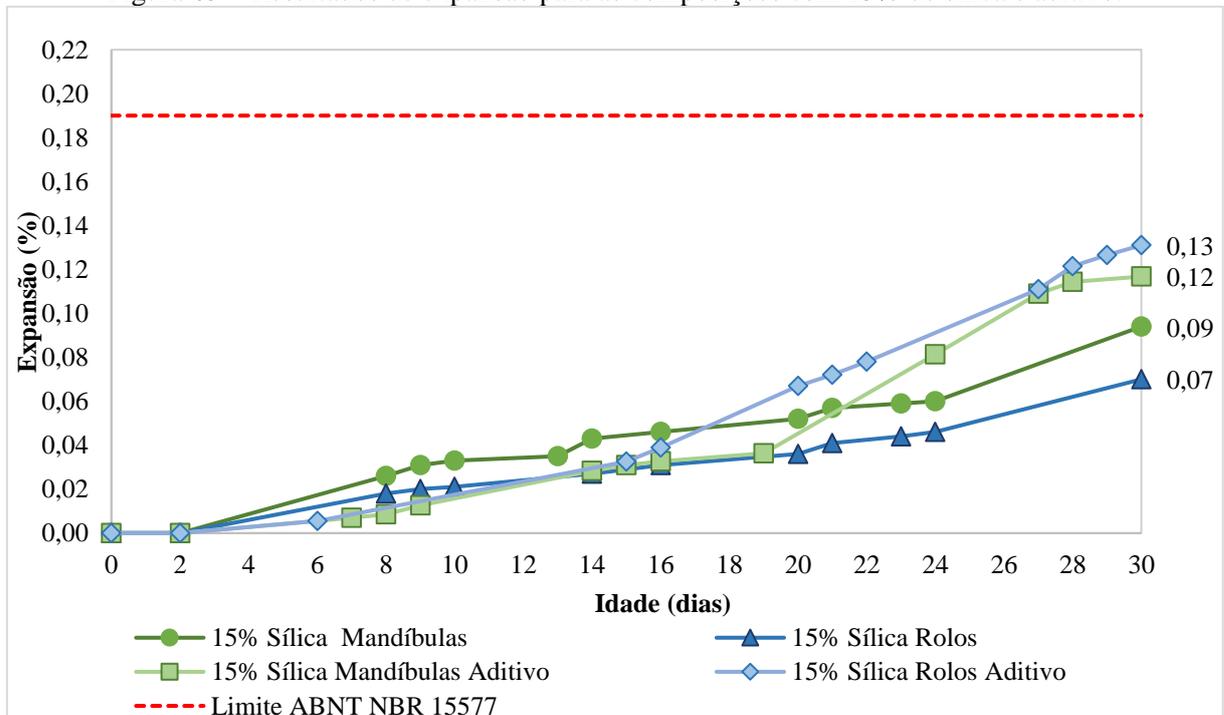
a sílica, foram utilizados dois teores em substituição ao cimento em massa, 8% e 15%. As Figuras 64 e 65 apresentam os resultados de expansão com os teores de sílica e o uso de aditivo.

Figura 64 – Resultados de expansão para as composições com 8% de sílica e aditivo.



Fonte: Autora, 2019.

Figura 65 – Resultados de expansão para as composições com 15% de sílica e aditivo.



Fonte: Autora, 2019.

A partir dos gráficos, observa-se que a tendência é um aumento na expansão com a utilização de aditivo, excetuando-se a porcentagem de 8% para o agregado cominuído pelo britador de mandíbulas. Neste caso, não houve alteração. Já para o agregado cominuído pelo britador de rolos, houve um aumento de cerca de 43% na expansão. No entanto, para todas as combinações, a mitigação foi considerada eficiente.

Para a adição de 15% de sílica, em todas as combinações houve mitigação eficiente, de acordo com a ABNT NBR 15577-1(2018). Observou-se que, ao contrário do que vinha ocorrendo para as composições com sílica, com o aditivo a composição rolos obteve expansões maiores do que a composição mandíbulas em ambas as porcentagens. Este comportamento, entretanto, não é tão acentuado aos 16 dias, sendo melhor observado aos 30 dias. As combinações rolos, portanto, mostram-se mais sensíveis ao uso de aditivo do que as combinações mandíbulas.

A análise estatística para determinar a influência do aditivo nas expansões está apresentada na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com sílica, avaliando a influência do aditivo.

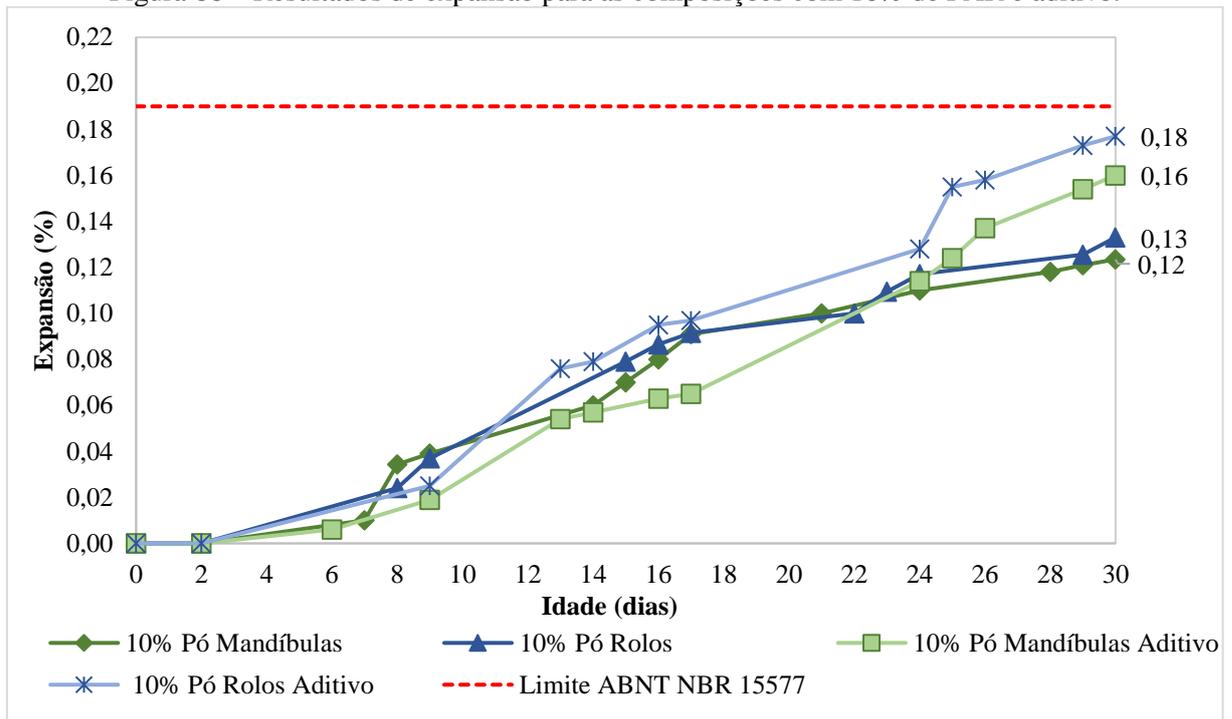
Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
8% Sílica Mandíbulas	0,148	$7,90 \cdot 10^{-5}$	0,363	3,182	0,7406	NS
8% Sílica Mandíbulas Aditivo	0,146	$1,20 \cdot 10^{-5}$				
15% Sílica Mandíbulas	0,094	$1,81 \cdot 10^{-4}$	-2,984	12,706	0,2059	NS
15% Sílica Mandíbulas Aditivo	0,122	$9,33 \cdot 10^{-6}$				
8% Sílica Rolos	0,117	$9,80 \cdot 10^{-5}$	-3,219	3,182	0,0486	S
8% Sílica Rolos Aditivo	0,167	$5,77 \cdot 10^{-4}$				
15% Sílica Rolos	0,070	$4,90 \cdot 10^{-5}$	-13,528	3,182	0,0009	S
15% Sílica Rolos Aditivo	0,131	$8,00 \cdot 10^{-6}$				

Fonte: Autora, 2019.

Nota-se que o uso do aditivo apresentou influência significativa apenas para as combinações rolos, o que mostra que há maior sensibilidade destas ao uso de aditivo, em relação às combinações mandíbulas. A progressão do p-valor indica maior influência para maiores teores de sílica.

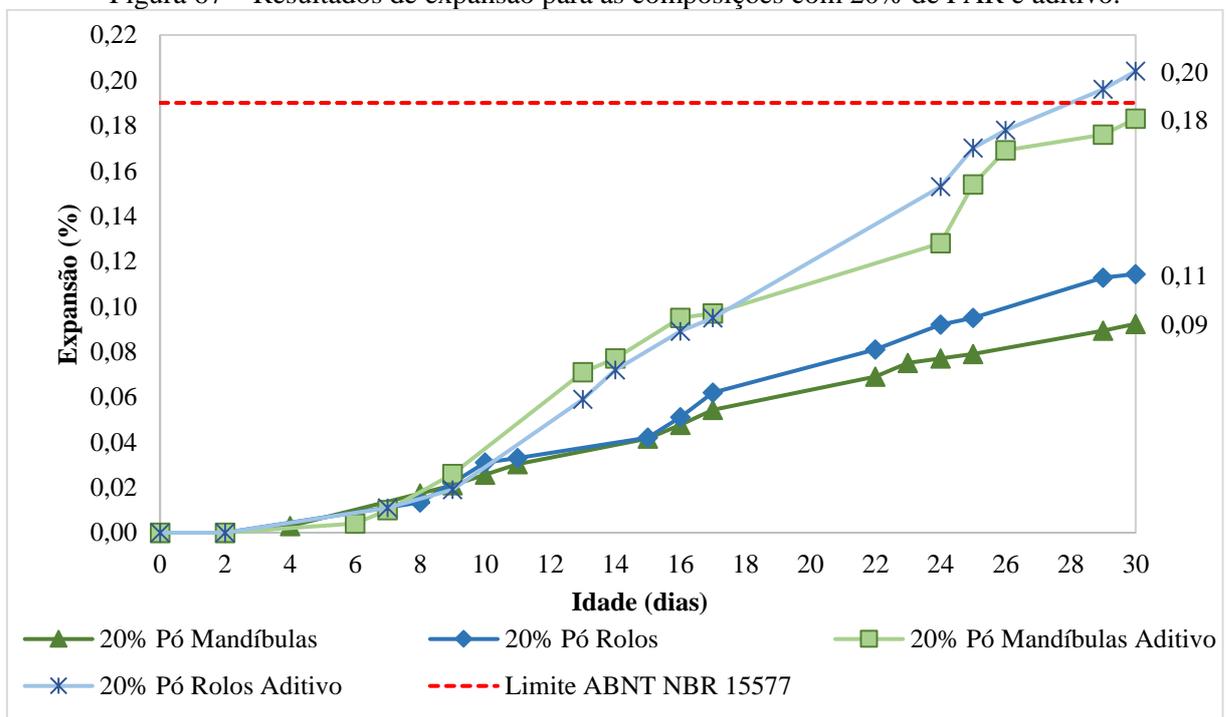
As figuras 66 e 67 apresentam as curvas de expansão para barras com uso de pós de agregado reativo nas porcentagens de 10% e 20%, respectivamente, com o uso de aditivo.

Figura 66 – Resultados de expansão para as composições com 10% de PAR e aditivo.



Fonte: Autora, 2019.

Figura 67 – Resultados de expansão para as composições com 20% de PAR e aditivo.



Fonte: Autora, 2019.

Para a adição de 10% de pó, com o uso de aditivo, houve mitigação eficiente das expansões para a composição com britador de mandíbulas. A composição com britador de rolos, porém, aproxima-se do limite da norma brasileira (em média 0,18%); uma das barras, inclusive, atingiu

0,19%. Desta forma, nesta combinação, a mitigação foi classificada como ineficiente, a favor da segurança. O comportamento se mantém, com as expansões para britador de rolos maiores do que para britador de mandíbulas.

Para a adição de 20%, houve mudança na classificação para ambas as combinações, com a combinação para britador de mandíbulas com expansão aos 30 dias próxima ao limiar estabelecido pela ABNT NBR 15577-1 (2018), sendo mais prudente considerar a mitigação ineficiente; da mesma forma, a combinação com britador de rolos, cuja expansão média foi superior a 0,19% aos 30 dias, teve mitigação ineficiente .

Os resultados da análise estatística para as combinações com PAR estão expostos na Tabela 30.

Tabela 30 – Resultado do teste t para o ensaio acelerado de barras nas combinações com PAR, avaliando a influência do aditivo.

Combinação	Média	Variância	T	T crítico	p- valor	Signif.
10% Pó Mandíbulas	0,124	$1,25 \cdot 10^{-5}$	-3,015	4,303	0,0945	NS
10% Pó Mandíbulas Aditivo	0,160	$4,21 \cdot 10^{-4}$				
20% Pó Mandíbulas	0,092	$3,29 \cdot 10^{-4}$	-7,428	3,182	0,0050	S
20% Pó Mandíbulas Aditivo	0,183	$1,14 \cdot 10^{-4}$				
10% Pó Rolos	0,133	$2,00 \cdot 10^{-6}$	-3,135	12,706	0,1966	NS
10% Pó Rolos Aditivo	0,177	$3,92 \cdot 10^{-4}$				
20% Pó Sílica Rolos	0,114	$8,93 \cdot 10^{-5}$	-3,851	12,706	0,1617	NS
20% Pó Rolos Aditivo	0,204	$1,01 \cdot 10^{-3}$				

Fonte: Autora, 2019.

Percebe-se que a única combinação que teve influência significativa do uso de aditivo foi a combinação com 20% de PAR com agregado cominuído por britador de mandíbulas.

A partir dos resultados com todas as combinações utilizando adições, percebe-se que não houve o efeito benéfico esperado utilizando-se aditivo. Houve, na verdade, um aumento generalizado das expansões.

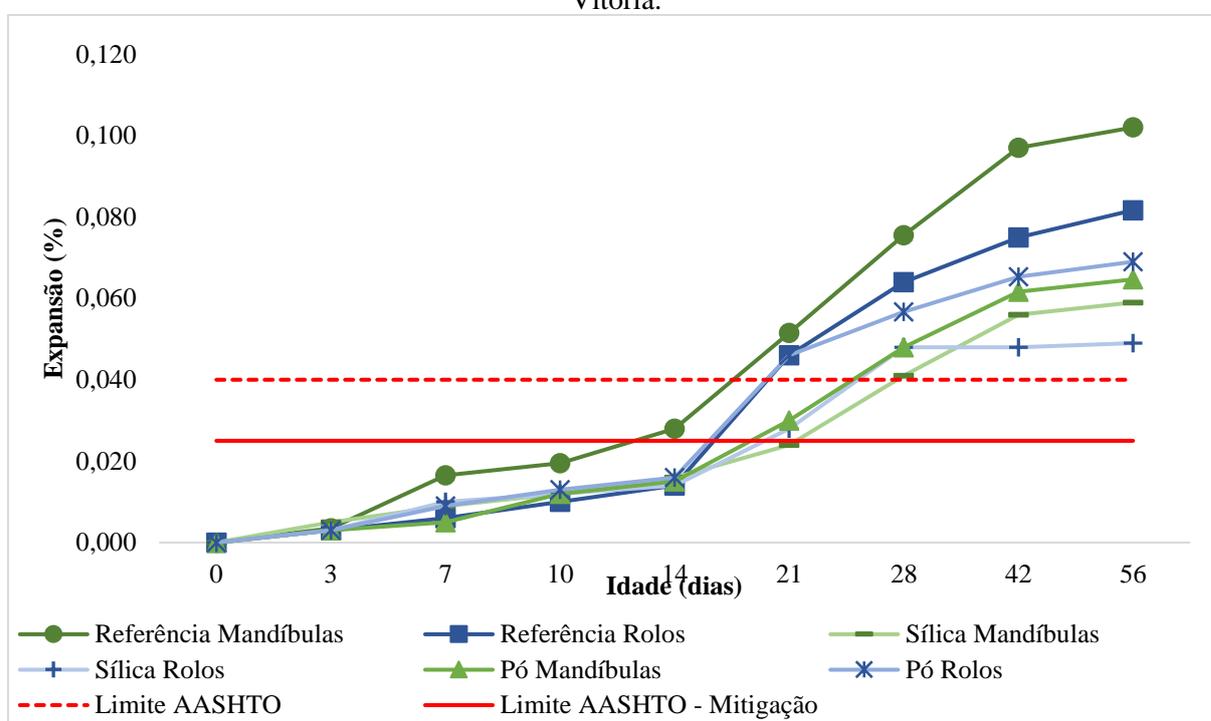
Observou-se para ambos os materiais expansão acentuada nas composições rolos. Resultados similares foram obtidos por Wang e Gillot (1989) e Perry e Gillot (1985, apud MALHOTRA *et al.*, 1988), obtendo-se aumento das expansões quando da utilização de aditivo do tipo policarboxilato em conjunto com sílica ativa. Silva (2015) também verificou o aumento das expansões de barras com sílica ativa com o uso de aditivo à base de policarboxilato, o mesmo utilizado na presente pesquisa. A autora aponta que o menor teor de ar nos corpos de prova com aditivo levou a maiores expansões, uma vez que, em argamassas e concretos porosos, o gel formado pela RAA tende a se acomodar nos poros, diminuindo a pressão exercida na matriz cimentícia e, conseqüentemente, as expansões. As combinações rolos apresentaram maiores

expansões, mostrando-se mais sensíveis ao uso do aditivo. As interações entre os componentes do aditivo e a matriz cimentícia e seus efeitos devem ser melhor estudados.

4.5.2.5 Considerações

Observou-se que as expansões, para o ensaio de barras, têm comportamento próximo ao linear. Para o ensaio dos miniprismas, as curvas possuem duas taxas de crescimento distintas, uma moderada até os 14 dias seguida de outra mais acentuada, como pode ser observado na Figura 68, excetuando-se a combinação Jaboatão.

Figura 68 – Resultados do ensaio de miniprismas de concreto para combinações com o agregado Vitória.



Fonte: Autora, 2019.

Este comportamento pode ser devido ao tamanho do agregado utilizado, uma vez que Zhang *et al.* (1999) afirmam que, com o uso de agregados maiores nos corpos de prova, a expansão em idades iniciais é menor, crescendo continuamente em idades avançadas.

Ao comparar os ensaios acelerados realizados, também é possível notar a menor discrepância dos resultados para os diferentes britadores no ensaio dos miniprismas, indicando a menor influência da morfologia para agregados de maiores dimensões.

Os quadros 12 e 13 apresentam um resumo das expansões e classificação de cada composição analisada, considerando os limites propostos pela ABNT NBR 15577-1 (2018) para o ensaio

acelerado de barras de argamassa e pela AASHTO TP 110-14 (2016) para o ensaio acelerado de miniprismas de concreto.

Quadro 12 – Quadro resumo das classificações relativas à reatividade potencial e eficiência da mitigação das combinações aos 30 dias para o ensaio acelerado de barras de argamassa.

NBR 15577			
Expansão Média		Mandíbulas	Rolos
Referência	Vitória	0,34 (PR)	0,13 (PI)
	Jaboatão	0,10 (PI)	0,15 (PI)
Sílica	8% - Massa	0,15 (ME)	0,12 (ME)
	8% Massa – Aditivo	0,15 (ME)	0,17 (ME)
	8% -Volume	0,17 (ME)	0,19 (MI)
	15% Massa	0,09 (ME)	0,07 (ME)
	15% Massa - Aditivo	0,12 (ME)	0,13 (ME)
Pó de Agregado Reativo	10% Massa	0,12 (ME)	0,13 (ME)
	10% Massa – Aditivo	0,16 (ME)	0,18 (MI)
	20% Massa	0,09 (ME)	0,11 (ME)
	20% Massa - Aditivo	0,18 (MI)	0,20 (MI)
	20% Volume	0,15 (ME)	0,13 (ME)

Fonte: Autora, 2019.

PR: Potencialmente Reativo; PI: Potencialmente Inócuo; ME: Mitigação Eficiente; MI: Mitigação Ineficiente

Quadro 13 – Quadro resumo das classificações relativas à reatividade potencial e eficiência da mitigação das combinações aos 56 dias (84 dias para o Agregado Jaboatão) realizadas para o ensaio acelerado de miniprismas de concreto.

Agregado Vitória			
Expansão Média		Mandíbulas	Rolos
Referência	Vitória	0,102 (PR)	0,082 (PR)
	Jaboatão	0,060 (PI)	0,053 (PI)
Sílica	8% - Volume	0,059 (MI)	0,049 (MI)
Pó de Agregado Reativo	20% Volume	0,065 (MI)	0,069 (MI)

Fonte: Autora, 2019.

PR: Potencialmente Reativo; PI: Potencialmente Inócuo; ME: Mitigação Eficiente; MI: Mitigação Ineficiente

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos ensaios e análises realizados, foi possível delinear o comportamento dos dois agregados utilizados em relação à reatividade potencial adotando-se diferentes métodos de britagem, assim como o comportamento de combinações com o uso de dois tipos de adição, a sílica ativa e o pó de agregado reativo. As conclusões e sugestões para futuras pesquisas estão destacadas a seguir.

5.1. CONCLUSÕES

Neste item estão apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos resultados do programa experimental, sendo válidas para as condições e materiais estudados.

- **Influência do britador no resultado dos ensaios acelerados**

Observou-se diferença significativa das expansões no ensaio acelerado de barras de argamassa para os diferentes britadores utilizados. Para o agregado Vitória, as maiores expansões foram observadas para o agregado britado por britador de mandíbulas. O uso de diferentes britadores modificou a classificação do agregado ensaiado em relação ao potencial reativo, indicando reatividade com o uso do britador de mandíbulas e inocuidade com o uso do britador de rolos, o que demonstra que esta variável pode ser fonte de falsos-positivos e falsos-negativos no ensaio acelerado de barras de argamassa.

Para o agregado Jaboaão, a influência do tipo de britador também foi significativa. Contudo, as maiores expansões foram observadas para a combinação rolos. Neste caso, para ambos os britadores, a classificação manteve-se, sendo este agregado considerado inócuo.

Os resultados do ensaio acelerado de miniprismas de concreto corroboram os resultados obtidos no ensaio acelerado de barras. Neste ensaio, não houve variabilidade na classificação quanto à reatividade potencial, como ocorreu para o agregado Vitória no ensaio acelerado de barras; para ambas as combinações, o agregado foi classificado como reativo. A influência do britador manteve-se significativa para o agregado Vitória; entretanto, não foi significativa para o agregado Jaboaão.

As diferenças nos resultados dos ensaios são, provavelmente, devidas à morfologia das partículas geradas pelos diferentes tipos de britador. Contudo, esta influência é variável dependendo do tipo e tamanho do agregado. Observam-se partículas com diferentes formatos e tamanhos relativos, mesmo para uma única faixa granulométrica analisada. As diferenças na

morfologia e tamanho das partículas repercutem nas expansões determinadas pelos ensaios de reatividade, observando-se maior influência para partículas de menores dimensões.

As maiores expansões no ensaio acelerado de barras de argamassa são observadas para combinações com partículas de maior área superficial específica; entre partículas de dimensões semelhantes, as partículas de formato lamelar acarretaram em maiores expansões. Para maiores faixas granulométricas, utilizadas no ensaio acelerado de miniprismas, a influência é reduzida.

- **Resultados da análise petrográfica**

A análise petrográfica permitiu observar os agregados estudados, identificando a presença de feições deletérias. O agregado Jaboaão é uma rocha ígnea que varia de granodiorito a tonalito; apresentou feições de alteração dos feldspatos, assim como quartzo microgranular e extinção ondulante, porém em reduzidas quantidades, permitindo classificá-lo como potencialmente inócuo.

Por outro lado, para o agregado Vitória, que é proveniente de rocha metamórfica, foram observados dois grupos com características distintas. Um grupo, descrito como ortognaisse de composição diorítica, com estrutura gnáissica, apresentou baixa quantidade de quartzo microgranular e presença de extinção ondulante, sendo classificado como potencialmente inócuo. O outro grupo, descrito como ortognaisse de composição granodiorítica, com estrutura milonítica, apresentou grande quantidade de quartzo microgranular, além de presença de extinção ondulante, formação de subgrão, mimerquita, pertita e sericita, sendo classificado como potencialmente reativo. Como a maior porção presente no agregado era a reativa, o agregado foi classificado como reativo. Entretanto, nota-se a complexidade do agregado, observada na variação dos resultados para a combinação de referência do agregado Vitória.

Os resultados da análise petrográfica estão em consonância com os obtidos nos ensaios acelerados. Este resultado, em conjunto com os obtidos nos ensaios acelerados, permitiu classificar o agregado Vitória como potencialmente reativo, apesar do resultado para a combinação rolos no ensaio acelerado de barras, sendo devido, provavelmente, à influência do tipo de britador utilizado.

- **Influência do tipo de britador em combinações com o uso de sílica ativa e pó de agregado reativo**

Nas combinações com o uso de sílica ativa, observou-se que não houve influência significativa do tipo de britador para as porcentagens de 8% e 15% no ensaio acelerado de barras de

argamassa, embora tenham sido obtidas maiores expansões para as combinações mandíbulas, como observado nas combinações de referência. Tal fato, provavelmente, se deve à maior superfície específica dos agregados cominuídos por britador de mandíbulas. A maior eficiência desta adição foi observada para agregados com maior área superficial específica e, conseqüentemente, maior reatividade. Para o ensaio de miniprismas, o tipo de britador também não influenciou de forma significativa as expansões.

Para o pó de agregado reativo, assim como para a sílica, não houve influência significativa do tipo de britador em ambos os ensaios para as porcentagens analisadas. Contudo, ao contrário do que ocorreu para as combinações de referência e com sílica, neste caso, as combinações rolos apresentaram maiores expansões. Este fato pode ser devido à maior superfície específica do pó mandíbulas, que teve melhor atuação mitigando as expansões.

- **Influência do uso de pó de agregado reativo e da sílica como mitigadores da reação álcali-agregado**

O uso de sílica ativa nas porcentagens de 8% e 15% em substituição ao cimento em massa proporcionou a diminuição das expansões a níveis aceitáveis pela norma brasileira. Apenas na composição rolos com uso de 8% de sílica em volume, equivalente a 6,3% em massa, houve ineficiência na mitigação. Tal fato pode ser devido ao baixo teor de sílica utilizado e/ou à energia de mistura insuficiente para desagregar as aglomerações de sílica. Para esta adição, a porcentagem utilizada teve influência significativa nas expansões. No ensaio de miniprismas, a combinação com 8% de sílica em volume obteve expansões acima do limite estabelecido por norma, havendo, também, mitigação ineficiente.

O pó de agregado reativo como agente mitigador da reação álcali-agregado mostrou-se eficaz no ensaio de barras, reduzindo as expansões até um nível abaixo do limite estabelecido pela norma brasileira. Neste caso, nas combinações com o pó mandíbulas, de maior área superficial específica, observaram-se as menores expansões; isto aconteceu mesmo em conjunto com o agregado cominuído por britador de mandíbulas, que, por ter maior área superficial específica, mostrou-se mais reativo. O ensaio de miniprismas, contudo, apresentou resultados conflitantes: apesar de haver diminuição das expansões em relação às combinações de referência, a mitigação foi classificada como ineficiente. O pó de agregado reativo pode ter reagido pozolanicamente em razão da maior temperatura do ensaio de barras. Desta forma, é necessário avaliar a partir de mais ensaios a viabilidade do uso deste material, determinando sua ação em um ensaio a menores temperaturas, como o ensaio de prismas de concreto.

- **Influência do uso de aditivo nas expansões da RAA**

Para as combinações com sílica, o uso de aditivo influenciou de forma significativa as expansões das combinações rolos. Observou-se maior influência para a maior porcentagem de sílica utilizada. Para as combinações com pó de agregado reativo, foi observada influência significativa do aditivo apenas para a combinação com 20% de pó e agregado mandíbulas.

Observou-se, em geral, aumento nas expansões, que pode ser devido ao menor teor de ar nos corpos de prova com aditivo, que faz com que o gel formado, não tendo onde se acomodar, exerça pressão e provoque expansões. Pode, também, ter havido algum tipo de interação entre os componentes do aditivo na matriz cimentícia. As combinações rolos apresentaram maiores expansões, mostrando-se mais sensíveis ao uso do aditivo. As interações entre os componentes do aditivo e a matriz cimentícia e seus efeitos devem ser melhor estudados.

- **Comparação entre os ensaios acelerados**

Os resultados obtidos por meio do ensaio acelerado de miniprismas, em grande parte, contradizem os obtidos pelo ensaio acelerado de barras de argamassa. Pode ter havido influência da liberação de álcalis por parte dos agregados no ensaio dos miniprismas, em decorrência do maior tempo de ensaio, em relação ao ensaio acelerado de barras de argamassa, além de agregados com grande quantidade de feldspatos, o que deve ser avaliado de antemão quando da realização deste ensaio. O ensaio de barras mostrou-se ser mais sensível ao uso de diferentes tipos de britadores, uma vez que utiliza partículas de menor dimensão. O ensaio de miniprismas, por sua vez, apresenta menor discrepância entre os resultados para diferentes britadores, indicando menor influência da morfologia para maiores tamanhos de agregado.

5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Baseando-se nos resultados da pesquisa e considerando os pontos que necessitam de uma análise mais aprofundada, sugere-se os seguintes temas para futuras pesquisas:

- Realização do ensaio de prismas de concreto e comparação com os resultados dos ensaios de barras e miniprismas;
- Análise da liberação de álcalis por parte dos agregados e sua influência nas expansões em concretos;

- Determinação do teor ótimo de pós de agregado reativo provenientes de diferentes tipos de agregado em substituição ao cimento para a mitigação das expansões da reação álcali-agregado;
- Estudo do teor péssimo do agregado reativo utilizado e sua influência em conjunto com diferentes tipos de britadores;
- Utilização de pós de agregado reativo como agregado miúdo para determinação de possível efeito mitigador das expansões da reação álcali-agregado;
- Análise da pozolanicidade do pó de agregado reativo por meio de outros métodos;
- Estudo dos géis formados e respectivas composições com a utilização de diferentes adições;
- Estudo dos géis formados e respectivas composições com a utilização de diferentes aditivos;
- Estudo reológico para a determinação do teor ótimo de aditivos a serem empregados em corpos de prova para ensaios de RAA.

REFERÊNCIAS

- AGUAS, M. F. F. **Influência da adição de cinza do bagaço de cana na reação álcali-silica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- ALVES, E. F. R.; CARMO, J. B. M.; SANTOS, M. C.; TRABOULSI, M. A. Estudo comparativo da expansão no concreto e argamassa moldados. *In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 110-14**: Standard method of test for potential alkali reactivity of aggregates and effectiveness of ASR mitigation measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT). 2016.
- _____. **T 19/T 19M**: Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate. 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 221.1R-98:State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity reported by ACI Committee 221. p. 31, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C295/C295M**: Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete. 2018a.
- _____. **C192/C192M**: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the Laboratory. 2018.
- _____. **C 150**: Standard specification for Portland cement. *In: Annual Book of ASTM Standards*, 2017.
- _____. **C 150**: Standard specification for Portland cement. *In: Annual Book of ASTM Standards*, 2019.
- _____. **D 1193-06**: Standard specification for reagent water. 2018.
- _____. **C 1260**: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). 2014.
- _____. **C 1567**: Standard test method for determining the potential alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method). 2013.
- _____. **C 1293**: Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. 2018a.
- ANDRIOLO, F. R. AAR – Dams affected in Brazil - Report on the current situation. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION*, 11., 2000, Québec City. **Proceedings [...]**. Québec City, 2000.
- ANDRIOLO, F. R.; SCHMIDT, M. T. Capanda RCC dam in Angola. **Water Power and Dam Construction**, v. 44, n. 2, p. 44–47, 1992.

ASGEIRSSON, H. Silica fume in cement and silane for counteracting of alkali-silica reactions in Iceland. **Cement and Concrete Research**, v. 16, p. 423–428, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10908**: Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

_____. **NBR 15577-3**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

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

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

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

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AUBEMA. **Single roll crusher**. Disponível em:

<http://www.tlt.as/Undersider/documents/RollCrusher1Single.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2019.

BARISONE, G.; RESTIVO, G. Alkali-silica potential reactivity of undulatory extinction quartz in the western alpine arch. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION*, 9., 1992, London. **Proceedings [...]**. London: The Concrete Society, 1992.

BASTO, P. E. A. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BATTAGIN, I. L. S.; BATTAGIN, A. F.; SBRIGHI NETO, C. A norma técnica brasileira de reação álcali-agregado faz seu primeiro aniversário. **IBRACON Concreto e Construção** 54, p. 34–47, 2009.

BEKTAS, F.; WANG, K.; CEYLAN, H. Effect of Portland cement fineness on ASTM C1260 expansion. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 36, n. 5, p. 436–442, 2009.

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1215–1227, 2002.

BÉRUBÉ, M.; FOURNIER, B. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, n. 1–2, p. 27–47, 2003.

BEYENE, M.; SNYDER, A.; LEE, R. J.; BLASZKIEWICZ, M. Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 51, p. 85–95, 2013.

BINAL, A. The pessimum ratio and aggregate size effects on alkali silica reaction. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 15, p. 725–731, 2015.

BLIGHT, G. E.; ALEXANDER, M. G. **Alkali-aggregate reaction and structural damage to concrete** - Engineering assessment, repair and management. Boca Raton: CRC Press, 2011.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1139–1150, 2000.

BRAGA, J. A.; ZANELLA, M. R.; ZALESKI, J. M.; ANDRIOLO, F. R. Uso de concreto rolado - Projeto Capanda - Angola - Ensaios especiais. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 9., 1991, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: CBDB, 1991.

CÂNDIDO, W. F. **Estudo de tratamentos com lítio no combate da reação álcali-agregado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

CARLES-GIBERGUES, A.; CYR, M.; MOISSON, M.; RINGOT, E. A simple way to mitigate alkali-silica reaction. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 1, p. 73–83, 2008.

CASTRO, C. H.; GUERRA, E. A.; FONTOURA, J. T. F.; GRAÇA, N. G. Estudo

comparativo de propriedades do concreto afetado pela reação álcali-agregado. *In*: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997a.

CASTRO, C. H.; SANTOS, M. C.; TRABOULSI, M. A.; BITTENCOURT, R. M. Influência do agregado pulverizado na reação álcali-agregado. *In*: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997b.

CHATTERJI, S. The role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 9, p. 185–188, 1979.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios - Britagem, peneiramento e moagem**. 4. ed. São Paulo: Signus Editora, 2009.

CHI, R. C. Y. **Mitigation of alkali-silica reaction in volcanic aggregate concrete using PFA and GGBS. Annual Concrete Seminar**. Hong Kong, 2016. Disponível em: https://www.devb.gov.hk/filemanager/en/content_971/3_Mitigation_of_Alkali_Silica_Reaction_in_Volcanic_Aggregate_Concrete_using_PFA_and_GGBS.pdf. Acesso em: 5 maio. 2019.

COLLINS, C.; IDEKER, J.; WILLIS, G.; HURST, J. **Alkali-silica reaction: “The cancer of concrete”**. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/3876748/>. Acesso em: 5 maio. 2019.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

CYR, M.; RIVARD, P.; LABRECQUE, F. Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 7, p. 438–446, 2009.

DEMERCHANT, D. P.; FOURNIER, B.; STRANG, F. Alkali-aggregate research in New Brunswick. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, p. 212–225, 2000.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The Chemistry of “Alkali-Aggregate” Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 1–9, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 194: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DIAMOND, S. **Alkali reactions in concrete-pore solution effects** (G. M. IDORN & S. ROSTAM, Eds.). *In*: CONFERENCE ON ALKALI IN CONCRETE: RESEARCH AND PRACTICE, 6., 1983, Copenhagen. **Proceeding [...]**. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1983.

_____. Alkali Silica Reactions - Some Paradoxes. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 391–401, 1997.

_____. Unique response of LiNO_3 as an alkali silica reaction-preventive admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1271–1275, 1999.

DIAMOND, S.; SAHU, S. **Densified Silica Fume : Particle Sizes and Dispersion in Concrete**.

Materials and Structures, v. 39, p. 849–859, 2006.

DIAMOND, S.; SAHU, S.; THAULOW, N. Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1625–1632, 2004.

DIAMOND, S.; THAULOW, N. A study of expansion due to alkali - silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 4, p. 591–607, 1974.

DRZYMALA, J. Comminution. *In: Mineral processing - Foundations of theory and practice of minerallurgy*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007. p. 510.

DUCHESNE, J.; BERUBÉ, M. A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms Part 1: Concrete expansion and Portlandite depletion. **Cement and Concrete Research**, v. 24, p. 73–82, 1994.

_____. Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali – silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1057–1063, 2001.

DUNANT, C. F.; SCRIVENER, K. L. Effects of aggregate size on alkali-silica-reaction induced expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 745–751, 2012.

DURAND, B.; BÉRARD, J.; ROUX, R.; SOLES, J. A. Alkali-silica reaction: the relation between pore solution characteristics and expansion test results. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 419–428, 1990.

DYER, T. **Concrete Durability**. 1^o ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

EVERTSSON, C. M. **Cone crusher performance**. 2000. Thesis (PhD) – Clahmers University of Technology, Göteborg – Sweden, 2000.

FARIAS, L. A.; HASPARYK, N. P.; ANDRADE, M. A. S. Estudos preliminares de diferentes bases de aditivos e adições na RAA. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

FENG, X.; THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T. W.; FOLLIARD, K. J.; FOURNIER, B. New observations on the mechanism of lithium nitrate against alkali silica reaction (ASR). **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 94–101, 2010.

FERNANDES, I.; RIBEIRO, M. A.; BROEKMANS, M.; SIMS, I. **Petrographic atlas: characterisation of aggregates regarding potential reactivity to alkalis**. RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method. Paris: Springer, 2016.

FERRAZ, A. R.; FERNANDES, I.; SOARES, D.; SILVA, A. S.; QUINTA-FERREIRA, M. Assessment of the alteration of granitic rocks and its influence on alkalis release. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 95, 2017.

FERREIRA, M. P. V. **A geologia de engenharia e os recursos geológicos - Geologia de Engenharia**. Coimbra: Editora Imprensa da Universidade de Coimbra, v. 1, 2003.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Cominuição. *In: Tratamento de*

minérios. 5. ed. CETEM, 2010. p. 143–210.

FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O Ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2007.

FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M. D. A.; KURTIS, K. E. **Guidelines for the use of lithium to mitigate or prevent ASR**. Washington, DC: Federal Highway Administration., 2003.

Disponível em:

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/03047/index.cfm>. Acesso em: 18 jul. 2018.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 167–191, 2011.

FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU., A. B. Materiais rochosos para a construção. *In*: OLIVEIRA, A.; BRITO, S. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 588.

FRENCH, W. J. The characterization of potentially reactive aggregates. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 9., 1992, London. **Proceedings [...]**. London: The Concrete Society, 1992.

GALLETI, A. A. B.; SILVEIRA, J. F. A.; ANDRADE, M. A. S.; PERES, R. G. Inspeções realizadas nas usinas de furnas para detectar reação álcali-agregado. *In*: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997.

GERMAN, R. M. A Measure of the number of particles in agglomerates. **Metal Powder Report**, v. 32, n. 4, p. 365–373, 1996.

GOLMAKANI, F.; HOOTON, R. D. Comparison of laboratory performance tests used to assess alkali-silica reactivity. *In*: ANNUAL CONFERENCE – CANADIAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING, 2006. **Proceedings [...]**. 2016.

_____. Cement and concrete research effect of carbonation on the pore solution of mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 121, p. 72–80, 2019.

GOMES, E. A. O. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado - A experiência do Recife**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

GOMES, H. . **Geologia e recursos minerais do Estado de Pernambuco**. Recife: 2001.

GONÇALVES, J. P.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; CUNHA, E. R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 924–932, 2007.

GRATTAN-BELLEW, P. E. Microcrystalline quartz, undulatory extinction & the alkali-silica reaction. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 9., 1992, London. **Proceedings [...]**. London: The Concrete Society, 1992.

- GRATTAN-BELLEW, P. E. A Critical Review of Ultra-accelerated Alkali-silica Reactivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 403–414, 1997.
- GRATTAN-BELLEW, P. E.; CHAN, G. Comparison of the morphology of alkali – silica gel formed in limestones in concrete affected by the so-called alkali – carbonate reaction (ACR) and alkali – silica reaction (ASR). **Cement and Concrete Research**, v. 47, p. 51–54, 2013.
- GRATTAN-BELLEW, P. E.; MITCHELL, L. D.; MARGESON, J.; MIN, D. Is alkali – carbonate reaction just a variant of alkali – silica reaction ACR = ASR? **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 556–562, 2010.
- GUÐMUNDSSON, G.; ÁSGEIRSSON, H. Some Investigations on Alkali-Aggregate Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 5, p. 211–220, 1975.
- GUPTA, A.; YAN, D. **Mineral processing design and operations**. 2nd ed. Elsevier, 2016.
- GUSMÃO, A. D.; TEIXEIRA, D. C. L.; ANDRADE FILHO, J. C.; VITÓRIO, J. A. P.; OLIVEIRA, R. A. **Laudo técnico sobre as causas do desabamento do edifício Areia Branca – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco - CREA - PE**. 2005.
- HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - Efeito da Cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.
- HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1885.
- HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- HASPARYK, N. P.; FARIAS, L. A. Comportamento de adições e aditivos na expansão da reação álcali-agregado - Um estudo envolvendo reologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: IBRACON, 2013.
- HELENE, P.; CARVALHO, M.; PACHECO, J. Engineering field tests for alkali-aggregate reaction. **Structural Concrete**, v. 18, p. 349–355, 2017.
- HEWLETT, P. C. (Ed.). **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chappelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017.
- HOU, X.; STRUBLE, L. J.; KIRKPATRICK, R. J. Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1683–1696, 2004.
- ICHIKAWA, T. Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 8, p. 716–726, 2009.

ICHIKAWA, T.; MIURA, M. Modified model of alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1291–1297, 2007.

IDEKER, J. H.; BENTIVEGNA, A. F.; FOLLIARD, K. J.; JUENGER, M. C. G. Do current laboratory test methods accurately predict alkali-silica reactivity? **ACI Materials Journal**, v. 109, n. 4, p. 395–402, 2012.

KATAYAMA, T. Critical review of carbonate rock reactions. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 9., 1992, London. **Proceedings [...]**. London: The Concrete Society, 1992.

_____. The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 643–675, 2010.

KATAYAMA, T.; JENSEN, V.; ROGERS, C. A. The enigma of the ‘ so-called ’ alkali – carbonate reaction. **Proceedings of the institution of Civil Engineers**, v. 169, n. 4, p. 223–232, 2016.

KAWABATA, Y.; YAMADA, K. The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali–silica reaction at the pessimum proportion. **Cement and Concrete Research**, v. 92, p. 1–15, 2017.

KREMPEL, A. F.; ANDRIOLO, F. R. The use of basaltic crushed powder (filler) in the RCC. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS, 1995, Santander. **Proceedings [...]**. Santander, 1995.

LATIFEE, E. R.; RANGARAJU, P. R. Miniature concrete prism test: rapid test method for evaluating alkali-silica reactivity of aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, 2015.

LEEMANN, A.; HOLZER, L. Alkali-aggregate reaction-identifying reactive silicates in complex aggregates by ESEM observation of dissolution features. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 796–801, 2005.

LI, Y.; HE, Z.; HU, S. Mechanism of suppressing ASR using ground reactive sandstone powders instead of cement. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 30, n. 2, p. 344–351, 2015.

LI, Z. **Advanced concrete technology**. EUA: John Wiley & Sons, 2011.

LIEBERWIRTH, H.; HILMANN, P.; HESSE, M. Dynamics in double roll crushers. **Minerals Engineering**, v. 103–104, p. 60–66, 2017.

LINDGÅRD, J.; ANDIÇ-ÇAKIR, Ö.; FERNANDES, I.; RØNNING, T. F.; THOMAS, M. D. A. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p. 223–243, 2012.

LU, D.; MEI, L.; XU, Z.; TANG, M.; MO, X.; FOURNIER, B. Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete (II) expansion and microstructure of concrete microbar. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1191–1200, 2006.

- LU, D.; ZHOU, X.; XU, Z.; LAN, X.; TANG, M.; FOURNIER, B. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1157–1165, 2006.
- LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 63–68, 1989.
- LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para a construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.
- MAAS, A. J.; IDEKER, J. H.; JUENGER, M. C. G. Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 166–174, 2007.
- MAGALHÃES, F. S.; CELLA, P. R. C. Estruturas dos maciços rochosos. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 1998. p. 588.
- MAGALHÃES, R. A.; MOURA, C. N. Caracterização, histórico e obtenção de parâmetros da reação álcali-agregado para modelagem matemática da barragem Peti. *In*: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997.
- MALHOTRA, V. M.; RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F.; AİTCIN, P. **Condensed silica fume in concrete**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1988.
- MARQUES, M. L. **Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MÉNENDEZ, E.; GARCÍA-ROVÉS, R.; RUÍZ, S. Alkali release of aggregates. Effectiveness of different solutions and conditions of test.. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE (ICAAR) (N. P. HASPARYK & H. M. BERNARDES, Eds.), 15., 2016, São Paulo. **Proceedings [...]**. São Paulo: 2016.
- MINGSHU, T. Classification of alkali-aggregate reaction. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 9., 1992, London. **Proceedings [...]**. London: The Concrete Society, 1992.
- MULTON, S.; CYR, M.; SELIER, A.; DIEDERICH, P.; PETIT, L. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 508–516, 2010.
- MULTON, S.; CYR, M.; SELIER, A.; LEKLOU, N.; PETIT, L. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 350–359, 2008.
- NIXON, P. J.; COLLINS, R. J.; RAYMENT, P. L. The concentration of alkalies by moisture migration in concrete - A factor influencing alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete**

Research, v. 9, p. 417–423, 1979.

NIXON, P. J.; SIMS, I. **RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures**. State-of-the-art-report of the RILEM Technical Committee 219 ACS. Springer, 2016.

OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 16, p. 181–189, 1986.

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F. M.; ANDRIOLO, F. R. Crushed powder filler - The use on RCC and the reduction of expansion due to the alkali - aggregate reaction crushed powder filler. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS*, 1995, Santander. **Proceedings [...]**. Santander, 1995.

_____. A evolução da reação álcali - agregado ao longo do tempo : 25 anos de observação. *In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997.

OWSIK, Z.; ZAPALA-SLAWETA, J. The course of the alkali-aggregate reaction in the presence of lithium nitrate. **Ceramics - Silikáty**, v. 57, n. 2, p. 138–145, 2013.

PAN, J. W.; FENG, Y. T.; WANG, J. . T.; SUN, Q. C.; ZHANG, C. H.; OWEN, D. R. J. Modeling of alkali-silica reaction in concrete : a review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1–18, 2012.

PAPINI, C. J. **Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2003.

PASSCHIER, C. W.; TROUW, R. A. J. **Micro-tectonics**. 2. ed. Berlin: Springer, 1998.

PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E.; AMAHJOUR, F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 41–49, 2001.

PEDERSEN, B. **Alkali-reactive and inert fillers in concrete. Rheology of fresh mixtures and expansive reactions**. 2004. Thesis (PhD) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2004.

PETTERSSON, K. Effects of Silica Fume on Alkali-Silica Expansion in Mortar Specimens. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 15–22, 1992.

PIRES SOBRINHO, C. W. A.; OLIVEIRA, R. A. Contribuição técnica ao processo de elaboração de leis sobre vistorias e manutenções periódicas de edificações no estado de Pernambuco. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA – COBENGE*, 2009, Recife. **Anais [...]**. Recife, 2009.

PRADO, A. G. **Avaliação petrográfica e experimental de agregados grãos afetados por deformação tectônica, desenvolvimento de minerais de alteração e texturas de exsolução**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

RAMACHANDRAN, V. S. Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 149–161, 1998.

RAMOS, V.; FERNANDES, I.; SILVA, A. S.; SOARES, D.; FOURNIER, B.; LEAL, S.; NORONHA, F. Assessment of the potential reactivity of granitic rocks - Petrography and expansion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 86, p. 63–77, 2016.

RAMYAR, K.; TOPAL, A.; ANDIÇ, Ö. Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2165–2169, 2005.

RODRIGUES, E. P. **Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da barragem de Pedro Beicht, SP.** 1994. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; JOHN, V. . M.; PILEGGI, R. G. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. **Cerâmica**, v. 54, p. 456–461, 2008.

SALLES, F. M.; OLIVEIRA, P. J. R.; ANDRIOLO, F. R. Uso de finos de britagem como redutores da expansão devida à reação álcali-agregado. *In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997.

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SHAYAN, A. Alkali reactivity of deformed granitic rocks: A case study. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 1229–1236, 1993.

SHAYAN, A.; QUICK, G. W.; LAMCUCKI, C. J.; WAY, S. J. Investigation of some greywacke aggregates for alkali-aggregate reactivity. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION*, 9., 1992, London. **Proceedings [...]**. London: The Concrete Society, 1992.

SHAYAN, A.; QUICK, G. W.; LAMCUCKI, C. J. Morphological , mineralogical and chemical features of steam-cured concretes containing densified silica fume and various alkali levels. **Advances in Cement Research**, v. 5, n. 20, p. 151–162, 1993.

SCHNEIDER, J. F.; HASPARYK, N. P.; SILVA, D. A.; MONTEIRO, P. J. M. Effect of lithium nitrate on the alkali-silica reaction gel. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 10, p. 3370–3374, 2008.

SHETTY, M. S. **Concrete technology: theory and practice.** New Delhi: S. Chand & Company LTD., 2005.

SILVA, C. F. C. **Análise de métodos de prevenção da reação álcali-agregado: análise petrográfica e método acelerado de barras de argamassa.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

_____. **Contribuição para eficácia da mitigação da reação álcali-agregado: influência de aditivos superplastificantes nas expansões ao utilizar adições minerais.** 2015. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, G. **Recuperação de blocos de coroamento afetados pela reação álcali-agregado**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

SILVA, D. A. **Estudo da influência do índice de forma do gráudo nas propriedades Mecânicas do Concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SILVA, J. R. P. **Reação álcali-agregado: influência da granulometria do agregado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

SILVEIRA, J. F. A. A expansão do concreto em barragens afetadas pela RAA e a importância das tensões confinantes. *In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 1997, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: IBRACON, 1997.

SIMS, I.; NIXON, P. RILEM recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Petrographic method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 36, n. 261, p. 480–496, 2003.

SIMS, I.; POOLE, A. **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete - A World Review**. London: CRC Press, 2017.

SOARES, D.; SILVA, A. S.; MIRÃO, J.; FERNANDES, I.; MENÉNDEZ, E. Study on the factors affecting alkalis release from aggregates into ASR. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE (ICAAR)** (N. P. HASPARYK & H. M. BERNARDES, Eds.), 15., 2016, São Paulo. **Proceedings [...]**. São Paulo: 2016.

SOUZA, V. C. M. DE; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI, 1998.

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

SWAMY, R. N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. London: Blackie, 1992.

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

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

____. **Supplementary cementing materials in concrete**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

THOMAS, M.; FOLLIARD, K. J.; FOURNIER, B.; RIVARD, P.; DRIMALAS, T. **Methods for evaluating and treating ASR-affected structures: results of field application and demonstration projects**. Summary of Findings and Recommendations. 2013.

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K. J. **Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book**. Federal Highway Administration. 2013.

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1842–1856, 2006.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado : avaliação do comportamento de agregados do Sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TREMBLAY, C.; BERUBÉ, M.; FOURNIER, B.; THOMAS, M. D. A.; FOLLIARD, K. F. Effectiveness of lithium-based products in concrete made with Canadian reactive aggregates. **ACI Materials Journal**, v. 104, p. 195-205, 2007.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WANG, H.; GILLOT, J. E. **The effect of superplasticizers on alkali-silica reactivity**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE (ICAAAR) (K. OKADA, S. NISHIBAYASHI, & M. KAWAMURA, Eds.), 8., 1989, Kyoto. **Proceedings [...]**. Kyoto: 1989.

WANG, H.; GILLOTT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 647–654, 1991.

WANG, Y.; YU, G.; DENG, M.; TANG, M.; LU, D. The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 353–359, 2008.

WIGUM, B. J. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. **Engineering Geology**, v. 40, n. 3–4, p. 195–214, 1995.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Will's mineral processing technology - An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 8. ed. Elsevier, 2016.

ZAPATA-SLAWETA, J.; OWSIAK, Z. The role of lithium compounds in mitigating alkali-gravel aggregate reaction. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 299–303, 2016.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; WU, B.; ZHANG, N. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1393–1396, 1999.

APÊNDICE A – TABELAS DE EXPANSÃO: ENSAIO ACELERADO DE BARRAS DE ARGAMASSA

As médias das variações foram calculadas a partir do cálculo do desvio relativo máximo (DRM). De acordo com a NBR 15577-4 (2018), para valores de expansão de até 0,10%, aos 30 dias, o DRM deve ser de até 40% da média das barras. Quando superior a 40%, deve ser calculada nova média desconsiderando o valor discrepante. Para valores de expansão acima de 0,10% aos 30 dias, o DRM deve ser de até 20% da média das barras. O DRM foi calculado aos 30 dias e, em caso de valor superior ao estabelecido pela norma, todos os valores da barra em questão foram desconsiderados.

A.1. Agregado Vitória

Para o agregado Vitória, foram realizadas combinações de referência, com sílica, nas porcentagens de 8% e 15% e com pó de agregado reativo, nas porcentagens de 10% e 20%, com agregado britado por britador de mandíbulas e rolos. As tabelas de expansão estão expostas a seguir.

A.1.1. Combinações de Referência

As tabelas A.1 e A.2 apresentam as expansões das combinações de referência, e as tabelas A.3 e A.4 apresentam os resultados da repetição.

Tabela A.1 – Resultados de expansão para a combinação de referência do agregado Vitória com britador de mandíbulas (inicial).

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	B1	B2	B3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,032	0,050	0,034	0,039
9	0,050	0,111	0,092	0,084
10	-	0,150	0,147	0,149
11	-	0,172	0,218	0,195
16	0,209	0,207	0,289	0,235
17	0,260	0,214	0,307	0,260
22	0,308	0,244	0,326	0,293
23	0,316	0,250	0,328	0,298
24	0,322	0,252	0,343	0,306
29	0,348	0,267	0,355	0,323
30	0,349	0,282	0,380	0,337
DRM (30 dias)	3,561	16,320	12,760	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela A.2 – Expansões para a composição de referência do agregado Vitória com britador de rolos (inicial).

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3*	
2	0,000	0,000	-	0,000
8	0,001	0,019	-	0,010
9	0,048	0,044	-	0,046
10	0,053	0,047	-	0,050
11	0,057	0,049	-	0,053
15	0,088	0,075	-	0,082
16	0,101	0,080	-	0,091
17	0,109	0,087	-	0,098
18	0,115	0,091	-	0,103
22	0,128	0,110	-	0,119
23	0,130	0,113	-	0,122
24	0,133	0,120	-	0,127
29	0,137	0,121	-	0,129
30	0,139	0,126	-	0,133
DRM (30 dias)	4,906	4,906	-	-

Fonte: Autora, 2019.

*DRM da barra 3, aos 30 dias, maior do que 20. Barra 3 descartada.

Tabela A.3 – Expansões para a composição de referência do agregado Vitória com britador de mandíbulas (repetição).

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,021	0,018	0,025	0,021
7	0,032	0,026	0,033	0,030
12	0,057	0,050	0,047	0,051
14	0,068	0,058	0,058	0,061
16	0,088	0,070	0,071	0,076
19	0,104	0,083	0,092	0,093
21	0,119	0,090	0,101	0,103
26	0,150	0,118	0,126	0,131
28	0,166	0,130	0,139	0,145
30	0,214	0,165	0,182	0,187
DRM (30 dias)	14,439	11,765	2,674	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela A.4 – Expansões para a composição de referência do agregado Vitória com britador de rolos (repetição).

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,018	0,016	0,011	0,015
7	0,021	0,022	0,016	0,020
12	0,028	0,035	0,027	0,030
14	0,035	0,040	0,034	0,036
16	0,039	0,045	0,045	0,043
19	0,048	0,053	0,064	0,055
21	0,054	0,061	0,070	0,062
26	0,071	0,075	0,088	0,078
28	0,081	0,083	0,103	0,089
30	0,100	0,126	0,122	0,116
DRM (30 dias)	13,793	8,621	5,172	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.2. Combinações com Sílica

A sílica foi utilizada nas porcentagens de 8% e 15%. Para a porcentagem de 8%, houve substituição em massa e volume. As expansões estão apresentadas a seguir.

A.1.2.1. 8% Sílica Mandíbulas

A tabela A.5 apresenta as expansões para a combinação com 8% de sílica em massa para britador de mandíbulas.

Tabela A.5 – Expansões para a combinação com 8% de sílica em massa com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,004	0,001	0,004	0,003
8	0,009	0,003	0,005	0,006
9	0,043	0,012	0,041	0,032
14	0,046	0,054	0,048	0,049
15	0,061	0,064	0,05	0,058
16	0,068	0,082	0,051	0,067
17	0,069	0,086	0,054	0,070
21	0,087	0,109	0,076	0,091
22	0,098	0,121	0,089	0,103
23	0,104	0,123	0,09	0,106
24	0,114	0,134	0,098	0,115
28	0,138	0,146	0,121	0,135
29	0,145	0,152	0,133	0,143
30	0,151	0,155	0,138	0,148
DRM (30 dias)	2,027	4,370	6,757	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.2.2. 8% Sílica Volume Mandíbulas

A tabela A.6 apresenta as expansões para a combinação com 8% de sílica em volume (6,3% em massa) para britador de mandíbulas.

Tabela A.6 – Expansões para a composição com 8% de sílica em volume com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,026	0,023	0,027	0,025
10	0,026	0,041	0,038	0,035
11	0,039	0,054	0,050	0,048
16	0,080	0,091	0,086	0,086
22	0,121	0,126	0,123	0,123
23	0,130	0,133	0,133	0,132
24	0,135	0,138	0,138	0,137
29	0,149	0,161	0,155	0,155
30	0,161	0,172	0,170	0,168
DRM (30 dias)	3,976	2,584	1,392	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.2.3. 8% Sílica Rolos

A tabela A.7 apresenta as expansões para a combinação com 8% de sílica em massa com britador de rolos.

Tabela A.7 – Resultados de expansão para a composição com 8% de sílica com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	-	0,000	0,000	0,000
8	-	0,018	0,006	0,012
9	-	0,020	0,010	0,015
10	-	0,025	0,013	0,019
11	-	0,026	0,016	0,021
15	-	0,031	0,030	0,031
16	-	0,038	0,040	0,039
17	-	0,048	0,046	0,047
18	-	0,050	0,054	0,052
22	-	0,057	0,070	0,064
23	-	0,061	0,082	0,072
24	-	0,075	0,087	0,081
29	-	0,100	0,114	0,107
30	-	0,110	0,124	0,117
DRM (30 dias)	-	5,983	5,983	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.2.4. 8% Sílica Volume Rolos

A tabela A.8 apresenta as expansões para a combinação com 8% de sílica em volume (6,3% em massa) para britador de rolos.

Tabela A.8 – Resultados de expansão para a composição com 8% de sílica em volume com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2*	Barra 3	
2	0,000	-	0,000	0,000
8	0,018	-	0,030	0,024
10	0,042	-	0,040	0,041
11	0,060	-	0,057	0,059
16	0,106	-	0,098	0,102
22	0,138	-	0,135	0,137
23	0,151	-	0,147	0,149
24	0,155	-	0,151	0,153
30	0,183	-	0,190	0,187
DRM (30 dias)	1,877	-	1,877	-

Fonte: Autora, 2019.

*DRM da barra 2, aos 30 dias, maior do que 20. Barra 2 descartada.

A.1.2.5. 15% Sílica Mandíbulas

A tabela A.9 apresenta as expansões para a combinação com 15% de sílica para britador de mandíbulas.

Tabela A.9 – Resultados de expansão para a composição com 15% de sílica com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	-	0,000	0,000	0,000
8	-	0,018	0,033	0,026
9	-	0,021	0,041	0,031
10	-	0,023	0,042	0,033
13	-	0,026	0,044	0,035
14	-	0,032	0,053	0,043
16	-	0,035	0,056	0,046
20	-	0,041	0,062	0,052
21	-	0,046	0,067	0,057
23	-	0,048	0,069	0,059
24	-	0,049	0,071	0,060
30	-	0,084	0,103	0,094
DRM (30 dias)	-	10,160	10,160	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.2.6. 15% Sílica Rolos

A tabela A.10 apresenta as expansões para a combinação com 15% de sílica para britador de rolos.

Tabela A.10 – Resultados de expansão para a composição com 15% de sílica com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,00	0,00	0,00	0,000
8	0,011	0,024	0,018	0,018
9	0,013	0,027	0,02	0,020
10	0,013	0,029	0,021	0,021
14	0,017	0,033	0,032	0,027
16	0,022	0,035	0,036	0,031
20	0,026	0,04	0,041	0,036
21	0,036	0,044	0,043	0,041
23	0,04	0,046	0,045	0,044
24	0,042	0,048	0,047	0,046
30	0,073	0,075	0,062	0,070
DRM (30 dias)	4,286	7,143	11,429	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.3. Composições com Pó de Agregado Reativo

O pó de agregado reativo foi utilizado nas porcentagens de 10% e 20%. Para a porcentagem de 20%, houve substituição em massa e volume. As expansões estão apresentadas a seguir.

A.1.3.1. Pó 10% Mandíbulas

A tabela A.11 apresenta as expansões para a combinação com 10% de pó de agregado reativo em massa para britador de mandíbulas.

Tabela A.11 – Resultados de expansão para a composição com 10% de pó de agregado reativo em massa com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3*	
2	0,000	0,000	-	0,000
7	0,014	0,014	-	0,014
8	0,030	0,032	-	0,031
9	0,040	0,038	-	0,039
14	0,062	0,055	-	0,059
15	0,076	0,069	-	0,073
16	0,090	0,078	-	0,084
17	0,092	0,082	-	0,087
21	0,100	0,099	-	0,100
24	0,112	0,112	-	0,112
28	0,114	0,121	-	0,118
29	0,118	0,124	-	0,121
30	0,121	0,126	-	0,124
DRM (30 dias)	2,024	2,024	-	-

Fonte: Autora, 2019.

*DRM da barra 3, aos 30 dias, maior do que 20. Barra 3 descartada.

A.1.3.2. Pó 10% Rolos

A tabela A.12 apresenta as expansões para a combinação com 10% de pó de agregado reativo em massa para britador de rolos.

Tabela A.12 – Resultados de expansão para a composição com 10% de pó de agregado reativo em massa com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	-	0,000
8	0,025	0,023	-	0,024
9	0,040	0,034	-	0,037
15	0,087	0,071	-	0,079
16	0,097	0,076	-	0,087
17	0,101	0,082	-	0,092
22	0,111	0,089	-	0,100
23	0,111	0,108	-	0,110
24	0,118	0,116	-	0,117
29	0,122	0,129	-	0,126
30	0,134	0,132	-	0,133
DRM (30 dias)	0,752	0,752	-	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.3.3. Pó 20% Mandíbulas

A tabela A.13 apresenta as expansões para a combinação com 20% de pó de agregado reativo em massa para britador de mandíbulas.

Tabela A.13 - Resultados de expansão para a composição com 20% de pó de agregado reativo em massa com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,001	0,008	0,001	0,003
8	0,019	0,021	0,012	0,017
9	0,020	0,026	0,017	0,021
10	0,025	0,026	0,026	0,026
11	0,026	0,031	0,034	0,030
15	0,038	0,038	0,049	0,042
16	0,044	0,042	0,057	0,048
17	0,053	0,045	0,065	0,054
22	0,073	0,051	0,083	0,069
23	0,078	0,055	0,092	0,075
24	0,082	0,057	0,092	0,077
25	0,083	0,059	0,095	0,079
29	0,094	0,069	0,105	0,089
30	0,095	0,073	0,109	0,092
DRM (30 dias)	2,888	20,939	18,051	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.3.4. Pó 20% Volume Mandíbulas

A tabela A.14 apresenta as expansões para a combinação com 20% de pó de agregado reativo em volume (18,2% em massa) para britador de mandíbulas.

Tabela A.14 – Resultados de expansão para a composição com 20% de pó de agregado reativo em volume com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,030	0,030	0,032	0,031
10	0,051	0,055	0,058	0,057
11	0,056	0,066	0,066	0,063
14	0,068	0,086	0,081	0,078
16	0,075	0,094	0,091	0,087
20	0,103	0,112	0,114	0,110
23	0,110	0,124	0,124	0,119
24	0,114	0,130	0,130	0,125
29	0,135	0,150	0,145	0,143
30	0,141	0,162	0,150	0,151
DRM (30 dias)	6,623	7,285	0,662	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.3.5. Pó 20% Rolos

A tabela A.15 apresenta as expansões para a combinação com 20% de pó de agregado reativo em massa para britador de rolos.

Tabela A.15 – Expansões para a composição com 20% de PAR em massa com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,011	0,015	0,014	0,013
9	0,017	0,025	0,023	0,022
10	0,027	0,028	0,039	0,031
11	0,024	0,034	0,041	0,033
15	0,039	0,034	0,052	0,042
16	0,044	0,047	0,063	0,051
17	0,056	0,054	0,077	0,062
22	0,075	0,070	0,098	0,081
24	0,087	0,078	0,112	0,092
25	0,088	0,081	0,115	0,095
29	0,109	0,104	0,125	0,113
30	0,111	0,107	0,125	0,114
DRM (30 dias)	1,479	5,030	10,947	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.3.6. Pó 20% Volume Rolos

A tabela A.16 apresenta as expansões para a combinação com 20% de pó de agregado reativo (18,2% em massa) em volume para britador de rolos.

Tabela A.16 – Expansões para a composição com 20% de PAR em volume com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,046	0,021	0,034	0,034
11	0,055	0,028	0,040	0,041
14	0,066	0,046	0,059	0,057
16	0,078	0,057	0,073	0,069
20	0,094	0,074	0,091	0,086
23	0,109	0,088	0,110	0,102
24	0,116	0,094	0,113	0,108
29	0,135	0,117	0,133	0,128
30	0,140	0,124	0,139	0,134
DRM (30 dias)	4,218	7,692	3,474	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4. Composições com Aditivo

Nas combinações de sílica e pó de agregado reativo também foi utilizado aditivo. As expansões estão apresentadas a seguir.

A.1.4.1. 8% Sílica Mandíbulas Aditivo

A tabela A.17 apresenta as expansões para a combinação com 8% de sílica com aditivo para britador de mandíbulas.

Tabela A.17 – Resultados de expansão para a composição com 8% de sílica e aditivo com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,020	0,018	0,020	0,019
7	0,034	0,021	0,033	0,029
9	0,036	0,026	0,035	0,032
13	0,046	0,037	0,043	0,042
14	0,049	0,069	0,050	0,056
16	0,054	0,072	0,064	0,063
17	0,057	0,075	0,067	0,066
24	0,101	0,117	0,114	0,111
25	0,102	0,118	0,115	0,112
26	0,120	0,131	0,130	0,127
29	0,138	0,145	0,145	0,143
30	0,142	0,148	0,148	0,146
DRM (30 dias)	2,740	1,370	1,370	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.2. 8% Sílica Rolos Aditivo

A tabela A.18 apresenta as expansões para a combinação com 8% de sílica com aditivo para britador de rolos.

Tabela A.18 – Resultados de expansão para a composição com 8% de sílica e aditivo com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,018	0,002	0,027	0,016
13	0,046	0,021	0,050	0,039
14	0,050	0,028	0,057	0,045
16	0,064	0,041	0,072	0,059
17	0,067	0,043	0,076	0,062
24	0,123	0,100	0,137	0,120
25	0,131	0,106	0,143	0,127
26	0,146	0,118	0,158	0,141
29	0,166	0,134	0,179	0,160
30	0,175	0,140	0,186	0,167
DRM (30 dias)	4,790	16,168	11,377	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.3. 15% Sílica Mandíbulas Aditivo

A tabela A.19 apresenta as expansões para a combinação com 15% de sílica com aditivo para britador de mandíbulas.

Tabela A.19 – Resultados de expansão para a composição com 15% de sílica e aditivo com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,00	0,00	0,00
7	0,006	0,008	0,010	0,008
8	0,008	0,009	0,012	0,010
9	0,012	0,012	0,014	0,013
14	0,031	0,024	0,030	0,028
15	0,033	0,027	0,033	0,031
16	0,035	0,028	0,035	0,033
19	0,041	0,030	0,038	0,036
24	0,086	0,076	0,082	0,081
27	0,114	0,104	0,109	0,109
28	0,117	0,111	0,115	0,114
30	0,125	0,119	0,123	0,122
DRM (30 dias)	2,180	2,725	0,545	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.4. 15% Sílica Rolos Aditivo

A tabela A.20 apresenta as expansões para a combinação com 15% de sílica com aditivo para britador de rolos.

Tabela A.20 – Resultados de expansão para a composição com 15% de sílica e aditivo com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	-	0,000
6	0,005	0,006	-	0,006
15	0,026	0,039	-	0,033
16	0,033	0,045	-	0,039
20	0,060	0,074	-	0,067
21	0,066	0,078	-	0,072
22	0,072	0,084	-	0,078
27	0,103	0,119	-	0,111
28	0,115	0,128	-	0,122
29	0,123	0,130	-	0,127
30	0,129	0,133	-	0,131
DRM (30 dias)	1,527	1,527	-	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.5. 10% Pó Mandíbulas Aditivo

A tabela A.21 apresenta as expansões para a combinação com 10% de pó de agregado reativo com aditivo para britador de mandíbulas.

Tabela A.21 – Resultados de expansão para a composição com 10% de pó de agregado reativo e aditivo com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,006	0,006	0,001	0,006
9	0,028	0,02	0,01	0,019
13	0,07	0,054	0,037	0,054
14	0,073	0,058	0,041	0,057
16	0,093	0,07	0,055	0,063
17	0,095	0,073	0,056	0,065
24	0,137	0,111	0,095	0,114
25	0,147	0,12	0,104	0,124
26	0,16	0,134	0,117	0,137
29	0,177	0,153	0,133	0,154
30	0,181	0,159	0,140	0,160
DRM (30 dias)	13,125	0,625	12,500	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.6. 10% Pó Rolos Aditivo

A tabela A.22 apresenta as expansões para a combinação com 10% de pó de agregado reativo com aditivo para britador de rolos.

Tabela A.22 – Resultados de expansão para a composição com 10% de pó de agregado reativo e aditivo com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	-	0,000	0,000	0,000
9	-	0,028	0,022	0,025
13	-	0,066	0,086	0,076
14	-	0,068	0,089	0,079
16	-	0,085	0,104	0,095
17	-	0,088	0,106	0,097
24	-	0,117	0,139	0,128
25	-	0,141	0,168	0,155
26	-	0,144	0,171	0,158
29	-	0,159	0,186	0,173
30	-	0,163	0,191	0,177
DRM (30 dias)	-	7,910	7,910	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.7. 20% Pó Mandíbulas Aditivo

A tabela A.23 apresenta as expansões para a combinação com 20% de pó de agregado reativo com aditivo para britador de mandíbulas.

Tabela A.23 – Resultados de expansão para a composição com 20% de pó de agregado reativo e aditivo com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,004	0,005	0,004	0,004
7	0,009	0,007	0,014	0,010
9	0,028	0,021	0,029	0,026
13	0,074	0,063	0,077	0,071
14	0,078	0,071	0,081	0,077
16	0,097	0,086	0,102	0,095
17	0,100	0,088	0,104	0,097
24	0,14	0,113	0,132	0,128
25	0,166	0,138	0,158	0,154
26	0,179	0,155	0,174	0,169
29	0,183	0,161	0,183	0,176
30	0,192	0,171	0,185	0,183
DRM (30 dias)	5,109	6,387	1,277	-

Fonte: Autora, 2019.

A.1.4.8. 20% Pó Rolos Aditivo

A tabela A.24 apresenta as expansões para a combinação com 20% de pó de agregado reativo com aditivo para britador de rolos.

Tabela A.24 - Resultados de expansão para a composição com 20% de pó de agregado reativo e aditivo com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	-	0,00	0,00	0,00
7	-	0,014	0,008	0,011
9	-	0,017	0,020	0,019
13	-	0,039	0,079	0,059
14	-	0,052	0,091	0,072
16	-	0,067	0,111	0,089
17	-	0,074	0,116	0,095
24	-	0,131	0,175	0,153
25	-	0,147	0,193	0,170
26	-	0,155	0,201	0,178
29	-	0,174	0,217	0,196
30	-	0,181	0,226	0,204
DRM (30 dias)	-	11,057	11,057	-

Fonte: Autora, 2019.

A.2. Agregado Jaboaão

Para o agregado Jaboaão, foram realizadas combinações de referência. As tabelas de expansão, A.25 e A.26, estão expostas a seguir.

Tabela A.25 - Resultados de expansão para a composição de referência com britador de mandíbulas com agregado Jaboaão.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,007	0,014	0,018	0,013
10	0,021	0,034	0,028	0,028
11	0,028	0,043	0,034	0,035
16	0,036	0,055	0,046	0,046
22	0,047	0,064	0,056	0,056
23	0,055	0,074	0,062	0,064
24	0,061	0,080	0,067	0,069
29	0,083	0,098	0,084	0,088
30	0,091	0,105	0,090	0,095
DRM (30 dias)	4,545	10,140	5,594	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela A.26 – Resultados de expansão para a composição de referência com britador de rolos com agregado Jaboatão.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,029	0,022	0,019	0,023
10	0,054	0,043	0,041	0,046
11	0,061	0,049	0,045	0,052
16	0,086	0,079	0,076	0,080
22	0,118	0,105	0,107	0,110
23	0,124	0,113	0,113	0,117
24	0,128	0,118	0,116	0,121
29	0,147	0,142	0,137	0,142
30	0,154	0,151	0,143	0,149
DRM (30 dias)	3,125	1,116	4,241	-

Fonte: Autora, 2019.

APÊNDICE B – TABELAS DE EXPANSÃO: ENSAIO ACELERADO DE MINIPRISMAS DE CONCRETO

O processo do cálculo do DRM foi utilizado para eliminar valores discrepantes no ensaio de miniprismas aos 56 dias, embora a norma não especifique tal processo. Neste caso, eliminou-se apenas o valor mais discrepante.

B.1. Agregado Vitória

Para o agregado Vitória, foram realizadas combinações de referência, com 8% de sílica e com 20% de pó de agregado reativo. As tabelas de expansão estão expostas a seguir.

B.1.1. Composições de Referência

As tabelas B.1 e B.2 apresentam as expansões das combinações de referência.

Tabela B.1 – Resultados de expansão do ensaio de miniprismas para a composição de referência com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	-	0,000	0,000	0,000
3	-	0,003	0,004	0,004
7	-	0,016	0,017	0,017
10	-	0,018	0,021	0,020
14	-	0,028	0,028	0,028
21	-	0,054	0,049	0,052
28	-	0,075	0,076	0,076
42	-	0,097	0,097	0,097
56	-	0,101	0,103	0,102
DRM (56 dias)	-	0,980	0,980	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela B.2 – Resultados de expansão do ensaio de miniprismas para a composição de referência com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,007	0,001	0,002	0,003
7	0,011	0,001	0,005	0,006
10	0,012	0,002	0,017	0,010
14	0,017	0,004	0,021	0,014
21	0,037	0,057	0,045	0,046
28	0,052	0,075	0,064	0,064
42	0,063	0,086	0,076	0,075
56	0,074	0,087	0,084	0,082
DRM (56 dias)	9,388	6,531	2,857	-

Fonte: Autora, 2019.

B.1.2. Composições com Adição

A sílica foi utilizada na porcentagem de 8% e o pó de agregado reativo na porcentagem de 20%, ambos em volume. As expansões estão apresentadas nas tabelas B.3, B.4, B.5 e B.6 a seguir.

Tabela B.3 – Resultados de expansão do ensaio de miniprismas para a composição com 8% de sílica com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3*	
0	0,000	0,000	-	0,000
3	0,001	0,009	-	0,005
7	0,004	0,013	-	0,009
10	0,008	0,016	-	0,012
14	0,013	0,018	-	0,016
21	0,021	0,027	-	0,024
28	0,036	0,045	-	0,041
42	0,053	0,059	-	0,056
56	0,056	0,062	-	0,059
DRM (56 dias)	5,085	5,085	-	-

Fonte: Autora, 2019.

*DRM do prisma 3, aos 56 dias, maior do que 20. Prisma 3 descartado.

Tabela B.4 – Resultados de expansão do ensaio de miniprismas para a composição com 8% de sílica com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	0,000	-	0,000	0,000
3	0,004	-	0,001	0,003
7	0,004	-	0,015	0,010
10	0,005	-	0,019	0,012
14	0,007	-	0,021	0,014
21	0,022	-	0,034	0,028
28	0,040	-	0,055	0,048
42	0,047	-	0,048	0,048
56	0,048	-	0,050	0,049
DRM (56 dias)	2,041	-	2,041	-

Fonte: Autora, 2019.

*DRM do prisma 2, aos 56 dias, maior do que 20. Prisma 2 descartado.

Tabela B.5 – Resultados de expansão do ensaio de miniprismas para a composição com 20% de PAR com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,008	0,001	0,001	0,003
7	0,011	0,002	0,003	0,005
10	0,013	0,006	0,017	0,012
14	0,017	0,008	0,020	0,015
21	0,034	0,024	0,032	0,030
28	0,050	0,045	0,049	0,048
42	0,061	0,062	0,062	0,062
56	0,063	0,066	0,065	0,065
DRM (56 dias)	2,577	2,062	0,515	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela B.6 – Expansões dos miniprismas para a composição com 20% de PAR com britador de rolos.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,001	0,001	0,007	0,003
7	0,002	0,009	0,017	0,009
10	0,010	0,012	0,018	0,013
14	0,012	0,015	0,020	0,016
21	0,037	0,053	0,048	0,046
28	0,050	0,064	0,056	0,057
42	0,058	0,073	0,065	0,065
56	0,061	0,077	0,069	0,069
DRM (56 dias)	11,594	11,594	0,000	-

Fonte: Autora, 2019.

B.2. Agregado Jaboaão

Para o agregado Jaboaão, foram realizadas combinações de referência. As tabelas de expansão, B.7 e B.8, estão expostas a seguir.

Tabela B.7 – Expansões do ensaio de miniprismas para a composição de referência do agregado Jaboaão com britador de mandíbulas.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	0,000	0,000	-	0,000
3	0,003	0,010	-	0,013
7	0,014	0,020	-	0,017
10	0,025	0,029	-	0,027
14	0,032	0,034	-	0,033
21	0,033	0,035	-	0,034
28	0,035	0,038	-	0,037
42	0,035	0,042	-	0,039
56	0,038	0,046	-	0,042
70	0,051	0,054	-	0,053
84	0,058	0,061	-	0,060
DRM (84 dias)	2,521	2,521	-	-

Fonte: Autora, 2019.

Tabela B.8 – Expansões do ensaio de miniprismas para a composição de referência do agregado Jaboaão com britador de rolos.

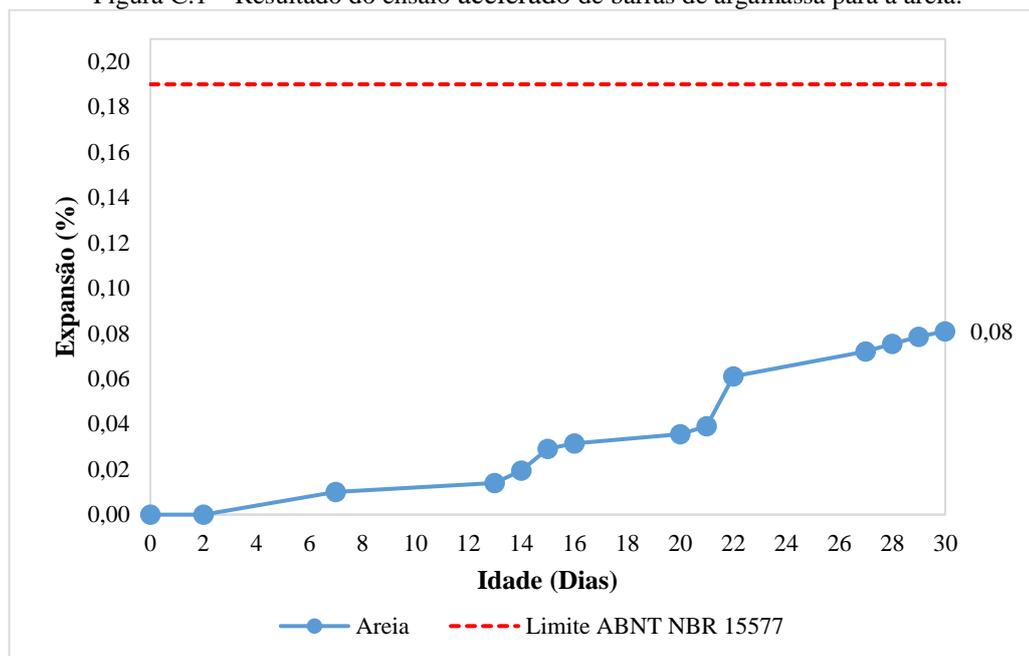
Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	
0	-	0,000	0,000	0,000
3	-	0,001	0,002	0,002
7	-	0,007	0,012	0,010
10	-	0,015	0,018	0,017
14	-	0,018	0,021	0,020
21	-	0,021	0,023	0,022
28	-	0,024	0,023	0,024
42	-	0,034	0,032	0,033
56	-	0,043	0,036	0,040
70	-	0,050	0,043	0,047
84	-	0,057	0,049	0,053
DRM (84 dias)	-	7,547	7,547	-

Fonte: Autora, 2019.

APÊNDICE C – REATIVIDADE POTENCIAL DA AREIA

A Figura C.1 e a Tabela C.1 apresentam o gráfico e tabela de expansões, respectivamente, pelo ensaio acelerado de barras de argamassa (NBR 15577-4). Este ensaio foi realizado de modo a determinar a reatividade da areia visando à sua utilização como agregado miúdo no ensaio de miniprismas de concreto.

Figura C.1 – Resultado do ensaio acelerado de barras de argamassa para a areia.



Fonte: Autora, 2019.

Tabela C.1 – Resultados de expansão para a composição com areia.

Idade (dias)	Variação das Leituras (%)			Média das Variações
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	
2	0,000	0,000	-	0,000
7	0,009	0,011	-	0,010
13	0,014	0,014	-	0,014
14	0,018	0,021	-	0,020
15	0,025	0,033	-	0,029
16	0,028	0,035	-	0,032
20	0,033	0,038	-	0,036
21	0,037	0,041	-	0,039
22	0,057	0,065	-	0,061
27	0,071	0,073	-	0,072
28	0,073	0,078	-	0,076
29	0,077	0,080	-	0,079
30	0,080	0,082	-	0,081
DRM (30 dias)	1,235	1,235	-	-

Fonte: Autora, 2019.