

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG
ENGENHARIA CIVIL
ARIELLEN APARECIDA FIDELIS COSTA

**ANÁLISE DA REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO EM ROCHAS
QUARTZÍTICAS PROVENIENTES DO SUL DE MINAS**

Varginha
2020

ARIELLEN APARECIDA FIDELIS COSTA

**ANÁLISE DA REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO EM ROCHAS
QUARTZÍTICAS PROVENIENTES DO SUL DE MINAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção de grau bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Me. Ivan Francklin Junior.

**Varginha
2020**

ARIELLEN APARECIDA FIDELIS COSTA

**ANÁLISE DA REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO EM ROCHAS
QUARTZITICAS PROVENIENTES DO SUL DE MINAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas –UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção de grau bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Prof. Me. Ivan Francklin Junior.

Aprovado em / /

Professor Me. Ivan Francklin Junior

Membro da banca examinadora I

Membro da banca examinadora II

OBS.:

Dedico este trabalho aos meu pais, avós, irmã,
meu namorado e aqueles que de alguma forma
acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois é graças a Ele que sempre persisti no alcance dos meus objetivos e não me deixou desistir, me fazendo seguir em frente.

Agradeço a minha vó Maria Helena, meu avô Tomé, minha irmã, meu pai, a família do meu namorado e demais familiares, que sempre me deram todo o apoio que precisei.

Agradeço ao meu namorado Filipe Aureliano, que sempre apoiou e incentivou os meus estudos, cuja sua presença sempre afetou positivamente a minha vida, em todos os aspectos.

Agradeço aos amigos que fiz durante meu curso e que colaboraram, direta ou indiretamente para a conclusão deste.

Agradeço em especial a minha querida mãe Flaviane (in memoriam), cujo empenho em me educar sempre veio em primeiro lugar. Aqui estão os resultados dos seus esforços. Com muito amor e gratidão.

Agradeço à empresa que estagiei e todas aquelas que já atuei, pela oportunidade de desenvolver na carreira profissional e também crescer em forma de conhecimento.

Agradeço à instituição UNIS – MG e CEFET-MG – Campus VIII, que me deram lições, conhecimentos e oportunidades que jamais serão esquecidas.

Agradeço a todos os professores que me influenciaram na minha trajetória, em especial ao professor Ivan Francklin Junior, meu orientador, por todas as oportunidades concedidas, pela oportunidade de estagiar no laboratório de Materiais de Construção Civil, pela dedicação no desenvolvimento deste trabalho e por todo conhecimento e experiências compartilhadas, que foram fontes de incentivo para o desenvolvimento da minha carreira profissional.

“Se vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)

RESUMO

A indústria da construção civil é um dos setores que mais movimentam a economia nacional, conseqüentemente o maior consumidor de recursos naturais. O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na construção civil, sendo também uma das principais fontes de poluentes da atividade. Outro fator agravante é a exploração dos quartzitos nas minerações que gera um grande volume de resíduos gerando impactos ambientais negativos. Para a redução dos rejeitos de quartzitos descartados inadequadamente, uma das alternativas é o uso como agregado na construção civil, como material componente do concreto. O trabalho teve como objetivo avaliar a reatividade potencial álcali-agregado em rochas quartzíticas provenientes do sul de minas. Foram realizados ensaios de expansão em argamassa e análise visual. Como comparação, foram feitas as mesmas análises em dois traços diferentes. Foi constatado bom desempenho do traço padrão (CPV ARI + Areia IPT), na análise de expansão em barras de argamassa, comparado ao traço 1 (CPV + Quartzito), que apresentou expansões que ultrapassaram os limites determinados pela NBR 15577-4: 2018. Os resultados apresentados em geral, estão de acordo com as biografias estudadas. Além disso, nenhuma amostra apresentou degradação superficial visível, ou envergamentos. Apesar do CPV-ARI possuir uma elevada pureza e ausência de adições capazes de controlar o desenvolvimento da reação álcali-agregado, no traço padrão (CPV ARI + Areia IPT) não desenvolveu a RAA.

Palavras-chave: Agregado para concreto. Rejeitos de quartzitos. Reação álcali-agregado.

ABSTRACT

The construction industry is one of the sectors that most move the national economy, consequently the largest consumer of natural resources. Portland cement is one of the most used materials in civil construction, and is also one of the main sources of pollutants in the activity. Another aggravating factor is the exploitation of quartzites in mining operations, which generates a large volume of waste, generating negative environmental impacts. For the reduction of waste from improperly disposed quartzites, one of the alternatives is the use as aggregate in civil construction, as a component material of concrete. The work aimed to evaluate the potential alkali-aggregate reactivity in quartzite rocks from the south of Minas. Mortar expansion tests and visual analysis were performed. As a comparison, the same analyzes were made on two different lines. A good performance was found for the standard trace (CPV ARI + Areia IPT), in the analysis of expansion in mortar bars, compared to trace 1 (CPV + Quartzite), which presented expansions that exceeded the limits determined by NBR 15577-4: 2018. The results presented in general are in accordance with the studied biographies. In addition, none of the samples showed visible surface degradation or bending. Although CPV-ARI has a high purity and no additions capable of controlling the development of the alkali-aggregate reaction, in the standard trace (CPV ARI + Areia IPT) the RAA did not develop.

Key words: *Aggregate for concrete. Quartzite tailings. Alkali-aggregate reaction.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da resistência a compressão dos compostos.	15
Figura 2 - Micrografia (MEV) da hidratação do cimento Portland aos 360 dias.	16
Figura 3 - Fissuração mapeada em barragem provocada pela RAA.	20
Figura 4 - Fissuração provocada pela RAA em bloco de fundação no Recife.	21
Figura 5 - Diagrama das etapas da reação álcali-sílica.	23
Figura 6 - Etapas da reação álcali-carbonato.	25
Figura 7 - Ataque das hidroxilas à sílica.	27
Figura 8 - Fissuras mapeadas em um pavimento de concreto.	27
Figura 9 - Gel incluído no poro da matriz cimentícia.	28
Figura 10 - Textura de exsolução do tipo mirmequita, indicado pela seta vermelha. Notar o quartzo B vermicular ou "em gotas" do quartzo, característico das mirmequitas.	36
Figura 11 - Perlita do tipo "em chama". A seta vermelha indica as lamelas esbranquiçadas mais largas em relação às lamelas mais finas dentro desse mesmo grão.	37
Figura 12 - Utilização do quartzito como material de acabamento.	39
Figura 13 - Resíduos gerados no processo de extração das placas de quartzito (a), resíduos acumulados no interior da mineração (b) e a (C) grande quantidade de resíduo depositado em meio a vegetação na região de exploração da cidade de São Tomé das Letras - MG.	41
Figura 14 - Expansão das barras de argamassa produzidas com quatro amostras de agregados de quartzito e cimento CPV ARI.	42
Figura 15 - Fluxograma da metodologia.	43
Figura 16 - Imagem de satélite apresentando minerações de quartzito localizada no entorno do município de São Thomé das Letras-MG.	44
Figura 17 - Peneiramento das amostras de quartzito.	45
Figura 18 - Procedimento de ensaio, Frasco de Chapman.	46
Figura 19 - Procedimento de ensaio, Frasco de Chapman.	47
Figura 20 - Pesagem da Amostra de Cimento.	48
Figura 21 - Procedimento de ensaio, Frasco de Le Chatelier.	49
Figura 22 - Amostras de quartzito.	50
Figura 23 - Amostras areia IPT.	50
Figura 24 - Materiais para o traço CPV ARI + quartzito.	51
Figura 25 - Materiais para o traço CPV ARI + Areia IPT.	52
Figura 26 - Misturador mecânico.	52

Figura 27 - Mesa de espalhamento utilizada no adensamento das barras de argamassa.	53
Figura 28 - Barras de argamassa moldadas.	53
Figura 29 - Barras de argamassa traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).	54
Figura 30 - Barras de argamassa traço 1 (CPV ARI + Quartzito).	54
Figura 31 - Barras imersas a solução de NaOH.	55
Figura 32 - Barras na estufa a uma temperatura de $80\pm 2^{\circ}\text{C}$	55
Figura 33 - Leituras realizadas no relógio comparador.	56
Figura 34 - Expansões do ensaio acelerado das barras de argamassa.	59
Figura 35 - Análise visual traço padrão (CPV + Areia IPT).	60
Figura 36 - Análise visual traço 1 (CPV + Quartzito).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland.....	18
Tabela 2 - Composição química do gel sílico-alcálico em amostras moldadas com diferentes cimentos.....	24
Tabela 3 - Classificação das rochas ígneas.....	34
Tabela 4 - Reservas de quartzito ornamental em Minas Gerais.	39
Tabela 5 - Composição química do cimento Portland - CPV ARI.....	47
Tabela 6 - Granulometria requerida para o agregado do ensaio.....	49
Tabela 7 - Quantitativo de material para o ensaio de expansão em argamassa.....	51
Tabela 8 - Granulometria requerida para o agregado do ensaio.....	51
Tabela 9 - Cronograma de leitura das barras.....	56
Tabela 10 - Leituras das barras traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).	57
Tabela 11 - Comprimento das barras traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).	58
Tabela 12 - Expansões das barras traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).	58
Tabela 13 - Leituras das barras traço 1 (CPV ARI + Quartzito).	58
Tabela 14 - Comprimento das barras traço 1 (CPV ARI + Quartzito).....	58
Tabela 15 - Expansões das barras traço 1 (CPV ARI + Quartzito).	58
Tabela 16 - Classificação do grau de reatividade do agregado.	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Cimento Portland	14
2.1.1 Adições	17
2.1.1.1 Escória de alto forno.....	18
2.1.1.2 Fíler calcário	18
2.2 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – (CPV-ARI)	19
2.3 Reação álcali-agregado (RAA)	19
2.3.1 Tipos de reação álcali-agregado	21
2.3.1.1 Reação álcali-sílica	22
2.3.1.1.1 Componentes do Gel	24
2.3.2 Reação álcali-carbonato.....	25
2.3.3 Condições para a ocorrência da RAA.....	26
2.3.3.1 Mecanismos de Expansão.....	26
2.3.4 RAA no cimento Portland	28
2.3.5 Métodos para avaliação da RAA	29
2.3.5.1 Análise petrográfica.....	29
2.3.5.2 Método Osipov	30
2.3.5.3 Método químico.....	30
2.3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura	31
2.3.5.5 Métodos acelerado em barras de argamassa.....	31
2.3.5.6 Métodos dos prismas de concreto.....	32
2.3.5.7 Métodos acelerado dos prismas de concreto	32
2.4 Rochas.....	33
2.4.1 Rochas Ígneas ou Magmáticas	33
2.4.2 Rochas Sedimentares	34
2.4.3 Rochas Metamórficas	35
2.4.4 Principais rochas potencialmente reativas.....	35
2.4.4.1 Texturas de exsolução reativas	36
2.4.4.1.1 Quartizitos	38

2.4.4.1.1.1 Extração do quartzito.....	40
2.4.4.1.1.2 Resíduo de quartzito	41
2.4.4.1.1.3 Resíduo de quartzito como agregado para a construção civil	42
3 METODOLOGIA.....	43
3.1 Caracterização dos materiais	44
3.1.1 Agregado	44
3.1.1.1 Massa específica do quartzito.....	45
3.1.1.2 Massa específica areia IPT	46
3.1.2 Cimento	47
3.1.2.1 CPV ARI	47
3.1.2.1.1 Composição química do Cimento Portland	47
3.1.2.1.2 Massa específica	48
3.2 Preparação de material	49
3.2.1 Separação das faixas granulométricas dos agregados	49
3.2.2 Ensaio de expansão em barras de argamassa.....	50
3.2.2.1 Proporção dos materiais para o ensaio	50
3.2.2.2 Mistura e moldagem da argamassa.....	52
3.2.2.3 Cura inicial	53
3.2.2.4 Disposição na solução e medições	54
3.2.2.5 Análise Visual	56
4 RESULTADOS	57
4.1 Caracterização dos materiais	57
4.1.1 Massa específica do quartzito e areia IPT	57
4.1.2 Massa específica do Cimento Portland CPV-ARI.....	57
4.2 Expansão em argamassa	57
4.3 Análise Visual.....	60
5 CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Desde os princípios da história o ser humano impulsiona uma constante transformação do meio em que vive. Desde a revolução industrial esse processo vem acelerando cada vez mais, provocando efeitos irreversíveis para a vida do planeta. Com isso, são inúmeros os estudos que buscam a sustentabilidade, de modo a suprir as necessidades do ser humano sem comprometer o meio ambiente ou a sobrevivência das gerações futuras, reduzindo a liberação de gases prejudiciais a atmosfera e objetivando a reutilização de resíduos eliminados nos processos industriais (HASPARYK, 2005).

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (2014), a indústria da construção civil é um dos setores que mais movimentam a economia nacional, representando 6,5% do PIB brasileiro. É também o setor que produz bens de maior dimensão física do planeta, consequentemente o maior consumidor de recursos naturais (JOHN, 2000).

Outro fator preocupante dentro do setor da construção civil, é a extração mineral no Brasil, esta é historicamente favorecida pela sua formação geológica e pela extensão territorial, tendo inúmeros minerais de interesse econômico no rol de minérios extraídos provenientes de embasamento cristalino e bacias sedimentares, 80% das minas existentes no país estão voltadas aos minerais usados na construção civil, como areias, argilas, rochas britadas e ornamentais uma vez que o aquecimento da construção civil vem se intensificando a cada ano (HASPARYK et al., 2006).

A conexão entre desenvolvimento tecnológico, necessidades econômicas e fatores ambientais vem impulsionando as inovações na área de materiais. Atualmente uma das maiores preocupações é o reaproveitamento ou reciclagem de resíduos gerados pela atividade humana, sobretudo aqueles originados pelos processamentos industriais, que na sua maioria continuam sendo descartados no meio ambiente sem nenhum controle e tratamento prévio.

As rochas ornamentais ganham ênfase pela demanda existente por novos tipos de rochas exóticas quartzíticas e calciossilicáticas para uso na construção civil, por terem várias tonalidades e texturas. A grande maioria da produção nacional de rochas ornamentais estão concentrada na região Sudeste do Brasil, nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais (HASPARYK et al., 2006). O quartzito é conhecido popularmente como “pedra mineira”, devido à grande quantidade encontrada no estado. Um dos maiores centros produtores de pedra de revestimento da região do sul de minas, está localizado na cidade de São Tomé das Letras, o fato fez com o que o quartzito ficasse também conhecido popularmente como “pedra de São Tomé”. Segundo Barbosa (2008), o processo de extração de quartzito na cidade de São Tomé

e região produz cerca de 92% de resíduos, sendo apenas 8% de material aproveitado, proporcionando grande impacto ambiental, sendo este um assunto abordado por pesquisadores que visam minorar os efeitos negativos dos detritos ao meio ambiente.

A exploração dos quartzitos nas minerações gera um grande volume de resíduos, podendo ultrapassar 90% do material extraído. Isto acontece porque o quartzito é utilizado, fundamentalmente, como pedra de revestimento, devendo ser extraído em placas, de acordo com padrões de espessura e comprimento. Devido ao expressivo volume de rejeitos produzidos, surgem impactos ambientais negativos, tais como: desconfiguração da paisagem, alterações na conformação natural do relevo, instabilizações em taludes de rejeitos de mineração, etc, (HASPARYK et al., 2006).

As pesquisas realizadas por Franklin Junior (2009) e Pinheiro (2003) mostraram que os resíduos de quartzito possuem um grande potencial para ser utilizado como agregados em concreto. Porém, ambos os autores recomendam um estudo mais aprofundado em relação a uma possível reação álcali-agregado que pode ocorrer no concreto, visto que o quartzito é considerado um agregado reativo aos álcalis presentes no cimento.

Para Francklin Junior (2009), este rejeito, caso obedeça aos padrões normativos estabelecidos para o uso de materiais rochosos pode configurar-se como material viável para outros fins, oferecendo, desta forma, alternativas ao seu uso exclusivo, até então, como pedra de revestimento. Uma das alternativas seria o uso como agregado na construção civil, como material componente do concreto, a fim de produzir o mesmo com os rejeitos pulverulentos de quartzito.

Existem poucos estudos referentes à análise da reatividade potencial álcali-agregado (RAA) em rochas quartzíticas provenientes do Sul de Minas. O RAA é um fenômeno químico que ocorre entre hidróxidos alcalinos presentes no cimento com minerais reativos do agregado. O produto dessa reação em contato com a umidade gera expansões no concreto em diferentes intensidades e idades, podendo causar fissuras e deslocamentos na estrutura da edificação além de prejudicar a funcionalidade da mesma (HASPARYK, 2005).

As revisões bibliográficas analisadas comprovam que a reação álcali-agregado sofre uma grande variação de acordo com o teor de álcalis do cimento e as características do agregado utilizado.

Deste modo, levando em conta que o quartzito é considerado reativo aos álcalis do cimento, ainda é necessárias pesquisas que avaliem a influência da reação álcali-agregado nesse tipo de rocha quando utilizada como agregado em concretos, com base em métodos já consagrados para a avaliação da RAA em cimento Portland.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a potencialidade deletéria de rejeitos de quartzitos oriundos da cidade mineira de São Tomé das Letras-MG, utilizados como agregado, através do ensaio de expansibilidade em barras de argamassa, visando sua aplicação em obras de Engenharia Civil.

1.2 Objetivos específicos

Com os objetivos específicos pretende-se:

- Realizar uma amostragem de rejeitos de quartzitos para a utilização como agregado nas argamassas;
- Realizar a caracterização física do aglomerante;
- Realizar a caracterização física dos agregados;
- Determinar a potencialidade reativa dos agregados de quartzito com os álcalis do cimento CPV-ARI;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland

De acordo com Neville (2013), o Cimento Portland é um material fino com propriedades aglomerantes, que endurecem sobre a ação da água. O mesmo foi originado através de um construtor inglês, Joseph Aspdin em 1824.

A matéria-prima para a fabricação do cimento vem da extração de calcário e argila. Esses materiais são moídos, misturados em proporções adequadas e então levados a queima a uma temperatura de 1400 C, formando assim, o clínquer. Para tornar-se o cimento Portland comercializado, faz-se necessário ainda, uma mistura de gipsita (sulfato de cálcio) e nova moagem (NEVILLE, 2013).

Ao longo da produção do clínquer, o calcário, sofre o processo de calcinação, que compreende em aquecer o carbonato de cálcio (CaCO_3), formando o óxido de cálcio (CaO) e liberando na atmosfera CO_2 (IEMA, 2013). A Equação 1 representa este processo.

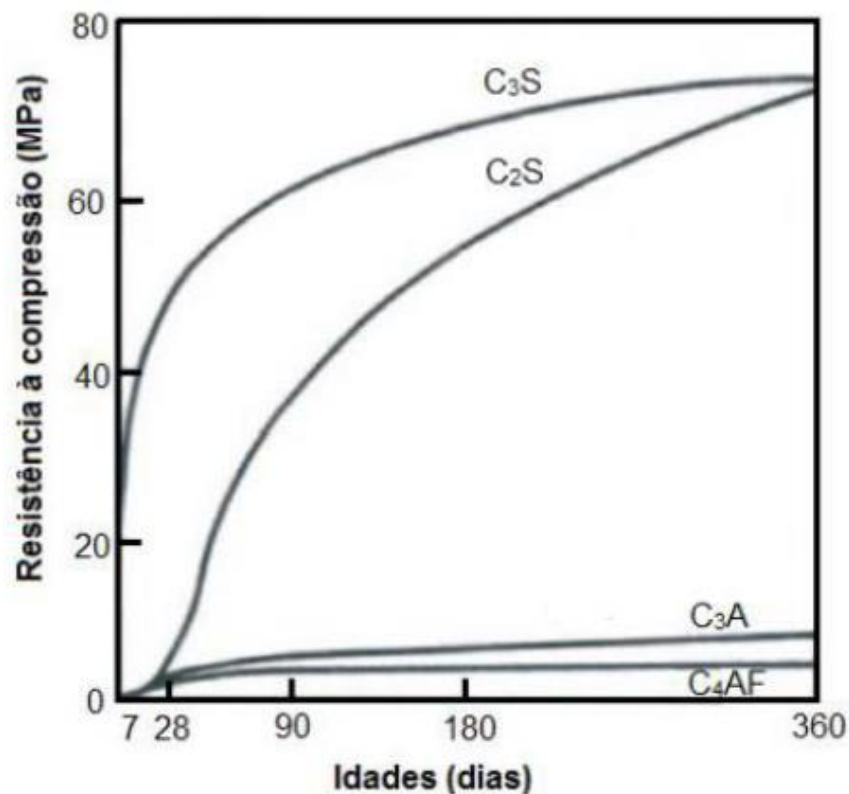


Depois da clinquerização, os compostos do cimento, CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, formam quatro minerais principais (AITCIN e MINDESS, 2011):

- Silicato tricálcico, 3CaO·SiO₂(C₃S) – Alita;
- Silicato dicálcico, 2CaO·SiO₂(C₂S) – Belita;
- Aluminato tricálcico, 3CaO·Al₂O₃ (C₃A) – Aluminato;
- Ferro-aluminato tetracálcico, 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ (C₄AF) - Ferrita.

A Figura 1 apresenta os principais produtos anidros produzidos pela reação, e responsáveis pelo desenvolvimento da resistência à compressão.

Figura 1 - Desenvolvimento da resistência a compressão dos compostos.



Fonte: Bogue (1995) apud Neville e Brooks (2013).

Quando hidratados os silicatos sofrem as reações, conforme Equação 2 e 3.





Forma-se então, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica do cimento, o C₃S nas primeiras idades e o C₂S nas maiores idades. Os aluminatos são responsáveis pelas primeiras reações, contudo apresentam baixos valores de resistência. Os sulfatos, como a gipsita, são adicionados para o controle da pega (NEVILLE *et al.*, 2013).

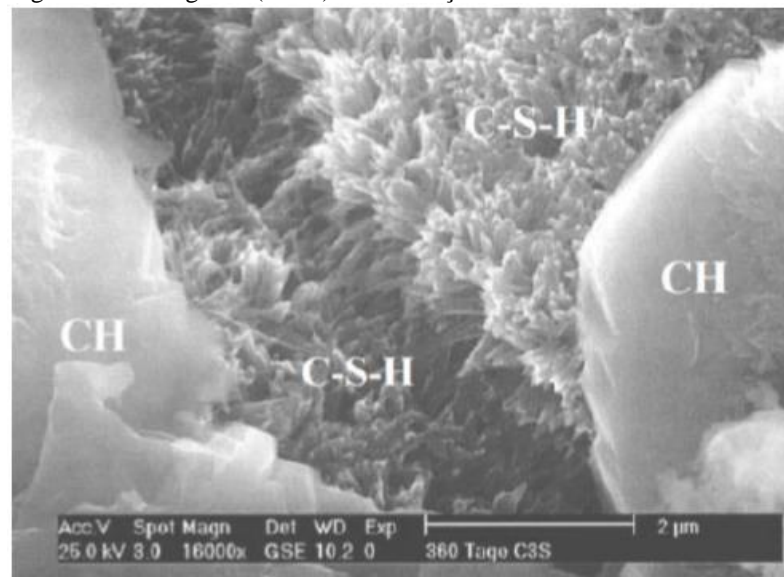
No início, a hidratação do cimento, é controlada pela taxa de dissolução das fases do clínquer e sulfato de cálcio, que apresenta alta evolução de calor. De acordo com que o cimento vai se hidratando a reação torna-se cada vez mais controlada pela taxa de nucleação e crescimento dos cristais das fases de hidrato formado, e por fim pela taxa de difusão de água e dos íons dissolvidos (TRINDADE, 2015).

Para Mehta e Monteiro (2014), a segunda fase de evolução de calor, ocorre entre 4 e 8 horas de hidratação. As reações químicas nesse período favorecem a formação de sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e preenchem os poros ocupados inicialmente pela água.

O material hidratado formado, depende da composição do cimento, da relação água/cimento, da temperatura e tempo de hidratação e da presença ou não de aditivos (TRINDADE, 2015). Pode-se dizer que as reações de hidratação do cimento são exotérmicas e dependem da composição e finura do material aglomerante (NEVILLE *et al.*, 2013).

Na Figura 2, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), é possível observar o composto C-S-H e a fase CH no processo de hidratação do cimento.

Figura 2 - Micrografia (MEV) da hidratação do cimento Portland aos 360 dias.



Fonte: Thomaz (2015).

No Brasil segundo o IBRACON (2008), os principais tipos de cimentos normatizados são: CP I – Cimento Portland comum, CP II, E, F ou Z Cimento Portland composto, CP III – Cimento Portland de alto forno, CP IV – Cimento Portland Pozolânico e o CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial.

De acordo com Prizskulnik (2005), a distribuição destes cimentos varia de acordo com a disponibilidade de recursos minerais de cada localidade do país. Como por exemplo, o estado do Rio Grande do Sul utiliza em ampla escala o CP IV – Cimento Portland Pozolânico, devido à grande disponibilidade de cinza volante proveniente das usinas termoelétricas movidas a carvão mineral presentes no estado.

2.1.1 Adições

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IEMA (2013), a produção do clínquer é responsável por 90% das emissões de CO₂ vindas da fabricação do cimento, tanto na calcinação do calcário, quanto da queima de combustíveis para aquecimento dos fornos.

Segundo Neville (2016), como alternativa para a diminuição de emissão de CO₂ na atmosfera, a indústria cimenteira incorpora adições de materiais pozolânicos no cimento, com o objetivo de melhorar as propriedades do sistema, reduzindo a porosidade da estrutura.

Para Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016), a cinza volante, também conhecida como cinza volante pulverizada é a cinza precipitada mecanicamente ou eletricamente, a partir dos gases de combustão de usinas termoelétricas a carvão mineral. As partículas de cinza volante são esféricas, o que já é benéfico no ponto de vista de utilização de água e tem finura bastante elevada. A maioria das partículas tem diâmetros muito pequenos e a sua superfície específica pelo método de Blaine varia de 250 a 600 m²/kg. Estes valores têm grande influência para a reação com o hidróxido de cálcio.

Segundo Carles-Gibergues e Hornain (2014), para ser eficaz, as cinzas volantes devem atender a parâmetros, como teor, finura, composição química e teor de álcalis variando entre 2 a 3%. É importante salientar que em dois casos elas não são eficazes, ou seja, na reação álcali-carbonato e para certas cinzas volantes com elevados teores de álcalis, sendo que o último pode aumentar as expansões devido a uma RAS (Reação Álcali Silicato).

Adições como escória de alto forno, cinzas volantes, fíler calcário, sílica ativa, conferem ao cimento características desejáveis, além de torna-se um material menos agressivo ao meio ambiente. A Tabela 1 demonstra os tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland.

Tipo	Sigla	Classe de resistência (Mpa)	Composição (%)				Norma Brasileira
			Clínquer + gesso	Escória de alto forno	Pozolana	Fíler	
Comum	CPI - S	32	90-95		1-5%	NBR 5732	
	CPI - S	40					
Composto	CP II - E	32 40	56-94	6-34%	0-10%	NBR 11578	
	CP II - Z	32					
	CP II - F	32 40					
Alto forno	CP III	32	30-65	35-70%	0-5%	NBR 5735	
		40					
Pozolânico	CP IV	32	45-85		15-50%	0-5%	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP ARI	-	95-100			0-5%	NBR 5733

Fonte: O Autor (2020).

2.1.1.1 Escória de alto forno

Para Carles-Gibergues e Hornain (2014), a escória de alto forno é um rejeito da indústria siderúrgica, mais especificamente na produção de ferro fundido ou ferro gusa. O rejeito é resfriado lentamente ao ar e não reage com água a temperatura ambiente. Quando moído em partículas muito pequenas e de pequeno diâmetro, o material tem características cimentantes e pozolânicas.

Ainda segundo os autores a relação entre a presença de escória e o surgimento da RAA (Reação Álcali Agregado), é inversamente proporcional, isto quer dizer que quanto maior a porcentagem de adição de escória de alto forno ao concreto, menor é a incidência de expansão relacionada a RAA, portanto a utilização de um cimento com presença desta adição é indicada devido a ser benéfico se na dosagem do concreto possuir algum agregado potencialmente inócuo.

Conforme Sabbag (2003), ensaios realizados por autores constataram que o teor ótimo de substituição da escória de alto forno na dosagem de concretos pode variar de 37 a 45%.

2.1.1.2 Fíler calcário

De acordo com Neville (2016), fíler é um material moído, que se aproxima da finura

do cimento Portland, que devido a suas propriedades físicas, enaltece algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, permeabilidade e massa específica, eles são quase sempre inertes quimicamente.

Conforme Munhoz (2007), a adição de fíler calcário ao cimento Portland, reduz os custos de produção, emitindo assim menores taxas de CO₂ e preservando o meio ambiente. Ela reduz o número de vazios devido ao melhor empacotamento das partículas da mistura, podendo-se dizer que o fíler serve como um material de enchimento para uma menor utilização de clínquer na composição dos cimentos onde essa adição se encontra presente.

2.2 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – (CPV-ARI)

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) é caracterizado por atingir altas resistências nos primeiros dias da aplicação. Isso se deve através da utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade. O mesmo possui uma alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias. O mesmo é largamente utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada (NEVILLE et al., 2013).

2.3 Reação álcali-agregado (RAA)

Segundo Hasparyk (2005), a reação álcali-agregado é a reação patológica que ocorre no concreto, entre os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento, e minerais reativos do agregado. Esta reação gera produtos capazes de expandir na presença de umidade, provocando fissurações, deslocamentos e podendo comprometer a estrutura.

Nesse sentido, a RAA vem sendo considerada como uma das manifestações patológicas responsáveis pela redução da durabilidade de estruturas de concreto, devido à expansão e consequente fissuração provocada nas mesmas, levando a diminuição de sua vida útil. Sendo necessário, portanto, a verificação antecipada do potencial reativo dos agregados e dos mecanismos que influenciam em sua expansão antes da aplicação em estruturas de grande porte (JIANWEN et al., 2013; BARROS et al., 2016; KUBAT; AL-MAHAIDI; SHAYAN, 2016).

A reação álcali-agregado foi estudada inicialmente por Stanton, em 1940, na Califórnia, quando identificou este processo como sendo uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis do cimento, o qual denominou reação álcali-agregado. De acordo com Stanton em constatações experimentais, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causar expansão e fissurações (STANTON, 1940).

De acordo com Mizumoto (2009), nos anos de 1940 e 1941, os Estados Unidos iniciaram pesquisas na área, devido à constatação da reação em barragens e obras de arte de rodovias. No mesmo período a Austrália iniciou um programa de pesquisas visando entender o mecanismo da RAA.

Segundo Silva (2007), a partir da década de 1990 foram elaborados novos métodos para a avaliação da reação álcali-agregado, devido à grande quantidade de casos reportados em todo o mundo. Entre estes, estão o método acelerado das barras de argamassa (ASTM C 1260) e o método dos prismas de concreto (ASTM C 1293).

No Brasil, segundo Andriolo (2000), as primeiras ocorrências da reação foram observadas no início da década de 1960, durante estudos na Barragem de Jupuíá, com 1,6 milhões de m³ de concreto. O autor levantou um número de 19 hidrelétricas afetadas pela RAA no território nacional até o ano de 2000. Além de danos em barragens, são reportados efeitos da reação em tomadas d'água, casas de força, vertedouros e eclusas. A Figura 3 mostra os efeitos da RAA em uma barragem nos EUA.

Figura 3 - Fissuração mapeada em barragem provocada pela RAA.



Fonte: ACRES (2005), apud TIECHER (2006).

Há também relatos da reação em pontes, viadutos, obras portuárias, termoelétricas, fundações de edifícios demonstrada pela Figura 4, e túneis (HASPARYK et al., 2006).

Figura 4 - Fissuração provocada pela RAA em bloco de fundação no Recife.



Fonte: ANDRADE (2006), apud COUTO (2008).

Para Mehta e Monteiro (2014), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer o concreto, resultando em perda de resistência, elasticidade e durabilidade.

A possibilidade de ocorrência da RAA está condicionada à interação entre a quantidade de álcalis disponíveis e a potencialidade reativa dos agregados. Contudo, para Tiecher (2002), influências externas como a umidade e temperatura são condicionantes importantes do processo deletério. O tempo necessário para notar indícios da RAA ou danos em uma estrutura depende de vários fatores, destacando-se o tipo e proporção dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel, a temperatura e a umidade, entre outros fatores.

2.3.1 Tipos de reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado pode ser dividida em duas formas principais, de acordo com os tipos de agregados que participam da reação. São eles: reação álcali-sílica e a reação álcali-carbonato. A reação álcali-silicato é reconhecida atualmente como um tipo lento de reação álcali-sílica (VALDUGA, 2002).

Para Tiecher (2006), essas classificações visam agrupar os minerais reativos pelo mecanismo de expansão provocado por eles, facilitando medidas de mitigação. Contudo a reação álcali-sílica e a reação álcali-silicato não apresentam grandes diferenças em seu

mecanismo de expansão, mas são diferenciadas pela complexidade e velocidade com que ocorrem.

A reação álcali-sílica é a mais comum, sendo também a que ocorre mais rapidamente. Nela, os hidróxidos do cimento reagem com alguns tipos de sílica presentes nos agregados e normalmente ocorre exsudação de gel composto por sílica e álcalis na superfície de concreto (VALDUGA, 2002; HASPARYK, 2006).

A reação álcali-silicato é definida pela ABNT NBR 15577-1: 2018 como um tipo específico de reação álcali-sílica, entre os álcalis do cimento e alguns tipos de silicatos.

De acordo com Valduga (2002), os silicatos causadores desta reação estão presentes em algumas rochas sedimentares como: argilitos, siltitos, folhelhos argilosos e grauvacas, metamórficas como: gnaisse e quartzitos, e magmáticas como os granitos. Embora a semelhança com a reação álcali-sílica, esta é mais lenta, devido aos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz, e à presença de quartzo deformado.

A reação álcali-carbonato é a reação em que agregados carbonáticos contendo calcário dolomítico reagem com os álcalis do cimento (VALDUGA, 2002). De acordo com a ABNT NBR 15777-1:2018 nesta reação, não ocorre a formação de gel expansivo, mas sim a chamada desdolomitização, que enfraquece a ligação entre pasta e agregado, provocando fissurações.

2.3.1.1 Reação álcali-sílica

De acordo com a ABNT NBR 15777-1: 2018 a reação álcali-sílica (RAS) é o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo.

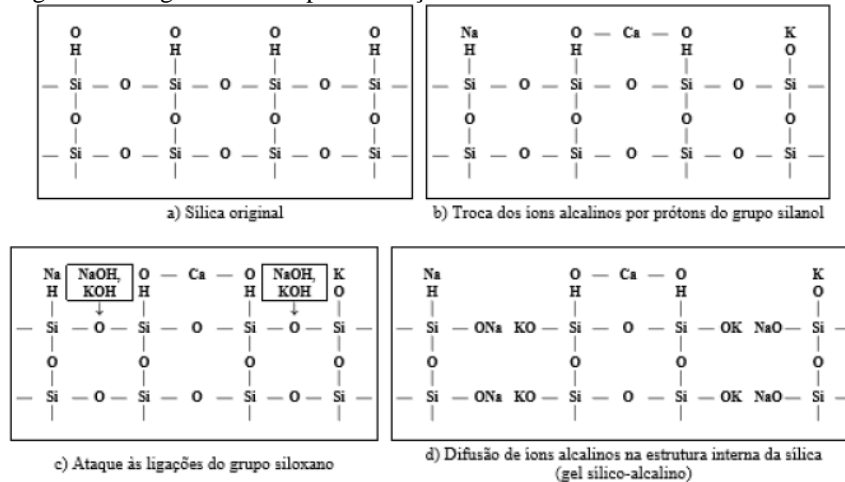
Para Diamond (1975), a reação álcali-sílica é mais comum do que a reação álcali-silicato e álcali-carbonato, sendo universalmente considerada como a reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados.

De acordo com Paulon, (1981), normalmente há exsudação do gel na superfície do concreto, na reação álcali-sílica, o qual é composto basicamente de sílica e álcalis. Este gel formado pela reação possui estrutura interna isotrópica, podendo se tornar algumas vezes anisotrópica, devido à cristalização parcial ou à presença de pequenas inclusões.

Segundo Sanchez et. al (2017), a reação origina-se a partir de duas etapas: primeiramente a RAS leva a formação do gel provocando tensões e fissuração no interior das partículas dos agregados nas idades iniciais, posteriormente ocorre a extensão das fissuras para

a matriz cimentícia. A partir disso, rapidamente ocorre o processo de expansão, em consequência da facilidade da propagação dessas fissuras. Nesse contexto Wang e Gillott (1991) exemplificam as etapas da RAS até a formação do gel expansivo, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Diagrama das etapas da reação álcali-sílica.



Fonte: Adaptado de Wang e Gillott (1991).

Wang e Gillott (1991) afirmam ao relatar essas etapas que, o grupo silanol (SiOH) presente na superfície das partículas de sílica (Figura 5 a), são atacados pelos hidróxidos alcalinos presentes principalmente no cimento como o cátion sódio (Na⁺), cátion potássio (K⁺) e/ou cátion cálcio (Ca⁺⁺) (Figura 5 b), levando a ocorrer a troca dos componentes de Ca⁺⁺ por prótons desse grupo, além de uma combinação do Na⁺ e do K⁺ aos íons hidroxilas (OH⁻). Após essas etapas no desenvolvimento da expansão do gel, ocorre a quebra das ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) devido a intervenção dos hidróxidos, resultando no surgimento de um grupo silanol na estrutura interna da sílica (Figura 5 c). Essas etapas acabam acarretando a difusão de íons alcalinos internamente nas partículas e consequentemente formando o gel sílico-alcálico (Figura 5 d).

Segundo Monteiro (2011), a reação álcali-sílica é considerada inócua se a concentração de cálcio for alta o suficiente para assegurar a contínua formação do gel não expansivo, uma vez que há o consumo de álcalis durante a reação, havendo uma redução na concentração alcalina. Contudo, se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que em presença de água, se expandirá e ocasionará fissuras quando as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento. Estas expansões acabarão somente quando os álcalis ou a sílica reativa forem consumidos.

2.3.1.1.1 Componentes do Gel

O gel gerado da reação álcali-silica é mencionado na literatura por um grande número de pesquisadores, que vêm estudando o produto da RAA, confirmando que o tempo, temperatura, adições minerais e tipo de cimento são os grandes responsáveis pela sua composição química (TRINDADE, 2015).

Afshinnia e Poursaee (2015) analisaram a composição química do gel sílico-alcálico presente em amostras moldadas com diversos cimentos, encontrando os componentes de Silício (Si), Cálcio (Ca), Sódio (Na) e Potássio (K) como os principais constituintes. Os produtos gerados da RAA com a utilização de diferentes tipos de cimento foram analisados, buscando identificar a composição química presente no gel, como pode se observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do gel sílico-alcálico em amostras moldadas com diferentes cimentos.

Compostos (%)	Cimentos			
	CPV - ARI	CPV - ARI RS	CP II - Z	CP IV
SiO_2	48,20	48,79	57,34	42,85
CaO	44,68	39,81	18,65	41,66
Na_2O	4,03	5,98	19,36	6,63
K_2O	0,21	1,02	0,83	0,07
Al_2O_3	1,41	3,32	3,13	6,43
MgO	0,14	0,25	0,01	0,71
SO_3	0,02	0,00	0,00	0,02
Fe_2O_3	0,19	0,84	0,22	1,64
CaO/SiO_2	0,93	0,82	0,33	0,97
Na_2O_{eq}	4,17	6,65	19,91	6,67
Expressão Final (%)	0,30	0,29	0,19	0,08

Fonte: Adaptado de Tiecher (2006).

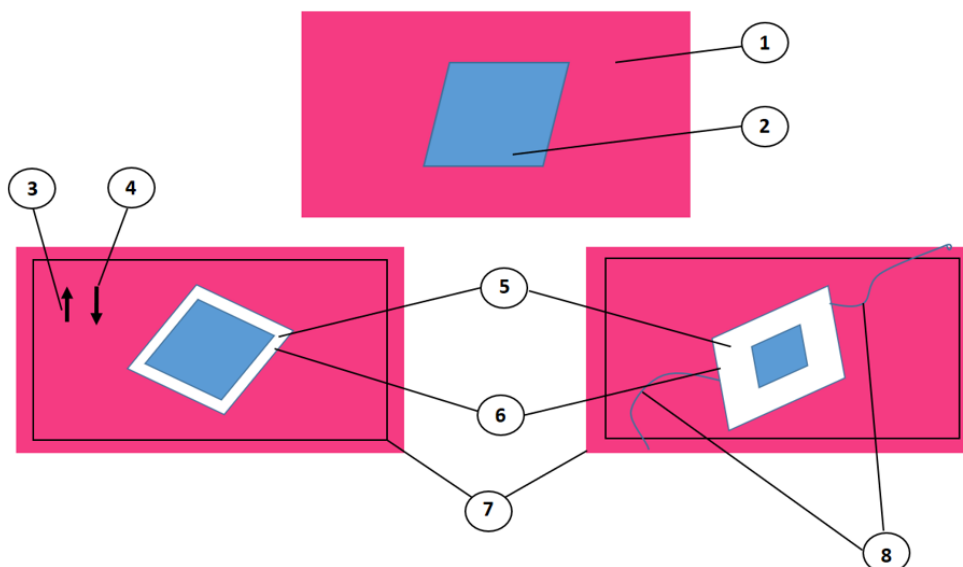
A Tabela 2 demonstra uma análise detalhada dos resultados encontrados por Tiecher (2006), apresentando os componentes químicos presentes no gel através de ensaio de MEV e análises por espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS). Tiecher (2006) e Afshinnia e Poursaee (2015) vêm utilizando como parâmetro a relação de CaO/SiO_2 presente no gel, para avaliar os produtos da RAA. Segundo os autores, quanto menor for essa relação, mais expansivo e prejudicial será o gel. As relações com valores superiores aos de 1,5 o gel pode ser considerado como produto da hidratação do cimento Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) e não como gel originado da RAA.

Para Tiecher (2006), na Tabela 2 é possível observar relações de óxido de cálcio/sílica (CaO/SiO_2) abaixo de 1,5, logo demonstra ser produtos da RAA, entretanto, ao contrário do que se esperava, não fica claro uma associação entre o aumento das expansões e o decréscimo da relação. Deste modo, Tiecher (2006), ao avaliar os resultados encontrados para os géis da RAA (Tabela 2), observou que todos os géis apresentavam relações menores que 1,5.

2.3.2 Reação álcali-carbonato

O agregado calcário propicia a ocorrência da reação álcali-carbonato (RAC). Essa manifestação se origina pela reação de alguns agregados dolomíticos e hidróxidos alcalinos contidos no cimento, provocando a sua desdolomitização (HOBBS, 1988; LUCCA, 2010). A Figura 6 representa as etapas dessa reação.

Figura 6 - Etapas da reação álcali-carbonato.



1) Pasta de cimento; 2) Dolomita; 3) Migração dos íons hidróxidos através dos poros até a superfície da dolomita, reagindo com a dolomita; 4) Direção da difusão dos íons CO_3^{2-} ; 5) Formação da calcita e brucita; 6) Vácuo; 7) Tamanho original; 8) Fissuração.

Fonte: Adaptado de Deng e Tang (1993).

A Figura 6 representa o processo da reação álcali-carbonato, e pode-se observar que não ocorre a formação do gel expansivo, como normalmente se forma na reação álcali-sílica e álcali-silicato (LUCCA, 2010; CHIARO, 2012).

A desdolomitização trata-se da reação em que a dolomita reage com os hidróxidos alcalinos, gerando a calcita, brucita e carbonato (CO_3^{2-}). Na qual os minerais de calcita e brucita que são gerados são finos e envolvidos de vácuo. Em seguida, o CO_3^{2-} reage com a portlandita,

produzindo novas calcitas e hidróxidos alcalinos. A reação termina quando ocorre o consumo total da dolomita (DENG; TANG, 1993).

2.3.3 Condições para a ocorrência da RAA

Segundo Paulon (1981), diversos fatores influenciam na reação álcali-agregado, pois o concreto é um agrupamento muito complexo de diferentes tipos de materiais com características físicas diversas, com condições ideais para a reação, mesmo que se utilize materiais não reativos ou cimento com baixo teor de álcalis.

Para Hasparyk (1999), os principais fatores que desencadeiam a reação são: cimento e agregado relacionado a propriedade dos materiais, umidade, temperatura, influência externas como tensões de compressão e o tempo.

De acordo com Lopes (2004), para que a RAA ocorra em estruturas de concreto são indispensáveis os seguintes fatores: concentração de hidróxidos alcalinos suficientes na solução dos poros do concreto para reagir com o agregado, agregados reativos, e umidade suficiente. Na ausência de qualquer um desses três fatores, a reação não ocorrerá.

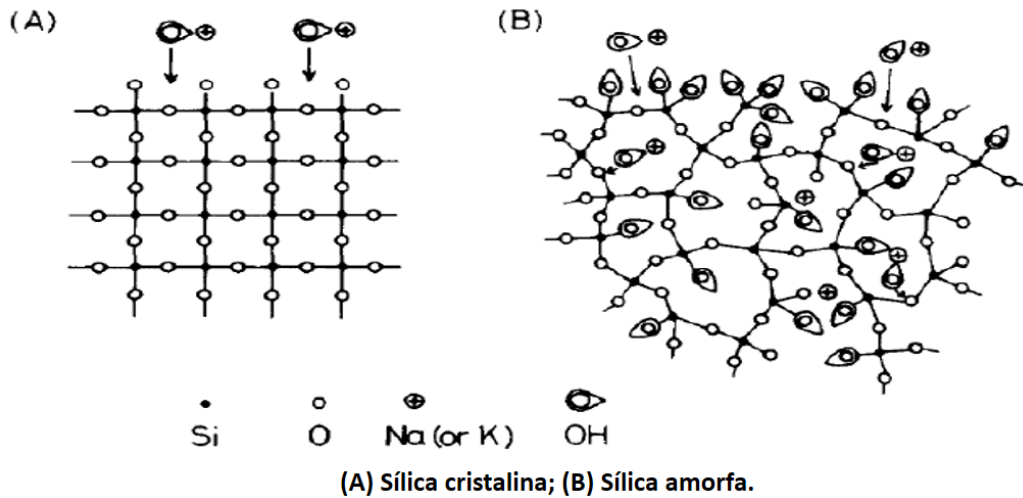
2.3.3.1 Mecanismos de Expansão

De acordo com Diamond (1975), o mecanismo de expansão oriundo da reação álcali-silica e álcali-silicato é comparado com a pressão mecânica exercida pelos produtos da reação no estado semi-sólido ou sólido, causando expansões e provocando o surgimento de fissuras.

Para Valduga (2002), há uma relação entre a quantidade de álcalis solúveis presentes nos concretos e a quantidade de álcalis presentes na solução porosa, sendo essas hidroxilas que acabam atacando a superfície dos componentes de sílica. Esse fato é explicado por Helmuth e Stark (1992), nos seus estudos é relatado que quando os componentes de sílica são bem cristalizados, as falhas ocorrem apenas na superfície externa do agregado, porém, nos casos em que os componentes de sílica estão fracamente cristalizados, a estrutura do agregado apresenta maior quantidade de falhas, podendo ocasionar a desagregação da rede inteira.

Dentro desse contexto, Dent Glasser e Kataoka (1981), estudaram a química presente na RAA, e representaram as formas de reação dos hidróxidos com a superfície dos agregados, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Ataque das hidroxilas à sílica.



Fonte: Adaptado de Dent Glasser e Kataoka (1981).

A Figura 7 (A) representa o ataque dos hidróxidos provenientes da reação de hidratação do cimento apenas na superfície dos agregados bem cristalizados, já a Figura 7 (B), mostra os hidróxidos reagindo quando em componentes de sílica pobremente cristalizados ou amorfos.

Depois de ocorrer a reação, o produto gerado pela RAA se apresenta na formação de um gel expansivo em torno e no interior das partículas de agregado, que no momento que absorve a água, exerce uma pressão de dentro para fora na matriz cimentícia provocando a fissuração da estrutura, como pode ser observado na Figura 8 (JIANWEN et al., 2013).

Figura 8 - Fissuras mapeadas em um pavimento de concreto.



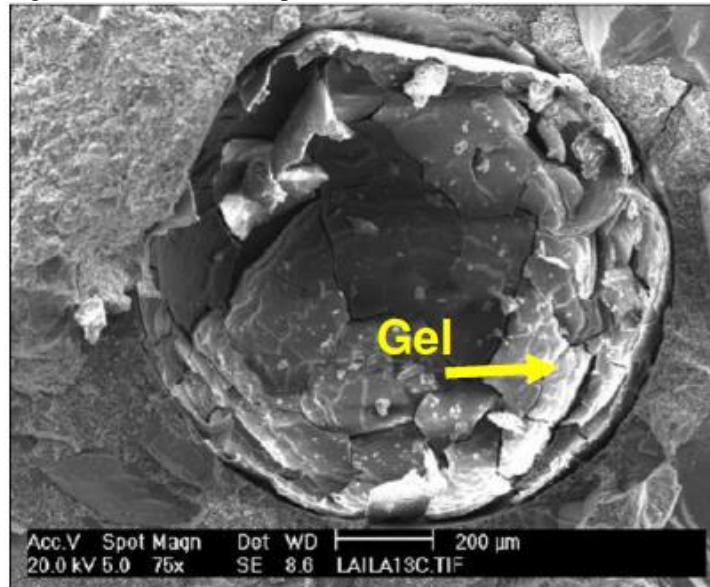
Fonte: Adaptado de Sarkar et al. (2004).

Na Figura 8, acima as fissuras são apresentadas de forma mapeada na superfície, e são espaçadas entre si, provocando deslocamentos nos elementos estruturais, simultaneamente a quebra de frações na superfície do concreto (SILVEIRA, 2007; RIBEIRO et al., 2012; OWSIAK; STAWETA; CZAPIK, 2015; PORTELLA et al., 2017).

Normalmente o gel é depositado nos poros do concreto, apesar de possuir diversas origens, uma das principais causas da ocorrência dessa reação é devido os componentes dos agregados utilizados (TIECHER, 2010; JIANWEN et al., 2013).

Na Figura 9, é exibido a imagem de uma análise microscópica em que pode-se observar o gel dentro dos poros do concreto.

Figura 9 - Gel incluído no poro da matriz cimentícia.



Fonte: Adaptado de Valduga (2002).

Contudo é importante destacar que, não são todos os produtos formados pela RAA que provocam tensões internas, para isso é necessário a presença de alguns componentes específicos.

2.3.4 RAA no cimento Portland

Atualmente são tomadas diversas medidas que diminuem a ocorrência da RAA, na Inglaterra uma das principais medidas recomendadas é a utilização de cimento Portland comum com adições, pelo menos 50% de escória granulada de alto-forno ou 25% de cinza volante, garantindo que o teor de álcalis fornecido ao concreto não ultrapasse $3,0 \text{ kg/m}^3$, (TIECHER, 2006).

Segundo Tiecher (2006) as adições pozolânicas impedem a reação álcali-agregado pois ao reagirem com o hidróxido de cálcio do cimento Portland provocam uma diminuição do pH da solução dos poros, inibindo assim a reação.

Para Diamond (1984) apud Tiecher (2006), outro fator que combate a RAA com adições minerais é que a sílica presente nestas reage com os álcalis do cimento Portland antes da sílica presente nos agregados do concreto, e esta reação que ocorre primeiramente não é prejudicial, pois o produto silicioso, finamente dividido, é inofensivo por não acarretar em expansões.

2.3.5 Métodos para avaliação da RAA

De acordo com Tiecher (2006), vários estudos no campo da reação álcali-agregado vêm sendo realizados, com diversos métodos encontrados na literatura. Contudo, ainda não foi definido um método rápido e eficaz para a sua avaliação. Desta forma, na maioria dos casos é adotado um conjunto de ensaios a fim de verificar a reatividade dos agregados.

Segundo Valduga (2002), os ensaios para avaliação da RAA podem ser classificados em dois tipos: métodos que avaliam unicamente o agregado (análise petrográfica, método Osipov, método químico, microscopia eletrônica de varredura), e métodos que avaliam o conjunto cimento/agregado (método das barras, método acelerado, método dos prismas de concreto).

2.3.5.1 Análise petrográfica

O método da análise petrográfica é um método utilizado para se obter informações qualitativas sobre os minerais e a natureza do agregado ou em amostras de concreto, que apresentou a RAA, ou que ainda possa sofrer a reação álcali-agregado.

Para a investigação do agregado, são utilizadas as seguintes técnicas:

- Observações macroscópicas e microscópicas através de microscopia estereoscópica (luz refletida), microscopia óptica (luz transmitida) e microscopia eletrônica;
- Técnicas analíticas, utilizadas para caracterizar a textura e forma cristalina da sílica nas partículas dos agregados, como difração de raios-x e espectroscopia de infravermelho.

As amostras dos agregados ou concretos deverão ser confeccionadas em lâminas delgadas, com aproximadamente 30 μm de espessura, para serem observadas através do microscópio eletrônico polarizador de luz transmitida.

Em concretos, além de classificar os agregados, a análise petrográfica determina a ocorrência de feições ou características provenientes da reação álcali-agregado, tais como gel nos poros, bordas de reação ao redor dos agregados e presença de microfissuras.

Contudo os resultados da análise petrográfica não traz a informação se um determinado agregado causará expansões deletérias no concreto, sendo assim deverá ser utilizado outro método de ensaio.

Segundo a ABNT NBR 15577-1:2018, a análise petrográfica e a caracterização mineralógica isolada não são suficientes para avaliar a expansão potencial deletéria devido à reação álcali-agregado, embora forneçam informações importantes para essa avaliação (KUPERMAN et. al.2005).

2.3.5.2 Método Osipov

De acordo com Valduga (2002), o método Osipov foi criado pelo Engenheiro Albert Osipov, do Institute Hidroproject de Moscou, e é também denominado de método térmico.

O ensaio consiste na submissão das partículas de agregado, com diâmetro entre 20 mm e 50 mm à temperatura aproximada de 1000°C durante 60 segundos. Desta forma, os agregados, que apresentarem fragmentação de suas partículas após o ensaio, são classificados como sendo reativos frente aos álcalis.

Este método não é aplicável aos agregados miúdos e os agregados ensaiados que não sofrem fragmentação, não são classificados como não reativos.

2.3.5.3 Método químico

Segundo Andriolo (1997), Richard Mielenz desenvolveu esse método, também conhecido como ensaio químico rápido, entre os anos de 1947 e 1952, tendo sido empregado no mapeamento de agregados deletérios em regiões dos Estados Unidos.

O método é padronizado pelas normas C 289 (ASTM, 2003) e na antiga NBR 9774 (ABNT, 1987), na qual foi cancelada em dezembro de 2008.

De acordo com Paulon (1981), esse método é empregado na avaliação potencial álcali-silica de um agregado, com base na relação entre a sílica dissolvida (Sd) e a redução de alcalinidade (Rc) da solução de NaOH, a qual o agregado é submetido. O ensaio consiste basicamente na imersão de uma pequena fração de agregado passante na peneira 0,3mm e retida na peneira 0,15mm, durante 24 horas, em uma solução de NaOH, à concentração de 1N (um

normal) e em temperatura de 80°C. Em seguida, através de processos de gravimetria ou fotometria, a solução é titulada determinando-se a redução de sua alcalinidade, assim como, após a filtração é determinada quantidade de sílica dissolvida. Os resultados obtidos classificarão o agregado como sendo inócuo, potencialmente deletério, ou deletério.

A velocidade de execução do ensaio é sua principal vantagem. Porém, na maioria das vezes os resultados não são confiáveis, sendo necessário uma avaliação complementar por meio de outros métodos.

2.3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um método que possibilita classificar os diversos tipos de géis formados pela RAA. Além disso pode-se também identificar as bordas de reação na interface da pasta com o agregado e a existência de gel álcali-silicoso disperso na argamassa, poros e fissuras do agregado.

Neste método são avaliadas amostras de concreto ou argamassa que passaram por ensaios para a avaliação da reatividade potencial do agregado ou até mesmo amostras de obras que possuem indícios de expansão.

De acordo com Hasparyk (1999), as amostras são submetidas à análise visual através da lupa estereoscópica para identificação dos pontos que serão analisados. Após análise visual, as amostras são analisadas através do microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se, em conjunto, a técnica de espectrometria de energia dispersiva, que possibilita uma correlação entre as diversas morfologias características dos produtos encontrados e seus componentes químicos.

É um método muito eficiente, o mesmo permite analisar em grandes ampliações e possibilita a identificação precisa da morfologia dos produtos da reação álcali-agregado, podendo verificar a deterioração da estrutura devida à concentração dos produtos e classificar-se os vários tipos de géis formados.

2.3.5.5 Métodos acelerado em barras de argamassa

O Método Acelerado de Barras de Argamassa é normatizado no pela ASTM C-1260 (2007) e ABNT NBR 15577-4:2018, e pelo motivo da sua velocidade de avaliação, o método mais utilizado no mundo (SANCHEZ, 2008).

De acordo com Thomas et al., (2006), o método consiste em executar barras de argamassas com os mesmos materiais empregados no concreto e submetê-las a um banho térmico de 80°C de solução de hidróxido de sódio (NaOH) por 30 dias. Os resultados de expansão são avaliados após 16 dias, contados a partir da data da confecção das barras.

A ASTM C-1260 (2007) define um limite de expansão de 0,20% aos 16 dias, acima do qual a reação é considerada deletéria. Expansões entre 0,10% e 0,20% são classificadas como potencialmente deletérias, e abaixo de 0,10%, como inócuas. Já a ABNT NBR 15577-4 (2018) classifica como potencialmente inócua a reação com expansão abaixo de 0,19% aos 30 dias, e acima desse limite como potencialmente reativa.

2.3.5.6 Métodos dos prismas de concreto

O Método dos Prismas de Concreto é normatizado pela ASTM C1293 (2008) e pela ABNT NBR 15577-6: 2008 (DAHER, 2009).

O método consiste em avaliar a disposição de um agregado (gráudo ou miúdo) em participar ou não da reação deletéria, por meio da variação do comprimento de prismas de concreto. Também pode ser utilizado na investigação de combinações de agregados miúdos e gráudos para uma combinação específica de concreto, assim como da combinação com o cimento e eventuais adições. Neste, são confeccionados prismas de concreto mantidos em ambiente com umidade relativa de 95%, à temperatura de 38 °C. Devem ser feitas medições de expansões aos 7, 28 e 56 dias, e posteriormente medidas mensais até o período de 12 meses (ABNT NBR 15577-6: 2018).

De acordo com as normas ASTM C1293 (2008), ABNT NBR 15577-6: 2018 é caracterizado como inócua a reação que apresentar expansão inferior a 0,04% após 12 meses, e como potencialmente reativa a que ultrapassar esse valor.

2.4.5.7 Métodos acelerado dos prismas de concreto

De acordo com Thomas et al. (2006), o ensaio consiste numa variação do método dos prismas, no qual os prismas são submetidos à temperatura de 60°C, ao invés de 38°C, reduzindo-se o tempo de ensaio. O método propõe reduzir o tempo de sua realização, passando de 12 meses para 3 meses, através da aceleração da taxa de expansão pelo aumento da temperatura para 60 °C.

Este método tem como vantagens a possibilidade de avaliação de agregados graúdos ou miúdos, ou de uma combinação de ambos, além da confiabilidade, devido às condições semelhantes às de campo.

Para a realização do ensaio devem ser adotados os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 15577-7:2018.

2.4 Rochas

Segundo o Manual de Agregados para Construção Civil (2009), rocha é um material consolidado composto por um conjunto de minerais resultantes de um processo geológico determinado. Pode ser formada por um ou mais minerais, dispostos segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante sua formação. Pode também ser formada por material não cristalino como o vidro vulcânico e por material sólido orgânico como o carvão. Quanto à origem, as rochas se classificam em ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas. Dentro desses grupos, de forma geral, a textura e a composição mineral são os critérios para a identificação dos diferentes tipos de rochas ou tipos litológicos.

2.4.1 Rochas Ígneas ou Magmaicas

As rochas magmáticas são formadas a partir da consolidação do magma em profundidade (rocha ígnea plutônica) ou em superfície (rocha ígnea vulcânica). O magma é uma fusão silicatada, contendo gases e elementos voláteis, gerada em altas temperaturas no interior da Terra. Quando o magma resfria lentamente, usualmente em profundidades de dezenas de quilômetros, ocorre a cristalização de minerais formando as rochas plutônicas cuja granulação varia de fina (milimétrica) à grossa (até 3 cm), (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

As rochas magmáticas extrusivas são formadas quando o magma resfria rapidamente, normalmente próximo a superfície da terra, resultando em uma rocha de granulação muito fina ou de textura vítrea, ou seja, os minerais não são identificáveis a olho nu (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

Existem várias classificações para as rochas ígneas baseadas na composição química das rochas, percentagem de minerais essenciais, granulometria etc. (Press et al, 2006). Na Tabela 3, é apresentada a classificação sugerida pelo IAEG (1981) e sintetizada em Frascá e Sartori (1996).

Tabela 3 - Classificação das rochas ígneas

Rochas	Ácidas (> 66% SiO₂)	Intermediárias (66-52% SiO₂)	Básicas (52-45% SiO₂)	Ultrabásica (<45% SiO₂)
Plutônica	Granito	Sienito	Gabro	Peridotito e Piroxenito
Vulcânica	Riolito	Andesito	Basalto	

Fonte: Adaptada de IAEG, 1981 in Press et al, 2006.

As rochas plutônicas ácidas são compostas essencialmente por quartzo e feldspatos, e a coloração é clara. As rochas plutônicas básicas são em geral compostas por minerais ferromagnesianos (anfíbólios, olivinas e piroxênios) e plagioclásios. Em geral, são rochas mais escuras e mais densas (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

2.4.2 Rochas Sedimentares

De acordo com o Manual de Agregados para Construção Civil (2009), as rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, ou seja, material resultante da ação do intemperismo, erosão e posterior transporte de uma rocha preexistente, ou da precipitação química ou ainda da ação biogênica. São geralmente classificadas em detríticas, químicas ou bioquímicas segundo sua origem.

As rochas detríticas são em geral denominadas, segundo o tamanho dos grãos (Pettijohn, 1975), em: conglomerado e brecha (mais de 25% dos grãos com tamanho >2 mm), arenito (mais de 50% dos grãos com tamanho entre 2 e 0,06 mm), siltito (0,06 e 0,004 mm) e argilito (<0,004 mm). Folhelho é a denominação para siltito e argilito com maior grau de fissilidade. Essas rochas são muitas vezes friáveis devido à baixa coesão dos constituintes, interferindo diretamente nas características mecânicas dessas rochas (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

As rochas de origem química são os calcários e os dolomitos formados por mais de 50% de minerais carbonáticos (calcita ou dolomita). Podem ser classificados segundo o conteúdo mineralógico (calcário dolomítico, dolomito calcítico) e a granulometria (calcirudito, calcarenito, calcissiltito, calcilutito). São muito utilizadas como matérias-primas para as indústrias cimenteira, vidreira, siderúrgica, corretivo de solo entre outras. As formações ferríferas apresentam alternância de bandas ricas em quartzo e em óxido de ferro, sendo a fonte de minério de ferro explorado no Brasil (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

As rochas derivadas de processos químicos/bioquímicos são: evaporitos (precipitação de sais como halita e gipsita), cherts (precipitação de sílica), fosforitos (fosfatos), diatomitos (formados da acumulação de carapaças silicosas de diatomáceas) e carvão (formado pela decomposição de restos de vegetais que foram soterrados), (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

2.4.3 Rochas Metamórficas

As rochas metamórficas podem ser formadas a partir de rochas ígneas, sedimentares ou mesmo metamórficas, preexistentes, submetidas a novas condições de pressão e temperatura. Quando as rochas através de processos geológicos são submetidas a condições diferentes (temperatura e pressão) das quais foram formadas, ocorrem modificações denominadas de metamorfismo. O efeito do metamorfismo progressivo é a geração de foliações, recristalização dos minerais e em condições extremas, a fusão dos constituintes. A textura metamórfica e estruturas presentes são determinantes para a utilização das rochas como agregados (MANUAL DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2009).

Dentre as principais rochas metamórficas, estão: a gnaisse, o xisto e filito, a ardósia, o mármore e quartzito.

2.4.4 Principais rochas potencialmente reativas

Como foi visto anteriormente, no tópico 2.4, a RAA pode ser classificada em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido.

A classificação do agregado quanto à RAA é enquadrado como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo, ou seja, a classificação do agregado é feita de forma qualitativa (ABNT NBR 15577-3:2018).

Sabe-se que o agregado natural provém das rochas, sendo essas últimas formadas por minerais. Os minerais por sua definição, são substâncias inorgânicas, possuem estrutura cristalina e composição química definida e sua gênese é condicionada, naturalmente, por processos geológicos (ABNT NBR 15577-3:2018). Porém, a depender da condição geológica, esses minerais podem assumir caráter reativo, que para a norma ABNT NBR 15577-3:2018 é denominada fase deletéria. Essas fases deletérias serão detalhadas, a seguir.

2.4.4.1 Texturas de exsolução reativas

- **Mirmequita:** É um tipo de textura de exsolução comum em granitos, bem como rochas que sofreram metamorfismo em alto grau e milonitos (rochas de zonas de falha caracterizadas por alto estiramento dos seus minerais). A mirmequita resulta de um intercrescimento de quartzo e plagioclásio (usualmente oligoclásio) no qual o plagioclásio hospeda o quartzo, sendo este último caracterizado em forma vermicular ou em “gotas” (ABNT NBR 15577-3:2018). A Figura 10, abaixo, ilustra um exemplo de mirmequita.

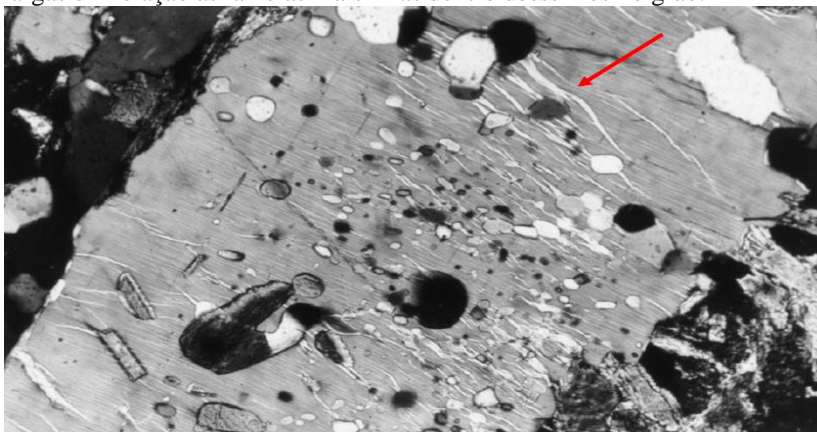
Figura 10 - Textura de exsolução do tipo mirmequita, indicado pela seta vermelha. Notar o quartzo vermicular ou "em gotas" do quartzo, característico das mirmequitas.



Fonte: <http://petrignea.wordpress.com>. Acesso em 07 jul. 2020.

- **Perlita:** Possui textura de exsolução também encontrada em rochas graníticas, assim como em gnaisses. É caracterizada pelo intercrescimento de plagioclásio (albita, mais comumente) em feldspato potássico (sendo o microclínio a variação de feldspato potássico mais comum), sendo esse último o hospedeiro. Porém, a variação reativa desse tipo de textura denomina-se perlita “em chama” (ABNT NBR 15577-3:2018). A Figura 11 abaixo, ilustra essa variação de perlita.

Figura 11 - Perlita do tipo "em chama". A seta vermelha indica as lamelas esbranquiçadas mais largas em relação às lamelas mais finas dentro desse mesmo grão.



Fonte: Vernon (1999).

- **Opala:** Forma hidratada de sílica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), com estrutura cristalina pouco definida. Comumente encontrado em rochas sedimentares como *cherts* e como principal componente de diatomitos (ABNT NBR 15577-3:2018).
- **Calcedônia:** É o principal constituinte de *cherts* e é encontrada tipicamente em areias e cascalhos (ABNT NBR 15577-3:2018).
- **Zeólitas:** Termo genericamente usado para os minerais aluminossilicatos hidratados de elementos alcalino e alcalino-terrosos. Encontrados tanto como material de preenchimento de fissuras e cavidades em rochas ígneas quanto ocorrem como produto de alteração hidrotermal (tipo de processo metamórfico). Os minerais considerados deletéreos para a RAA são: heulandita, natrolita e laumontita pelo fato de serem capazes de liberar álcalis no concreto (ABNT NBR 15577-3:2018).
- **Vidro vulcânico:** É considerada a parte amorfa, não cristalizada, das rochas vulcânicas (ABNT NBR 15577-3:2018).
- **Vidro devitrificado:** Devido a processos magmáticos tardios ou processos intempéricos, o resultado são material cristalino, comumente feldspatos e argilominerais (ABNT NBR 15577-3:2018).
- **Quartzo deformado:** É o quartzo submetido por deformações intracristalinas através de processos tectônicos. Nesse termo entra o quartzo que apresenta extinção ondulante, bandas de deformação e subgrãos (ABNT NBR 15577-3:2018).
- **Quartzo microgranular:** Todo quartzo cujo tamanho seja menor que 0,15mm (ABNT NBR 15577-3:2018).

Segundo Kihara (1986), apesar das fases deletérias supracitadas oferecerem potencial risco reativo, a RAA é um processo ainda complexo de total compreensão, havendo interferências diversas. Mesmo assim, alguns autores buscaram compreender qualitativamente que fases minerais são mais propensas à patologia.

Andrade *et al* (2006) realizaram um estudo associando a reatividade potencial de agregados. As fases reativas analisadas foram: quartzo com extinção ondulante moderada a forte, quartzo microcristalino e feldspatos alcalinos. Foram conduzidos ensaios de expansão, cujos resultados revelaram comportamento inócuo para as amostras que apresentaram apenas extinção ondulante.

Wigun (1995) realizou um estudo com variados tipos de rochas capazes de promover a RAA, avaliando suas feições microestruturais utilizando testes modificados com barras de argamassa. Esse mesmo autor concluiu que a presença de quartzo microcristalino e o desenvolvimento de subgrão foram as feições que mais contribuiu para a reatividade das rochas analisadas.

Prado (2008) avaliou petrograficamente e experimentalmente agregados afetados por deformação tectônica, oriundos de zona de cisalhamento, atentando aos diferentes padrões texturais e mineralógicos reativos. Concluiu-se que o fator mais relevante para o desencadear da RAA foi a presença do quartzo microcristalino, resultante do tectonismo, enquanto que as rochas contendo apenas quartzo com extinção ondulante são muito menos susceptíveis de desenvolvimento dessa patologia do concreto, pois agem de forma mais lenta, possivelmente explicada por possuírem menos defeitos cristalográficos do que o quartzo microcristalino e subgrão.

Conclui-se que, ainda é muito complexo determinar com exatidão os agregados potencialmente reativos.

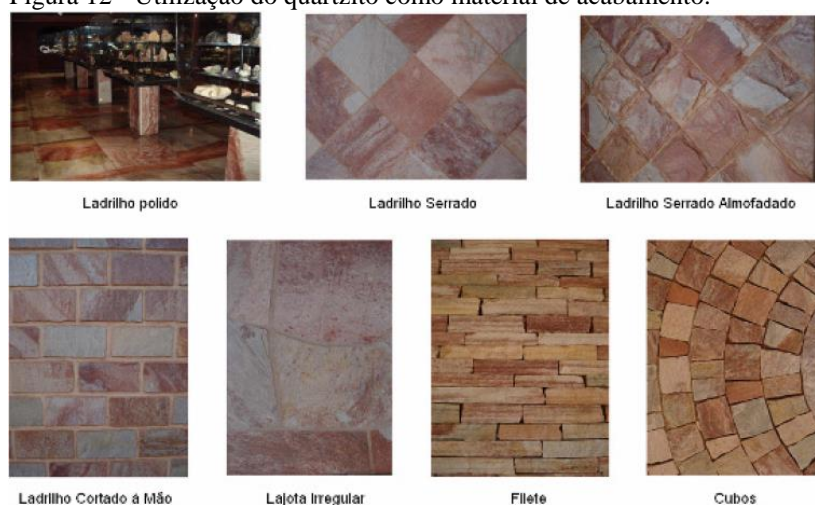
2.5.4.1.1 Quartizitos

Quartzitos são rochas metamórficas provenientes do metamorfismo dos arenitos, cujo principal componente é o quartzo (mais de 75%) e minerais micáceos em menor quantidade, como a moscovita, biotita, sericita, turmalina, dumortierita, entre outros.

Segundo Popp (1998), devido a elevada dureza dos quartzitos, quando quebrados os minerais de quartzo são seccionados ao meio, já os arenitos apenas se deslocam, permanecendo inteiros. Uma rocha ornamental é uma rocha utilizada decorativamente, por exemplo em escultura ou como material de construção. O quartzito é utilizado na construção civil como

revestimentos de pisos e paredes, sendo muito atrativo pelas variedades de cores existentes, como o branco, amarelo, róseo e os verdes-escuros com manchas avermelhadas. O quartzito possui também propriedades atrativas, como alta resistência mecânica, antiderrapante, alta resistência química e ao desgaste e isolante térmico. A Figura 12 exibe a utilização de placas de quartzitos como revestimento de pisos e paredes na construção civil e a suas diversidades de cores.

Figura 12 - Utilização do quartzito como material de acabamento.



Fonte: Pires (2007).

De acordo com o Anuário Mineral (DNPM, 2006), Minas Gerais apresenta uma grande reserva de quartzito a ser lavrado. O estado possui 446.424.975 m³ de reservas medidas de quartzito ornamental. Grande parte dessa reserva está na região da Serra da Canastra, nos municípios de Alpinópolis, Capitólio, Sacramento e São João Batista da Glória. Os valores das reservas medidas, indicadas, inferidas e lavráveis, bem como as cidades produtoras são indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Reservas de quartzito ornamental em Minas Gerais.

UNIDADES DA FEDERAÇÃO/ MUNICÍPIOS	RESERVAS (1)			
	Medida (m ²)	Indicada (m ²)	Inferida (m ²)	Lavrável (m ²)
Minas Gerais	446.424.975 m ²	524.421.292 m ²	381.275.891 m ²	789.389.006 m ²
Alpinópolis	26.433.689	23.051.363	58.719.140	26.433.689
Capitólio	5.517.794	6.180.902	34.100.201	5.517.794
Carmo do Rio Claro	105.734.000	*	*	105.734.000
Guapé	144.273.823	423.855.275	209.341.400	501.940.245
Luminárias	11.572.987	4.822.848	*	11.572.987

Mariana	1.815.615	2.204.763	2.925.972	1.817.330
Muriaé	7.999	17.964	*	7.999
Piui	27.399.767	3.600.000	5.600	27.399.767
Sacramento	22.290.000	*	*	22.290.000
São João Batista do Glória	14.785.625	4.378.012	9.863.750	14.785.625
São José da Barra	1.213.947	2.852.073	4.682.066	1.213.947
São José do Goiabal	3.189.766	14.179.335	17.369.101	3.473.820
São Tomé das Letras	82.189.963	39.278.757	44.268.661	67.201.803

Fonte: DNPM (2006).

2.4.4.1.1.1 Extração do quartzito

Segundo Gomes (2000), nas pedreiras, em torno da cidade de São Tomé das Letras, é extraído um quartzito micáceo, geralmente com aspecto laminado, causado por uma xistosidade bem desenvolvida. As faixas de quartzito pertencem à formação São Tomé das Letras, integrante do grupo Carrancas. A formação é ainda caracterizada pela presença de minerais metálicos, como magnetita, titano-magnetita, ilmenita e rutilo. A turmalina ocorre como mineral acessório típico.

De acordo com Fernandes et al (2003), no município de São Tomé das Letras, afloram quartzitos de coloração predominantemente esbranquiçada, amarela e rosada, designados comercialmente de pedra São Tomé Branco, Amarelo e Róseo. Já os quartzitos da região de Luminárias caracterizam-se por apresentarem coloração predominantemente esverdeada com presença de manchas vermelhadas, uma variação mineralógica de 65 a 85% de quartzo e 20 a 25% de muscovita. A estrutura foliada/laminada é proeminente nas duas regiões.

Para Deschamps et al (2002), a extração de quartzito em São Tomé das Letras é feita com lavra a céu aberto, em bancadas, sendo retirado inicialmente o material estéril, composto pelo capeamento e quartzito alterado para depois atingir o material de interesse. Quando essa fase inicial de remoção de estéril é feita por meio mecânico, pode-se aproveitar parte do material como minério, em torno de 10%. Porém, quando se utilizam explosivos (fogo de limpeza), não há aproveitamento sendo todo o material gerado enquadrado como estéril. Na sequência, atinge-se a camada de minério e ainda por meio de explosivos (fogo de corte) procede-se à liberação do banco para que o minério seja deslocado. Nessa etapa, há perdas ao longo de uma faixa com largura de 0,80m nas faces do banco em contato com o maciço rochoso, que são blocos fragmentados e retalhos de quartzito não comercializáveis. A disposição dos rejeitos gerados nas mineradoras em São Tomé das Letras é feita em taludes com geometria similar, cuja técnica foi difundida pelos donos das empresas.

A extração do quartzito na região, entretanto, ocorre, muitas vezes, de forma clandestina ou não cumprindo os requisitos de controle ambiental da atividade. Exemplos desta situação são os fechamentos de diversas minerações na região, pelo órgão ambiental competente, por irregularidades nos empreendimentos (FRANCKLIN JUNIOR, 2009).

2.4.4.1.1.2 Resíduo de quartzito

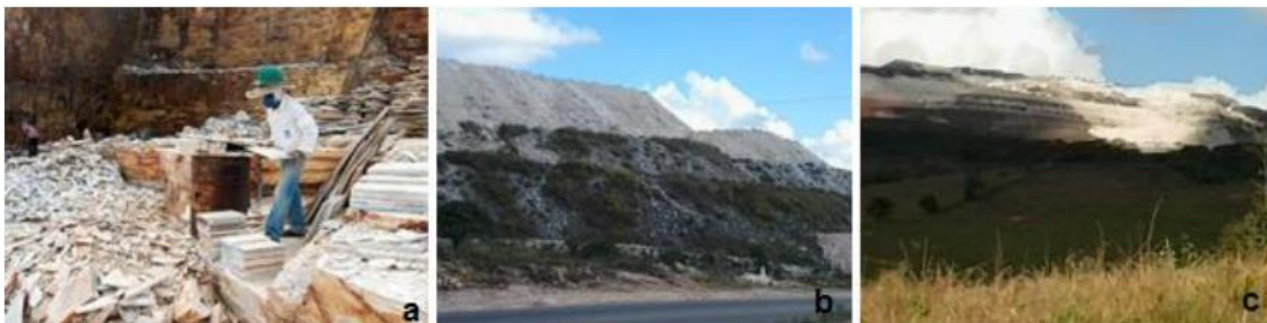
Segundo Pinheiro (2003), a extração da pedra mineira (quartzito) no sudoeste de Minas Gerais vem causando graves problemas ambientais e elevadas despesas com descarte do imenso volume de resíduos, que chega a 80% do total extraído.

Francklin Junior (2009) relata que isto acontece porque o quartzito é utilizado, fundamentalmente, como pedra de revestimento e, desta forma, deve ser extraído em placas, obedecendo a padrões de espessura e comprimento. Todo o material extraído que não obedece este padrão, passa a constituir resíduo nos “bota-foras”.

O resíduo gerado no processo de extração e de processamento da “pedra mineira” é um grande problema para os empreendedores, uma vez que, devido ao grande volume de material, passa a produzir impactos ambientais negativos, tais como, desconfiguração da paisagem, alterações na conformação natural do relevo, assoreamento dos corpos de água, impedimento o desenvolvimento da vegetação nativa, instabilidades nos taludes, dentre outros (FRANCKLIN JUNIOR, 2009).

A Figura 13 a-c mostra as imagens da geração de resíduos no processo de extração de placas de quartzitos (a), da geração de resíduos no interior de minerações (b) e da formação de grandes volumes destes resíduos em meio a vegetação (c) na região de exploração da cidade de São Tomé das Letras.

Figura 13 - Resíduos gerados no processo de extração das placas de quartzito (a), resíduos acumulados no interior da mineração (b) e a (C) grande quantidade de resíduo depositado em meio a vegetação na região de exploração da cidade de São Tomé das Letras - MG.



Fonte: Ferreira (2017).

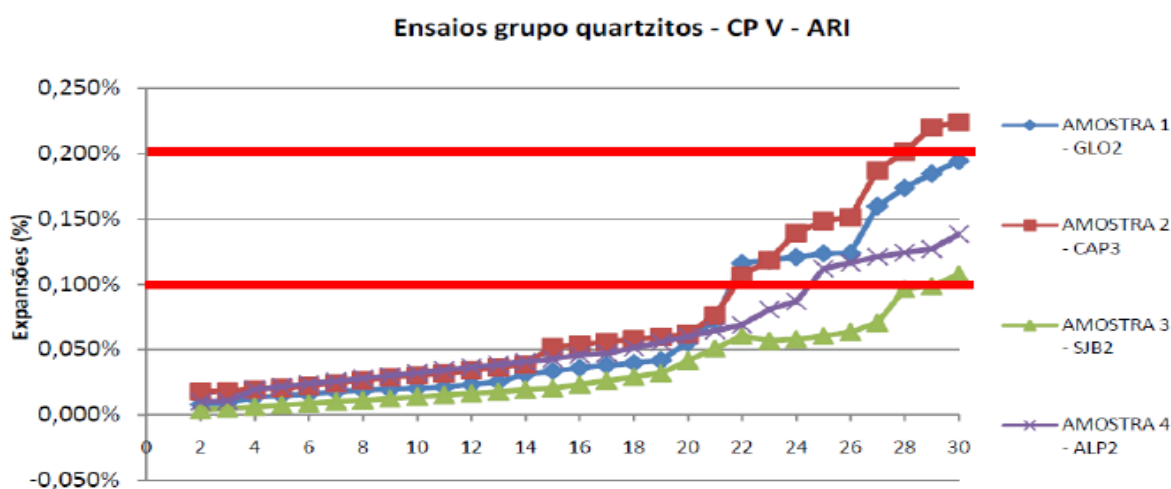
2.4.4.1.1.3 Resíduo de quartzito como agregado para a construção civil

O reuso de resíduos visa um equilíbrio entre o dinâmico setor da construção civil, que cresce a cada dia, e a presente necessidade de preservar jazidas limitadas de recursos naturais (SANTOS et al., 2012). Segundo John (2000) a necessidade da reciclagem e minimização da geração de resíduos sólidos devem ser constantemente incentivadas, principalmente pelo fato do setor da construção civil ser grande consumidor de recursos naturais. Pinheiro (2003) relata que o consumo total de agregados no Brasil no ano de 2003 foi da ordem de 22,8 milhões de toneladas de brita e 33,0 milhões de toneladas de areia.

Ramírio et al. (2008) realizaram um estudo comparativo envolvendo a caracterização física e mecânica em materiais depositados como rejeito nos bota-foras das minerações de quartzito, em comparação com outros agregados já utilizados comercialmente. Foram utilizados resíduos de quartzito de cor cinza, bastante silicificado, com baixo teor em micas e não foliado, sendo coletado em quatro minerações diferentes.

Franklin Junior (2009) realizou um estudo tecnológico em resíduos da mineração de quartzito do Sudoeste Mineiro para verificação da possibilidade de reciclagem destes resíduos como agregado graúdo no concreto. Ao realizar o ensaio de reatividade álcali-agregado pelo método acelerado segundo a norma ASTM C1260 (2014), verificou-se a presença da RAA nas amostras fabricadas com os cimentos CP II-Z-32 e CPV ARI. A Figura 14 mostra o comportamento gráfico das amostras estudadas utilizando o cimento CPV ARI, onde observa-se que todas apresentaram um possível potencial deletério a RAA.

Figura 14 - Expansão das barras de argamassa produzidas com quatro amostras de agregados de quartzito e cimento CPV ARI.



Fonte: Franklin Junior (2009).

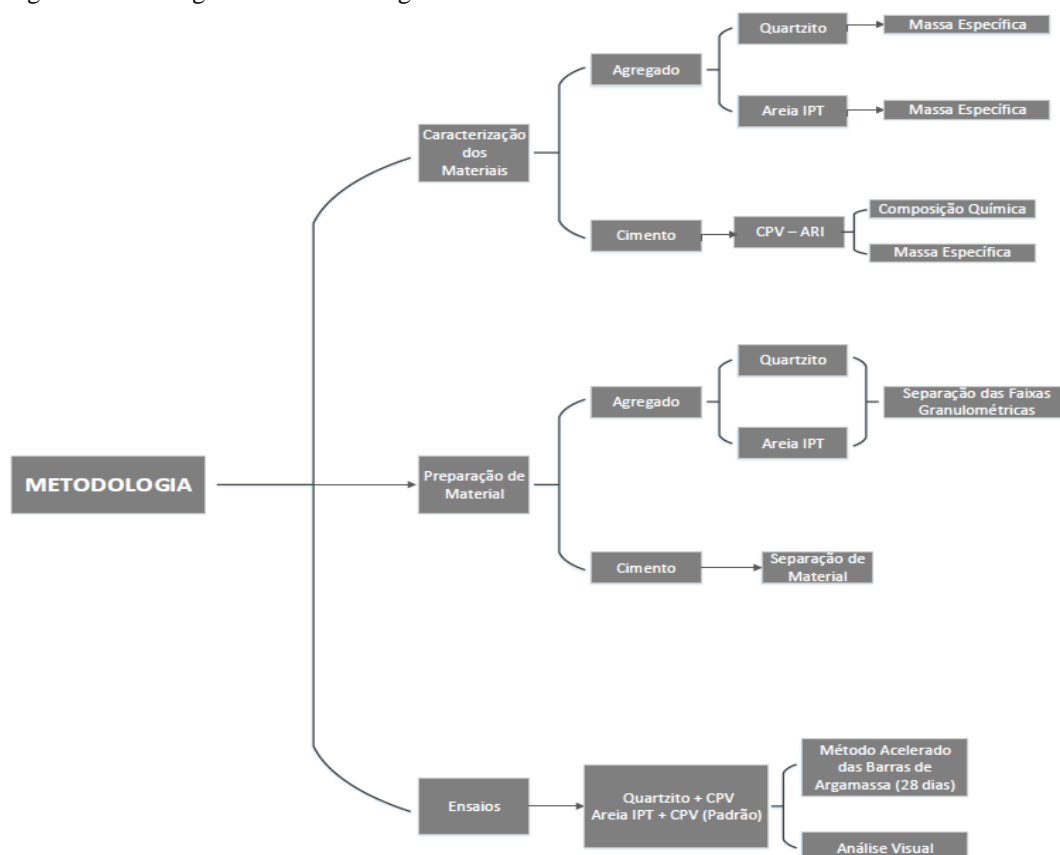
Hasparyk (2005) investigou as características e propriedades de concretos afetados por RAA contendo quartzito reativo, oriundo da Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE Furnas) localizada na cidade de São José da Barra – MG. A UHE Furnas foi construída em 1950 utilizando como agregado o quartzito da região, aproximadamente 13 anos após sua construção já apresentava patologias provenientes da RAA. Os resultados mostraram que o quartzito proveniente da região da UHE Furnas é um agregado com grande potencialidade reativa, com presença da reação álcali-sílica e que esta reação afeta efetivamente as propriedades mecânicas do concreto, proporcionando uma diminuição do módulo de elasticidade e da resistência à compressão ao longo do tempo.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização desta pesquisa, foi executada através de ensaios laboratoriais embasada nas revisões bibliográficas, utilizando agregados de rejeitos de quartzitos disponíveis na região do Sul de Minas e o cimento CPV-ARI como aglomerante.

A Figura 15, apresenta o fluxograma da metodologia.

Figura 15 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: O Autor.

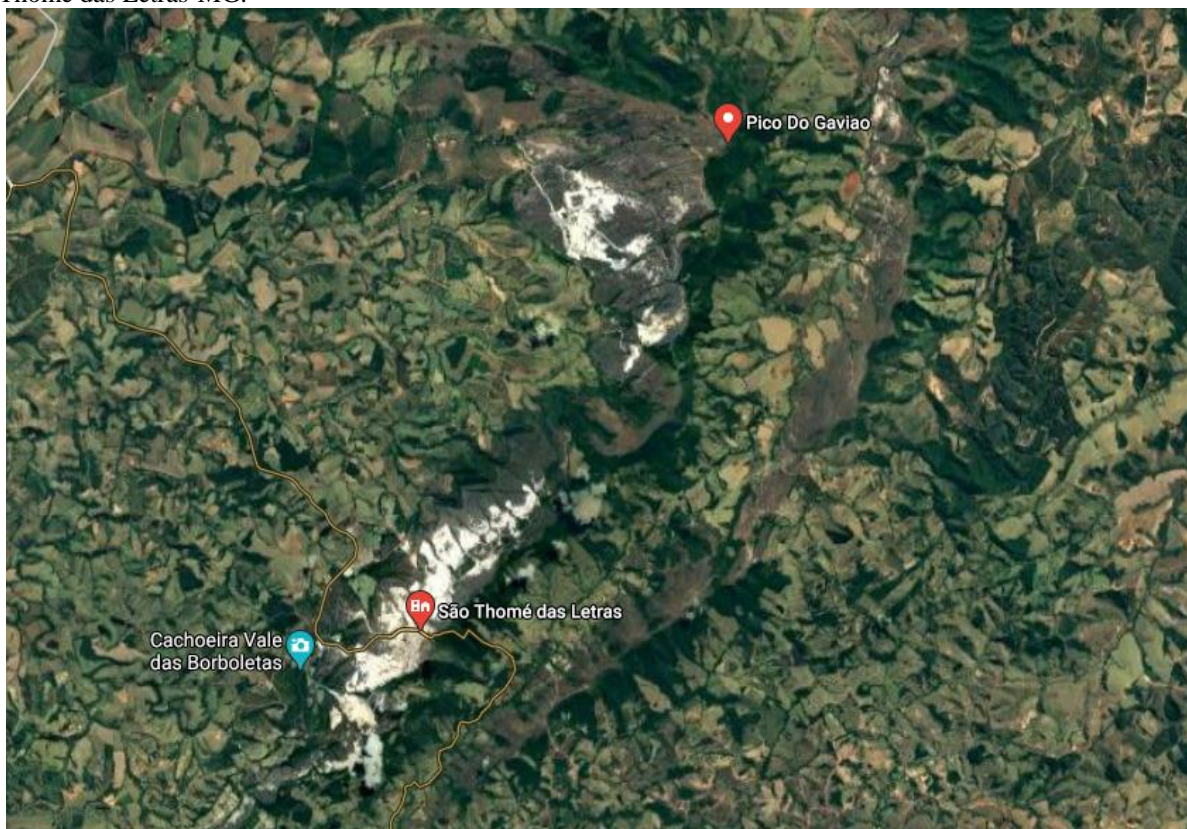
3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Agregado

Os agregados utilizados no estudo são provenientes da Mineração Pico do Gavião, localizada no município de São Thomé das Letras – MG.

Na Figura 16, é apresentada imagem de satélite ilustrando minerações de quartzito no entorno da zona urbana do município de São Thomé das Letras.

Figura 16 - Imagem de satélite apresentando minerações de quartzito localizada no entorno do município de São Thomé das Letras-MG.



Fonte: Modificado de Google Maps (2020).

As frações finas de quartzito foram utilizada como agregado miúdo em dois traços selecionados, e a areia normal brasileira do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), para outro traço.

As amostras de quartzito tiveram suas granulometrias selecionadas de forma a atender o especificado pelos ensaios, através de um agitador mecânico, um conjunto de peneiras e com auxílio de uma balança.

As peneiras foram colocadas em ordem decrescente do tamanho de suas malhas do topo para base, conforme a Figura 17. A amostra foi colocada na primeira peneira do conjunto e este permaneceu no agitador mecânico por 20 minutos. Antes do processo de peneiramento, as amostras pré-selecionadas foram lavadas com o intuito de eliminar o material pulverulento presente, e então secas em estufa a 100°C durante 24h.

Figura 17 - Peneiramento das amostras de quartzito.



Fonte: O Autor (2020).

3.1.1.1 Massa específica do quartzito

O cálculo da massa específica aparente do quartzito na fração fina, foi realizado através do método estabelecido pela ABNT NBR 9776:1987. A amostra foi seca em estufa à 105°C – 110°C. Inicialmente colocou-se água no frasco até marca de 200 cm³, deixando-o em repouso, para que a água aderida às faces internas escorressem totalmente, em seguida foi introduzido, cuidadosamente, 500 g de agregado (quartzito) no frasco.

Através da Equação 4, calculou-se o valor da massa específica aparente do quartzito:

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (4)$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

O procedimento de ensaio é demonstrado pela Figura 18, a seguir.

Figura 18 - Procedimento de ensaio, Frasco de Chapman.



Fonte: O Autor (2020).

3.1.1.2 Massa específica areia IPT

Para a determinação da massa específica da Areia IPT, foi utilizado o método do frasco de Chapman, normatizado pela ABNT NBR NM 52:2009. A amostra foi seca em estufa à 105°C – 110°C, até constância de massa. Inicialmente colocou-se água no frasco até marca de 200 cm³, deixando-o em repouso, para que a água aderida às faces internas escorressem totalmente, em seguida foi introduzido, cuidadosamente, 500 g de agregado miúdo (areia) seco no frasco.

A massa específica do agregado miúdo foi calculada através da Equação 5.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (5)$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

O procedimento de ensaio é demonstrado pela Figura 19, a seguir.

Figura 19 - Procedimento de ensaio, Frasco de Chapman.



Fonte: O Autor.

3.1.2 Cimento

3.1.2.1 CPV ARI

Foi escolhido o CPV ARI, por ser um tipo de cimento que possui uma elevada pureza e ausência de adições capazes de controlar o desenvolvimento da reação álcali-agregado.

3.1.2.1.1 Composição química do Cimento Portland

A composição química do cimento Portland utilizado foi obtida a partir do site informativo da empresa Itambé, apresenta-se na Tabela 5 a seguir, apenas os compostos mais relevantes para as reações do cimento.

Tabela 5 - Composição química do cimento Portland - CPV ARI.

Componente	CPV-ARI
SiO ₂	18,96
CaO	60,89
Al ₂ O ₃	4,24
MgO	3,87
Fe ₂ O ₃	2,66
S O ₃	3

Fonte: Cimento ITAMBÉ (2020).

3.1.2.1.2 Massa específica

A determinação da massa específica, Equação 6, baseou-se na ABNT NBR NM 23:2001, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier. Foi utilizado o querosene como fluido para o ensaio devido a este não provocar a hidratação do cimento.

Primeiramente foi adicionado a querosene ao frasco de Le Chatelier entre as marcas de zero e 14cm², e colocou-se o frasco no banho de água de repouso por 30 minutos. Decorrido esse tempo foi registrada a primeira leitura de volume (V1). Após, foi adicionada uma amostra de aproximadamente 60 gramas de cimento Portland no frasco e agitado suavemente para que não ocorresse a formação de bolhas. Foi então registrada a segunda leitura de volume (V2) e a massa utilizada de cimento. A partir da Equação 6, obteve-se a massa específica do cimento.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (6)$$

Onde:

ρ = massa específica do cimento;

m = massa de cimento Portland;

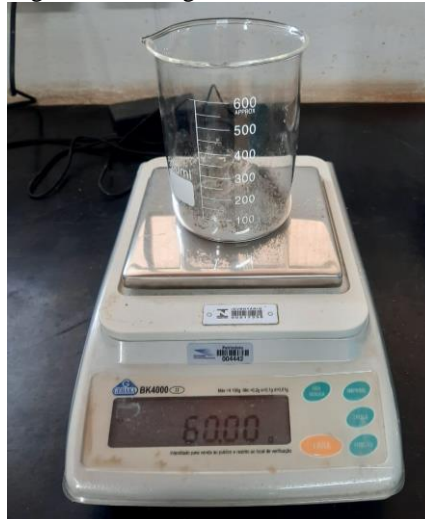
V_1 = leitura de volume;

V_2 = leitura de volume.

O resultado foi considerado a média entre dois ensaios em que a diferença foi menor que 0,01 g/cm³.

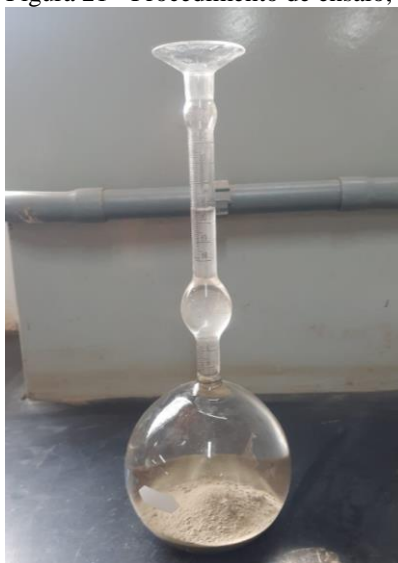
A Figura 20 e Figura 21, ilustra o procedimento de ensaio.

Figura 20 - Pesagem da Amostra de Cimento.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 21 - Procedimento de ensaio, Frasco de Le Chatelier.



Fonte: O Autor (2020).

3.2 Preparação de material

3.2.1 Separação das faixas granulométricas dos agregados

Foi realizada a separação dos agregados pelas faixas granulométricas estabelecidas por norma. O agregado miúdo utilizado foi ora quartzito, ora areia IPT. As faixas granulométricas do quartzito são apresentadas na Tabela 6. Já a areia do IPT, foram utilizado as quatro faixas granulométricas (16, 30, 50 e 100). A quantidade de agregado em gramas foi a utilizada para a moldagem de três barras de argamassa para cada tipo de traço.

Tabela 6 - Granulometria requerida para o agregado do ensaio.

Malha
4,75 mm
2,36 mm
1,18 mm
850 μm
600 μm
300 μm
150 μm

Fonte: O Autor (2020).

A Figura 22, representa as amostras de quartzito separadas e a Figura 23 as amostras da areia IPT.

Figura 22 - Amostras de quartzito.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 23 - Amostras areia IPT.



Fonte: O Autor (2020).

3.2.2 Ensaio de expansão em barras de argamassa

Para a medição das expansões em argamassa devido à RAA, foi utilizado o Método Acelerado das Barras de Argamassa, normatizado pela ABNT NBR 15577- 4: 2018 - Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado. Este método é um dos mais utilizados para este tipo de avaliação, tendo como grandes vantagens a facilidade e a rapidez do ensaio.

3.2.2.1 Proporção dos materiais para o ensaio

Os quantitativos dos materiais utilizados nos ensaios são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Quantitativo de material para o ensaio de expansão em argamassa.

Expansão em Argamassa		
Material	CPV + Areia IPT (g)	CPV + Quartzito (g)
Aglomerante	440,0	440,0
Agregado Miúdo	990,0	990,0
Água	206,8	206,8

Fonte: O Autor.

O agregado miúdo utilizado neste método foram as frações finas de quartzito separada nas faixas granulométricas apresentadas na Tabela 8 e a Areia IPT. A quantidade de agregado em gramas foi a utilizada para a moldagem de três barras de argamassa para cada tipo de traço.

Tabela 8 - Granulometria requerida para o agregado do ensaio.

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: Adaptado ABNT NBR 15577-4: 2018.

Para a dosagem do material foi utilizado de uma parte de cimento para 2,25 partes de agregado, em massa. E relação água/cimento de 0,47 em massa. Sendo assim, 440 g de cimento e 990 g de agregado e 206,8 g de água.

A Figura 24 e Figura 25, mostra os materiais separados para a realização dos ensaios.

Figura 24 - Materiais para o traço CPV ARI + quartzito.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 25 - Materiais para o traço CPV ARI + Areia IPT.



Fonte: O Autor (2020).

3.2.2.2 Mistura e moldagem da argamassa

Para a preparação das argamassas foi utilizado um misturador mecânico (Figura 26). Inicialmente foi colocada a água, em sequência adicionou-se o cimento. Esses dois materiais foram misturados mecanicamente na velocidade lenta durante 30 s. Depois foi acrescentado o agregado a cuba durante 30 s, em sequência mudou-se a velocidade para rápida e misturou-se durante 30 s. Após isso, a argamassa descansou por um minuto e meio, coberta com pano úmido na cuba, e depois disso foi batida na velocidade rápida durante mais um minuto.

Figura 26 - Misturador mecânico.



Fonte: O Autor (2020).

Para cada traço foram produzidas 3 barras de argamassa, em moldes prismáticos de 25x25x285 mm. O tempo decorrido entre o término da mistura e a moldagem não ultrapassou 2

minutos e 15 s. Com o auxílio de uma espátula, foram dispostas em duas camadas aproximadamente iguais sendo que cada uma foi adensada com 30 golpes na mesa de espalhamento.

A Figura 27 e Figura 28, representa os procedimentos realizados.

Figura 27 - Mesa de espalhamento utilizada no adensamento das barras de argamassa.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 28 - Barras de argamassa moldadas.



Fonte: O Autor (2020).

3.2.2.3 Cura inicial

Após a moldagem, as barras de argamassa foram submetidas em câmara úmida a 23 °C durante 24 horas.

Com o término do período de cura as barras de argamassa foram removidas dos moldes e identificadas conforme Figura 29 e Figura 30.

Figura 29 - Barras de argamassa traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).



Fonte: O Autor (2020).

Figura 30 - Barras de argamassa traço 1 (CPV ARI + Quartzito).



Fonte: O Autor (2020).

3.2.2.4 Disposição na solução e medições

Após a identificação das barras de argamassa, estas foram colocadas em um recipiente com água destilada, até imergi-las, e sem tocar nas paredes do recipiente, nem entre si, e levadas à estufa a 80°C.

Depois de 24 horas de desmoldagem, as barras foram medidas no relógio comparador, essas foram consideradas as leituras zero. Depois disso, colocou-se as barras em recipiente com solução de NaOH ($1 \pm 0,01$) N (Figura 31), de forma que ficassem totalmente imersas e sem tocar ao recipiente e nem entre si.

Para a preparação da solução de NaOH, foram diluídos 40 g de soda em 900 mL de água destilada, e depois adicionou-se água até alcançar 1 litro de solução, e nessa proporção foi produzido 12 litros de solução o suficiente para preencher todo o recipiente. O recipiente escolhido foi de aço inox, pois esse se mostrou mais resistente à solução de NaOH em altas temperaturas.

Os recipientes com as barras foram então colocados em estufa a uma temperatura de $80\pm 2^\circ\text{C}$ (Figura 32), onde permaneceram por 28 dias, sendo retirados apenas para as medições.

Figura 31 - Barras imersas a solução de NaOH.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 32 - Barras na estufa a uma temperatura de $80\pm 2^\circ\text{C}$.



Fonte: O Autor (2020).

Após a leitura inicial, foram realizadas leituras, no relógio comparador conforme, Figura 33, aos 7, 10, 16, 23 e 30 dias, contados a partir da colocação das barras em solução alcalina. Sendo as leituras aos 16 e 30 dias estabelecidas por normas e as demais leituras intermediárias.

Figura 33 - Leituras realizadas no relógio comparador.



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 9 representa o cronograma de leituras.

Tabela 9 - Cronograma de leitura das barras.

Leitura	Data
Inicial	06/10/2020
7 dias	13/10/2020
16 dias	22/10/2020
23 dias	29/10/2020
30 dias	06/11/2020

Fonte: O Autor (2020).

3.2.2.5 Análise Visual

Após o término do ensaio acelerado das barras de argamassa, foi realizada a análise visual dos corpos de prova, visando identificar fissuras, poros esbranquiçados e outros indícios da RAA.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados que foram obtidos durante a realização do estudo experimental.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Massa específica do quartzito e areia IPT

Os valores de massa específica do quartzito foram de $2,732\text{g/cm}^3$ obtidos através do procedimento de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 9776:1987, assim como da areia IPT de $2,631\text{ g/cm}^3$. Comparados a ensaios realizados por outros autores, os valores obtidos estão dentro das variações permitidas por norma.

4.1.2 Massa específica do Cimento Portland CPV-ARI

Através do ensaio de massa específica pelo frasco Le Chatelier, estabelecido pela ABNT NBR NM 23:2001, obteve-se uma massa específica de $2,97\text{ g/cm}^3$.

4.2 Expansão em argamassa

As Tabelas 10 à Tabela 15, traz os resultados das medições individuais para cada barra.

A Figura 34 apresenta as expansões médias obtidas no ensaio acelerado das barras de argamassa para o traço padrão (CPV + Areia IPT) e traço 1 (CPV + Quartzito).

Tabela 10 - Leituras das barras traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).

Leituras (mm)					
Barra	Leitura Inicial	7 dias	16 dias	23 dias	30 dias
Barra Padrão	5,147	5,933	5,275	5,213	6,040
T-Padrão 01	3,830	4,609	4,979	4,999	4,834
T-Padrão 02	6,689	7,465	7,838	7,958	7,805
T-Padrão 03	4,010	4,711	4,741	4,844	4,980

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 11 - Comprimento das barras traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).

Comprimento (mm)					
Barra	Leitura Inicial	7 dias	16 dias	23 dias	30 dias
Barra Padrão	295,570	295,570	295,570	295,570	295,570
T-Padrão 01	294,247	294,240	294,268	294,350	294,358
T-Padrão 02	297,106	297,096	297,127	297,309	297,329
T-Padrão 03	294,427	294,342	294,430	294,501	294,504

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 12 - Expansões das barras traço padrão (CPV ARI + Areia IPT).

Expansões				
Barra	7 dias	16 dias	23 dias	30 dias
T-Padrão 01	0,002%	0,007%	0,035%	0,038%
T-Padrão 02	0,003%	0,007%	0,068%	0,075%
T-Padrão 03	0,029%	0,001%	0,023%	0,026%
Média	0,012%	0,005%	0,042%	0,046%
Sd	0,015%	0,003%	0,023%	0,026%

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 13 - Leituras das barras traço 1 (CPV ARI + Quartzito).

Leituras (mm)					
Barra	Leitura Inicial	7 dias	16 dias	23 dias	30 dias
Barra Padrão	6,720	1,233	2,382	2,471	3,210
T1-1	8,460	3,495	5,010	5,455	6,396
T1-2	8,435	3,417	4,992	5,413	6,382
T1-3	8,551	3,679	5,265	5,629	6,505

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 14 - Comprimento das barras traço 1 (CPV ARI + Quartzito).

Comprimento (mm)					
Barra	Leitura Inicial	7 dias	16 dias	23 dias	30 dias
Barra Padrão	295,570	295,570	295,570	295,570	295,570
T1-1	297,264	297,826	298,192	298,548	298,75
T1-2	297,225	297,748	298,120	298,506	298,736
T1-3	297,341	298,010	298,447	298,722	298,959

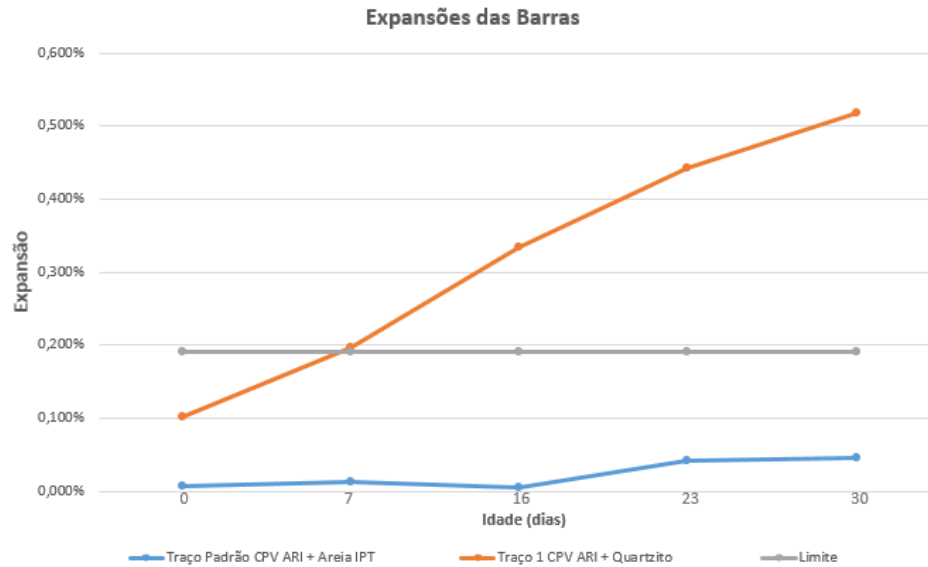
Fonte: O Autor (2020).

Tabela 15 - Expansões das barras traço 1 (CPV ARI + Quartzito).

Expansões				
Barra	7 dias	16 dias	23 dias	30 dias
T1-1	0,189%	0,312%	0,432%	0,500%
T1-2	0,176%	0,319%	0,431%	0,508%
T1-3	0,225%	0,372%	0,464%	0,544%
Média	0,197%	0,334%	0,442%	0,517%
Sd	0,025%	0,033%	0,019%	0,023%

Fonte: O Autor (2020).

Figura 34 - Expansões do ensaio acelerado das barras de argamassa.



Fonte: O Autor (2020).

Somente as barras do traço 1 (CPV + Quartzito), ultrapassaram o limite de expansão de 0,19%, estabelecido pela ABNT NBR 15577-4:2018, para classificar a reação como potencialmente deletéria. A expansão alcançou o valor limite já aos 7 dias, e continuou a ser observada até o fim das medições, aos 30 dias, quando ultrapassou a marca de 0,50%. Mesmo com expansões acima do limite, as barras não apresentaram em exsudação de gel. Analisando os resultados obtidos o comportamento potencialmente reativo do agregado de quartzito fica claramente evidenciado.

Para o traço padrão (CPV + Areia IPT), a reação pode ser classificada como potencialmente inócua, estando as expansões abaixo de 0,19% para todas as idades.

De acordo com a ABNT NBR 15577-1:2018, o grau de reatividade do agregado em função da expansão aos 30 dias pelo método acelerado de barras de argamassa é classificado conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação do grau de reatividade do agregado.

Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias (%)
Potencialmente inócua grau R0	Menor que 0,19 %
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 e 0,40 %
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 e 0,60 %
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60 %

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15577-1:2018.

Dos resultados obtidos, o traço padrão (CPV ARI + Areia IPT) se classifica como Potencialmente inócuo grau R0 e o traço 1 (CPV ARI + Quartizito), como Potencialmente reativo grau R2.

4.3 Análise Visual

Após o término do ensaio acelerado das barras de argamassa, os corpos de prova foram analisados visualmente com o intuito de encontrar fissuras superficiais, envergamentos e outros indícios da reação álcali-agregado. As Figuras 35 e 36, são referentes às análises.

Figura 35 - Análise visual traço padrão (CPV + Areia IPT).



Fonte: O Autor (2020).

As barras do traço padrão (CPV ARI + Areia IPT), não apresentaram fissuras aparentes que poderiam ser decorrentes da reação álcali-agregado. Este fato está de acordo com os resultados obtidos no ensaio acelerado de expansão das barras de argamassa, em que apresentaram expansões inferiores ao limite imposto pela ABNT NBR 15577: 2018.

As barras de argamassa em geral não apresentaram envergamento para nenhum dos traços analisados.

Figura 36 - Análise visual traço 1 (CPV + Quartzito).



Fonte: O Autor (2020).

Nas barras do traço 1 (CPV ARI + Quartzito) (Figura 36), foi possível observar a olho nu o aparecimento de fissuras na superfície de todos os corpos de prova. Na barra T-1 3 onde foram observadas as maiores fissuras, algumas destas chegaram aproximadamente 9 cm de comprimento.

5 CONCLUSÃO

As explorações dos quartzitos nas minerações geram um grande volume de resíduos, isto acontece porque o quartzito é utilizado, fundamentalmente, como pedra de revestimento, devendo ser extraído em placas, de acordo com padrões de espessura e comprimento. Devido ao expressivo volume de rejeitos produzidos, surgem impactos ambientais negativos, tais como: desconfiguração da paisagem, alterações na conformação natural do relevo, instabilizações em taludes de rejeitos de mineração, etc.

A utilização de rejeitos de quartzitos como agregado na construção civil é uma alternativa para a solução de problemas com rejeitos, reduzindo os impactos ambientais negativos, contribuindo não somente na questão ambiental, como também no setor da construção civil, como a utilização de um material alternativo, com custo mais baixo, uma vez que não demanda a abertura de uma nova jazida.

Foi constatado bom desempenho do traço padrão (CPV ARI + Areia IPT), na análise de expansão em barras de argamassa, comparado ao traço 1 (CPV + Quartzito), que apresentou expansões que ultrapassaram os limites determinados pela NBR 15577-4 : 2018.

Visualmente os corpos de prova submetidos às condições agressivas propícias à reação álcali-agregado apresentaram fissuras apenas para o traço 1(CPV + Quartzito). Além disso, nenhuma amostra apresentou degradação superficial visível, ou envergamentos.

Os resultados apresentados em geral, estão de acordo com as biografias estudadas.

Apesar do CPV-ARI possuir uma elevada pureza e ausência de adições capazes de controlar o desenvolvimento da reação álcali-agregado, no traço padrão (CPV ARI + Areia IPT) não desenvolveu a RAA.

Para o melhor entendimento dos efeitos da reação álcali-agregado em rochas quartzíticas, é sugerido como continuação deste estudo, uma análise da reatividade potencial álcali-agregado em rochas quartzíticas combinado ao cimento álcali-ativado, devido estudos já realizados que comprovaram que a utilização de um aglomerante álcali-ativado obteve resultado positivo, mitigando a expansão da reação álcali-agregado em todos os agregados, além de evitar a ocorrência do gel expansivo nas barras de argamassa. Também é sugerida uma avaliação dos mesmos agregados e aglomerantes através de ensaios lentos de expansão.

REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C.; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete**. USA e Canada: Spon Press, 2011. p. 28-37.

ALONSO, S.; PALOMO, A. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio**. *Materials Letters*, v. 47, p. 55-62, 2001.

ANDRIOLO, F. R. **Observação de Estruturas de Concreto: Validade Quanto a Ocorrência da Reação Álcali-Agregado**. Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, São Paulo, 1997.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. **AAR – Dams affected in Brazil – Report of the current situation**. In: International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 11, 2000, Québec. Anais. Québec, 2000. p. 1243-1252.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – RAA – Guia para avaliação**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados – RAA – Ensaio acelerado de barras de argamassa**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-6: Agregados – RAA – Determinação da expansão em prismas de concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia Normal para Ensaio de Cimento – Especificação**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 1998.

ASTM C348-02. **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars**. Philadelphia, 2002.

ASTM C1260-07. **Standard test method for potential álcali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)**. Philadelphia, 2014.

ASTM C1293-08b. **Standard test method for determination of length change of concrete due to álcali-silica reaction**. Philadelphia, 2008.

AITCIN, P. C.; MINDESS, S. **Sustainability of Concrete**. USA e Canada: Spon Press, 2011. p. 28-37.

BARBOSA, M. C. R. **Avaliação sistêmica de tecnologias aplicáveis ao APL Lagoa Santa**. Ouro Preto. 121p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives. **Journal of the American Ceramic Society**, v. **97**, p. **997-1008**, 2014.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agro-industriais**. 2008. 280f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BILIM, Cahit, ATIS, Cengiz Duran. **Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag**. Construction and Building Materials, 2012.

Câmara Brasileira da Construção Civil. **Banco de Dados – PIB Brasil e Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CARLES-GIBERGUES, A; HORNAIN, H. **A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena**. In: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ed. Ibracon, 2014.

CIMENTO ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/>>. Acesso em: jun. 2020.

DAHER, Cesar Henrique Sato. **Avaliação do grau de influência de parâmetros de contorno no ensaio de reatividade potencial álcali-agregado pelo método acelerado.** UFPR, Curitiba, 2009.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers and geopolymeric materials.** Journal of Thermal Analysis, v. 35, p. 429-441, 1989.

DENG, M.; TANG, M. **Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks.** Cement and Concrete Research, vol. 23, 6, 1993.

DENT GLASSER, L.S.; KATAOKA, N. **The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction.** Cement and Concrete Research, vol. 11, 1981.

DESCHAMPS, E., Maia Júnior, B., Costa, C. S., Santos, M. G. V., Keller, W. S., Carvalho Filho, C. A., Damasceno, M. A., Pinto, C. L. L. **Controle ambiental na mineração de quartzito - Pedra São Tomé.** Segrag editora e gráfica limitada. Belo Horizonte, 2002, 204p.

DNPM - **Departamento Nacional de Produção Mineral.** Anuário Mineral Brasileiro 2006, Parte III – Estatísticas por substâncias.

DUXSON, P. et al. **Geopolymer technology: the current state of the art.** Journal of Materials Science, v. 42, p. 2917-2933, 2007b.

DUXSON, P. et al. **The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'.** Cement and Concrete Research, v. 37, p. 1590-1597, 2007a.

FRANKLIN JÚNIOR, I. **Estudo tecnológico em rejeitos de quartzito do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2009, 142p.

FERNANDES, T. M. G.; Godoy, A. M.; Fernandes, N. H. (2003) **Aspectos Geológicos e Tecnológicos dos Quartzitos do Centro Produtos de São Thomé das Letras (MG).** Geociências, v. 22, n. 2, p. 129-141.

FERREIRA, D. T. A. et al. **Characterization physics, chemistry and mineralogy of waste from kaolin and their potential pozzolanic to alkali activation.** Key Engineering Materials, v. 517, p. 617-621, 2012.

FOURNIER, Benoit; CHEVRIER, Ray; GROSOBOIS, Marie de; LISELLA, Rino; FOLLIARD, Kevin; IDEKER, Josen; SHEHATAD, Medhat; THOMAS, Mike; BAXTER, Steve. **The Accelerated Concrete Prism Test (60°C): Variability of the test method and proposed expansion limits.** Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2004.

GERALDO HENRIQUE, R. **Aglomerante Álcali-ativado Contendo Lodo de ETA e Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, 2016, 21-29p.

GOMES, M. A. S. (2000) **Redução de impacto ambiental através da melhoria do processo de lavra de quartzito micáceo no município de São Tomé das Letras - Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de Concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. UFRGS, Porto Alegre, 2005.

HELMUTH, R., STARK, D. **Alkali-silica reactivity mechanisms**. In: SKALNY, J.; MINDESS, S. *Materials Science of Concrete* ill. Estados Unidos: American Ceramic Society, 1992.

HOS, J. P.; MCCORMICK, P. G.; BYRNE, L. T. **Investigation of a synthetic aluminosilicate inorganic polymer**. *Journal of Materials Science*, v. 37, p. 2311-2316, 2002.

JIANWEN, P.; YUNTIAN, F.; YANJIE, X.; FENG, J.; CHUHAN, Z.; BINGYIN, Z. **Chemodamage modeling and cracking analysis of AAR-affected concrete dams**. *Science China Technological Sciences*, 56, 2013.

JOHN, Vanderley M. **Cimento de escória ativada com silicato de cálcio**. USP, São Paulo, 1995.

JOHN, Vanderley M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. USP, São Paulo, 2000.

JUENGER M.C.G.; WINNEFELD F.; PROVIS J.L.; IDEKER J.K. **Advances in alternative cementitious binders**. *Cement and Concrete Research* 41, p. 1232-1243. 2011.

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos**. In: 1º SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986. São Paulo. Anais... São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986, p.127-138.

KUPERMAN, S. C. ; SALLES, F. M. ; PINFARI, J. C. ; CARNEIRO, E. F. **A CESP e a detecção da reação álcali-agregado**. In: 26º SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2005, Goiânia. Anais... Rio de Janeiro : CBDB, 2005.

LANGARO, E.A; MORAES, M.C; BUTH, I.S; ANGULSKI DA LUZ, C; MATOSKI, A. **Estudo do teor de ativador no desempenho de cimentos álcali ativados feitos com escórias ácidas em idades iniciais**. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de Lindóia, SP, 2016.

LANGARO, Eloise Aparecida. **Cimento Álcali Ativado a partir da valorização da Escória de Alto Forno a Carvão Vegetal**. UTFPR, Curitiba. 2016.

LIMA, R. M. F., Silva, A. F. S., Morais, R. M. M., Luz, J. A. M. (2007) **Caracterização Tecnológica de resíduos de pedreiras de quartzito na região de Ouro Preto / MG**. REM – Revista Escola de Minas, v. 60 (4), p. 663-668.

LOPES, L. E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragem de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 2004. 157p.

Manual de Agregados para Construção Civil/Ed. Salvador Luiz M. de Almeida, Adão Benvindo da Luz. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. p. 674. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIZUMOTO, Camilo. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. UNESP, Ilha Solteira, 2009.

MONTEIRO, J. P. M. **Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction**. ACI Materials Journal, v.98, n.2, 2001.

MUNHOZ, F.A.C. **Efeito das adições ativas na mitigação das reações álcali –sílica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado), Universidade São Paulo, São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2 ed. p. 8-11; 266-267. São Paulo: BOOKMAN, 2013.

PAULON, V.A. **Reações álcali-agregado em concreto**. São Paulo, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1981. 125p.

PINHEIRO, W. M. G. (2003) **Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Faculdade de Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 202p.

PINTO, Amândio Teixeira. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal. 2006.

PIRES, Kironi Oliveira. **Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual – um estudo de caso**. UFPR, Curitiba, 2009.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1998.

PRISZKULNIK, S. **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado**. In: ISAÍÁ, G.C. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ed. Ibracon, 2005. Vol 2.

PROVIS, John L.; DEVENTER, Jannie S.J. van. **Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM**. v. 13. Springer Netherlands, 2014.

QUARESMA, L. F. (2009) **Agregados para a construção civil (produto 22)**. Perfil de areia para construção civil (relatório técnico 31). J. Mendo Consultoria. Ministério de Minas e Energia – MME. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral – SGM.

RAMIRIO R. F.; Pamplona D. R. P.; Franklin Junior I.; Collares E. G. (2008) **Estudo comparativo de rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no sudoeste de Minas Gerais**. *Ciência et Praxis* v. 1, n. 1.

RUBERT, S. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação**. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, UTFPR. Pato Branco, 2015.

SABBAG, A. F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SANCHEZ, Leandro Francisco Moretti. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos**. USP, São Paulo, 2008.

SANTOS, R. A.; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. **Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito**. *Rev. Elet. Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, nº 8, p. 1818-1828, set-dez, (2012).

SHI, Zhenguog; HU, Xiang. **A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates**. *Materials and Structures* 48, p. 621-628. 2015.

SILVA, Patricia Neves. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso / CHESF**. USP, São Paulo, 2007.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

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

TIECHER, Francieli. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** UFRGS, Porto Alegre, 2006.

THOMAZ, Eduardo C.S. **Escórias de alto forno – Parte 1 – Fabricação.** Notas de aula. IME, Rio de Janeiro, 2010.

VALDUGA, Laila. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos no estado de São Paulo.** UNICAMP, Campinas, 2002.

VASSALO, Érica Antunes de Souza. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado.** UFMG, Belo Horizonte, 2013.

WANG, H.; GILLOT, J. E. **Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide.** Cement and Concrete Research, New York, Pergamon Press, v. 21, n. 4, p. 647-654, July 1991.

WIGUM, B. J. **“Alkali-aggregate reaction in concrete - properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks”.** PhD. Thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Norway, 1995. 227 p.