

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**

**ENGENHARIA CIVIL**

**GABRIEL DE ABREU MENEZES**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE  
CONCRETO: avaliação de agregados de quartzito provenientes do município de São  
Thomé das Letras-MG**

**Varginha-MG**

**2019**

**GABRIEL DE ABREU MENEZES**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE  
CONCRETO: avaliação de agregados de quartzito provenientes do município de São  
Thomé das Letras-MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro  
Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para  
obtenção de título de bacharel em engenharia civil sob  
orientação do Prof. Me. Ivan Francklin Júnior.

**Varginha**

**2019**

**GABRIEL DE ABREU MENEZES**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE  
CONCRETO: avaliação de agregados de quartzito provenientes do município de São  
Thomé das Letras-MG**

Monografia apresentada ao curso de engenharia civil do  
Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito  
para obtenção do grau de bacharel, pela banca  
examinadora.

Aprovado em     /     /

Prof. Me. Ivan Francklin Júnior

Prof. Nome professor

Prof. Nome professor

Dedico este trabalho a todos aqueles que  
contribuíram para sua realização.

## AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meu agradecimento a Deus, que me capacitou para chegar aonde cheguei, proveu tudo que foi necessário para que eu me tornasse não somente um engenheiro, mas uma pessoa melhor.

Agradeço imensamente aos meus pais, que sempre me incentivaram e me apoiaram nos momentos bons e ruins.

Aos meus irmãos, meus agradecimentos por sempre me ajudaram dentro da capacidade de cada um deles e me incentivaram a continuar trilhando esse caminho.

Agradeço à minha namorada e futura esposa, Fernanda Cesário, que nos últimos 4 anos esteve do meu lado em todos os momentos, soube lidar com meus momentos de estresse por conta do curso e que faz desde então os meus dias melhores.

Deixo também meu agradecimento aos meus amigos Felipe Krauss, Guilherme Teodoro, e Higor Cesar por estarem me apoiando em tudo no curso e na vida. Sou imensamente grato à Deus por ter colocado eles no meu caminho.

Agradeço também aos meus professores que sempre cobraram e exigiram muito durante o curso, mas que fizeram isso conscientes de que seria o melhor para o nosso futuro. Professores são verdadeiros heróis.

Enfim... agradeço a todos que de certa forma colaboraram tanto para esse trabalho quanto para a minha formação durante o curso e peço desculpas se não citei alguém, mas que fique claro que todos que estiveram ao meu redor durante esta etapa da minha vida, contribuíram de alguma forma!

“(...todas as coisas começam NELE, e NELE encontram seu propósito.) Deus não joga dados.”

Albert Einstein

## RESUMO

A engenharia está em constante evolução, permitindo-se estudar problemas que antes não eram possíveis por falta de tecnologia. O material mais utilizado na construção civil é o concreto e existem várias patologias que afetam a sua durabilidade e resistência mecânica. Uma dessas patologias é conhecida com reação álcali-agregado (RAA), trata-se de uma reação química que ocorre no interior do concreto já endurecido, entre componentes do cimento e do agregado quando a estrutura se encontra em contato com água. A RAA produz um gel que se expande e gera tensões de tração no interior do concreto causando fissurações que diminuem a sua resistência mecânica. Foi realizado um estudo de potencialidade reativa em concretos produzidos com o agregado graúdo de quartzito proveniente de estéril de extração da cidade de São Thomé das Letras, sul de Minas Gerais. O estudo foi embasado na norma ABNT NBR 15577:2018, que determina todos os parâmetros e requisitos para a realização dos ensaios de verificação de RAA. O estudo contempla as seguintes etapas: definição dos materiais para a produção do concreto; determinação dos índices físicos dos materiais; produção dos concretos e realização das medições. Nesta etapa foi realizada uma análise petrográfica para verificar a composição mineralógica do quartzito e também a produção dos prismas de concreto pelo método acelerado onde a duração do ensaio é de 20 semanas para constatar a potencialidade reativa. No conteúdo do trabalho são apresentados os resultados da análise petrográfica realizada na Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Rio Claro e medidas de variação de expansão dos prismas de concreto. O resultado da análise foi satisfatório devido à inicial classificação reativa do agregado, entretanto em relação aos prismas ainda não foram finalizados os ensaios, mas já se pode afirmar que o agregado atingiu um grau de potencialidade reatividade como foi previsto na análise petrográfica.

**Palavras-chave:** Reação álcali-agregado, análise petrográfica, potencialidade reativa.

## **ABSTRACT**

*Engineering is in constant evolution, allowing us to study problems that were not possible before due to lack of technology. The most used material in civil construction is concrete and there are several pathologies that affect its durability and mechanical resistance. One of these pathologies is known as alkali-aggregate reaction (AAR); it is a chemical reaction that occurs inside the already hardened concrete, between cement and aggregate components when the structure is in contact with water. The AAR produces a gel that expands and generates tensile stresses inside the concrete causing cracks that reduce its mechanical strength. A study of reactive potentiality in concrete produced with the coarse quartzite aggregate from extraction tailings from the city of São Thomé das Letras, southern Minas Gerais, was performed. The study was based on the ABNT NBR 15577:2018 standard, which determines all parameters and requirements for the performance of AAR verification tests. The study contemplates the following steps: definition of materials for the production of concrete; determination of the physical indexes of materials; production of concrete and performance of measurements. In this step, a petrographic analysis was performed to verify the mineralogical composition of the quartzite and also the production of the concrete prisms by the accelerated method where the test duration is 20 weeks to verify the reactive potentiality. The results of the petrographic analysis carried out at Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Rio Claro Campus and measures of the variation of the expansion of the concrete prisms are presented in the study content. The result of the analysis was satisfactory due to the initial reactive classification of the aggregate, however in relation to the prisms the tests have not yet been finalized, but it can already be stated that the aggregate reached a degree of reactivity potentiality as predicted in the petrographic analysis.*

**Keywords:** *Alkali-aggregate reaction, petrographic analysis, reactive potentiality.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Vista por satélite da cidade de São Thomé das Letras.....	15
Figura 02 - Alteração na paisagem natural da região. ....	16
Figura 03 – Assoreamento do Ribeirão Passa Quatro. ....	16
Figura 04 - Fatores necessários para ocorrência da RAA. ....	17
Figura 05 - Formação do gel expansivo nos poros do concreto visto por micrografia. ....	18
Figura 06 - Fissuras em forma de mapa em um elemento de fundação. ....	19
Figura 07 - Estrutura molecular da sílica amorfa. ....	24
Figura 08 - Estrutura molecular da sílica cristalina. ....	25
Figura 09 - Etapas da desdolomitização na reação álcali-carbonato. ....	26
Figura 10 - Local de beneficiamento do estéril de quartzito. ....	29
Figura 11 - Procedimento para obter os valores de massa específica e massa específica aparente. ....	30
Figura 12 - Agitador elétrico de peneiras. ....	30
Figura 13 - Separação granulométrica do agregado graúdo. ....	31
Figura 14 - Separação das granulometrias de agregado miúdo. ....	33
Figura 15 - Ensaio para determinação de massa específica do agregado miúdo.....	33
Figura 16 - Frasco de Le Chatelier utilizado para ensaio de massa específica do cimento.....	35
Figura 17 - Moldes utilizados para a confecção dos prismas. ....	36
Figura 18 - Realização da mistura dos concretos. ....	38
Figura 19 - Prisma após o processo de moldagem. ....	39
Figura 20 - Cura inicial dos prismas.....	40
Figura 21 - Recipientes de armazenamento dos prismas.....	40
Figura 22 - Medição de variação de comprimento em prisma de concreto.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Valores de rejeitos acumulados ao longo de décadas de extração de quartzito. ...	15
Tabela 02 - Classificação do grau de reatividade do agregado. ....	20
Tabela 03 - Grau de risco de ocorrência de RAS. ....	21
Tabela 04 - Granulometria requerida do agregado graúdo. ....	31
Tabela 05 - Granulometria requerida do agregado miúdo. ....	32
Tabela 06 - Tabela de fator de conversão de Na <sub>2</sub> O para NaOH. ....	37
Tabela 07 - Determinação das características físicas dos agregados. ....	43
Tabela 08 - Determinação das características dos cimentos. ....	43
Tabela 09 - Análise química do cimento com ênfase no equivalente alcalino. ....	44
Tabela 10 - Composição do quartzito de São Thomé das Letras por meio de análise petrográfica. ....	44
Tabela 11 - Dados de leitura dos prismas de concreto. ....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Expansão dos prismas confeccionados com cascalho de quartzito pelo método acelerado.....	22
Gráfico 02 - variação de comprimento dos prismas confeccionados com cascalho de quartzito pelo método acelerado.....	46
Gráfico 03 - Variação de massa dos prismas confeccionados com cascalho de quartzito pelo método acelerado.....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Quartzito de São Thomé das Letras .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Reação Álcali-Agregado.....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Reação Álcalis-Sílica – RAS .....	23
2.2.2 Reação Álcali-Carbonato – RAC.....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Materiais para produção dos concretos e suas respectivas características físicas e químicas.....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Agregado graúdo de quartzito .....	28
3.1.2 Agregado miúdo.....	32
3.1.3 Cimentos .....	34
<b>3.2 Confeção dos Prismas.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 Dosagem dos Concretos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3 Determinação do Comprimento .....</b>	<b>41</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO E RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Determinação dos valores característicos dos materiais.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Análise Petrográfica .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Expansão dos prismas .....</b>	<b>45</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>51</b>
<b>Especificações do cimento CP III.....</b>	<b>51</b>
<b>Especificações do cimento CP V.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>53</b>
<b>Cronograma de atividades em laboratório .....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, por mais criterioso que seja qualquer processo, sempre há um risco para o qual é aplicado um fator de segurança. Com isso, ao longo dos anos foram e ainda são criadas tecnologias para diminuir ao máximo esses fatores, de modo que seja melhorada a qualidade e os processos construtivos, em relação aos cálculos e execução, com o objetivo de prevenir esses problemas.

Um dos principais materiais empregados na construção civil é o concreto, na sua constituição básica, agregados, água e cimento portland, devido a sua vida útil e permissividade de executar elementos em diversas geometrias. De acordo com Valduga (2002), o concreto é tão versátil a ponto de ser chamado de “material universal”.

Mesmo possuindo uma incrível durabilidade, hoje com várias tecnologias disponíveis, é possível diagnosticar patologias em estruturas de concreto armado devido à má execução, qualidade dos elementos utilizados em sua mistura ou até mesmo à composição dos materiais envolvidos.

Patologias podem comprometer uma estrutura apenas no âmbito da estética ou de forma grave quando se trata da função estrutural. Uma das diversas causas de patologias estruturais que há alguns anos atrás era pouco estudada e hoje já se tem uma vasta bibliografia a respeito é conhecida como reação álcali-agregado (RAA).

De forma geral a RAA pode ser explicada por uma reação química que ocorre entre os componentes alcalinos do cimento portland (óxidos de sódio e potássio) e os minerais que compõe o agregado graúdo utilizado na preparação do concreto, quando o elemento está em contato com água.

O produto resultante dessa reação é um gel expansivo na presença de umidade, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência física e química e consequente ruptura da estrutura (SABBAG, 2003).

As primeiras ocorrências da reação foram observadas por Thomas Stanton na década de 1940 na região de Monterrey e Las Vegas na Califórnia, estado norte-americano. Stanton observou fissurações e expansões em maciços de concreto em várias obras locais como prédios, pontes, pavimentos e paredões de beira-mar.

A importância de estudar a RAA se dá pelo motivo de entender a origem de uma patologia que afeta gravemente o concreto, pois é a causa de grandes problemas em

superestruturas e até mesmo em elementos de fundação de edificações comuns como prédios e pequenas pontes.

Essa pesquisa tem como objetivo geral, o estudo da RAA, por meio de ensaios estabelecidos pela ABNT NBR 15577:2018, com a utilização de um agregado proveniente de estéril de extração de quartzito na região de São Tomé das Letras – MG.

Os objetivos específicos são:

- Definir os materiais que serão empregados nesta pesquisa;
- Determinar os índices físicos do agregado de quartzito de São Tomé das Letras-MG;
- Classificar os quartzitos quanto à potencialidade reativa através de análise petrográfica;
- Determinar os índices físicos e químicos dos cimentos, para dosagem dos concretos;
- Produzir os corpos de prova prismáticos dos concretos em laboratório, conforme recomendações da ABNT NBR 155577-7:2018.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Quartzito de São Thomé das Letras**

A cidade de São Thomé das Letras é reconhecida no Brasil como uma grande produtora de quartzitos destinados ao uso como revestimento na construção civil. Esse quartzito também conhecido como “pedra de São Thomé” é utilizado como elementos ornamentais em obras civis, e são produzidos basicamente nos formatos de placas e filetes.

Chiodi Filho, Artur e Rodrigues (2005) ressaltam que São Thomé das Letras se destaca por ter o maior volume de extração de quartzitos no Brasil.

De acordo com um estudo publicado em 2009 pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), no ano da publicação o volume bruto de extração de quartzito na cidade de São Thomé das Letras foi de aproximadamente 1,3 milhões de toneladas.

No processo de extração do quartzito para utilização em acabamentos só possuem valor econômico as peças perfeitas, assim resultando em uma enorme quantidade de estéril chegando à quase 90% do material extraído. Esse material passa a gerar impactos ambientais negativos, tais como: alteração da paisagem natural; alterações na conformação natural do relevo e assoreamento dos cursos d’água.

Ainda segundo a FEAM, desde o início da década de 1950 a 2009 estimou-se um volume de no mínimo total de 26,7 milhões de toneladas de estéril de extração de quartzitos dispostos detalhadamente, por produção em décadas, na Tabela 01.

Com base nesses valores e considerando 70% desse volume como materiais recuperáveis como matéria-prima de uso industrial e na construção civil, obtêm-se aproximadamente 19 milhões de toneladas de material com potencial para ser trabalhado e introduzido no mercado consumidor, dispostos junto às regiões de extração.

Tabela 01 - Valores de rejeitos acumulados ao longo de décadas de extração de quartzito.

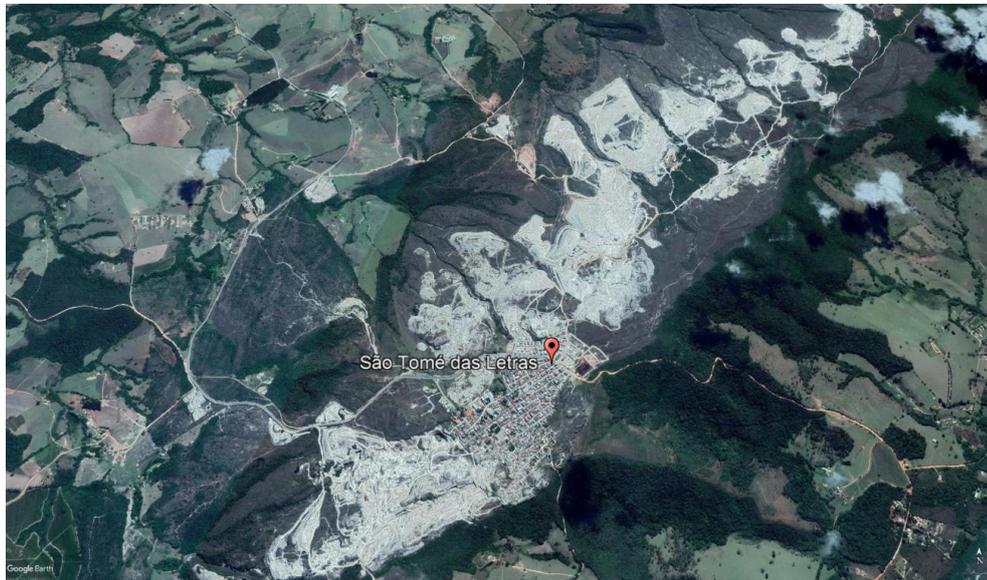
Estimativa dos Rejeitos Acumulados nas Áreas de Lavra de Quartzitos Foliados no Município de São Thomé das Letras				
Período Considerado	B	C	D	E
	Produção Bruta Média Anual de Lavra (milhão t)	Taxa de Perda na Lavra (%)	Taxa de Acumulação Local (%)	Total Acumulado no Período (milhão t)*
1950-59	0,2	90	80	1,5
1960-69	0,4	90	80	2,9
1970-79	0,6	90	80	4,1
1980-89	0,8	85	80	5,1
1990-99	1,0	80	80	6,4
2000-09	1,2	70	80	6,7
Total				26,7

(\*)  $E = B \times C \times D \times 10 \text{ anos}$

Fonte: (FEAM, 2009).

Na Figura 01, nota-se a dimensão do volume de extração baseado na configuração da superfície vista por satélite.

Figura 01 - Vista por satélite da cidade de São Thomé das Letras.



Fonte: (Google Earth Pro, 2019).

Os impactos ambientais da extração de quartzito em São Thomé das letras causam alterações na paisagem como mostra a Figura 02.

Figura 02 - Alteração na paisagem natural da região.



Fonte: (FEAM, 2009).

Na Figura 03 é possível ver o assoreamento do Ribeirão Passa Quatro.

Figura 03 – Assoreamento do Ribeirão Passa Quatro.



Fonte: (FEAM, 2009).

Entretanto, existem empresas que fazem o beneficiamento de parte desses minerais conseguindo extrair desde materiais pulverulentos a materiais com dimensões de britas,

dimensões estabelecidas pela ABNT NBR 7211:2009, comercializando os extrafinos para indústrias do ramo de cerâmicas e fabricações de tintas e texturas, e os materiais com granulometrias classificadas como britas e pedregulhos para usos na construção civil.

Na região do sul de Minas Gerais, a rocha mais comum na construção civil é a gnaíse, porém alguns profissionais da área têm utilizado o quartzito na produção de concreto e o material tem se mostrado eficiente quanto à resistência mecânica.

## 2.2 Reação Álcali-Agregado

A RAA é uma reação química que ocorre entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o óxido de sódio e potássio ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) presentes no cimento e altos índices de umidade, como mostrado na Figura 04, reagindo íons hidroxila originando um gel sílico-alcálico que tem a capacidade de absorver moléculas de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e expandir seu volume, com isso gerando esforços de tração no interior do concreto que resultam em fissuras. Isso acontece quando o elemento de concreto está exposto à altos teores de umidade ou em contato direto com a água, como pontes, barragens e elementos de fundações.

Figura 04 - Fatores necessários para ocorrência da RAA.



Fonte: (Couto, 2008).

Na Figura 05 é possível observar o preenchimento de alguns poros do concreto pelo gel resultante na RAA.

Figura 05 - Formação do gel expansivo nos poros do concreto visto por micrografia.



Fonte: (Zambotto, 2014).

Hasparyk (2005), diz que a reação álcali agregado pode ser definida como um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado.

Zihui Li et. al. (2019) afirmam que a composição do gel sílico-alcálico depende da porosidade, tamanho da partícula, grau de cristalinidade do agregado e localização do gel formado. A composição química do gel consiste principalmente em sílica, cálcio, potássio e sódio.

A norma ABNT NBR 15577-1:2018 ainda cita a reação álcali-agregado em elementos de concreto maciço que não estejam em contato direto com a água ou alto teor de umidade, mas que possuam uma dimensão mínima de um metro de qualquer um dos lados, uma vez que o concreto possua internamente uma umidade relativa suficiente para o desenvolvimento da reação.

Bonato (2015) ressalta que a RAA forma gel de caráter expansivo, esse produto quando em contato direto com água ou alto teor de umidade, que se forma ao redor ou no interior do agregado em elementos de concreto. A expansão desse gel causa esforços de tração no material. O concreto é um elemento ótimo para compressão, porém não possui o mesmo desempenho para tração, esses esforços reduzem e muito sua resistência mecânica.

Uma das manifestações da RAA é a fissuração dos elementos de concreto, em formato de mapa. Isso pode ser observado na Figura 06.

Figura 06 - Fissuras em forma de mapa em um elemento de fundação.



Fonte: (GIOVANNI et al. 2019, p.3)

No Brasil os primeiros estudos foram na década de sessenta na barragem de Jupia no rio Paraná, onde foram estudados os agregados disponíveis para a construção e verificando em laboratório a incidência de materiais reativos, diante do fato de não ter outros agregados para serem empregados, a solução foi tomar medidas preventivas, a princípio limitando o teor de alcalinidade do concreto e posteriormente substituindo até 35% de cimento portland por pozolana, conforme trabalho publicado por Paulon (1981).

Existem relatos da confirmação da existência da RAA logo após o início da construção, porém outros casos clássicos envolvem observação da patologia em longo prazo (HASPARYK, 2005).

Ensaio para análise da RAA são descritos na ABNT NBR-15577:2018, sendo possível verificar o potencial reativo dos agregados na argamassa e no concreto. O objetivo principal da norma é investigar o processo de ocorrência da RAA.

Os ensaios previstos na norma citada acima permitem por meio da variação de comprimento dos prismas de concreto, avaliar a suscetibilidade de um agregado colaborar para a expansão álcali-silica RAS (explicada posteriormente) na presença de íons hidroxila

juntamente com os álcalis (sódio e potássio) presentes no cimento padrão, com adição de NaOH (hidróxido de sódio) por um período de 20 semanas (ABNT NBR 15577:2018–7).

É importante ressaltar que a parte 7 da ABNT NBR 15577:2018 foi acrescentada no ano de 2018 e a última versão havia sido publicada em 2008. Para a versão atualizada foram revisados alguns parâmetros e considerações como, por exemplo, a utilização dos valores de absorção de água dos agregados para compensação no cálculo do traço do concreto.

Um grande destaque na versão 2018 é a adição do método acelerado, possibilitando a análise em prismas de concreto em um tempo mais curto em relação à parte 6. No entanto, devido ao recente acréscimo do método acelerado, ainda não existem parâmetros normativos suficientes para classificar o agregado em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo apenas com o ensaio pelo método acelerado. Sendo assim faz-se necessário a classificação baseada nos mesmos parâmetros para o ensaio com duração de 365 dias em prismas, mostrados na Tabela 02.

Tabela 02 - Classificação do grau de reatividade do agregado.

Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias %	Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias %
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19% e 0,40%	Entre 0,04% e 0,12%
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41% e 0,60%	Entre 0,13% e 0,24%
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%

Fonte: (ABNT NBR 15577-1:2018).

Ainda na ABNT NBR 15577:2018, são mostrados valores para classificação do grau de risco da RAA na estrutura, como mostra a Tabela 03.

Tabela 03 - Grau de risco de ocorrência de RAS.

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

Fonte: (ABNT NBR 15577-1:2018).

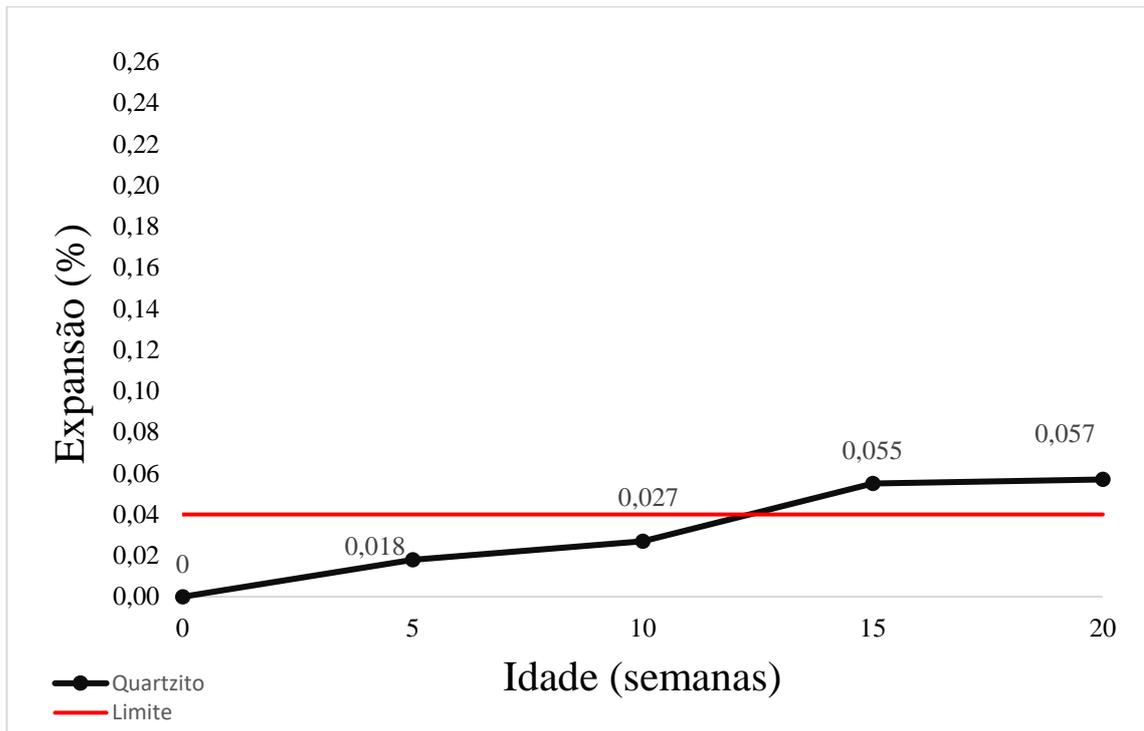
Sanchez et al. (2011) também utilizou para o método acelerado os mesmos parâmetros para classificação dos prismas considerando a expansão deletéria ou reativa pelo método dos prismas de concreto com expansão aos 365 dias. Os agregados utilizados pelos pesquisadores foram granito, basalto de duas localizações diferentes, gnaisse, cascalho de quartzito e calcário, todos provenientes do Brasil, exceto o calcário, este proveniente da região de Ottawa no Canadá.

Neste estudo foram confeccionados os prismas com os agregados citados e os mesmos passaram por um processo de alcalinização sendo também embebidos por uma solução com equivalente alcalino similar à do concreto.

Quando analisados os valores de expansão dos prismas aos 90 dias, os prismas que estavam com valores mais distintos se aproximaram em valores de expansão e passado a idade de 120 dias os valores se estabilizaram sem expansões consideráveis. Sendo assim foi definido que a idade de 120 dias foi o necessário para se obter resultados precisos de expansões deletérias, não justificando a extensão desse período de medição.

Os resultados de expansão para o cascalho de quartzito pelo método acelerado podem ser observados no gráfico 01.

Gráfico 01 - Expansão dos prismas confeccionados com cascalho de quartzito pelo método acelerado.



Fonte: (Adaptado de Sanchez et. al., 2011).

No gráfico 01 observa-se que o agregado expandiu com uma certa linearidade nas primeiras semanas até a idade de 10 semanas. Após esse período teve uma considerável expansão sendo estabilizada a partir da idade de 15 semanas.

Segundo Helene et al. (2016), a forma mais eficaz de evitar a RAA é a escolha correta do agregado a ser utilizado na preparação do concreto, no caso um agregado não reativo classificado a partir de uma análise petrográfica.

Helene et al. (2016), ainda cita como forma preventiva da reação o uso de um cimento com baixo teor alcalino ou até mesmo a adição de alguns minerais no concreto como escória de alto forno, pozolanas, metacaulin, cinzas de casca de arroz, entre outros. Ressalta-se que dependendo da região, fica economicamente inviável a troca do tipo de cimento utilizado na mistura.

A fim de conhecer a capacidade reativa do quartzito para causar a RAA, foram realizados ensaios com prismas de concreto pelo método acelerado descrito pela ABNT NBR 15577-7:2018 utilizando como agregado o quartzito proveniente de estéril de extração.

Gomes e Barreto (2013) afirmam que diversos fatores influenciam a reação, como o cimento e o teor de álcalis que o mesmo possui, os agregados utilizados, as dimensões e as formas das partículas, o processo de liberação dos álcalis, a umidade e a temperatura.

As consequências da RAA vão desde expansões, fissurações, deslocamentos, exsudação do gel ao comprometimento das estruturas de concreto quanto à sua resistência mecânica e durabilidade.

Hobbs (1988) expõe um exemplo onde testemunhos de concreto de uma estrutura afetada pela RAA na Inglaterra apresentaram uma redução significativa no módulo de elasticidade. A realização de outros estudos em vigas, citados por Hobbs (1988), também apontam redução no módulo de elasticidade em torno de 65%, após exposição por 150 dias em condição de 100% de umidade a 40°C.

A RAA (reação álcali agregado) pode ser subdividida em classes de acordo o mineral presente no agregado.

Paulon (1981) observa que os tipos de reação álcali-agregado se diferem do mecanismo de reação, critérios práticos para a identificação da reatividade e das medidas de prevenção.

### 2.2.1 Reação Álcalis-Sílica – RAS

As reações álcali-sílica basicamente ocorrem entre os álcalis da argamassa e as sílicas quimicamente reativas: Vidros naturais e artificiais, opalas, tridimitas e calcedônias, sílicas amorfas e cristobalitas (HASPARYK, 2005). Ainda segundo a autora, a RAS pode ser definida como a reação entre formas metaestáveis de sílica presente nos agregados com a solução de álcalis presente nos poros do concreto, principalmente óxido de sódio e óxido potássio ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Mohammad (2013) afirma que a reatividade da sílica está diretamente ligada à estrutura cristalina, e não de sua composição química, pois na reação álcali sílica o gel consegue penetrar o interior dos agregados do concreto já endurecido devido à sua má cristalização, permitindo assim brechas na sua estrutura molecular por onde penetram os íons hidroxilas, assim se instaurando a RAS.

O Autor ainda ressalta que para a ocorrência da RAS, é necessário que o agregado contenha uma quantidade suficiente de sílica reativa. Entretanto o volume de sílica reativa necessária para produzir efeitos deletérios é muito pequeno (SWAMY, 1992 apud MOHAMMAD, 2013), e a quantidade varia de acordo com os tipos de rochas e minerais reativos.

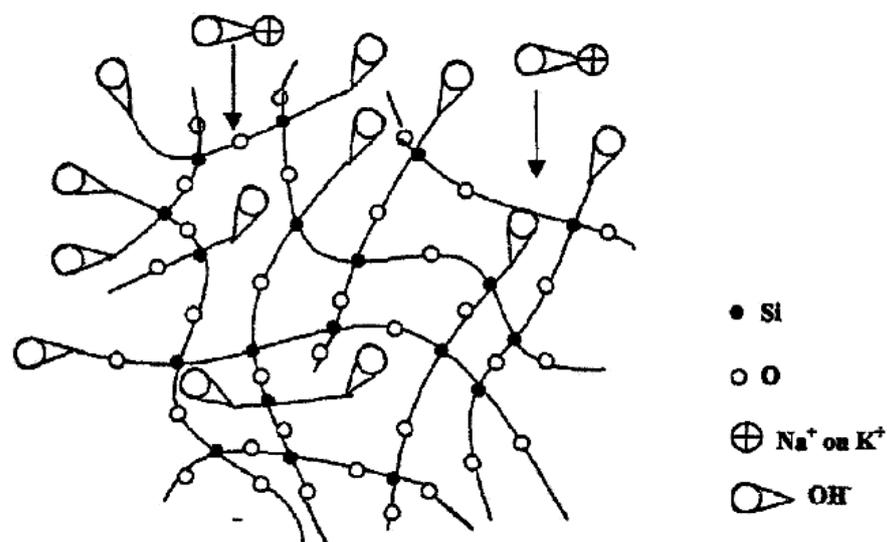
O fato de a reação se iniciar no interior do agregado acelera o processo de formação do gel expansivo, assim sendo possível identificar mais rapidamente a reação se comparado a outras classes de RAA.

Uma das mudanças apresentadas na atualização da ABNT NBR 15577:2018 é a exclusão da reação álcali-silicato como um tipo de reação e a inclusão da mesma como reação álcali-sílica diferenciando-as pela cristalização dos cristais de quartzo devida ao processo de formação e velocidade de ocorrência da reação.

Rochas metamórficas possuem cristais de sílica amorfa o que torna a ocorrência da reação mais acelerada se comparada à sílica cristalina proveniente de rochas ígneas e magmáticas onde a percepção da reação se dá de forma mais tardia.

Na Figura 07 é possível ver a estrutura molecular da sílica amorfa.

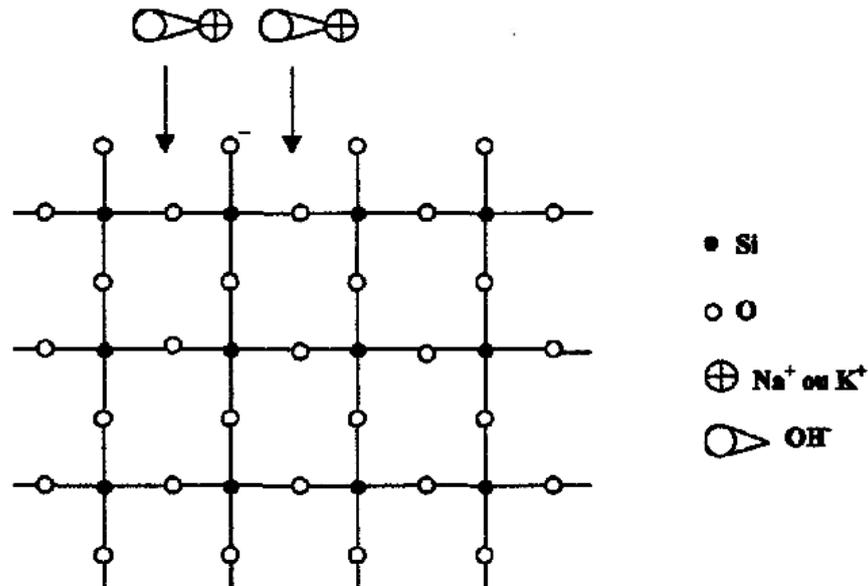
Figura 07 - Estrutura molecular da sílica amorfa.



Fonte: (Ferraris, 2000).

Ao contrário da sílica amorfa, a sílica cristalina possui uma estrutura molecular mais organizada como mostra a Figura 08.

Figura 08 - Estrutura molecular da sílica cristalina.



Fonte: (Ferraris, 2000).

### 2.2.2 Reação Álcali-Carbonato – RAC

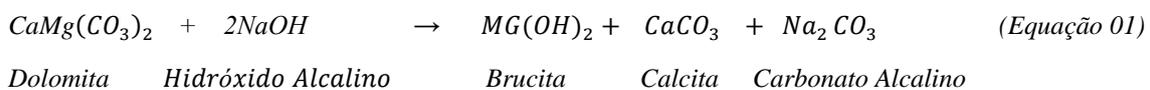
A primeira pesquisa sobre a reação álcali-carbonato (RAC) foi realizada entre as décadas de 50 e 60 pelo pesquisador canadense E. G. Swenson. A reação álcali-carbonato é descrita pela "desdolomitização", reação entre as dolomitas dos calcários e os álcalis principalmente fornecidos pelo cimento, produzindo hidróxidos de magnésio (HASPARYK, 2005). E segundo Hobbs (1988), a reação álcali-carbonato ocorre quando álcalis provenientes do cimento, ou de outra fonte externa, reagem com certos calcários com impurezas de argila, onde os álcalis interagem com a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) formando brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

Apesar de haverem vários mecanismos de reações álcali-carbonato, ainda o processo mais conhecido permanece sendo a desdolomitização da dolomita, em que as fissuras surgidas

deste processo são originadas pela reação individual das partículas de agregados graúdos (HASPARYK, 2005).

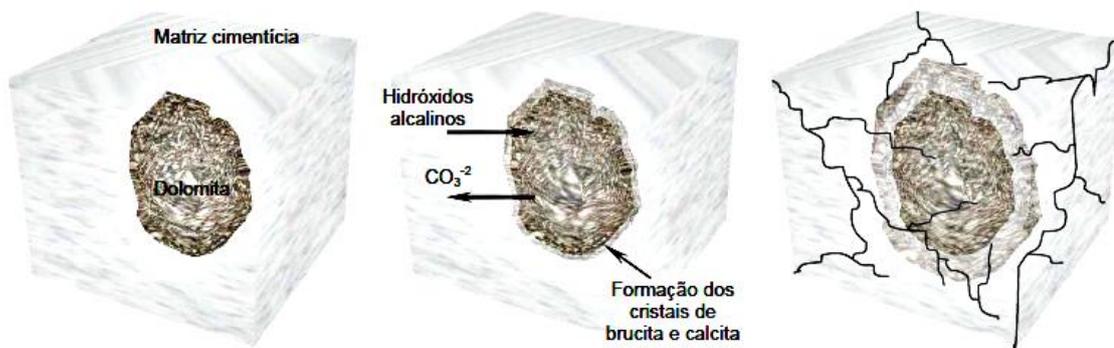
Para Paulon (1981), a RAC possui uma particularidade em que os elementos alcalinos não estão presentes no produto final da reação, apenas exerce função catalisadora entre a portlandita e os íons carbonatos, explicando assim a ausência do gel sílico-alcalino na matriz cimentícia, como na reação álcali-sílica.

O processo da desdolomitização da dolomita é explicado pela Equação 01.



Na Figura 09 é possível ver o processo de desdolomitização e a formação de cristais de brucita e calcita.

Figura 09 - Etapas da desdolomitização na reação álcali-carbonato.



Fonte: (COUTO, 2008).

Entretanto a ABNT NBR 15577:2018, deixa claro que quando se obtém somente a desdolomitização, sem expansão deletéria, não é considerado como RAC.

Deschenes (2009) ressalta que para analisar um concreto em relação à RAA deve-se ter atenção em uma outra reação química, chamada etringita tardia, cujo resultado cria um composto químico mineral de sulfato de cálcio e alumínio hidratado, isso gera no concreto uma tensão de tração que se assemelha ao gel expansivo da reação álcali-agregado. A formação da etringita tardia ocorre devida à alta umidade e temperatura de cura do concreto superior a 70°C.

Para evitar que ocorra a etringita tardia, a ABNT NBR 15577-7 estabelece os parâmetros de temperatura e umidade relativa local para que sejam preparados os concretos.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os trabalhos foram divididos em etapas, obedecendo a uma ordem de análises necessárias para a realização dos ensaios laboratoriais de determinação de índices físicos e produção dos prismas de concreto.

#### **3.1 Materiais para produção dos concretos e suas respectivas características físicas e químicas**

Os materiais definidos para produção dos concretos foram:

- Agregado graúdo produzido com estéril de quartzitos de São Thomé das Letras.
- Agregado miúdo fornecido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas).
- Cimentos CP V e CP III do fabricante Holcim.

Para obtenção dos índices físicos dos agregados foram realizados ensaios complementares.

##### **3.1.1 Agregado graúdo de quartzito**

Para a escolha do agregado graúdo levou-se em consideração o histórico de potencialidade reativa de rochas que contenham quartzo em sua formação.

Partindo desses pontos, foi escolhido o quartzito da cidade de São Thomé das Letras, sul de Minas Gerais, proveniente de estéril de extração para fins da indústria de pedras decorativas.

Os materiais foram fornecidos pela empresa SA Indústria e Beneficiamento Mineral LTDA, empresa criada em 2003, que realiza o processamento do estéril produzido nas mineradoras, a partir de uma separação visual, em que se analisam as pilhas de estéril com fragmentos de cor clara, mais próximos da cor branca. Após esta análise inicial o material teoricamente aprovado é levado para o local onde é feito o beneficiamento.

Na Figura 10, são mostradas as instalações onde é feito o beneficiamento do material.

Figura 10 - Local de beneficiamento do estéril de quartzito.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

São citados pela norma ABNT NBR NM 53:2009 os procedimentos de cálculo para a obtenção dos índices do agregado graúdo como massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

Na Figura 11 é mostrado o procedimento de ensaio de determinação da massa específica do agregado graúdo utilizando uma balança hidrostática,

Figura 11 - Procedimento para obter os valores de massa específica e massa específica aparente.



Fonte: (Autoria Própria, 2019).

Para utilizar o material nos diâmetros granulares estabelecidos pela norma que rege o ensaio da RAA, foi necessário realizar o peneiramento do material para posterior classificação granulométrica. Essa separação foi feita em um agitador elétrico de peneiras, como o mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Agitador elétrico de peneiras.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A ABNT NBR 15577-7:2018 estabelece as quantidades corretas de cada granulometria de agregado a ser usada na mistura do concreto conforme a Tabela 04.

Tabela 04 - Granulometria requerida do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Proporção individual em massa
Passante	Retido	
19,0 mm	12,5 mm	1/3
12,5 mm	9,5 mm	1/3
9,5 mm	4,75 mm	1/3

Fonte: (ABNT NBR 15577-7:2018).

As quantidades de material referente à cada peneira são demonstradas na Figura 13.

Figura 13 - Separação granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Para verificar a capacidade reativa do quartzito de São Tomé das Letras, foram feitas análises petrográficas em fragmentos representativos da rocha. A NBR 15577-3:2018 determina como devem ser feitos os ensaios petrográficos para agregados utilizados na verificação de reação álcali-agregado.

A petrografia foi feita na Universidade Estadual Paulista (UNESP) campus de Rio Claro, São Paulo.

A análise depende de fatores subjetivos e interpretativos. A experiência e qualificação do petrógrafo são essenciais para ligar as informações obtidas quanto à origem do material aos resultados da análise.

Com base nos resultados obtidos em todas as análises constituintes da petrografia, o agregado foi classificado quanto à sua potencialidade reativa.

### 3.1.2 Agregado miúdo

A parte 7 da ABNT NBR 155747:2018 estabelece que para a verificação do potencial reativo de um determinado tipo de rocha pelo método acelerado em prismas de concreto, deve ser utilizado um agregado miúdo potencialmente inócuo.

Para os ensaios propostos, foi utilizada uma areia normal produzida e distribuída pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) padronizada de acordo com a ABNT NBR 7214:2015, norma que estabelece parâmetros físicos e químicos para o beneficiamento da areia natural normal.

As quantidades utilizadas se adequam nas mesmas proporções descritas na parte 4 da ABNT NBR 15577:2018, descritas na Tabela 05.

Tabela 05 - Granulometria requerida do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)		Quantidade de material em massa
Passante	Retido	%
4,75 mm	2,36 mm	10
2,36 mm	1,18 mm	25
1,18 mm	600 µm	25
600 µm	300 µm	25
300 µm	150 µm	15

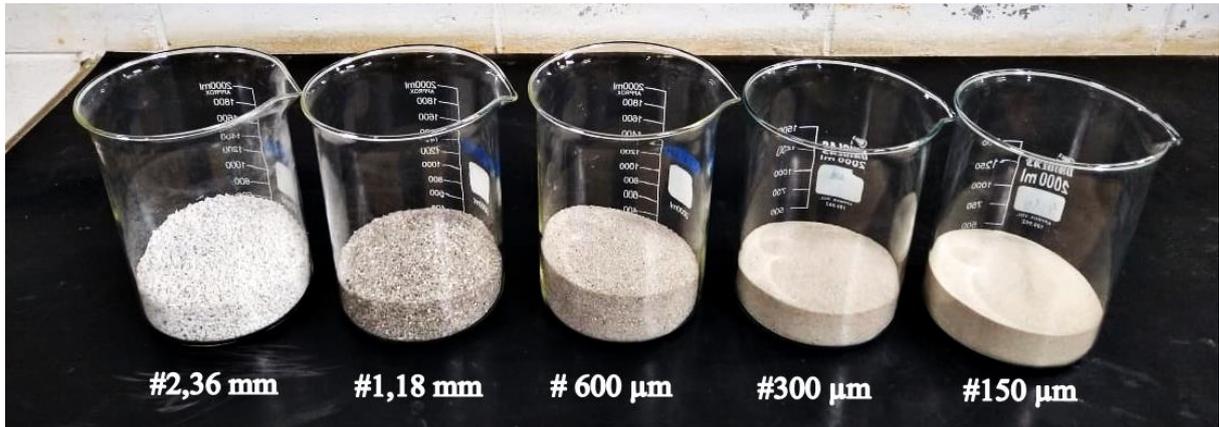
Obs.: Valores válidos para massa específica igual ou superior a 2,45 g/cm<sup>3</sup>

Fonte: (Adaptado de ABNT NBR 15577-7:2018)

Vale ressaltar que na falta de material retido na peneira de abertura de malha 2,36 mm, utilizou-se do próprio quartzito possuindo a mesma granulometria requerida.

Na Figura 14 é possível observar as granulometrias do agregado miúdo utilizadas na mistura do concreto.

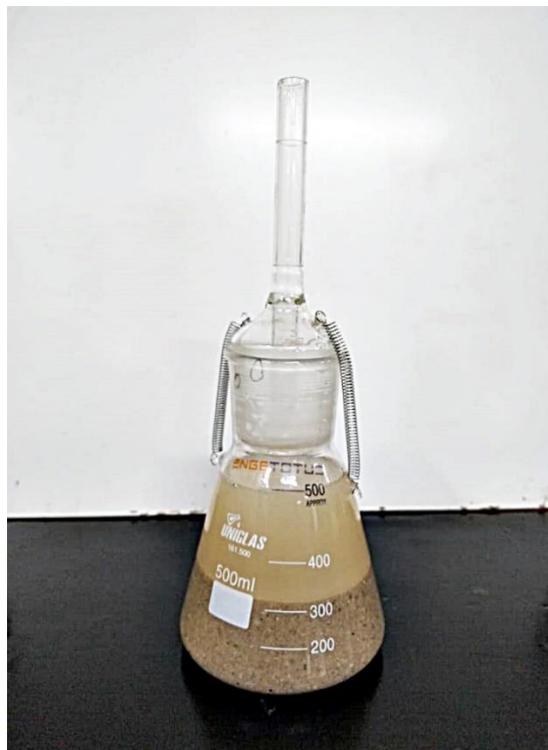
Figura 14 - Separação das granulometrias de agregado miúdo.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Para o agregado miúdo utilizou-se da norma ABNT NM 52, na qual descreve os procedimentos necessários para determinação da massa específica de agregados miúdos, procedimento este mostrado na figura 15.

Figura 15 - Ensaio para determinação de massa específica do agregado miúdo.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A obtenção dos valores dos ensaios permite o cálculo correto do traço para a mistura do concreto.

### 3.1.3 Cimentos

Para verificar a reatividade do agregado estudado, foram escolhidos dois tipos de cimento, com o intuito de comparar entre ambos qual deles contribui positivamente ou negativamente para a ocorrência da RAA.

Visando uma maior confiabilidade da composição dos produtos para comparação nos estudos, foram escolhidos o cimento CP V e o cimento CP III do fabricante Holcim, uma empresa do setor construtivo consolidada há anos no mercado mundial, referência em produtos e serviços para construção civil.

O cimento CP V tende a ser mais reativo devido à maior quantidade de clínquer em sua composição, tornando-o um cimento mais alcalino. Já o CP III é um cimento que contém uma grande quantidade de escória de alto forno em sua composição, com isso faz com que os elementos de concreto sejam menos permeáveis tendo grande utilização em obras expostas à umidade.

Para obter os valores de massa específica para ambos os cimentos utilizados no estudo, utilizou-se do disposto na ABNT NBR NM 23:2000, que descreve os procedimentos para ensaio que se assemelham com os da norma ABNT NBR 9776:1987. Em ambas, é utilizado o frasco de Le Chatelier para realização dos ensaios, porém os frascos se diferem na capacidade volumétrica de um ensaio para o outro.

Na Figura 16 observa-se o frasco de Le Chatelier utilizado na realização do ensaio para obtenção de valores de massa específica, sendo repetido o procedimento 3 vezes para cada tipo de cimento a fim de se trabalhar com o valor médio.

Figura 16 - Frasco de Le Chatelier utilizado para ensaio de massa específica do cimento.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Está descrito na ABNT NBR 15577-7:2018 que na mistura do concreto deve ser levado em consideração o equivalente alcalino do cimento.

Para o cálculo do equivalente alcalino, utiliza-se a Equação 02.

$$Na_2O_{eq.} = (0,658 K_2O \% + Na_2O \%) \quad (\text{Equação 02})$$

É necessário conhecer os valores percentuais de  $K_2O$  e  $Na_2O$  presentes no cimento e para isso foi necessária uma análise química feita em laboratório.

Foi fornecida pelo fabricante uma tabela, conforme Anexo A, onde se dispõe de apenas um desses valores, impossibilitando o uso da equação.

Entretanto, o resultado da análise química realizada em laboratório forneceu ambas as porcentagens dos elementos, utilizadas para o cálculo correto do equivalente alcalino.

Devido ao longo prazo para a obtenção dos resultados, foi necessário adotar valores percentuais para iniciar-se a produção dos concretos considerando o tempo disponível para a realização do ensaio.

Para o cimento CP V foi adotado um equivalente alcalino de 0,9% considerando o valor máximo estabelecido pela norma, isso por se tratar de um cimento sem adições de escórias ou materiais pozzolânicos, conseqüentemente mais alcalino, e para o CP III o valor de 0,6% devido à presença de escórias de alto forno em sua composição.

Munhoz (2007), afirma que a escória que está presente na composição do cimento CP III tem efeito mitigador, podendo causar uma redução e controle da expansão do concreto quando o mesmo for acometido pela RAA.

### 3.2 Confeção dos Prismas

Os moldes utilizados para os corpos de prova prismáticos foram emprestados pela Universidade de São Paulo (USP), Campus São Carlos. Na Figura 17 é mostrado o molde utilizado para a realização dos ensaios.

Figura 17 - Moldes utilizados para a confecção dos prismas.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A ABNT NBR 15577-7:2018 determina que os prismas devem ter um comprimento de 285 mm e uma seção transversal quadrada de lado 7,5 mm.

Para o estudo dos prismas pelo método acelerado, a norma ABNT NBR 15577-7:2018 determina que o equivalente alcalino deve ser elevado a 1,25%, para acelerar o processo de expansão e não para simular situações de campo.

Para isso foi compensada a diferença de alcalinidade entre o valor estabelecido pela norma e o valor de álcalis presente no cimento, adicionando-se NaOH na água de amassamento.

Foram realizados os cálculos com as porcentagens descritas para achar o valor de álcalis em massa, obtendo assim a quantidade já presente no cimento e a quantidade total para a porcentagem acrescida.

Em posse dos valores obtidos, foi possível saber a diferença de álcalis em massa que deverá ser acrescentada expressa em  $\text{Na}_2\text{O}$ .

A parte 6 da ABNT NBR 15577:2018 dispõe de uma tabela de conversão de  $\text{Na}_2\text{O}$  para  $\text{NaOH}$  para obter o valor em massa de soluto a ser misturado na água de amassamento, assim alcançando a massa necessária de álcalis estipulada anteriormente.

A Tabela 06 mostra como deve ser feita a conversão.

Tabela 06 - Tabela de fator de conversão de  $\text{Na}_2\text{O}$  para  $\text{NaOH}$ .

$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH}$	
Composto	Peso molecular
$\text{Na}_2\text{O}$	61,98
$\text{NaOH}$	39,997
Fator de conversão = $2 \times 39,997/61,98 = 1,291$	
Fonte: (ABNT NBR 15577-6:2018).	

A norma em estudo estabelece que a temperatura ambiente para todas as etapas do ensaio, temperatura dos materiais, em específico agregados e água de amassamento, e também da câmara úmida deve estar no intervalo de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

### 3.2 Dosagem dos Concretos

Para Assunção (2002), dosagem do concreto, em uma linguagem popular, seria a mistura dos ingredientes que constituem mesmo.

Foi utilizado o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), considerando os parâmetros já estabelecidos pela norma de método acelerado em prismas:

- Taxa de absorção de água dos agregados;
- Consumo de cimento de  $(420 \pm 10) \text{ kg/m}^3$ ;
- Relação água/cimento de 0,45.

Os cálculos foram feitos considerando o volume de quatro corpos de prova para eventuais perdas durante a moldagem. Também foi considerada a porcentagem de quartzito presente no agregado miúdo, gerando assim uma nova absorção de água pelo mesmo.

O traço em massa (kg) para materiais secos calculados através do método ABCP foi de 1 : 1,53 : 2,54 : 0,64 considerando cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e massa de água respectivamente.

Segundo a ABNT NBR 12821:2009, a mistura deve ser realizada em misturador mecânico, porém o equipamento não suportou misturar os componentes do concreto devido às dimensões do agregado graúdo. Sendo assim a mistura foi feita manualmente conforme mostrado na figura 18, em quantidade suficiente para todos os ensaios.

Figura 18 - Realização da mistura dos concretos.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Foram seguidas etapas para a mistura:

- Antes de iniciar a rotação, acrescentar o agregado graúdo e um pouco da água de amassamento;
- Iniciar o processo de mistura e acrescentar o agregado miúdo, o cimento e o restante da água de amassamento;
- Misturar por 3 minutos, seguidos de 3 minutos de descanso e mais 2 minutos de mistura.

Durante o tempo de descanso foi utilizado para cobrir a cuba de mistura um pano úmido para evitar perda de umidade na mistura.

Foram moldados 3 corpos de prova seguindo as recomendações da ABNT NBR 15577-7:2018.

Os prismas foram moldados em duas etapas, colocando o concreto até metade da altura da forma e adensado, posteriormente completou-se o restante da forma adensando novamente até que se formasse uma superfície lisa como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Prisma após o processo de moldagem.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

O processo de adensamento foi uniforme para todos os corpos de prova tomando o cuidado para não ocorrer segregação de material.

Após o processo de moldagem os prismas foram colocados em um recipiente com umidade do ar o mais próximo de 95% para a cura inicial durante 24 horas.

Na figura 20 é mostrado o processo de cura inicial.

Figura 20 - Cura inicial dos prismas.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Durante todo o tempo de ensaio os prismas estão sendo armazenados em recipiente fechado colocado dentro de uma estufa à temperatura de 60°C podendo ser retirados apenas para a realização de medições de expansão.

Dentro do recipiente está sendo mantida uma lâmina d'água de aproximadamente 3 cm (centímetros), de maneira que os prismas não entrem em contato com a água.

Os recipientes são mostrados na figura 21.

Figura 21 - Recipientes de armazenamento dos prismas.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

### 3.3 Determinação do Comprimento

Antes de determinar a expansão dos prismas foi feita a leitura da barra-padrão utilizando relógio comparador com precisão de 0,001 mm. Logo após a retirada da forma, os prismas foram pesados e medidos, posteriormente foram submersos em água durante 30 minutos. Feito isso, os prismas foram secados superficialmente, pesados e medidos novamente e armazenados nos recipientes para serem levados à estufa.

A partir da moldagem dos prismas de concreto foram feitas leituras, como mostrado na figura 22, nas idades de 5, 10,15 semanas com a medição na idade de 20 semanas ficando para o dia 29 de novembro conforme cronograma mostrado no Anexo B.

Figura 22 - Medição de variação de comprimento em prisma de concreto.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

Os prismas não foram retirados da estufa antes de completarem a idade de 5 semanas.

Para as medições, os prismas foram retirados da estufa e colocados em recipiente com umidade relativa ambiente 24 horas antes da realização da medição. Após esse período os prismas foram pesados e medidos e levados de volta ao recipiente de maneira que fossem acondicionados no sentido inverso ao que estavam anteriormente.

Para o cálculo de variação de comprimento utilizou-se a diferença entre valor da medição na idade requerida e o valor da medição inicial. Essa diferença foi expressa em porcentagem com aproximação de 0,001%.

Para o cálculo de variação de massa o procedimento foi semelhante ao de variação de comprimento, substituindo-se os dados de comprimento pelos dados de massa obteve-se a variação também em porcentagem, porém com aproximação de 0,01%.

Ao final das medições na idade de 20 semanas, serão obtidos os valores de expansão dos prismas, em porcentagem, relacionados às medidas iniciais.

Como citado no item 2.2 deste estudo, como a parte 7 da ABNT NBR 15577:2018 foi acrescentada no ano de 2018, ainda não se dispõe de parâmetros normativos suficientes para determinação de potencialidade reativa do agregado pelo método acelerado.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1 Determinação dos valores característicos dos materiais

Foram realizados os ensaios para a obtenção das propriedades físicas dos materiais utilizados na mistura do concreto.

Na Tabela 07, são apresentadas as características físicas dos agregados.

Tabela 07 - Determinação das características físicas dos agregados.

<b>QUARTZITO</b>	
MASSA ESPECÍFICA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE
2,66 g/cm <sup>3</sup>	2,52 g/cm <sup>3</sup>
MASSA UN. COMPACTADA	ABSORÇÃO DE ÁGUA
1,397 kg/dm <sup>3</sup>	2,03%
<b>AREIA DO IPT</b>	
MASSA ESPECÍFICA	ABSORÇÃO DE ÁGUA
2,65 g/cm <sup>3</sup>	5%

Fonte: (Autoria própria, 2019).

Os valores de massa específica e percentual de equivalente alcalino para os cimentos utilizados nos ensaios estão dispostos na Tabela 08.

Tabela 08 - Determinação das características dos cimentos

	Cimento Holcim CP V	Cimento Holcim CP III
$\rho$	3,06 (g/cm <sup>3</sup> )	3,07 (g/cm <sup>3</sup> )
NaOH eq.	0,9%	0,6%

Fonte: (Autoria própria, 2019).

Entretanto, após a produção dos corpos de prova foram obtidos os resultados da análise do cimento feitas no laboratório do IPT, mostrado na tabela 09, através da Professora Doutora Alessandra Lorenzetti de Castro, docente no departamento de engenharia e de estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Tabela 09 - Análise química do cimento com ênfase no equivalente alcalino.

Determinações	Resultado, em %	
	Cimento CP III	Cimento CP V
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,23	0,14
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,51	0,71
Equivalente alcalino (em Na <sub>2</sub> O) <sup>Nota 2</sup>	0,57	0,61

Nota 2: Equivalente alcalino (em Na<sub>2</sub>O) = % Na<sub>2</sub>O + 0,6587 x % K<sub>2</sub>O.

Fonte: (Adaptado do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2019).

## 4.2 Análise Petrográfica

Para obtenção da composição mineralógica dos quartzitos em estudo foram feitas análises no laboratório da USP-SP. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição do quartzito de São Thomé das Letras por meio de análise petrográfica.

Composição mineralógica	(%)
Quartzo	94,5
Muscovita	5,2
Opacos (magnetita/limonita/hidróxido de ferro)	0,3
Turmalina	Traço
Zircão	Traço
Rutilo	Traço

Fonte: (Adaptado da Universidade do Estado de São Paulo, 2019).

De acordo com a NBR 15577-3:2018 e com base nos resultados obtidos pela análise petrográfica, o quartzito de São Tomé das Letras é considerado potencialmente reativo por conter uma quantidade superior a 5% de mineral quartzo. Ainda, considerando que a reação acontece entre os álcalis do cimento e os materiais silicosos presentes no agregado, há uma grande probabilidade de ocorrer RAS (reação álcali-sílica) utilizando o quartzito proposto, visto que a principal constituinte do mineral quartzo é a sílica (SiO<sub>2</sub>).

### 4.3 Expansão dos prismas

Durante o período de ensaios em laboratório, foram feitas as medições e avaliações visuais dos corpos de prova.

Com a última leitura realizada na idade de 20 semanas conforme cronograma demonstrado no anexo B, a tabela 11 dispõe de resultados finais obtidos para análise de variações de comprimento e massa.

Tabela 111 - Dados de leitura dos prismas de concreto.

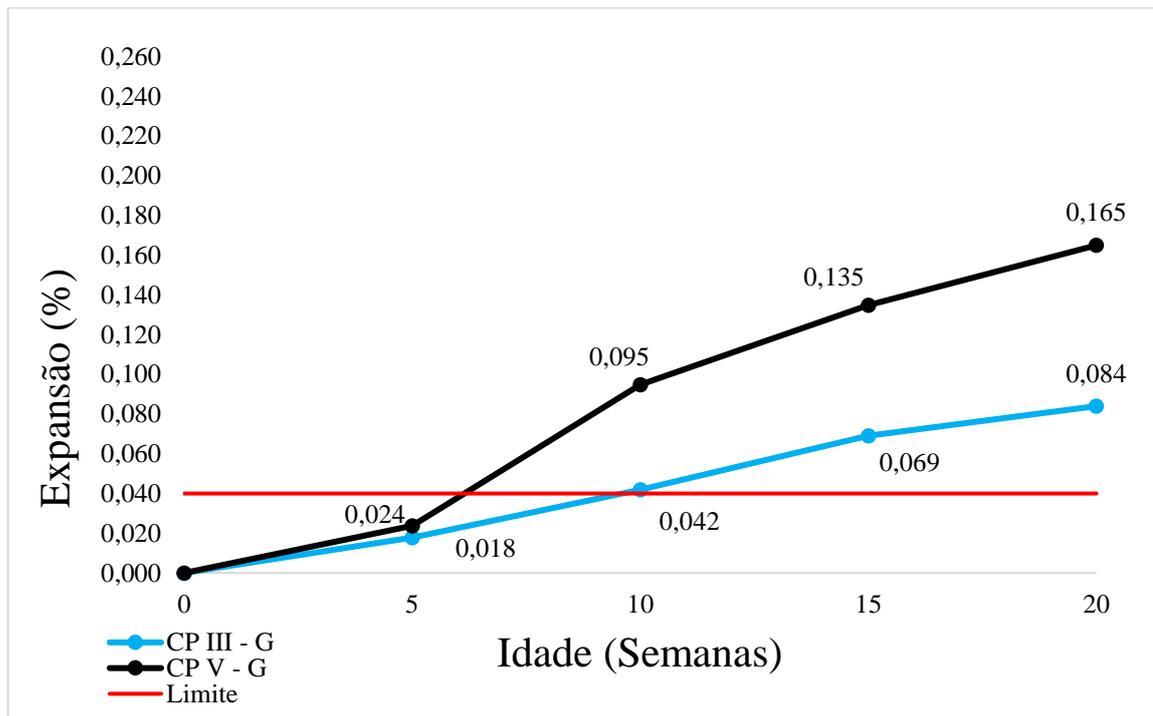
IDADE (Semanas)	Corpos de Prova	CP III - Quartzito				Corpos de Prova	CP V - Quartzito			
		$\Delta L$ (mm)	$\Delta L$ (%)	$\Delta m$ (g)	$\Delta m$ (%)		$\Delta L$ (mm)	$\Delta L$ (%)	$\Delta m$ (g)	$\Delta m$ (%)
0	CP 1					CP 1				
	CP 2	0,000	0,000	0,0	0,0	CP 2	0,000	0,000	0,0	0,0
	CP 3					CP 3				
5	CP 1					CP 1				
	CP 2	0,051	0,018%	153,3	4,40%	CP 2	0,068	0,024%	172,0	4,40%
	CP 3					CP 3				
10	CP 1					CP 1				
	CP 2	0,120	0,042%	212,0	6,08%	CP 2	0,270	0,095%	219,3	5,76%
	CP 3					CP 3				
15	CP 1					CP 1				
	CP 2	0,197	0,069%	243,7	6,99%	CP 2	0,384	0,135%	284,3	7,62%
	CP 3					CP 3				
20	CP 1					CP 1				
	CP 2	0,239	0,084%	289,0	8,29%	CP 2	0,469	0,165%	379,7	10,36%
	CP 3					CP 3				

Fonte: (Autoria própria, 2019)

É possível notar uma expansão considerável nos prismas produzidos com cimento CP V em relação aos que foram produzidos com cimento CP III entre as idades de 5 e 10 semanas. Considerando a diferença de equivalente alcalino adotada, que difere da real, conforme apontada pela análise química já mostrada na tabela 09 onde os valores eram próximos, pode-se afirmar que a causa da diferença seja apenas a diferença de composição do elemento ligante, já que os prismas ficaram expostos igualmente em tempo e condições de agressividade ambiental, e ainda que a escória de alto-forno presente no cimento CP III tem função mitigadora em relação a RAA.

Em comparação com os resultados de Sanchez et. al. (2011), expostos no item 2.2 deste trabalho, os prismas produzidos com quartzito de São Thomé das Letras mostram um comportamento bem diferente, com expansões consideráveis a partir da idade de 5 semanas tanto para os que foram produzidos com o cimento CP III quanto para os produzidos com CP V como mostra o gráfico 02.

Gráfico 02 - variação de comprimento dos prismas confeccionados com cascalho de quartzito pelo método acelerado.



Fonte: (Autoria própria, 2019).

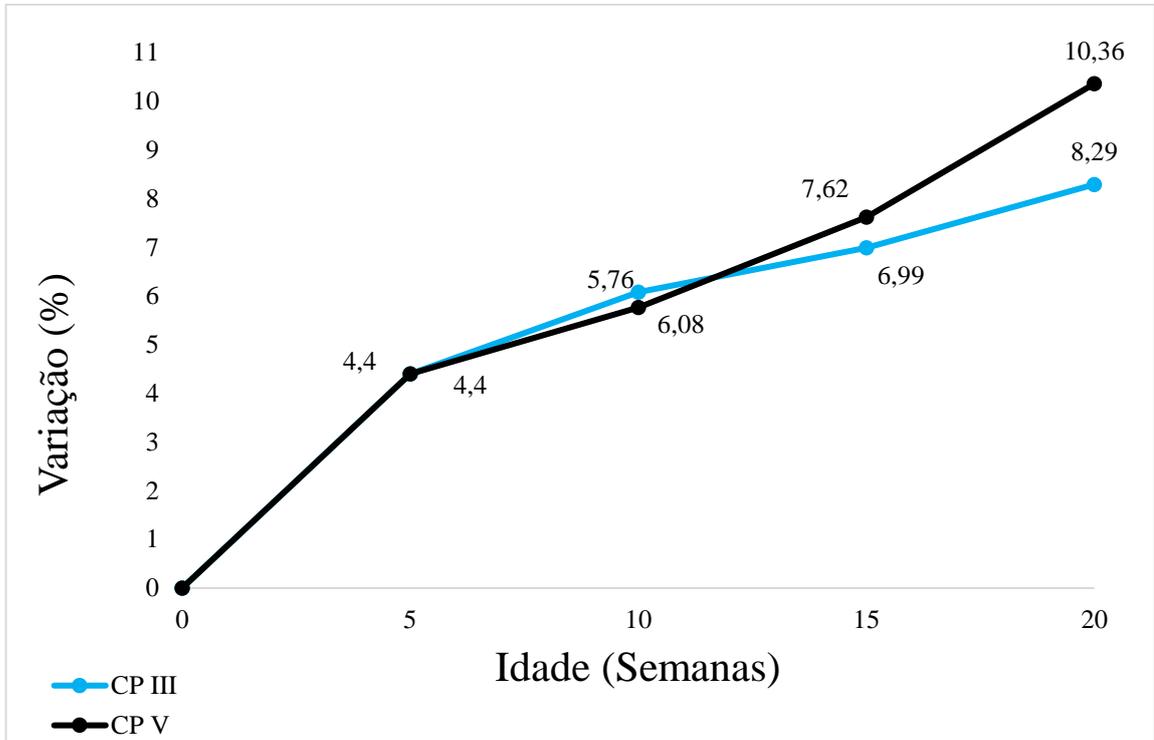
No gráfico 02, observa-se que os prismas confeccionados com o cimento CP III tiveram um comportamento de expansão praticamente linear, já os prismas com cimento CP V tiveram um salto expressivo entre as idades de 5 e 10 semanas.

Com os valores obtidos, é possível ver que os agregados ultrapassaram o limite que divide a classificação dos mesmos em potencialmente reativos ou potencialmente inócuos.

Em relação a diferença de equivalente alcalino verdadeiro e o adotado para os ensaios, aos prismas produzidos com cimento CP V adição de NaOH eq. foi de 0,35, já nos prismas produzidos com cimento CP III foi de 0,65. Se com esses valores de equivalente alcalino, os prismas com cimento CP V estão expandindo consideravelmente, usando o equivalente alcalino real seria necessário adicionar um valor de 0,64 NaOH eq. Isso aumentaria a agressividade aos prismas, um dos principais fatores para desencadear a RAA.

A ABNT NBR 15577 – 7 ainda traz que os prismas também devem ser pesados e analisados quanto à variação de massa como mostra no gráfico 03.

Gráfico 03 - Variação de massa dos prismas confeccionados com cascalho de quartzito pelo método acelerado



Fonte: (Autoria própria, 2019).

A ABNT NBR 15577 – 7 expressa que a perda ou ganho de massa está relacionado às condições de cura, porém não há limites para essa variação.

Considerando que as condições de cura para todos os prismas foram as mesmas, a variação de massa deve-se ao tipo do agregado, que possui uma taxa de absorção de água de 2,03%.

## 5 CONCLUSÃO

Com os ensaios finalizados, os resultados obtidos foram extremamente satisfatórios.

Sobre a análise petrográfica realizada na UNESP, os resultados confirmaram a inicial potencialidade reativa do agregado por se tratar de um mineral altamente sílico com um valor de 94,5% de quartzo em sua composição.

Em relação aos prismas, os valores das expansões apontaram para uma classificação positiva quanto à RAA. Com os valores obtidos, pôde-se classificar o quartzito de São Thomé das Letras como reativo grau 2 no caso dos prismas produzidos com o cimento CP V e grau 1 para os produzidos com o cimento CP III.

Sobre a variação de massa dos corpos de prova, pode-se atribuir a causa ao gel que provavelmente foi formado no interior do concreto, por se tratar de um material expansivo que absorve umidade. Entretanto a existência do gel expansivo só pode ser determinada através de um ensaio em MEV (Microscopia eletrônica de varredura).

Analisando os dados de composição do cimento obtidos por meio de análise química no laboratório do IPT, é possível ver que se os concretos fossem produzidos levando em consideração os valores reais de NaOH eq., provavelmente os níveis de expansão seriam maiores por se tratar de uma reação química entre os álcalis e a sílica dos agregados.

Durante os ensaios buscou-se seguir fielmente as determinações da norma ABNT NBR 15577:2018, com o intuito de se obter resultados confiáveis durante a pesquisa, para uma determinação correta sobre o grau de reatividade do agregado.

A ABNT NBR 15577:2018, estabelece todos os parâmetros bem detalhados em etapas, desde a preparação dos materiais à execução dos prismas e leitura dos mesmos.

No decorrer dos estudos em laboratório, improvisações foram necessárias no processo de adensamento, pois o laboratório não dispunha de mesa vibratória, sendo o processo feito em mesa de “flow test” tomando todos os cuidados para que não ocorresse a segregação dos materiais, também foi improvisado um recipiente que simulasse as condições de umidade e armazenamento de uma câmara úmida, como descrito na norma para a realização da cura inicial dos prismas logo após a moldagem.

Por meio dos ensaios realizados, fica nítido que é de extrema importância o estudo dos agregados quanto à potencialidade reativa para o emprego correto na produção de concreto, considerando que a RAA ao se instalar no concreto já endurecido pode causar uma redução considerável na resistência mecânica do mesmo, visto que a principal característica do concreto é sua resistência mecânica, comprometendo assim toda a estrutura.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2000. Julho.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Novembro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto: Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Maio.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento: Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Dezembro
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado Miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Novembro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório: procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Abril.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados: reatividade álcali-agregado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Julho.
- ASSUNÇÃO, José Wilson. **Curvas de Dosagem Para Concretos Convencionais e Aditivados Confeccionados Com Materiais Da Região Noroeste Do Paraná.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.
- BONATO, Luciano Cezar. **Reação álcali-agregado, principais causas e estudo de reatividade potencial.** Campo Mourão: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015.
- CHIODI FILHO, Cid; ARTUR, Antônio C.; RODRIGUES, Eleno de P. **Aspectos geológicos, petrográficos e químicos de interesse para o aproveitamento econômico dos quartzitos foliados de São Thomé – Minas Gerais.** São Paulo: Geociências. 2005.
- COUTO, Tiago Andrade. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas.** Goiânia: Universidade Federal de Goiás. 2008.
- DESCHENES, D. J. **Damaged bent caps: shear tests and field implications.** Master of Science in Engineering, The University of Texas. 2009.
- FERRARIS, C.F. **Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete.** Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology Journal. 1995
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Plano de ação para sustentabilidade do setor de rochas ornamentais: quartzito São Thomé das Letras.** Belo Horizonte: FEAM, 2009.

GIOVANNI, Fábio; ROBERTO, Flávio; AUGUSTO, Luiz; CUNHA, Márcio; SGARBI, Maurício. **RAA e o 15th ICAAR**. São Paulo. 2019.

GOMES NETO, D. P.; BARRETO, L. S. Manifestações patológicas na construção: uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seu mecanismo e os fatores que a influenciam. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE**. João Pessoa. 2013.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

HELENE, Paulo; CARVALHO, Mariana; PACHECO, Jéssika. **Engineering field tests for alkali aggregate reaction**. *Structural Concrete*. São Paulo. 2017.

HOBBS, D. W. **Alkali-Silica reaction in concrete**. Londres: Thomas Telford, 1988

LAFARGE HOLCIM. **Relatório de ensaios de cimento: tipo/classe CP III 40 RS**. Barroso: Lafarge Holcim, 2018.

LAFARGE HOLCIM. **Relatório de ensaios de cimento: tipo/classe CP V ARI PLUS**. Pedro Leopoldo: Lafarge Holcim, 2019.

MOHAMMAD, S. Islam; GHAFUORI, Nader. **Evaluation of Alkali-Silica Reactivity Using Aggregate Geology, Expansion Limits of Mortar Bars and Concrete Prisms, and Kinetic Model**. Canadá: Canadian Center of Science and Education. 2013.

PAULON, Vladimir Antônio. **Reações álcali-agregado em concreto**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1981.

SABBAG, Anderson Finamore. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2003.

SANCHES, Leandro; KUPERMAN, Selmo; HELENE, Paulo. **Using the accelerated Brazilian concrete prism test (ABCPT) to evaluate alkali aggregate reaction (AAR)**. Ibracon. 2011.

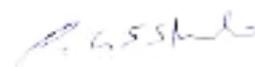
VALDUGA, Laila. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 2002.

ZAMBOTTO, Danielle. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado nas respostas estruturais de pavimentos de concreto**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2014.

ZIHUI Li, ROBERT J. Thomas, SULAPHA Peethamparan. **Alkali-silica reactivity of alkali-activated concretes subjected to ASTM C1293 and 1567 alkali-silica reactivity tests**. Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, New York. 2019.

## ANEXO A

## Especificações do cimento CP III

		<b>RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO</b> <b>TIPO / CLASSE : CP III 40 RS</b> <b>FÁBRICA BARROSO</b>					
		ENSAIOS	PERÍODO	01.01.2018 25.01.2018	29.01.2018 19.02.2018	28.02.2018 12.03.2018	28.03.2018 19.04.2018
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>							
# 400 (%) IT Holcim	Média	1,9	2,1	1,7	2,2		
	Desv. Pad.	0,63	0,41	0,45	0,34		
	Nº Amostras	7	8	8	8		
Blaine (cm <sup>2</sup> /g) NBR NM 75	Média	4763	4640	4635	4822		
	Desv. Pad.	191	100	96	102		
	Nº Amostras	8	8	8	8		
Início Pega (min) NBR NM 65	Média	189	201	200	201	≥ 60	
	Desv. Pad.	6	8	11	7		
	Nº Amostras	8	8	8	8		
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média	249	264	260	261	≤ 720	
	Desv. Pad.	5	7	10	6		
	Nº Amostras	8	8	8	8		
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média	15,0	12,2	13,0	12,6		
	Desv. Pad.	3,19	0,73	0,60	0,49		
	Nº Amostras	8	8	8	8		
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média	27,4	24,9	26,0	25,9	≥ 12,0	
	Desv. Pad.	2,52	0,95	1,24	0,49		
	Nº Amostras	8	8	8	8		
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média	37,6	34,1	36,4	36,0	≥ 23,0	
	Desv. Pad.	2,01	1,06	1,68	0,84		
	Nº Amostras	8	8	8	6		
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média	48,9	47,4	48,4		≥ 40,0	
	Desv. Pad.	1,16	1,11	1,22			
	Nº Amostras	8	8	8			
<b>ANÁLISE QUÍMICA (%)</b>							
PF 1000°C	NBR NM 18	2,58	2,58	2,67	2,68	≤ 4,5 %	
SiO <sub>2</sub>	NBR 14656	24,92	26,02	25,90	26,49		
R.I.	NBR NM 15	0,78	0,78	1,24	0,95	≤ 1,5 %	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 14656	7,33	7,65	7,61	7,44		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 14656	2,04	1,94	1,93	1,90		
CaO	NBR 14656	55,41	54,18	54,36	53,94		
MgO	NBR 14656	3,21	3,50	3,47	3,51		
SO <sub>3</sub>	NBR 14656	1,72	1,67	1,64	1,70	≤ 4,0 %	
CO <sub>2</sub>	NBR NM 20					≤ 3,0 %	
K <sub>2</sub> O	NBR 14656	0,70	0,67	0,69	0,67		
PF 500°C	IT Holcim	0,71	0,78	0,68	0,77		
C <sub>3</sub> A (Teórico)	Equação Bogue						
<b>OBSERVAÇÕES:</b>							
1. IT - Injúria de Trabalho							
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 8,0% (NBR 11579)							
 <b>Eng. Carlos Melo</b> Supervisor A. Técnicos SP							
AB00_CP_III_40_RS_VENDAS.xls		7 maio, 2018					

## Especificações do cimento CP V

		<b>RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO</b> <b>TIPO / CLASSE : CP V ARI PLUS</b> <b>FÁBRICA PEDRO LEOPOLDO</b>					
ENSAIOS	PERÍODO	13.11.2018 07.12.2018	11.12.2018 04.01.2019	08.01.2019 01.02.2019	05.02.2019 01.03.2019	LIMITES NBR 16697/2018	
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>							
<b># 400 (%)</b> IT Holcim	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>2,9</b> 0,19 8	<b>2,5</b> 0,16 8	<b>4,1</b> 1,33 8	<b>2,9</b> 0,27 8		
<b># 325 (%)</b> NBR 9202	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras						
<b>Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b> NBR 16372	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>4607</b> 49 8	<b>4572</b> 54 8	<b>4631</b> 69 8	<b>4590</b> 50 8	<b>≥ 3000</b>	
<b>Início Pega (min)</b> NBR NM 65	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>134</b> 8 8	<b>132</b> 7 8	<b>136</b> 12 8	<b>134</b> 8 8	<b>≥ 60</b>	
<b>Fim Pega (min)</b> NBR NM 65	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras					<b>≤ 600</b>	
<b>Exp. Quente (mm)</b> NBR 11582	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras					<b>≤ 5</b>	
<b>R 1 dia (MPa)</b> NBR 7215	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>27,6</b> 0,60 8	<b>26,6</b> 0,68 8	<b>26,9</b> 0,72 8	<b>27,0</b> 1,22 8	<b>≥ 14,0</b>	
<b>R 3 dias (MPa)</b> NBR 7215	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>41,6</b> 0,90 8	<b>41,1</b> 0,69 8	<b>40,1</b> 1,18 8	<b>40,5</b> 1,06 8	<b>≥ 24,0</b>	
<b>R 7 dias (MPa)</b> NBR 7215	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>46,5</b> 1,21 8	<b>45,7</b> 0,78 8	<b>44,6</b> 1,64 8	<b>45,6</b> 0,78 8	<b>≥ 34,0</b>	
<b>R 28 dias (MPa)</b> NBR 7215	<b>Média</b> Desv. Pad. Nº Amostras	<b>51,8</b> 0,86 8	<b>51,1</b> 1,03 8	<b>50,5</b> 1,39 8	<b>51,4</b> 0,89 8		
<b>ANÁLISE QUÍMICA (%)</b>							
<b>PF 1000°C</b>	NBR NM 18	<b>5,65</b>	<b>5,74</b>	<b>5,69</b>	<b>5,34</b>	<b>≤ 6,5</b>	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	NBR 14656	<b>18,14</b>	<b>17,51</b>		<b>17,48</b>		
<b>R.I.</b>	NBR NM 15	<b>0,95</b>	<b>0,76</b>		<b>0,61</b>	<b>≤ 3,5</b>	
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	NBR 14656	<b>4,90</b>	<b>5,11</b>		<b>4,90</b>		
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	NBR 14656	<b>2,99</b>	<b>3,03</b>		<b>2,87</b>		
<b>CaO</b>	NBR 14656	<b>64,58</b>	<b>64,17</b>		<b>63,81</b>		
<b>MgO</b>	NBR 14656	<b>0,76</b>	<b>0,78</b>	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>		
<b>SO<sub>3</sub></b>	NBR 14656	<b>2,73</b>	<b>2,48</b>	<b>2,78</b>	<b>2,72</b>	<b>≤ 4,5</b>	
<b>CO<sub>2</sub></b>	NBR NM 20	<b>4,87</b>	<b>4,77</b>		<b>4,47</b>	<b>≤ 5,5</b>	
<b>K<sub>2</sub>O</b>	NBR 14656	<b>0,78</b>	<b>0,73</b>		<b>0,69</b>		
<b>PF 500°C</b>	IT Holcim	<b>0,58</b>	<b>0,66</b>		<b>0,22</b>		
<b>C<sub>3</sub>A (Teórico)</b>	Equação Bogue	<b>6,88</b>	<b>7,67</b>	<b>7,86</b>	<b>7,59</b>		
<b>OBSERVAÇÕES:</b>							
1. IT = Intrusão de Trabalho							
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)							
							
						<b>Eng. Luciano dos Reis Bento</b> Assessoria Técnica MG	
APLO_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls		3 abril, 2019					

**ANEXO B****Cronograma de atividades em laboratório**

<b>Data</b>	<b>Atividades</b>		
	<b>Desenformar Prismas</b>	<b>Retirar prismas da Estufa</b>	<b>Realizar Leituras</b>
11/07/2019	X		
12/07/2019			X
15/08/2019		X	
16/08/2019			X
19/09/2019		X	
20/09/2019			X
24/10/2019		X	
25/10/2019			X
28/11/2019		X	
29/11/2019			X