

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG

ENGENHARIA CIVIL

HIGOR CESAR FAIS INVERNIZZI

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: uma investigação da reação álcali-sílica em barras de argamassa produzidas com agregados de quartzitos do município de São Thomé das Letras-MG

**Varginha
2019**

HIGOR CESAR FAIS INVERNIZZI

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: uma investigação da reação álcali-sílica em barras de argamassa produzidas com agregados de quartzitos do município de São Thomé das Letras-MG

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Professor Ms. Ivan Francklin Júnior.

**Varginha
2019**

HIGOR CESAR FAIS INVERNIZZI

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: uma investigação da reação álcali-sílica em barras de argamassa produzidas com agregados de quartzitos do município de São Thomé das Letras-MG

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Ms. Ivan Francklin Júnior

Prof. (título) Nome do Professor

Prof. (título) Nome do Professor

OBS.:

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas, professores, familiares, aos meus pais Luciana Invernizzi e Mauro Invernizzi e também a minha noiva Amanda Resende por terem ajudado na construção deste trabalho.

“Não é suficiente fazer o nosso melhor; às vezes, nós temos de fazer o que é necessário.”
Winston Churchill

RESUMO

O objetivo deste estudo é investigar a reação álcali-sílica (RAS) em barras de argamassa produzidas com agregados de quartzitos provenientes do município de São Thomé das Letras-MG, utilizando o método acelerado preconizado pela ABNT NBR 15577-4:2018 e o método alternativo pelo empacotamento de partículas. A análise química do cimento foi realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em São Paulo. O exame petrográfico foi feito na Universidade Estadual Paulista (Unesp). O ensaio de determinação da massa específica do agregado e o ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foram realizados no laboratório do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, no campus Cidade Universitária em Varginha – MG. Para produção das barras de argamassa utilizou-se rejeitos da extração de quartzitos. Foram produzidos três traços de argamassa, denominados: Traço 1, com uso do cimento CP III; Traço 2, com uso do cimento CP V; e o Traço 3, com uso do cimento CPV e aplicando metodologia alternativa para empacotamento de partículas dos agregados. Os Traços 1 e 2 tiveram duração de 28 dias e o Traço 3 teve duração de 56 dias. Considerando-se os traços 1 e 2 pelo método acelerado, os resultados contestaram a hipótese de que o agregado seria potencialmente reativo à RAS, visto que, apesar de a análise petrográfica indicar em um agregado potencialmente reativo, a classificação resultou em um agregado potencialmente inócuo para os Traços 1 e 2. A ABNT NBR 15577:2018 ainda enfatiza o termo potencialmente, isto significa que a probabilidade de o agregado ser reativo não foi descartada e ainda sugere, de forma indireta, que sejam realizados outros ensaios para confirmação da RAS. Sendo assim, o Traço 3 alternativo pelo empacotamento de partículas resultou em uma expansão de 0,196% aos 56 dias, logo, sendo classificado como potencialmente reativo grau R1. De maneira geral, os resultados foram satisfatórios, pois, o agregado se mostrou com forte potencialidade reativa, visto que, a quantidade de quartzo na composição mineralógica atingiu 95%. Além disso, o Traço 2, mesmo sendo classificado como potencialmente inócuo no período de 28 dias, mostrou-se capaz de atingir maiores expansões. Dessa forma, aplicando-se o Traço 3, foi possível confirmar a potencialidade reativa do agregado.

Palavras-chave: Quartzitos. Sílica. Cimento Portland. Empacotamento de partículas.

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the alkali-silica reaction (RAS) in mortar bars produced with quartzite aggregates from São Thomé das Letras-MG, using the accelerated method recommended by ABNT NBR 15577-4: 2018 and the method alternative by particle packing. The chemical analysis of the cement was performed at the Institute of Technological Research (IPT) in São Paulo. The petrographic examination was done at the Paulista State University (Unesp). The aggregate specific mass determination test and the accelerated mortar expansion test were performed in the laboratory of the University Center of Southern Minas Gerais - UNIS/MG, at the Cidade Universitária campus in Varginha - MG. For the production of the mortar bars it was used quartzite extraction tailings. Three traces of mortar were produced, named: Trace 1, using CP III cement; Trace 2, using CP V cement; and Trace 3, using CPV cement and applying alternative methodology for aggregate particle packing. Traces 1 and 2 lasted 28 days and Trace 3 lasted 56 days. Considering traits 1 and 2 by the accelerated method, the results challenged the hypothesis that the aggregate would be potentially reactive to the RAS, since, although petrographic analysis indicates in a potentially reactive aggregate, the classification resulted in a potentially harmless aggregate. for Traits 1 and 2. ABNT NBR 15577: 2018 still emphasizes the term potentially, this means that the likelihood that the aggregate is reactive has not been ruled out and also indirectly suggests that further assays be performed to confirm the RAS. As such, the alternative particle packing Trait 3 resulted in an expansion of 0.196% at 56 days, thus being classified as potentially reactive grade R1. In general, the results were satisfactory because the aggregate showed strong reactive potentiality, since the amount of quartz in the mineralogical composition reached 95%. In addition, Trait 2, even though classified as potentially harmless within 28 days, was able to achieve greater expansions. Thus, by applying Trace 3, it was possible to confirm the reactive potentiality of the aggregate.

Keywords: *Quartzites. Silica. Portland Cement. Particle packing.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vista do município de São Thomé das Letras	18
Figura 2 - Estrutura com RAA	19
Figura 3 - Amostra retirada da piscina	20
Figura 4 - Gel expansivo devido ao RAS	22
Figura 5 – RAA em estrutura de concreto	23
Figura 6 - Distribuições granulométricas	33
Figura 7 - Vista da extração de placas da Mineração Bico do Gavião	39
Figura 8 - Equipamentos utilizados na preparação das lâminas delgadas	39
Figura 9 - Lavagem do agregado	40
Figura 10 - Agitador elétrico para separação do agregado	42
Figura 11 - Agregado quartzito separado em cada granulometria Traços 1 e 2	42
Figura 12 - Agregado quartzito separado em cada granulometria Traço 3	43
Figura 13 - Cimento CPV depois de peneirado	44
Figura 14 - Preparo da solução	45
Figura 15 - Gráfico do empacotamento gerado pelo EMMA	47
Figura 16 - Balança para pesagem da massa dentro d'água	48
Figura 17 - Água destilada usada na mistura	49
Figura 18 - Plastificante utilizado	50
Figura 19 - Mistura para homogeneização do agregado	50
Figura 20 - Misturador da argamassa	51
Figura 21 - Moldagem das barras	52
Figura 22 - Moldes na câmara úmida	53
Figura 23 - Barras desenformadas do Traço 1 e 2	53
Figura 24 - Barras desenformadas do Traço 3	54
Figura 25 - Recipiente com as barras de argamassa	55
Figura 26 - Barras de argamassa com a solução	55
Figura 27 - Leitura da barra de argamassa	56
Figura 28 - Expansibilidade das barras de argamassa	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa dos rejeitos acumulados nas áreas de lavra de quartzitos foliados no município de São Thomé das Letras.....	16
Tabela 2 - Grau de Reatividade do Agregado	26
Tabela 3 – Grau de Risco da Ocorrência da RAS	26
Tabela 4 - Identificação das amostras.....	28
Tabela 5 - Composição mineralógica das amostras.....	28
Tabela 6 - Denominação e identificação dos rejeitos de quartzitos de São Thomé das Letras	38
Tabela 7 - Quantidade de agregado requerida para o Traços 1 e 2	41
Tabela 8 – Frações retidas de agregado para o Traço 3.....	41
Tabela 9 - Quantidades do Traço 3.....	47
Tabela 10- Limites de DRM.....	57
Tabela 11 - Composição mineralógica STL 1	58
Tabela 12 - Composição mineralógica STL 2	59
Tabela 13 - Composição mineralógica STL 3	59
Tabela 14 - Equivalentes alcalinos	59
Tabela 15- Massa do agregado	60
Tabela 16 - Leitura das barras do Traço 1	60
Tabela 17 – Leitura das barras do Traço 2	61
Tabela 18 – Desvio Relativo Máximo do Traço 2.....	61
Tabela 19 - Leitura das barras do Traço 3	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFEM – Contribuição Financeira por Exploração Mineral
CP III – Cimento Portland de Alto Forno
CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DRM – Desvio Relativo Máximo
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
 $K_2Ca_2(SO_4)$ – Lambeinite de Cálcio
 K_2O – Óxido de Potássio
 K_2SO_4 - Arcanite
MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura
 Na_2O – Óxido de Sódio
 Na_2SO_4 – Tenardite
 $(Na, K)_2SO_4$ – Sulfato Duplo de Sódio e Potássio
NaOH – Hidróxido de Sódio
pH – Potencial Hidrogeniônico
RAA – Reação Álcali-Agregado
RAC – Reação Álcali-Carbonato
RAS – Reação Álcali-Sílica
 SiO_2 – Dióxido de silício
TCU – Tribunal de Contas da União
Unesp – Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

Micrômetro	37
Gramas	37
Mililitro.....	37
Gramas por centímetro cúbico	38
Graus Celsius.....	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Extração de quartzitos em São Thomé das Letras- MG	16
2.2 Reação álcali-agregado	18
2.2.1 Classes de RAA	21
2.2.1.1 Reação Álcali-Sílica – RAS	21
2.2.1.2 Reação Álcali-Carbonato – RAC	22
2.2.2 RAA combinada a minerais de quartzo	23
2.2.3 Expansão do gel proveniente da RAA	24
2.2.4 Ensaio de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado	25
2.2.5 Análise petrográfica	27
2.2.6 Caracterização do cimento	29
2.2.7 Normatizações sobre a RAA	31
2.3 Empacotamento de partículas	32
2.3.1 Empacotamento de partículas na produção de concreto	33
2.3.2 Modelos de empacotamento	34
2.3.2.1 Modelo de Furnas	34
2.3.2.2 Modelo de Andreasen	35
2.3.2.3 Modelo de Alfred	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Agregado	37
3.1.1 Escolha do agregado	37
3.1.2 Análise petrográfica	38
3.1.3 Classificação do agregado	40
3.2 Cimento	43
3.2.1 Escolha do cimento	43
3.2.2 Caracterização do cimento	43
3.2.3 Peneiramento do cimento	44

3.3 Preparo da solução	44
3.4 Argamassa	45
3.4.1 Preparo de argamassa dos Traços 1 e 2	45
3.4.2 Preparo de argamassa do Traço 3	46
3.4.3 Ensaio de determinação da massa específica do agregado graúdo.....	47
3.4.4 Mistura da argamassa	49
3.5 Moldagem das barras	52
3.6 Período de cura e confinamento das barras em solução	52
3.7 Determinação da expansibilidade	56
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
4.1 Análise petrográfica – composição mineralógica	58
4.2 Caracterização do cimento	59
4.3 Massa específica do agregado	60
4.4 Expansão das barras	60
4.5 Classificação do grau de reatividade e grau de risco de ocorrência da RAS	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS	67
ANEXO A – Especificações do cimento CP III.....	71
ANEXO B – Especificações do cimento CP V.....	72
ANEXO C – Ensaio Químicos do Cimentos Portland CP III e CP V	73

1 INTRODUÇÃO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química que ocorre na confluência entre e os óxidos de potássio (K_2O) e sódio (Na_2O) presentes no cimento e os materiais reativos constituintes dos agregados.

Na presença de umidade, essa reação forma um gel que absorve a água e se expande, gerando esforços de tração. As consequências disso são fissuras, deslocamentos e até o comprometimento das estruturas de concreto quanto à durabilidade e resistência mecânica.

Elas ocorrem geralmente em pontes, viadutos e barragens, devido à presença da umidade. Trata-se de um tema muito importante, porém pouco explorado e estudado no meio acadêmico.

Há dois tipos de reação álcali-agregado, sendo eles a álcali-sílica (RAS) e a álcali-carbonato (RAC) e existem alguns ensaios que tentam prever e comprovar a RAA, entre eles, o ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado dado pela ABNT NBR 15577-4:2018. Esse método de ensaio se destaca pela sua simplicidade e ao mesmo tempo eficiência, pois, dentre todos os métodos é o que apresenta com maior rapidez os resultados.

Este trabalho aborda a reação álcali-agregado, onde investiga-se a seguinte problemática: Qual a importância da norma ABNT NBR 15577-1:2018 para a classificação dos agregados?

Investiga-se um agregado de quartzito extraído na região de São Thomé das Letras através do método de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado preconizado, seguindo a norma ABNT NBR 15577-4:2018.

A hipótese de trabalho é que o agregado extraído em São Thomé das Letras-MG será potencialmente reativo.

Tal abordagem se faz necessária mediante os benefícios e melhor interpretação do tema relativo à RAA.

É importante ressaltar também a contribuição do trabalho para auxiliar no aprimoramento da norma e como auxílio em futuras pesquisas relacionadas ao tema em questão.

O objetivo principal desta pesquisa é investigar a reação álcali-sílica em barras de argamassa produzidas com agregados de quartzitos provenientes do município de São Thomé das Letras-MG, utilizando o método acelerado preconizado pela ABNT NBR 15577-4:2018.

Como objetivos específicos, citam-se:

- a) Realizar a apreciação petrográfica dos quartzitos;
- b) Caracterização química do cimento;

- c) Produzir barras de argamassa utilizando o método padronizado pela ABNT NBR 15577-4:2018 e pelo método alternativo por meio do empacotamento de partículas;
- d) Determinar o grau de reatividade do agregado;
- e) Classificar o grau de risco de ocorrência da RAS.

Esses objetivos serão obtidos mediante o estudo em laboratório de forma a verificar a expansibilidade das barras de argamassa e, por fim, classificar os agregados de acordo com a ABNT NBR 15577-1:2018.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Extração de quartzitos em São Thomé das Letras- MG

Em uma primeira aproximação, antes de se falar em reação álcali-agregado, que é o tema principal deste estudo, é necessário apresentar o agregado utilizado nos ensaios.

A região de São Thomé das Letras é muito turística e conhecida por suas belezas naturais, sendo um município do sul de Minas Gerais. Além disso, São Thomé das Letras também é uma grande produtora de materiais para acabamentos no setor da construção civil. A maioria desses materiais são rochas de quartzitos também conhecidas como “pedras de São Thomé”.

De acordo com Chiodi Filho, Artur e Rodrigues (2005), a região de São Thomé das Letras constitui o maior conjunto de lavra de quartzitos foliados do Brasil.

Segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM) a produção bruta da lavra de quartzito foliado no ano de 2008 foi de 1,3 milhão de toneladas. No entanto, o índice de aproveitamento da extração é de aproximadamente 30%, sendo que foram geradas 900.000 toneladas de rejeitos nesse período. É importante ressaltar que esses dados são estimados pelo motivo de não existirem registros, visto que nem mesmo as empresas dispõem de controle de sua produção (FEAM, 2009).

Tabela 1 – Estimativa dos rejeitos acumulados nas áreas de lavra de quartzitos foliados no município de São Thomé das Letras

Período	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

Fonte: (FEAM, 2009, p. 60).

Na Tabela 1 é possível observar a estimativa de rejeitos gerados no período de 1950 a 2009. Apesar de a taxa de perda ter diminuído, a produção bruta média anual de lavra aumentou ao longo das décadas de forma substancial, o que acarretou no aumento significativo nos resíduos acumulados.

Como citado anteriormente, a extração de rochas na região de São Thomé das Letras é consideravelmente alta, gerando um índice altíssimo de rejeitos. Pode-se observar que o índice de aproveitamento das rochas extraídas é muito baixo.

Segundo Chiodi Filho, Artur e Rodrigues (2005), com a intenção de promover um controle ambiental da região, a FEAM iniciou, em 1993, trabalhos e fiscalização para melhor aproveitamento e controle na geração dos resíduos, mas só em 1996 esses trabalhos foram ampliados através do Projeto Minas Ambiente. Esse projeto posteriormente obteve auxílio da Universidade Vale do Rio Verde de Três Corações e mostrou a viabilidade da utilização dos rejeitos na produção de alguns materiais no setor da construção civil, como tijolos prensados e autoclavados, vidros e esmaltes cerâmicos.

Além destes usos, também há na região a comercialização de agregados usados na construção civil, que podem ser utilizados para fins estruturais.

De acordo com Fleischer (2006) outro dano ambiental por consequência da extração de rochas no município é o comprometimento dos cursos d'água, causando assoreamento por conta dos resíduos gerados durante o processo de beneficiamento da rocha.

Além da desconfiguração da paisagem no município, os danos ambientais causados por conta da extração de rochas são bastante significativos, prejudicando até mesmo os cursos d'água por meio de processos de assoreamento.

Foi criado pela prefeitura o Departamento do Meio Ambiente e Mineração, com o intuito de acompanhar e fiscalizar o processo de regularização das empresas junto ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), ao FEAM à própria prefeitura do município (CARRISSO; PIRES, 2011).

Outro problema local é a sonegação da Contribuição Financeira por Exploração Mineral (CFEM), referente à extração das rochas de quartzito. Em 2012, o Tribunal de Contas da União (TCU) determinou que o DNPM estabelecesse uma maior fiscalização na arrecadação dos royalties pelas empresas. Arrecadou-se o correspondente a R\$ 348.990,99 entre os anos 2009 e 2011, no entanto, no mesmo período os fiscais geraram autuações que estão em processo, com valor estipulado acima de R\$ 3.700.000,00 com relação à CFEM (BRASIL, 2011).

Fica claro que, apesar dos esforços ao longo da última década para melhorar a fiscalização da extração de rochas de quartzito em São Thomé das Letras - onde grande parte das empresas foi legalizada - ainda existem vários problemas com relação à fiscalização.

Figura 1 - Vista do município de São Thomé das Letras



Fonte: (PERNA et al., 2012, p. 16).

Na Figura 1 é possível observar o município de São Thomé das Letras e também um aspecto da grande extração de rochas de quartzito ao redor da zona urbana do município. São notórios os danos visuais causados pelas pilhas de rejeitos na extração das rochas.

2.2 Reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado, também conhecida como RAA, constitui-se em uma manifestação patológica obtida na confluência entre minerais reativos pertencentes aos agregados, os óxidos de potássio (K_2O) e sódio (Na_2O) constituintes no cimento e a existência de umidade. Para que a reação possa acontecer é necessário haver um agregado altamente reativo, combinado aos íons alcalinos do cimento hidratado e também a umidade.

De acordo com Lahdensivu e Aromaa (2015), a RAA foi primeiramente descoberta nos Estados Unidos no ano de 1940.

Esse processo químico ocasiona-se em um gel higroscópico expansivo, que absorve a água e se expande, manifestando esforços de tração. Diversos fatores influenciam a reação, como o cimento e o teor de álcalis que ele possui, os agregados utilizados, as dimensões e as formas das partículas, o processo de liberação dos álcalis, a umidade e a temperatura (GOMES NETO; BARRETO, 2013).

A RAA pode ocorrer principalmente nas construções de pontes, viadutos e barragens, devido à presença contínua de umidade.

Segundo Pianezzer, Gramani e Kaviski (2019), a umidade é responsável por provocar a exposição dos álcalis e hidroxilas, de tal modo que quebram as ligações do tipo siloxano e silanol que estão presentes no agregado reativo. Que por sua vez leva a formação do gel expansivo.

As consequências são desde expansões, fissurações, deslocamentos até pipocamentos, exsudação do gel e comprometimento das estruturas de concreto quanto à sua resistência mecânica e durabilidade.

Apesar deste fenômeno ter sido descoberto há mais de 60 anos, ainda existem grandes dificuldades de entender melhor os mecanismos envolvidos e controlar a ação deletéria da RAA já instalada no concreto. Uma vez iniciada, ainda não se dispõe de uma maneira totalmente eficiente de interromper a evolução da RAA, e a consequente expansão, em qualquer tipo de estrutura de concreto (HASPARYK, 2005, p. 31).

Lopes et al. (2001) encontraram alguns resultados em seus testes, como várias fissuras verticais e horizontais, acompanhando as juntas de concretagem; alguns pilares sofreram ruptura por esmagamento devido às expansões no concreto; abertura de juntas e deslocamentos diferenciais entre blocos; entre outros problemas que a RAA causou nos geradores da empresa estudada.

Figura 2 - Estrutura com RAA



Fonte: (SILVA, 2016, p. 1).

Na Figura 2 é possível observar uma estrutura de fundação submetida à reação álcali-agregado. O que mais chama atenção neste caso é a quantidade de fissuras na superfície do concreto, deixando claro que há algo incomum.

Quanto à resistência à compressão, à tração e ao módulo de elasticidade, as consequências apresentadas pela RAA também são negativas.

O processo de deterioração causado pela RAA tem como consequências uma pequena queda na resistência à compressão, uma perda maior da resistência à tração e uma acentuada redução do módulo de elasticidade Larive (1997).

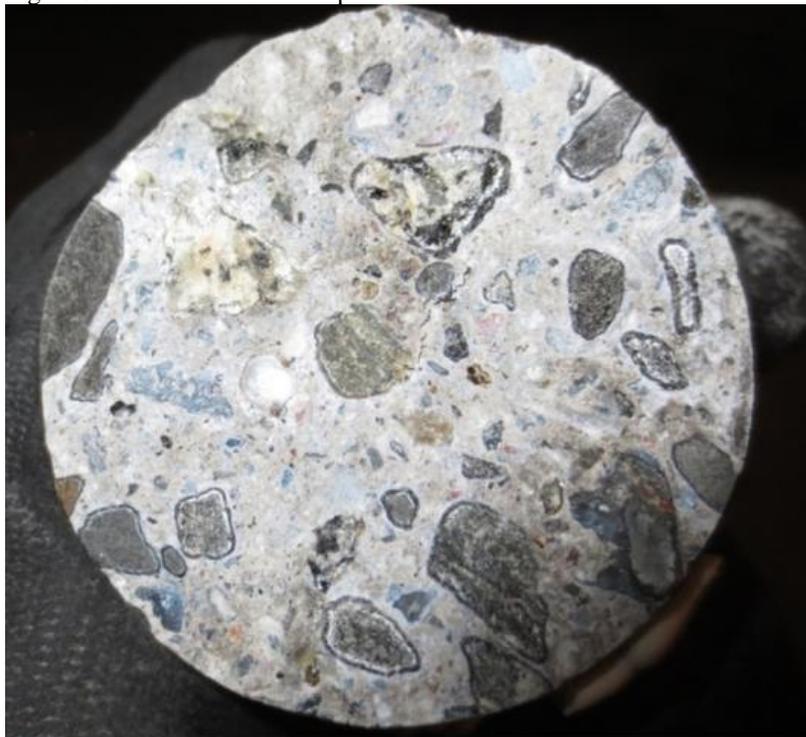
Na Barragem de Furnas, quando se comparou os resultados dos testemunhos extraídos com o concreto moldado, verificou-se uma redução da ordem de 50% no módulo de elasticidade, segundo Castro (1997).

Sendo assim, os reflexos dessa patologia podem ser observados no que tange à resistência à tração, à compressão e ao módulo de elasticidade do concreto.

Na bibliografia, podem-se encontrar alguns casos de reações álcali-agregado. Entre eles, o caso da RAA gerado na estrutura das piscinas do Tampere Swimming Center (Centro de Natação de Tampere), na Finlândia.

Conforme o estudo realizado por Lahdensivu e Aromaa (2015), a reação constatada foi do tipo álcali-sílica. Na Figura 3 é possível identificar uma amostra retirada de uma das piscinas.

Figura 3 - Amostra retirada da piscina



Fonte: (LAHDENSIVU; AROMAA, 2015, p. 4).

Observando a imagem, é possível notar o gel de coloração esbranquiçada presente nos poros e fissuras do concreto.

De acordo com Rezende (2019), a reação álcali-agregado acontece de forma lenta e seus primeiros sinais patológicos são perceptíveis após anos de construção por motivos ainda pouco

conhecidos. No entanto, a RAA está diretamente relacionada com a quantidade de íons envolvidos na mesma.

Existem duas classes de RAA presentes na literatura, e as mesmas serão abordadas na seção subsequente.

2.2.1 Classes de RAA

Atualmente, são conhecidas duas categorias da reação álcali-agregado. São elas a reação álcali-sílica e a reação álcali-carbonato.

2.2.1.1 Reação Álcali-Sílica – RAS

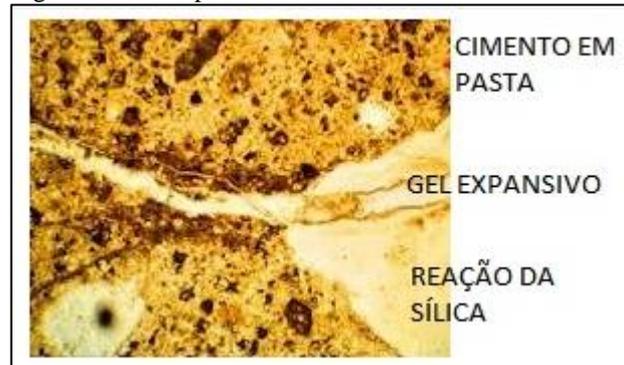
A reação álcali-sílica é a reação apresentada entre a alta alcalinidade do cimento em contato com a sílica. Há dois tipos de RAS, sendo que uma delas diz respeito à sílica cristalina, e a outra, à sílica amorfa, que era anteriormente conhecida como reação álcali-silicato.

É a forma mais comum de reação álcali-agregado, em estruturas com alto teor de umidade, os poros nela presentes devem conter água com sódio (Na_2O) e potássio (K_2O) que foram dissolvidos na mesma. A alta alcalinidade combinada com a sílica do agregado cria-se um gel expansivo. Tal gel tem enorme capacidade de absorver cada vez mais umidade, aumentando consideravelmente de tamanho dentro dos poros do concreto, gerando assim, tensões internas de tração. Portanto, conseqüentemente após o aparecimento de tais esforços de tração, são apresentadas fissuras na estrutura de concreto (NEVILLE, 2011).

Segundo Pianezzer, Gramani e Kaviski (2019) a reação álcali-sílica pode danificar estruturas especiais, como barragens hidrelétricas, devido ao gel expansivo que causa modificações nas propriedades efetivas do concreto.

A alta capacidade de expansão do gel dentro da estrutura de concreto devido a retenção de umidade gera esforços desfavoráveis para o concreto, como tração. Devido a tais esforços solicitantes quando ultrapassado o esforço resistente do concreto, manifestam-se primeiramente as fissuras.

Figura 4 - Gel expansivo devido ao RAS



Fonte: (SILVA, 2016, p. 1).

De acordo com Gomes Neto e Barreto (2013) essa reação compreende a sílica amorfa, existente em minerais como opala, quartzo, calcedônia, cristobalita, tridimita e alguns tipos de vidros.

A sílica reage com a umidade e com os álcalis (K_2O e Na_2O) do cimento, compondo-se em um gel sílico-alcalino.

Outra reação, antes conhecida como álcali-silicato, é a reação entre a alta alcalinidade do cimento em contato com a sílica amorfa. Ela ocorre de forma semelhante a anterior, mas apresenta algumas diferenças, entre elas se destaca o tempo de ocorrência reação, que se manifesta de forma mais lenta comparado à sílica cristalina.

Gomes Neto e Barreto (2013) afirmam que a reação álcali-silicato possui a mesma natureza da RAS, todavia ocorre de forma mais lenta. Compreende os silicatos existentes em agregados como feldspatos, folhelhos, argilosos, certas rochas sedimentares (como as grauvacas), metamórficas, (como os quartzitos e gnaisses), magmáticas (como os granitos), quartzo deformado e minerais expansivos do grupo dos filossilicatos.

Como explanado, a reação álcali-sílica é a que ocorre com maior frequência. Portanto, grande parte dos casos envolve principalmente agregados formados por sílica.

2.2.1.2 Reação Álcali-Carbonato – RAC

A reação álcali-carbonato apresenta-se em agregados calcários e não há formação de gel expansivo como ocorre na reação álcali-sílica.

Abrange os calcários dolomíticos, quando os mesmos são empregados como agregados (GOMES NETO; BARRETO, 2013).

Os calcários dolomíticos sofrem um processo de desdolomitização na reação que ocorre entre eles e os álcalis. Nesse processo, a dolomite dá origem à calcite e a brucite. Os iões

hidróxilo são absorvidos pelos minerais de argila e se expandem, entretanto, não há formação de gel expansivo como na reação álcali-sílica (POOLE, 1992).

O que a reação álcali-carbonato tem em comum com a álcali-sílica é a expansão anormal que dá origem as fissuras em forma de mapa e o que ambas têm de diferente é que a RAC não forma gel expansivo (FERNANDES, 2005).

Katayama (1992 apud RODRIGUES, 1994) sugere que a reação expansiva nos casos de reação em agregados calcínicos e dolomíticos seja causada pelo quartzo criptocristalino detectado no resíduo insolúvel, sendo, portanto, uma forma de reação álcali-sílica.

Figura 5 – RAA em estrutura de concreto



Fonte: (SANCHEZ; FOURNIER; KUPERMAN, 2010, p. 3).

Nos dois tipos de reações apresentadas, o que chama atenção visualmente é a fissura em forma de mapeamento. Na Figura 5 é possível notar o mapeamento causado pela RAA em uma estrutura de concreto. As fissuras se interligam umas nas outras, deixando um aspecto característico.

O próximo tópico explana as características do mineral quartzo presente na rocha de quartzito utilizada no presente estudo.

2.2.2 RAA combinada a minerais de quartzo

Nesta seção são abordados os mecanismos da reação álcali-agregado utilizando rochas ricas em minerais de quartzo.

Sua fórmula química é o (SiO₂), popularmente o dióxido de silício é chamado de sílica. A sílica é formada basicamente pelo grupo Si-O, e pode ser dividida entre grupos com a cadeia organizada e/ou desorganizada que são chamados de estado cristalino e amorfo, respectivamente. O vidro pode ser citado como a sílica no estado amorfo e o quartzo no estado cristalino (ROSA, 2014, p. 13).

Ainda de acordo com Rosa (2014, p. 13) “diversos tipos de quartzos podem ser encontrados na crosta terrestre, tendo suas estruturas cristalinas variando de acordo com o meio em que crescem os cristais”.

Sendo assim, o quartzo possui diversas características de acordo com as tipologias existentes.

O quartzo tem possibilidade da manipulação das impurezas presentes no material. Estas impurezas são átomos diferentes do silício e do oxigênio que entram naturalmente na estrutura do quartzo e acabam sendo responsáveis pela mudança de densidade, tenacidade de cor e brilho do material (ROSA, 2014, p. 13).

Se tratando do processo de reação do cimento com o quartzo, ele é possível mediante as características reativas do mesmo, pois, é uma forma de sílica, geralmente cristalina.

Para ocorrer a RAA, o agregado deve conter formas de sílica capazes de reagir quimicamente com os íons hidroxila e os álcalis presentes na solução dos poros, tais como: vidro vulcânico, sílica amorfa, sílica microcristalina, tridimita, cristobalita, calcedônia, opala, quartzo e feldspato deformados (RIBEIRO et al., 2012, p. 92).

A sílica cristalina é a forma em que se apresenta o principal mineral que compõe o agregado de quartzito utilizado no presente estudo. O quartzo é um mineral reativo à RAA, por se tratar de uma forma de sílica cristalina, que é altamente reativa aos álcalis do cimento.

2.2.3 Expansão do gel proveniente da RAA

Existem na literatura, teorias distintas sobre a expansão do gel proveniente da reação álcali-sílica.

De acordo com Hasparyk (2005, p. 45-46), “as evidências indicando que as expansões são causadas por pressões mecânicas exercidas pelos produtos da reação no estado sólido ou semi-sólido, levando à formação e conseqüente abertura de fissuras”.

A teoria da pressão osmótica é bem conhecida por explicar o mecanismo da RAS. De acordo com Zolett e Souza (2012, p. 19):

Durante a fabricação do concreto, uma parte dos componentes alcalinos presentes no cimento se dissolve na água de amassamento. Posteriormente, no interior do concreto, a concentração da solução aumenta com o progresso da hidratação do cimento, tornando a solução fortemente básica, a qual ataca as partículas suscetíveis do agregado reativo, produzindo uma substância viscosa denominada gel. Este, por ser higroscópico, atrai as moléculas aquosas, as quais migram através da pasta de cimento. A pasta de cimento funciona como uma membrana osmótica, permitindo a migração das moléculas aquosas para o gel, mas não deste para a solução. Assim, o gel vai “inchando”. Envoltivo em pasta de cimento, e sem poder mitigar através dela, começa então a exercer pressões hidráulicas cuja intensidade poderá exceder a resistência de ruptura à tração da pasta e do concreto, tendo como consequência fissuras internas e externas no concreto.

Outra teoria muito utilizada é a teoria da adsorção, desenvolvida por Vivian (1951 apud HASPARYK, 2005, p. 46):

A teoria da adsorção está atribuída às tensões produzidas pelo crescimento do gel quando saturado. A expansão dependerá da concentração volumétrica do gel, de sua taxa de crescimento e suas propriedades físicas. Caso a taxa de crescimento ocorra lentamente, o gel pode migrar ao longo do concreto dissipando as tensões. Por outro lado, se ocorrer rapidamente, as tensões internas são capazes de aumentar a ponto de causar fissuração e expansão do gel.

A expansão em barras de argamassa pode ser verificada através do ensaio de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

2.2.4 Ensaio de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado

Nesta seção será apresentado o modelo de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, pois se trata do ensaio utilizado na elaboração deste estudo em laboratório.

A priori, a expansão em barras de argamassa causada pela RAS foi criada no início dos anos de 1940 por Stanton e foi adotada pela American Society for Testing Materials (Sociedade Americana de Testes em Materiais). Como o ensaio era de longa duração, foi então considerado inviável. Ainda, havia problema com lixiviação nas barras de argamassa enquanto ficavam armazenadas. Por fim, em 1986, baseado no próprio modelo de Stanton, Oberholster e Davies desenvolveram o ensaio em barras de argamassa pelo método acelerado (MURLIDHAR; MOHAMAD; ARMAGHANI, 2016).

A variação de comprimento das barras de argamassa através do método acelerado aumenta a probabilidade de um agregado ser reativo a RAS.

Como o ensaio tem duração de 28 dias, ele tenta ocasionar ao máximo a expansibilidade das barras. O reagente utilizado para ficar em contato com as barras é composto por hidróxido

de sódio e água, isto é, uma solução com alta alcalinidade, juntamente com a alta temperatura (80 °C), onde as barras permanecem por 28 dias.

Esse ensaio é realizado conforme a ABNT NBR 15577-4:2018 e, com seus resultados, é possível estipular, segundo a ABNT NBR 15577-1:2018, a classificação potencial do grau de reatividade do agregado e também do grau de risco de ocorrência da RAS, sendo eles classificados como observa-se nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - 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, p. 5).

De acordo com a Tabela 2, a expansão das barras de argamassa permite classificar os graus de reatividade potencial do agregado como inócuo R0, ou reativos R1, R2 e R3.

Tabela 3 – Grau de Risco da Ocorrência da RAS

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco	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, p. 6).

De acordo com a Tabela 3, a classe de reatividade do agregado pode ser comparada com as dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto, gerando assim os riscos: desprezível, mínimo, moderado, alto e muito alto de ocorrer a RAA com o agregado.

2.2.5 Análise petrográfica

Nesta seção será apresentada a importância da análise petrográfica na área da engenharia civil, bem como suas propriedades e conceitos.

A análise petrográfica tornou-se importante, em alguns países, para projeto e execução de estruturas em concreto. Principalmente em casos de perícia criminal e para determinação da vida útil de uma estrutura sobre diversos tipos de ambiente. Porém, apresenta um fator limitante quanto ao seu resultado, visto que depende da percepção do petrógrafo (FERNANDES, 2005).

Isso mostra o quão importante é a análise petrográfica, não apenas para determinação da potencialidade reativa aos álcalis, mas também para outros casos específicos em estrutura de concreto. Até mesmo em casos de perícias como citado, devido a um colapso ou acidente estrutural, por exemplo.

O exame petrográfico em si não é o suficiente para determinação da reatividade aos álcalis, mas serve inicialmente para indicar a potencialidade reativa do mesmo (WIGUM, 1995).

Assim, a análise petrográfica, principalmente no presente estudo, aponta se o agregado tem probabilidade de ocorrer a reação álcali-agregado com o cimento.

“O exame petrográfico permite identificar os minerais prejudiciais, revelar a presença de alterações em alguns minerais e fornecer indicações quanto aos ensaios complementares a utilizar, sendo o grau de pormenorização dependente do tipo de material observado” (SIMS, 1981 apud FERNANDES, 2005, p. 58).

A petrografia é o método mais seguro para desqualificar a utilização do agregado para que não ocorra a RAA, é considerado um ensaio rápido para determinação da potencialidade do mesmo (GRATTAN – BELLEW, 1983 apud FERNANDES, 2005).

No caso em estudo, a análise petrográfica do agregado foi de suma importância, pois, com a quantidade de quartzo presente na amostra é possível determinar a potencialidade reativa do mesmo. Para tal análise, a ABNT NBR 15577-3:2018 estabelece o amparo necessário para realização do ensaio.

A ABNT NBR 15577-3:2018 também estabelece que para agregados com índice maior que 5% de quartzo microgranular ou deformado presente em sua composição mineralógica, o mesmo deve ser classificado inicialmente como potencialmente reativo.

Chiodi Filho, Artur e Rodrigues (2005) realizaram um levantamento das características físicas e químicas das principais rochas de quartzitos foliados presentes na região de São Thomé das Letras. Foram retiradas diversas amostras do mesmo para análise.

Tabela 4 - Identificação das amostras

Identif. Amostra	Área de amostragem	Local da amostragem	Coordenadas Geográficas	
			Lat. S	Long. W
PG-01	Pico do	Pedra São Thomé	21°38'21"	44°56'58"
PG-02	Pico do	Bellas Pedras	21°38'19"	44°57'32"
PG-03	Pico do	Capistrano	21°38'30"	44°56'55"
PG-04	Pico do	Mineralves	21°38'45"	44°56'14"
PG-05	Pico do	Mineralves	21°38'38"	44°56'24"
CA-06	Carimbado	São Thomé Martins	21°43'27"	44°59'17"
CA-07	Carimbado	São Thomé Martins	21°43'03"	44°58'47"
CA-08	Carimbado	Sales Andrade	21°42'29"	44°58'18"
CO-09	Coopedra	Frente da Tina	21°43'22"	44°59'10"
CO-10	Coopedra	Frente do Ítalo	21°43'39"	44°59'13"
CO-11	Coopedra	Frente do Moinho	21°43'43"	44°59'30"
CH-12	Chapadão	Pelúcio	21°43'56"	44°59'43"
CH-13	Chapadão	Pelúcio	21°44'00"	44°59'34"
CH-14	Chapadão	Pelúcio	21°44'08"	44°59'32"
PA-15	Paredão	Min. Cachoeira	21°45'00"	44°01'03"
PA-16	Paredão	Min. Cachoeira	21°44'59"	44°01'02"

Fonte: (CHIODI FILHO; ARTUR; RODRIGUES, 2005, p. 167).

Na Tabela 4 é possível observar a identificação de todas as amostras, bem como o local de onde foram retiradas e suas coordenadas geográficas.

Tabela 5 - Composição mineralógica das amostras

Amostra	Quartzo	Muscovita	Turmalina	Hidróxido de ferro	Opacos	Zircão	Caulinita	Rutilo	Epidoto	Clorita
PG-01	97	3	<1	R	RR	R	R	RR	-	-
PG-02	97	3	<1	-	<1	-	R	R	-	-
PG-03	96	4	<1	-	<1	R	R	R	-	-
PG-04	95	5	<1	-	R	RR	R	R	-	-
PG-05	95	5	<1	-	-	RR	<1	RR	-	-
CA-06	95	5	<1	<1	RR	RR	-	R	-	-
CA-07	97	3	<1	<1	R	RR	-	RR	-	-
CA-08	95	5	<1	R	<1	RR	-	RR	-	-
CO-09	95	5	<1	<1	R	RR	RR	R	-	R
CO-10	97	3	<1	R	R	R	RR	R	RR	-
CO-11	95	5	<1	<1	R	-	R	RR	-	-
CH-12	96	4	<1	R	-	RR	-	R	RR	-
CH-13	96	4	<1	R	<1	R	-	R	-	-
CH-14	98	2	<1	R	<1	R	-	R	-	-
PA-15	95	5	R	-	-	RR	-	RR	-	-
PA-16	95	5	RR	<1	-	RR	-	RR	-	-

Fonte: (CHIODI FILHO; ARTUR; RODRIGUES, 2005, p. 170).

A Tabela 5 expõe os resultados da composição mineralógica de cada amostra analisada. Ainda, é possível observar que todas as amostras coletadas apresentaram um teor de quartzo

maior que 95%, isso segundo a ABNT NBR 15577-3:2018, indica que os quartzitos coletados são potencialmente reativos a ocorrência da RAA.

Para que ocorra a reação álcali-agregado, além do agregado potencialmente reativo outra combinação para favorecer a reação é a alta alcalinidade do cimento.

2.2.6 Caracterização do cimento

Nesta seção, serão expostas as principais propriedades do cimento com relação à sua contribuição para ocorrência da RAA.

Segundo Poole (1992), no concreto, os álcalis são prevalentes do cimento na maioria dos casos.

Além disso, os álcalis do cimento têm origem no processo de fabricação do mesmo, onde são utilizados diversos tipos de materiais, como calcário, marga, xisto argiloso e o carvão utilizado como combustível. Embora existam mais elementos da tabela periódica classificados como álcalis, apenas dois elementos da mesma são denominados como álcalis na química do cimento, são eles, o óxido de sódio - Na_2O e o óxido de potássio - K_2O (FERNANDES, 2005).

A concentração de sódio e potássio contida no cimento Portland é de suma importância para determinação do equivalente alcalino que será mostrado ainda nesta seção.

Os álcalis presentes no cimento Portland estão sob forma de sulfatos (Na_2SO_4 – tenardite, K_2SO_4 – arcanite, $(\text{Na},\text{K})_2\text{SO}_4$ – sulfato duplo de sódio e potássio e $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$ – lanbeinite de cálcio) (CONCRETE SOCIETY, 1987). Alguns minerais presentes nos agregados, como os feldspatos, ilita e as micas, também dão origem aos álcalis (WIGUM, 1995).

Além disso, as fontes externas como a água do mar são responsáveis pelo aumento da alcalinidade, que em contato com o meio, aumenta-se o potencial hidrogeniônico (pH). Facilitando assim, a ocorrência da reação álcali-sílica (AKERS et al., 1998).

Assim, os meios externos são grandes fatores que influenciam na reação álcali-agregado. Isso nos leva a crer que estruturas em contato com a água, principalmente em água salobra, estão mais propensas de sofrer a RAA.

Na química do cimento, os principais elementos álcalis presentes no mesmo são o sódio e o potássio.

Assim, o equivalente alcalino do cimento é dado pela quantidade de óxido de sódio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$), que leva em consideração a quantidade de Na_2O e K_2O (POOLE, 1992).

Como se apresenta na Equação 1 a seguir.

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}} = \text{Na}_2\text{O} \% + 0,658 * (\text{K}_2\text{O}) \% \quad (1)$$

Onde o 0,658 provêm da razão entre as massas de Na_2O e K_2O . Ainda, o pH do concreto considerado com baixo teor de álcalis, o mesmo fica entre 12,7 e 13,1. Para concretos considerados com alto teor de álcalis, o pH fica entre 13,5 e 13,9 (HOBBS, 1988).

Diante disso, é possível concluir que o equivalente alcalino está diretamente ligado com o pH do concreto, deixando claro que quanto maior o seu equivalente alcalino, maior seu pH, portanto, maiores as chances de ocorrer a RAA.

Taylor (1997) afirma que a porcentagem de óxidos de sódio e potássio presentes na massa de cimento é de 0,3 a 1,2%.

É notável a contribuição dos dois óxidos no cimento para que ocorra ou não a reação, o que chama atenção é que os mesmos constituem uma pequena parcela na massa de cimento.

Com relação aos resultados do equivalente alcalino, considera-se que cimentos com equivalente alcalino inferiores a 0,6% podem prevenir a ocorrência da reação álcali-agregado (CONCRETE SOCIETY, 1987).

No entanto, para Stievenard-Gireaud (1987) mesmo para cimentos com equivalente alcalino menor, pode ocorrer a reação. Para prevenir a reação, o autor estabelece como parâmetro seguro o teor de equivalente alcalino entre 0,3 e 0,4% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$.

Para fins do presente trabalho, a ABNT NBR 15577-4:2018 estabelece para o ensaio de determinação de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, um equivalente alcalino de 0,8% a 1,0%.

De acordo com Wigum (1995), na maior parte dos casos de reações álcali-agregado registradas, verificou-se um teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$ maior que 1,0%.

Para a alcalinidade do cimento é contabilizado seu equivalente alcalino, no entanto, podem haver mais fatores que compõem a massa de concreto que podem alterar sua alcalinidade.

Por isso, é sugerido um limite máximo de 3 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$ por metro cúbico de concreto. Com isso, são contabilizados os álcalis do cimento, dos adjuvantes e adições, dos agregados e de outras fontes iminentes (CONCRETE SOCIETY, 1987).

Isso significa que os álcalis presentes no cimento estão diretamente ligados à RAA, uma vez que, principalmente cimentos com altos teores de equivalente alcalino são mais suscetíveis de ocorrência da reação.

2.2.7 Normatizações sobre a RAA

São constantes as mudanças e descobertas a respeito da reação álcali-agregado nos últimos 20 anos, por isso, a ABNT NBR 15577:2018 que trata a respeito desta patologia passou por algumas atualizações recentes.

Entre elas, algumas modificações se destacam, como a classificação da reatividade do agregado através do resultado dos ensaios de expansão das barras de argamassa pelo método acelerado e do prisma.

Nesta última versão, a norma passou a contar com uma tabela de classificação do grau de reatividade do agregado (como mostra a Tabela 2), onde, classifica-se o agregado como inócuo ou reativo, R0 sendo como inócuo e do grau R1 ao R3 (ABNT, 2018).

Segundo a ABNT NBR 15577-1:2018 até a atualização da atual norma, ainda não há dados estatísticos suficientes para obter a classificação da potencialidade reativa do agregado quando efetuado em prismas de concreto pelo método acelerado.

O que chama atenção na classificação é a apresentação da palavra “potencialmente”, o que diz respeito a não certeza do agregado de ser ou não reativo a RAS. Reforçando assim, o uso de outros ensaios laboratoriais para a confirmação da reatividade do agregado. Dentre os ensaios, se destaca a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), capaz de confirmar a ocorrência da reação.

Também foi adicionada na nova ABNT NBR 15577:2018 a classificação do grau de ocorrência da RAS (como mostra a Tabela 3), onde, é levado em consideração o grau de reatividade do agregado em diferentes meios de elementos estruturais de concreto. As classificações são: desprezível, mínimo, moderado, alto e muito alto (ABNT, 2018).

Vale ressaltar que ambas as classificações citadas e adicionadas na última atualização, trazem a classificação somente para a reação álcali-sílica.

Outra atualização importante na ABNT NBR 15577:2018 foi a inclusão do ensaio em prismas de concreto pelo método acelerado, que traz semelhanças aos prismas de concreto, no entanto, o tempo de ensaio é a principal diferença, reduzindo de 52 para 20 semanas.

Além disso, a última atualização da norma traz apenas dois tipos de reação, a álcali-sílica e a álcali-carbonato, diferente da versão anterior, que além das duas reações ainda incluía a álcali-silicato (ABNT, 2018).

Assim, a reação álcali-silicato passou a compor-se na reação álcali-sílica desde a última atualização da norma. Segundo a ABNT NBR 15577-1:2018 a reação álcali-silicato passou a ser reconhecida atualmente como uma reação álcali-sílica de forma lenta.

2.3 Empacotamento de partículas

Neste capítulo será explanado sobre a utilização do empacotamento de partículas em materiais como concreto, visto que se trata de um dos resultados desta pesquisa.

Um dos primeiros estudos envolvendo empacotamento de partículas é atribuído a Kepler, em 1611 (RIVA, 2010).

Sendo assim, nota-se que os estudos envolvendo o empacotamento de partículas, são de certa forma antigos se comparados a própria reação álcali-agregado.

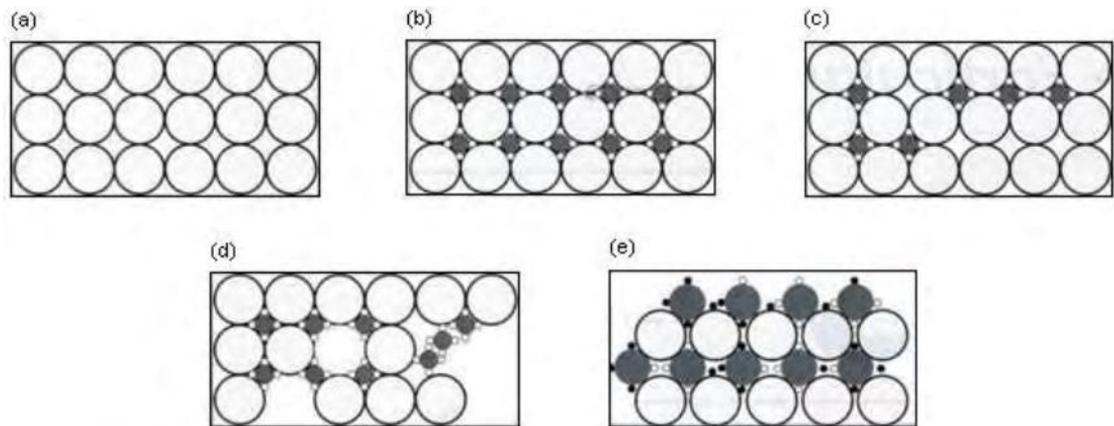
Ainda segundo Riva (2010), empacotamentos densos de partículas são mais utilizados na composição de concreto, misturas asfálticas, fundações, cerâmicas estruturais, eletrônica e otimização de processos de fundição. Enquanto que empacotamentos de baixa densidade são mais utilizados na produção de revestimentos isolantes térmicos, crescimento radicular de plantas e outras diversas aplicações.

É notório como o empacotamento de partículas é utilizado em diferentes áreas, dessa forma, também gera pesquisas em distintas áreas envolvendo o mesmo.

O solo granular de processo densificado não depende direta e somente da granulometria do mesmo, mas também de como essas partículas estão arranjadas entre si. Na acomodação natural do solo causado por conta das vibrações por exemplo, as partículas menores se rearranjam dentre as partículas maiores, desta forma, diminui os vazios dentro do mesmo (RIVA, 2010).

Com isso, é possível concluir que para um solo sofrer um processo de compactação por exemplo, depende-se diretamente de sua granulometria. Dessa forma, o mesmo irá se arranjar da melhor maneira com que os grãos mais finos completem os vazios entre os grãos maiores, obtendo assim uma melhor compactação. Assim, quanto maior a densidade de um solo, menor será o índice de vazios.

Figura 6 - Distribuições granulométricas



Fonte: (OLIVEIRA, 2013, p. 57).

Na Figura 6 é possível notar diferentes distribuições granulométricas e como cada uma delas se comporta. Na primeira situação ocorre uma densidade mínima do empacotamento, também conhecida como monodisperso, quando não se tem variação na granulometria do material, assim, os espaços vazios não são preenchidos por partículas menores. Na segunda situação ocorre a densidade máxima do empacotamento, também conhecida como polidisperso, como é possível visualizar os vazios estão totalmente preenchidos por partículas menores. Na terceira situação é ilustrada a falta de partículas menores para completar os vazios. Na quarta situação ilustra a falta de partículas grandes. Na quinta situação ilustra uma distribuição inadequada das partículas, com diversas granulometrias.

2.3.1 Empacotamento de partículas na produção de concreto

Nesta seção será abordado o conceito de empacotamento de partículas no que se refere à produção de concreto.

Desde de 1982, alguns modelos de empacotamento têm sido utilizados na produção de concreto, misturas asfálticas, cerâmicas estruturais, revestimentos, entre outros (OLIVEIRA, 2013).

Segundo estudos, concretos dosados com base no empacotamento de partículas apresentam vantagens se comparado aos concretos dosados sem o empacotamento. Tais vantagens podem ser melhoria na resistência, rigidez, retração e fluência. (KOEHLER; FOWLER, 2007 apud OLIVEIRA, 2013).

Nota-se a importância do empacotamento de partículas nas propriedades mecânicas do concreto. Podemos, assim, deduzir que quanto maior a densidade obtida pelo empacotamento, maior será a resistência característica adquirida pelo concreto, em consequência da diminuição dos poros presentes no mesmo.

O empacotamento de partículas foi aplicado em um dos resultados dessa pesquisa no intuito de facilitar a exposição do agregado à RAA, considerando que seu núcleo ficará mais exposto para ocorrer a reação. Com isso, foi aplicado o conceito de empacotamento de partículas para diminuição das granulometrias da argamassa na fabricação das barras para obtenção da expansão pelo método acelerado segundo a ABNT NBR 15577-4:2018.

2.3.2 Modelos de empacotamento

Existem alguns modelos de empacotamento de partículas, por isso, nessa seção eles serão apresentados.

De acordo com Rebmann (2011), as curvas granulométricas são de suma importância para obtenção do melhor empacotamento de partícula através dos modelos de empacotamento.

Sendo assim, é importante explanar sobre os modelos de empacotamento mais utilizados.

2.3.2.1 Modelo de Furnas

O modelo de Furnas apresenta uma distribuição discreta, que considera as partículas individualmente. Ainda, o empacotamento máximo ocorre quando as partículas menores preenchem totalmente os espaços entre as partículas maiores (OLIVEIRA, 2013).

O empacotamento pelo modelo de Furnas é dado pela Equação 2:

$$CPFT = 100 * \left(\frac{Dp^{\log r} - Ds^{\log r}}{DL^{\log r} - Ds^{\log r}} \right) \quad (2)$$

Onde:

- CPFT - porcentagem acumulada de partículas menores;
- Dp - diâmetro da partícula;
- Ds – diâmetro menor da partícula;
- DL – diâmetro da maior partícula;
- r - razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

Vale ressaltar que o modelo de Furnas é válido para qualquer tipo de mistura.

2.3.2.2 Modelo de Andreasen

O modelo de Andreasen apresenta uma distribuição contínua, que leva em consideração todos os diâmetros presentes. Ainda, Andreasen descreveu que para um empacotamento ideal de partículas ocorrer, deve haver uma semelhança entre duas partículas com granulometrias muito diferentes (OLIVEIRA, 2013).

O empacotamento pelo modelo de Andreasen é dado pela Equação 3:

$$CPFT = 100 * \left(\frac{Dp}{DL}\right)^q \quad (3)$$

Onde:

- CPFT - porcentagem acumulada de partículas menores;
- Dp - diâmetro da partícula;
- q = módulo ou coeficiente de distribuição.

2.3.2.3 Modelo de Alfred

O modelo de Alfred surgiu de comparações feitas através do modelo de Furnas e Andreasen. Dessa maneira, os dois modelos se convergem para uma mesma equação, conhecida como modelo de Alfred (OLIVEIRA, 2013).

O empacotamento pelo modelo de Alfred é dado pela Equação 4:

$$CPFT = 100 * \left(\frac{Dp^q - Ds^q}{DL^q - Ds^q}\right) \quad (4)$$

Onde:

- CPFT - porcentagem acumulada de partículas menores;
- Dp - diâmetro da partícula;
- Ds – diâmetro menor da partícula;
- DL – diâmetro da maior partícula;
- q = módulo ou coeficiente de distribuição.

Segundo Oliveira (2013), existem diferenças consideráveis em cada modelo. A eficiência do empacotamento experimental para obtenção da densidade máxima em cada modelo é representada na seguinte ordem: Alfred > Andreasen > Furnas.

Como é descrito, os métodos de empacotamento passaram por aprimorações ao longo do tempo. O modelo de Alfred é considerado como o mais eficaz dentre os três apresentados.

Dessa forma, nessa pesquisa o modelo utilizado na aplicação do conceito de empacotamento de partículas em um dos resultados obtidos, foi o modelo de Alfred. Utilizou-se o software EMMA Mix Analyzer para realização do empacotamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de uma pesquisa de abordagem qualitativa, visto que os ensaios foram empregados a fim de descobrir uma característica do material, ou seja, o intuito é verificar se o agregado é potencialmente reativo à RAS.

Para isso, foram fabricadas 9 barras de argamassas com 3 traços diferentes, assim sendo:

1. Traço 1 – 3 barras utilizando quartzito e cimento Portland CP III, método acelerado preconizado segundo ABNT NBR 15577-4:2018;
2. Traço 2 - 3 barras utilizando quartzito e cimento Portland CP V, método acelerado preconizado segundo ABNT NBR 15577-4:2018;
3. Traço 3 – 3 barras utilizando quartzito e cimento Portland CP V, método alternativo pelo empacotamento de partículas.

A seguir, serão apresentados os materiais empregados para realização dos Traços 1, 2 e 3 e os modelos experimentais de ensaios utilizados para obtenção dos resultados desta pesquisa, bem como os métodos segundo a NBR 15577-4:2018 (ABNT, 2018).

3.1 Agregado

Nesta seção serão apresentados os aspectos referentes ao agregado utilizado no presente estudo, como a sua escolha, análise petrográfica e classificação.

3.1.1 Escolha do agregado

O agregado escolhido para realização dos ensaios de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foi o quartzito. Sua escolha se deve ao fato do mesmo ser, a princípio, um forte reativo para ocorrência da reação álcali-agregado, devido o percentual de sílica presente no mesmo.

Outro fator para escolha da rocha de quartzito foi pela sua localização, pois, é muito utilizada na região do sul de minas, além de ter poucos estudos envolvendo esse tipo de agregado com a RAA. O quartzito utilizado no ensaio foi extraído no município de São Thomé das Letras.

O material foi fornecido em parceria com a empresa Sales Andrade, responsável pelo beneficiamento dos resíduos. Vale ressaltar que a mesma recolhe os resíduos de quartzitos em

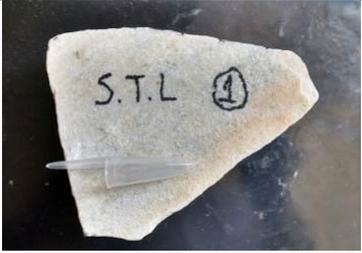
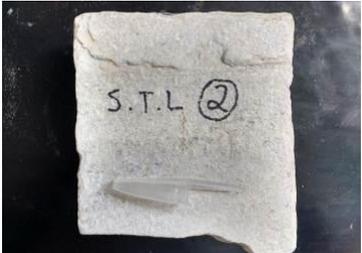
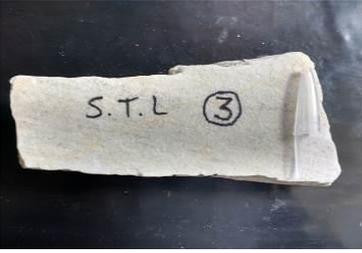
diversas jazidas de São Thomé das Letras, onde, também é feita uma pré-seleção do material de melhor qualidade.

3.1.2 Análise petrográfica

A análise petrográfica apresentada foi feita na Universidade Estadual Paulista (Unesp) campus de Rio Claro, e disponibilizadas pelo Prof. Ms. Ivan Francklin Júnior.

Foram coletadas no total de 3 amostras de mão em diferentes tipos de frentes de lavras da Mineração Bico do Gavião no município de São Thomé das Letras – MG. Conforme divergências nas características físicas como: tonalidade e textura. Conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Denominação e identificação dos rejeitos de quartzitos de São Thomé das Letras

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

Fonte: Acervo Pessoal do Prof. Ms. Ivan Francklin Júnior (2017).

Conforme a Figura 7, é possível observar com maior detalhe a vista parcial das frentes de extração de placas da Mineração Bico do Gavião.

Figura 7 - Vista da extração de placas da Mineração Bico do Gavião



Fonte: Acervo Pessoal de Prof. Ms. Ivan Francklin Júnior (2017).

As lâminas foram produzidas na Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) em Araraquara, São Paulo. Na Figura 8 é possível visualizar alguns dos equipamentos utilizados na preparação das lâminas.

Figura 8 - Equipamentos utilizados na preparação das lâminas delgadas



Fonte: Acervo Pessoal de Prof. Ms. Ivan Francklin Júnior (2017).

Apesar de a amostra analisada não ser da mesma amostra de agregado utilizado para a produção das barras de argamassa, a quantidade de quartzo presente nos agregados do

município de São Thomé das Letras tem ínfima variação, visto que o estudo de Chiodi Filho, Artur e Rodrigues (2005) comprovou este fato.

3.1.3 Classificação do agregado

Quanto à sua origem, o agregado é artificial, pois é proveniente da britagem da sobra de resíduos gerados pela mineradora ao extrair rochas de quartzito para fins de acabamento.

Foi utilizado somente agregado miúdo para fabricação da argamassa, com granulometrias variando de 150 μm a 2,36 mm nos Traços 1 e 2, e de 37 μm a 600 μm no Traço 3.

Antes da classificação de cada granulometria, foi feita a lavagem do agregado sobre água corrente para retirada de impurezas. Logo após a lavagem, levou-se o mesmo para estufa onde permaneceu por 48 horas a uma temperatura de 100 ° C. A Figura 9 mostra a lavagem do material em água corrente.

Figura 9 - Lavagem do agregado



Fonte: o autor (2019).

Para a classificação do agregado utilizado nos Traços 1 e 2, seguiu-se a Tabela 7, onde se encontram as quantidades de agregado retidas em cada abertura de peneira.

Tabela 7 - Quantidade de agregado requerida para os Traços 1 e 2

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 μm	25	247,5
600 μm	300 μm	25	247,5
300 μm	150 μm	15	148,5

Fonte: (ABNT NBR 15577-4, 2018, p. 7).

Para classificação das granulometrias do Traço 3 foi utilizado o software EMMA, onde foram inseridos os dados referentes ao cimento e ao agregado.

A porcentagem retida em cada granulometria está representada na Tabela 8.

Tabela 8 – Frações retidas de agregado para o Traço 3

Abertura (μm)	Quantidade retida %
600	20%
300	12%
150	20%
74	13%
37	35%

Fonte: o autor (2019).

A quantidade de cada granulometria utilizada será explanada na seção 3.4.2, visto que a análise é feita considerando a mistura da argamassa.

Foi utilizado um agitador elétrico para classificação do agregado em suas respectivas aberturas de peneira, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Agitador elétrico para separação do agregado



Fonte: o autor (2019).

O agitador foi calibrado para trabalhar, em média, 5 minutos por cada amostra de agregado colocado no mesmo, sempre em velocidade máxima. O tempo estabelecido foi decidido com base na execução do ensaio, pois, 5 minutos foram suficientes para passar a granulometria e também reter caso fosse necessário.

As peneiras foram colocadas em ordem de acordo com suas aberturas. Na parte inferior, foi utilizado o fundo, onde a granulometria retida no fundo foi descartada ao final de cada rodada de peneiração.

Na Figura 11 é possível ver as respectivas amostras de cada granulometria do agregado de quartzito utilizado nos Traços 1 e 2.

Figura 11 - Agregado quartzito separado em cada granulometria Traços 1 e 2



Fonte: o autor (2019).

Na Figura 12 é possível visualizar as respectivas amostras de cada granulometria do agregado de quartzito utilizado no Traço 3.

Figura 12 - Agregado quartzito separado em cada granulometria Traço 3



Fonte: o autor (2019).

Vale ressaltar que as granulometrias utilizadas no Traço 3 encontravam-se classificadas mecanicamente pelo fornecedor.

3.2 Cimento

Nesta seção serão exibidas as particularidades inerentes ao cimento utilizado no presente estudo, como a sua escolha, caracterização e peneiramento.

3.2.1 Escolha do cimento

A priori, foram escolhidos dois tipos de cimento, com a intenção de realizar comparações nas expansibilidades das barras de argamassa. Para isso, foram escolhidos o cimento Portland CP III (teoricamente com equivalente alcalino mais baixo), utilizado no Traço 1 e o cimento Portland CPV (teoricamente com equivalente alcalino maior), utilizado nos Traços 2 e 3. Ressalta-se que ambos os cimentos utilizados para os ensaios são da marca Holcim.

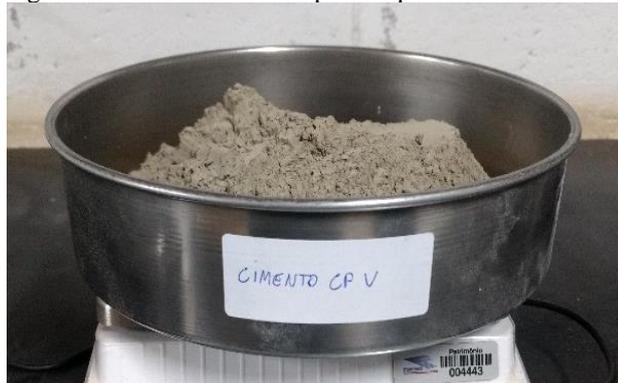
3.2.2 Caracterização do cimento

A caracterização do cimento foi feita pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo em agosto de 2019. Foram encaminhadas duas amostras do cimento (CPV e CIII).

3.2.3 Peneiramento do cimento

Para a remoção de eventuais grumos contidos no cimento, o mesmo foi peneirado então na abertura de 600 μm . Para isso, utilizou-se o agitador elétrico. O restante do material retido na peneira foi descartado.

Figura 13 - Cimento CPV depois de peneirado



Fonte: o autor (2019).

Na Figura 13 é possível observar o cimento CP V depois de peneirado, o mesmo procedimento foi repetido para o cimento CP III.

3.3 Preparo da solução

O reagente utilizado no ensaio é, basicamente, feito de hidróxido de sódio (NaOH) dissolvido em água. A solução foi efetuada contendo a relação de 40 g de NaOH para 900 mL de água, para assim obter-se 1 litro de solução. Seguiram-se as especificações segundo a ABNT NBR 15577-4:2018.

Figura 14 - Preparo da solução



Fonte: o autor (2019).

A Figura 14 mostra a solução de NaOH e água já preparada, para isso, utilizou-se um balde de plástico para armazenamento da mesma.

Ainda, segundo a ABNT NBR 15577-4:2018 o reagente pode causar queimaduras e problemas severos de saúde em caso de contato com partes sensíveis do corpo, por isso, utilizaram-se equipamentos de proteção individual.

3.4 Argamassa

Nesta seção serão expostas as informações relacionadas à argamassa utilizada na pesquisa, como o seu preparo, ensaio de determinação da massa específica e mistura.

3.4.1 Preparo de argamassa dos Traços 1 e 2

Para a argamassa utilizada na confecção das barras dos Traços 1 e 2, foram seguidas, de acordo com a ABNT NBR 15577-4:2018, as quantidades de agregado, cimento e água no preparo da mesma.

Porém, a quantidade de material depende da massa específica do agregado. Segundo a norma, para agregados com massa específica superior a $2,45 \text{ g/cm}^3$, as quantidades de materiais são de: 440 g de cimento, 990 g de agregado e relação água / cimento de 0,47.

Para massa específica menor que $2,45 \text{ g/cm}^3$, as quantidades de materiais são de: 440 g de cimento, relação água / cimento de 0,47, para quantidade de agregado deve seguir a Equação 5 a seguir.

$$ma = 990 * \frac{d}{2,65} \quad (5)$$

Onde:

- a) “ma” é a massa de agregado;
- b) “d” é a massa específica do agregado.

3.4.2 Preparo de argamassa do Traço 3

O Traço 3 foi efetuado com base nos parâmetros de ensaio da ABNT NBR 15577-4:2018. As modificações adicionadas foram o aumento no período de medições para 56 dias e a aplicação do conceito de empacotamento de partículas, de forma a diminuir as granulometrias do agregado utilizado. Com isso, o objetivo foi expor, de certa forma, o núcleo do mesmo, assim, o deixando mais vulnerável à reação. Para a preparação do traço e empacotamento das partículas foi utilizado o software EMMA Mix Analyzer.

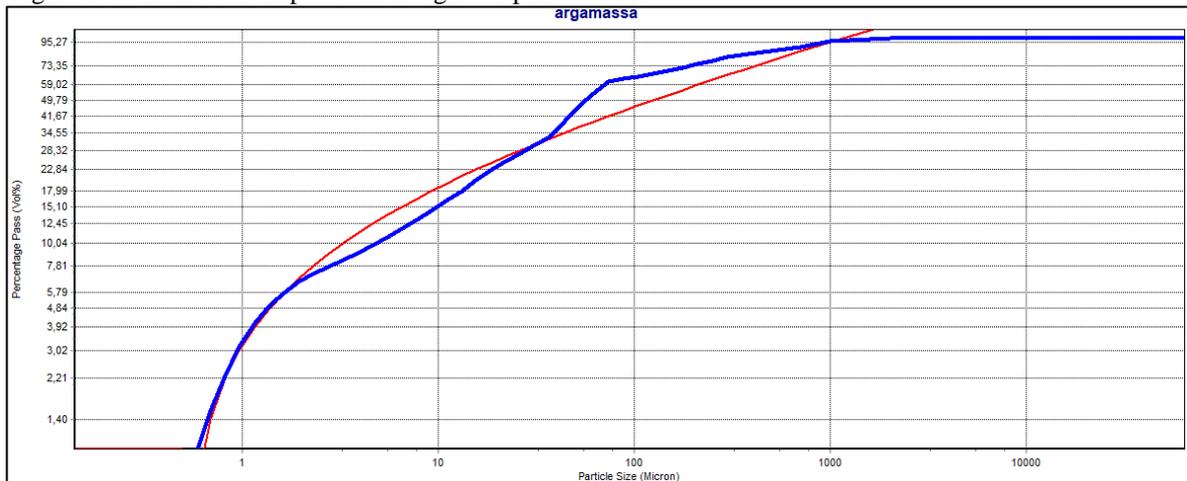
Para isso, teve-se de testar inúmeras vezes, com diferentes distribuições granulométricas nas aberturas de peneira escolhidas, a fim de encontrar a melhor distribuição possível. Vale ressaltar que o software trabalha com os modelos de Alfred e Andreasen, dessa forma, foi escolhido o modelo de Alfred para análise.

Foi necessário estipular um valor de coeficiente “q” para o software, pois, o valor influencia no comportamento do gráfico de empacotamento. O software, como padrão, possui o coeficiente com valor de 0,30. No entanto, o próprio guia de usuário da EMMA Mix Analyzer orienta o uso de 0,28 para concretos auto adensáveis e 0,25 para argamassa. Dessa forma, o valor de “q” utilizado foi de 0,25.

Assim, foi necessário aproximar os dados do gráfico do ensaio a ser realizado com os dados do gráfico gerado para empacotamento do EMMA, de acordo com a Figura 15.

Como pode-se observar na Figura 15, quanto mais próximo o gráfico azul com relação ao vermelho, melhor será o empacotamento. O eixo vertical representa a porcentagem passante, o eixo horizontal representa o tamanho das partículas em micrômetro.

Figura 15 - Gráfico do empacotamento gerado pelo EMMA



Fonte: EMMA Mix Analyzer (2019).

Foi mantida a relação água/cimento de 0,47, no entanto, a quantidade de agregado teve de ser alterada de 2,25 do traço original para 1,2 de maneira a conseguir aproximar do gráfico de empacotamento gerado pelo EMMA.

Além disso, foi necessário testar diversos traços com quantidades de quartzitos diferentes até atingir uma argamassa com consistência ideal.

Assim, o traço encontrado para a argamassa e as respectivas quantidades para fabricação das barras foram, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Quantidades do Traço 3		
TRAÇO 1:1,2:0,47		
QUANTIDADE DE QUARTZITO = 840 g		
ABERTURA (μm)	QUANTIDADE RETIDA %	QUANTIDADE (g)
600	20%	168
300	12%	100,8
150	20%	168
74	13%	109,2
37	35%	294
QUANTIDADE DE ÁGUA DESTILADA = 329 mL		
QUANTIDADE DE CIMENTO = 700 g		

Fonte: o autor (2019).

3.4.3 Ensaio de determinação da massa específica do agregado graúdo

Para execução deste ensaio, foi seguido a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

A priori, foi recolhida uma amostra significativa de quartzito com granulometria maior que a utilizada na argamassa, para fim de facilitar o processo de execução do ensaio. Sendo assim, foi lavada a mesma para retirada de eventuais impurezas. Foi colocada na estufa, onde permaneceu por aproximadamente 72 horas em temperatura de 100°C para retirada de toda umidade.

Após 72 horas em estufa, foi retirada e medida a massa de uma amostra significativa do agregado, no qual se chamou de “massa seca”. Logo após, foi colocada a amostra de agregado em um recipiente com água, deixando-a totalmente submersa, onde permaneceu por 24 horas.

Passadas 24 horas, a amostra foi retirada do recipiente com água e colocada no cesto de medição, onde utilizou-se de uma balança de precisão junto a um cesto na parte inferior para fazer a medição da chamada “massa submersa” da amostra.

Figura 16 - Balança para pesagem da massa dentro d'água



Fonte: o autor (2019).

Na Figura 16 é possível notar a balança de precisão junto com o recipiente com água. Vale ressaltar que a balança tem uma abertura na parte inferior, por onde desce um gancho para içar o cesto. A priori, foi efetuada a tara da massa do gancho e do cesto, logo após foi colocado o agregado dentro do mesmo para medição.

Com isso foi possível determinar a massa específica do agregado de acordo com a Equação 6.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (6)$$

Onde:

- “d” é a massa específica do agregado;
- “m” é a massa da amostra seca;
- “ma” é a massa da amostra em água (submersa).

3.4.4 Mistura da argamassa

Definida a quantidade de agregado, cimento e água, foi possível preparar então a mistura da argamassa. Para isso, foi seguido à risca de acordo com a ABNT NBR 15577-4:2018 todo o passo a passo para preparação da mesma.

A água utilizada na mistura foi destilada, tomado o devido cuidado quanto à sua massa e temperatura, que segundo a norma deve ser de aproximadamente (24 ± 4) °C. Para controle de temperatura foi utilizado um termômetro digital.

Figura 17 - Água destilada usada na mistura



Fonte: o autor (2019).

A Figura 17 mostra a quantidade de água usada na mistura, lembrando, foi respeitado o fator água / cimento de 0,47.

Para o Traço 3 foi utilizado aditivo plastificante a fim de aumentar a trabalhabilidade da argamassa, já que a mesma possui grande quantidade de partículas finas e a relação água/cimento não foi alterada. Foi utilizado o aditivo Argaplast Quartzolit, como ilustra a Figura 18.

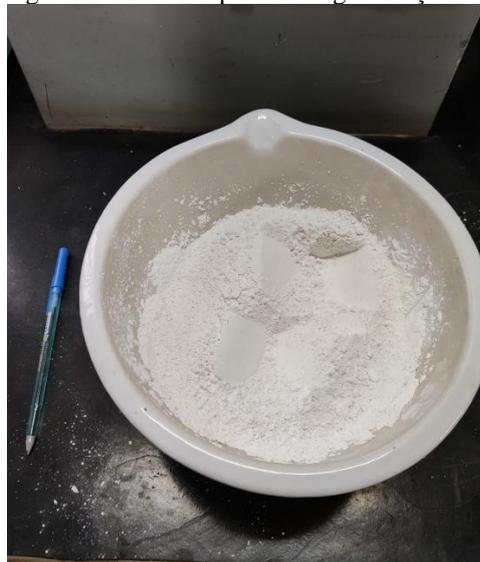
Figura 18 - Plastificante utilizado



Fonte: o autor (2019).

Com relação ao agregado utilizado na argamassa, como visto anteriormente, ele foi separado em suas respectivas frações de acordo com sua granulometria. Foi feita então a mistura de todas as frações do agregado, a fim de facilitar o processo de mistura da argamassa. Foi utilizado um recipiente de cerâmica para fazer a mistura. Como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Mistura para homogeneização do agregado



Fonte: o autor (2019).

A ABNT NBR 15577-4:2018 estabelece tempo mínimo e máximo para mistura de cada “ingrediente” da argamassa. Para isso, foi utilizado um cronômetro no momento da mistura. A fim de facilitar o entendimento do passo a passo estabelecido pela norma, foi montado um mini-cronograma, como apresentado abaixo:

- a) Colocar água na cuba;

- b) Adicionar cimento;
- c) Ligar misturador em velocidade baixa por 30 segundos;
- d) Adicionar o agregado no intervalo de 30 segundos;
- e) Aumentar a velocidade para alta durante 30 segundos;
- f) Desligar o misturador;
- g) Nos primeiros 15 segundos, retirar o excesso de argamassa na lateral da cuba com auxílio de uma espátula;
- h) Deixar a argamassa em repouso durante 1 minuto e 15 segundos;
- i) Ligar o misturador em velocidade alta por 1 minuto.

Vale ressaltar que no misturador, no momento de “descanso” da argamassa, foi utilizado um pano limpo úmido, a fim de evitar ao máximo a evaporação de umidade da argamassa, como reforça a Figura 20.

Foi interessante perceber a padronização dada pela norma neste processo, definindo toda etapa de produção da argamassa com tempo e procedimento necessários.

No entanto, é importante destacar que ocorreram impasses principalmente para seguir o tempo estabelecido para mistura da argamassa, pois, na maioria das tentativas, o tempo foi insuficiente para realizar a mistura de cada componente da argamassa.

Figura 20 - Misturador da argamassa



Fonte: o autor (2019).

Vale evidenciar que, especialmente para o Traço 3, devido à grande quantidade de agregados finos, o misturador mecânico não conseguiu trabalhar adequadamente, assim, a argamassa teve de ser misturada de forma manual.

3.5 Moldagem das barras

Após a mistura da argamassa, foram seguidas de acordo com a ABNT NBR 15577-4:2018 as orientações para moldagem das barras.

A norma estabelece um tempo máximo de 2 minutos e 15 segundos para moldagem das barras, tempo este que foi respeitado. Além disso, a massa foi adensada quando atingiu a metade da profundidade do molde e também a altura total do molde, com 20 golpes em cada, para evitar “vazios”.

Na Figura 21 é possível observar as barras sendo preenchidas.

Figura 21 - Moldagem das barras



Fonte: o autor (2019).

Após a colocação e o adensamento da argamassa nos moldes, foi retirado todo excesso de argamassa que estava fora do molde. Além disso, teve de se observar a altura da argamassa, pois, como o molde não tem fechamento superior, poderia faltar ou ultrapassar a altura do mesmo.

3.6 Período de cura e confinamento das barras em solução

Para cura inicial, teve de ser utilizada uma câmara úmida como especifica a ABNT NBR 15577-4:2018, então, utilizou-se um recipiente de plástico grande o suficiente para colocar os moldes em seu interior. Além disso, preencheu-se o recipiente em cerca de 30% com água. Então foram colocados os moldes sobre um suporte sem deixar ter contato direto com a água,

e, por fim, foi coberto com uma tampa a fim de confinar ao máximo o ambiente do molde e manter a umidade o mais alta possível.

Na Figura 22 é possível visualizar melhor os moldes dentro da câmara úmida.

Figura 22 - Moldes na câmara úmida



Fonte: o autor (2019).

Os moldes permaneceram na câmara por aproximadamente 24 horas, tempo de cura inicial estabelecido pela ABNT NBR 15577-4:2018.

Logo após a cura inicial, as barras foram desenformadas dos moldes. Elas foram marcadas de acordo com o cimento utilizado em cada uma e colocadas submersas em água destilada em um recipiente de aço, então, o mesmo foi colocado na estufa em uma temperatura de 80°C, onde permaneceu por mais 24 horas.

Figura 23 - Barras desenformadas do Traço 1 e 2



Fonte: o autor (2019).

Na Figura 23 é possível ver as barras dos Traços 1 e 2 logo após serem desenformadas. As mesmas foram colocadas o mais rápido possível no recipiente com água destilada e na Figura 24 são exibidas as barras do Traço 3 desenformadas.

Figura 24 - Barras desenformadas do Traço 3



Fonte: o autor (2019).

Ao fim do tempo de cura, as barras foram retiradas do recipiente. O recipiente então foi esvaziado e depois preenchido com a solução. As barras foram colocadas no mesmo novamente e levadas na estufa em temperatura de 80°C. Vale ressaltar que foi gasto o menor tempo possível entre o esvaziamento e o enchimento do recipiente, a fim de evitar que as barras ficassem fora da estufa e sem contato com a umidade.

Figura 25 - Recipiente com as barras de argamassa



Fonte: o autor (2019).

Na Figura 25 é mostrado o recipiente com as barras de argamassa apoiadas nas grades, a fim de evitar que os pinos das barras encostassem no fundo do recipiente.

Figura 26 - Barras de argamassa com a solução



Fonte: o autor (2019).

Como mostra a Figura 26, o recipiente é feito de aço com profundidade o suficiente para cobrir toda barra com água e posteriormente com a solução de hidróxido de sódio.

Além disso, como o recipiente estava em contato com temperatura de 80°C durante 24 horas por dia, foi inevitável que à água contida na solução não evaporasse. Portanto, o recipiente teve de ser monitorado e, a cada dois dias, efetuou-se o preenchimento com a solução, evitando assim que faltasse solução para cobrir as barras e prejudicando no resultado e credibilidade da pesquisa.

3.7 Determinação da expansibilidade

Para efetuar as expansibilidades, foi utilizado um relógio comparador digital. Onde as barras são encaixadas por seus pinos superior e inferior no relógio. Após serem encaixadas no relógio, foi efetuada uma volta de 360° nas barras como estabelece a ABNT NBR 15577-4:2018.

Vale ressaltar a importância da alta precisão no processo de leitura das barras, já que o relógio é muito sensível, com isso, o resultado do relógio pode variar de acordo com o manuseio do equipamento, por esse motivo, as medições foram feitas pela mesma pessoa, a fim de evitar erros de medições.

Durante o processo de leitura das barras ocorreram algumas limitações com relação ao relógio comparador, pois, na primeira tentativa de fabricação das barras de argamassa dos Traços 1 e 2, o mesmo apresentou problemas técnicos, exigindo-se a elaboração de outro ensaio após calibrado o mesmo.

A primeira leitura foi realizada logo após a desmoldagem das barras, assim, a primeira medida teoricamente não sofreu expansão. Junto com as barras de argamassa, foi medida também a barra padrão. As leituras dos Traços 1 e 2 foram feitas no 1°, 7°, 14°, 21° e 28° dia. As leituras do Traço 3 foram feitas no 1°, 7°, 14°, 21°, 28°, 35°, 42°, 49° e 56° dia.

A Figura 27 ilustra melhor o processo de leitura em uma das barras.

Figura 27 - Leitura da barra de argamassa



Fonte: o autor (2019).

No momento das leituras das barras, foi retirada somente uma barra por vez da estufa, a fim de minimizar os efeitos da variação de temperatura fora da estufa. Além disso, foi tirada a leitura das barras no menor tempo possível, pelo mesmo motivo citado anteriormente.

O relógio comparador pode variar sua leitura em pequeno período de tempo, devido principalmente a condições de temperatura e manuseio do equipamento. Para isso, foi utilizada a barra padrão em todas as medições. Desse modo, foi possível determinar a possível expansibilidade das barras de argamassa.

A ABNT NBR 15577-4:2018 especifica também o Desvio Relativo Máximo (DRM) com relação à média das amostras, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10- Limites de DRM

Valores de expansão	Desvio relativo máximo
até 0,10% aos 30 dias	até 40%
maior que 0,10% aos 30 dias	até 20%

Fonte: o autor (2019).

O DRM é calculado dividindo-se a expansão total média pela expansão individual de cada barra, verifica-se para a maior e menor variação da expansão individual.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões obtidos para fabricação dos três traços de argamassa, bem como: análise petrográfica, caracterização química do cimento e massa específica do agregado.

Além disso, são apresentados os resultados de expansibilidades das barras de argamassa, classificação do grau de reatividade e grau de risco de ocorrência da RAS segundo a ABNT NBR 15577-1:2018.

4.1 Análise petrográfica – composição mineralógica

Conforme estabelecido na seção 3.1.2, foram escolhidos três tipos de rejeitos de quartzitos (amostras de mão) para realização da apreciação petrográfica, denominados: STL 1, STL 2 e STL 3.

Para a primeira amostra “STL 1” de quartzito retirado da região de São Thomé das Letras, foram obtidos os seguintes resultados de composição mineralógica, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Composição mineralógica STL 1

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

Fonte: o autor (2019).

Conforme a ABNT NBR 15577-3:2018 é possível classificar a primeira amostra do agregado como sendo potencialmente reativa à RAA, já que apresenta 94,5% de quartzo, muito superior ao limite de 5% estabelecido pela norma para ser classificado como potencialmente inócuo.

Para a segunda amostra do agregado “STL 2”, os resultados foram obtidos conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Composição mineralógica STL 2

Composição	%
Quartzo	95
Muscovita	4,6
Opacos (magnetita/limonita/hidróxido de ferro)	0,4
Turmalina	Traços
Zircão	Traços
Rutilo	Traços

Fonte: o autor (2019).

Com o resultado da segunda amostra de composição mineralógica também é possível classificar o agregado como potencialmente reativo, com elevado índice de quartzo em sua composição.

Para a terceira amostra de agregado “STL 3” foram obtidos os seguintes resultados de composição mineralógica, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Composição mineralógica STL 3

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

Fonte: o autor (2019).

O resultado obtido na terceira amostra também foi muito parecido com as duas anteriores, confirmando assim que o agregado por sua composição mineralógica se classifica quanto à RAA como potencialmente reativo.

4.2 Caracterização do cimento

De acordo com o resultado da análise química feita pelo IPT, os equivalentes alcalinos encontrados no cimento Portland CP III e CP V foram de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 - Equivalentes alcalinos

Determinação	Resultado em %	
	Cimento CP III	Cimento CP V
Equivalente alcalino	0,57	0,61

Fonte: o autor (2019).

Nota-se que os resultados foram bastante próximos entre os cimentos CP III e CP V.

4.3 Massa específica do agregado

Com a massa do agregado seco e submerso, foi possível encontrar a massa específica do mesmo de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15- Massa do agregado

Seco	Submerso	Massa Específica
499,81g	311,73 ^a	2,657 g/cm ³

Fonte: o autor (2019).

4.4 Expansão das barras

Os resultados referentes às leituras realizadas nas barras de argamassa do Traço 1 com cimento CP III foram as seguintes, de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Leitura das barras do Traço 1

TRAÇO 1	COMPRIMENTO (mm)		
DIA	BARRA 1	BARRA 2	BARRA 3
1	285	285	285
7	284,973	284,971	284,975
14	285,035	285,014	285,030
21	285,015	285,018	284,928
28	285,001	284,999	285,000

Fonte: o autor (2019).

Assim, a expansão média das barras de argamassa utilizando cimento CP III foi de 0 milímetros aos 28 dias. Dessa forma, o DRM do Traço 1 foi desconsiderado para as barras com cimento CP III, pois não houve expansão significativa na mesma.

Para as barras do Traço 2 utilizando cimento CP V, os resultados foram dados pela Tabela 17.

Tabela 17 – Leitura das barras do Traço 2

TRAÇO 2		COMPRIMENTO (mm)		
DIA	BARRA 1	BARRA 2	BARRA 3	
1	285	285	285	
7	285,062	285,056	285,063	
14	285,177	285,186	285,188	
21	285,297	285,291	285,307	
28	285,395	285,397	285,395	

Fonte: o autor (2019).

Desta forma, a expansão média das barras de argamassa utilizando cimento CP V foi de 0,395667 milímetros aos 28 dias.

Com isso, foi possível verificar o DRM do Traço 2, de acordo com a Tabela 18.

Tabela 18 – Desvio Relativo Máximo do Traço 2

DRM %		
BARRA 1	BARRA 2	BARRA 3
0,168	0,337	0,168

Fonte: o autor (2019).

Como o DRM da barra 2 foi superior ao máximo estabelecido pela ABNT NBR 15577-4 de 0,20%, desconsiderou-se o valor discrepante da barra 2.

O novo resultado de expansão das barras 1 e 3 do Traço 2 foi de 0,395 milímetros aos 28 dias de ensaio.

Para as barras de argamassa do Traço 3 utilizando cimento CP V, os resultados foram os seguintes, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 - Leitura das barras do Traço 3

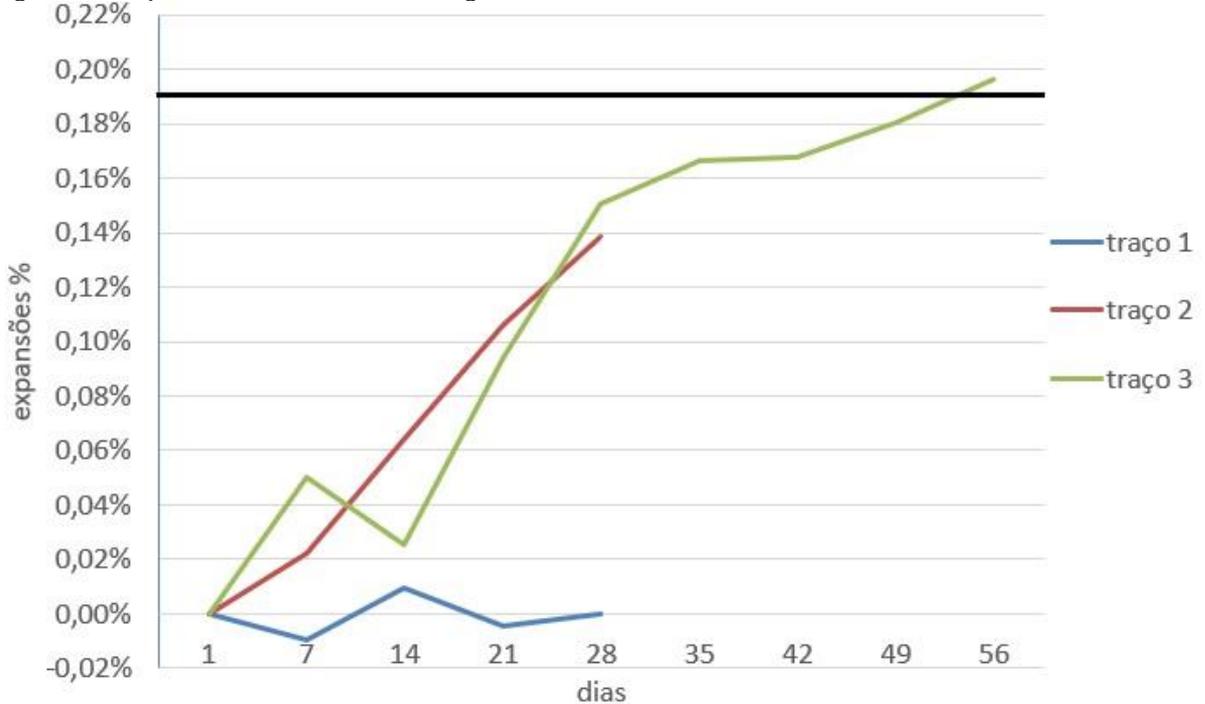
TRAÇO 3		COMPRIMENTO (mm)		
DIA	BARRA 1	BARRA 2	BARRA 3	
1	285	285	285	
7	285,190	285,204	285,032	
14	285,094	285,083	285,042	
21	285,196	285,472	285,134	
28	285,363	285,637	285,287	
35	285,461	285,640	285,322	
42	285,602	285,562	285,268	
49	285,682	285,613	285,248	
56	285,659	285,671	285,348	

Fonte: o autor (2019).

Assim, a expansão média aos 56 dias do Traço 3 foi de 0,559 milímetros.

A Figura 28 representa a expansibilidade das barras em porcentagem e suas respectivas idades de medições.

Figura 28 - Expansibilidade das barras de argamassa



Fonte: o autor (2019).

A expansão total das barras do Traço 2 foi de 0,1386% e do Traço 3 foi de 0,196%. Ainda, é possível notar que as barras do Traço 1 com cimento CP III retornaram ao seu comprimento de origem aos 28 dias de medição.

É possível notar que no Traço 3, entre o 7º e 14º dia, houve uma pequena diminuição nas expansões.

Por isso, é válido ressaltar os problemas encontrados com a estufa do laboratório utilizado durante as primeiras 2 semanas de medições. A temperatura permaneceu abaixo de 80° C nesse período, pois, o termostato da mesma apresentou problemas técnicos. Levando a crer que tal diminuição das expansibilidades nesse período possa ter sido causada por essa variação de temperatura.

4.5 Classificação do grau de reatividade e grau de risco de ocorrência da RAS

O resultado de classificação do grau de reatividade do agregado é dado de acordo com a Tabela 2.

Como o índice de expansibilidade das barras de argamassa dos Traços 1 e 2 foram menores que 0,19%, as mesmas foram classificadas como potencialmente inócuo grau R0.

A classificação do grau de risco de ocorrência da RAS conforme a Tabela 3, para as barras dos Traços 1 e 2 é de desprezível em todas as condições.

Para as barras do Traço 3, considerando 56 dias de idade, sua classificação quanto ao grau de reatividade do agregado é de potencialmente reativo grau R1.

Quanto ao grau de risco de ocorrência da RAS é de:

1. Desprezível – Não maciço em ambiente seco;
2. Mínimo – Maciço em ambiente seco;
3. Moderado - Todas as estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar, enterradas e imersas;
4. Alto - Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação à análise petrográfica realizada no agregado, obteve-se um resultado previsto, pois, se tratando de quartzito, foi esperado um alto índice de quartzo em sua composição mineralógica. Podendo assim, a priori, enfatizar o agregado como potencialmente reativo. Os agregados utilizados para o estudo apresentaram índice médio acerca de 95% de quartzo na composição mineralógica.

O agregado mostrou que tem características suficientes para ser considerado como potencialmente reativo a priori, visto que a quantidade de quartzo presente no mesmo é alta.

Geralmente, o quartzo por ser uma sílica cristalina, tem propriedades que apresentam um alto índice de reatividade com os álcalis, o que fez a crer que neste estudo o agregado utilizado se comportaria de maneira semelhante.

Quanto à caracterização do cimento, esperava-se do cimento Portland CP V um equivalente alcalino próximo de 0,8% a 0,9%. No entanto, o resultado do teste de composição química realizado em laboratório apresentou um equivalente alcalino de 0,61%. Como a ABNT NBR 15577-4:2018 especifica um cimento com equivalente de 0,9% +/- 0,10% para realização do ensaio, nessas condições, o cimento utilizado não atendeu às recomendações de ensaio.

Os resultados obtidos da caracterização química do cimento Portland CP III foram satisfatórios, pois, como já era de se esperar, os índices ficaram abaixo de 0,60%, ou seja, são considerados como não reativos, segundo expõem diversos autores.

A hipótese de pesquisa era que o agregado extraído em São Thomé das Letras – MG seria potencialmente reativo. Essa hipótese foi confirmada, pois o resultado obtido foi de um agregado classificado como potencialmente reativo grau R1.

De maneira a verificar a expansibilidade das barras de argamassa utilizando agregado de quartzito, escolheu-se, primeiramente, efetuar dois traços de argamassa utilizando os cimentos Portland CP III (Traço 1) e CP V (Traço 2) a fim de comparar seus resultados, com o intuito de que o Traço 2 apresentaria maior expansibilidade que o Traço 1. Ambos os ensaios foram efetuados seguindo a ABNT NBR 15577-4:2018 pelo método acelerado preconizado.

O Traço 1 não mostrou expansibilidades significativas, ao invés disso, ouve uma insignificante variação ao longo dos 28 dias, isso pode ter ocorrido devido a sensibilidade do relógio comparador.

O Traço 2 mostrou índices de expansibilidade, no entanto, ao final dos 28 dias de ensaio, esse indicador não ultrapassou 0,19%. Contudo, percebeu-se que a expansibilidade era crescente e com potencial de ultrapassar 0,19% com maior tempo de ensaio.

Sendo assim, a fim de investigar a fundo o comportamento das barras de argamassa utilizando agregado de quartzito e o mesmo cimento Portland CP V do Traço 2, efetuou-se o Traço 3, aplicando-se o conceito do empacotamento de partículas utilizando o software EMMA e elevando o período de ensaio para 56 dias.

Com isso, o Traço 3 implementado de maneira alternativa, resultou em uma expansão de 0,196% ao final dos 56 dias de ensaio. O resultado foi muito positivo, pois, foi possível constatar que as expansibilidades do Traço 2 e 3 estão muito próximas se comparadas dentro dos 28 dias, dessa forma, conclui-se que a expansibilidade do Traço 3 provavelmente não tenha sido causada pelo empacotamento de partículas, mas sim, devido a própria reatividade do agregado de quartzito com o cimento Portland CP V. Caso o Traço 2 tivesse sido medido além dos 28 dias, é bem possível que o comportamento de expansibilidade também teria ultrapassado os 0,19%.

É importante frisar que a ABNT NBR 15577-4:2018 determina o ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado para 28 dias. No entanto, como observado no resultado de expansibilidade, principalmente do Traço 3, as barras não apresentaram comportamento discrepante após os 28 dias, ao invés disso, continuaram a expandir de forma contínua.

Em virtude dos fatos observados, o resultado da classificação do grau de reatividade do agregado foi de potencialmente reativo grau R1, e assim, foi possível responder ao problema de pesquisa “Qual a importância da norma ABNT NBR 15577-4:2018 para a classificação dos agregados?”.

A resposta é que a norma é de suma importância, porém, é insuficiente para a comprovação da RAS.

Ao longo desta pesquisa foi possível observar a importância da ANBT NBR 15577:2018 no auxílio do desenvolvimento acerca da reação álcali-agregado. Além disso, apesar da última atualização recente da norma, é notória a necessidade de a mesma acompanhar todo o processo de desenvolvimento da reação álcali-agregado, que se mostra sobre constante evolução. Como exposto nos resultados desta pesquisa, um dos itens que chama atenção na prescrição da norma é a quantidade de dias para realização do ensaio em barras de argamassa pelo método acelerado, pois, se mostrou ilógico. Assim, uma proposta de revisão para aumento no prazo de ensaio seria uma alternativa conveniente.

O presente estudo mostrou justamente isso, pois, ao considerar-se os ensaios aplicados somente conforme a ABNT NBR 15577-1:2018, ao final dos 28 dias, não seria possível

classificar o agregado como potencialmente reativo, inclusive tendo o mesmo apresentado crescimento.

Entretanto, ao aplicar um ensaio complementar alternativo, elevando o tempo para 56 dias, foi possível comprovar a sua possível reatividade.

Por fim, conclui-se que a ABNT NBR 15577-1:2018 enfatiza o termo potencialmente, isto é, a norma não enfatiza a reatividade com convicção, mostrando assim, a necessidade da combinação com outros ensaios. Como, por exemplo, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), pois, é um ensaio que confirma a presença do gel expansivo no interior das barras de argamassa ou prismas de concreto, se for o caso.

Pretende-se aprofundar a análise do agregado de quartzito extraído em São Thomé das Letras – MG em outro estudo, onde as medições sejam efetuadas em 56 dias, utilizando um cimento Portland CP V cuja análise química resulte em um equivalente alcalino superior a 0,8% e também aplicar o ensaio complementar da MEV.

Espera-se que este estudo contribua para o desenvolvimento contínuo do tema e assim, para o aprimoramento da ABNT NBR 15577:2018.

Além disso, presume-se que este estudo também colabore para o desenvolvimento de mais pesquisas relacionadas tanto com a reação álcali-agregado, quanto ao agregado extraído no município de São Thomé das Letras.

REFERÊNCIAS

- AKERS, David J. et al. **State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity**. Farmington Hills: ACI, 1998. (Report ACI 221.1R-98).
- ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. NM 53: **Agregado grueso: Determinación de la densidade, de la densidade aparente y de la absorción de agua**. [S.l.], 10 p. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – Reatividade álcali-agregado: Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, 15 p. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-3: Agregados – Reatividade álcali-agregado: Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto**. Rio de Janeiro, 10 p. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados – Reatividade álcali-agregado: Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, 11 p. 2018.
- BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Relatório de Atividades**. Brasília, DF, 2011. 8 p.
- CARRISSO, Regina C. Casseres; PIRES, Daniel C. Barçante. A pedra “São Thomé”: tensões e conflitos entre a APL mineral e o turismo. **Recursos Minerais & Sustentabilidade Territorial**, Rio de Janeiro, v. 2, p. 115-138, 2011. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1013/3/A%20Pedra%20Sao%20Thome%20.pdf>>. Acesso em 20 fev. 2019.
- CASTRO, Cláudia H. de et al. Estudo comparativo de propriedades do concreto afetado pela reação álcali-agregado. In: **SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**, 1, 1997, Goiânia: Anais..., CBGB/FURNAS/IBRACON, p. 45-51. Disponível em: <<https://engipapers.com.br/artigos/00147DURA1997.pdf>>. Acesso em 20 fev. 2019
- CHIODI FILHO, Cid; ARTUR, Antonio C.; RODRIGUES, Eleno de P. Aspectos geológicos, petrográficos e químicos de interesse para o aproveitamento econômico dos quartzitos foliados de São Thomé das Letras – Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 163-171, 2005.
- CONCRETE SOCIETY. **Alkali-silica reaction: minimising the risk of damage to concrete: guidance notes and model clauses for specifications**. Londres: Concrete Society, 1987. (Technical Report TR 30).
- EMMA MIX ANALYZER. Versão 3.5.2. [S. l.]: Elkem, 2012.

FERNANDES, M. I. G. **Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões**: estudo de casos de obra. 2005. 313f. Dissertação (Doutorado) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2005.

FLEISCHER, David I. R. São Thomé das Letras e Lagoa Santa: mineração, turismo e risco ao patrimônio histórico e natural. **Cadernos de Campo**, São Paulo, n. 14/15, p. 1-382, 2006. Disponível em: <file:///C:/Users/Inova/Downloads/50096-Texto%20do%20artigo-61913-1-10-20130118.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2019.

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. (Projeto Associado 4174 – Relatório Final).

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**, 9, 2013, João Pessoa, 2013. Disponível em: <http://www.casadagua.com/wp-content/uploads/2014/02/A1_037.pdf> Acesso em: 15 fev. 2019.

HASPARYK, Nicole P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exudado**. 2005. 326f. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HOBBS, D. W. **Alkali-Silica reaction in concrete**. Londres: Thomas Telford, 1988. 192 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Boletim de resultados**. São Paulo: IPT, 2019.

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.

LAHDENSIVU, Jukka; AROMAA, Jussi. Renovation of an alkali-aggregate reaction damaged swimming pool. **Elsevier**, Tampere, 2015, Case studies in construction materials, Caderno 3, p. 1-8.

LARIVE, Catherine. **Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques**. 1997. 327f. Dissertação (Doutorado) - École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1997.

LOPES, Anne N. de M. et al. Investigação da RAA em testemunhos de concreto procedentes das UHE's Pau' o Afonso I, II, III e IV. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 24, 2001, Fortaleza, nov. 2001. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/documentos/site/12%20-%20Trabalho%204_Investiga%C3%A7%C3%A3o%20da%20RAA.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2019.

MURLIDHAR, Bhatawdekar R.; MOHAMAD, Edy T.; ARMAGHANI, Danial J. Potential alkali silica reactivity of various rock types in an aggregate granite quarry. **Elsevier**, Tampere, 2016, Measurement, Caderno 81, p. 221-231.

NEVILLE, Adam M. **Properties of concrete**. 5. ed. Harlow: Pearson, 2011. 846 p.

NORMAS DA ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 53: Agregado grosso**: Determinación de la densidade, de la densidade aparente y de la absorción de agua.

OLIVEIRA, Caroline Oliveira e. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

PERNA, Stefânia de A. et al. Paisagem cultural de São Thomé das Letras, Minas Gerais. **Espacios**, Caracas, v. 33, n. 3, p. 16, 2012. Disponível em: <<https://www.revistaespacios.com/a12v33n03/123303161.html>>. Acesso em: 17 fev. 2019.

PIANEZZER, G. A.; GRAMANI, L. M.; KAVISKI, E. Change of effective properties of concrete by alkali-silica reaction. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño em Ingeniería**, Catalunya, v. 35, n. 1, p. 1-5, 2019.

POOLE, A. B. Introduction to álcali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. **The álcali-silica reaction in concrete**. Londres: Blackie and Son, 1992, v. 1, p. 1-28. Disponível em: <<https://www.crcpress.com/The-Alkali-Silica-Reaction-in-Concrete/Swamy/p/book/9780216926912#googlePreviewContainer>>. Acesso em: 21 fev. 2019.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

REZENDE, Mariana de A. M. **Matriz cimentícia produzida com resíduo agroindustrial: reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e passivação do aço**. 2019. 139f. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/11049/Disserta%C3%A7%C3%A3o_vers%C3%A3o-final_Mariana-de-Almeida-Motta-Rezende.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 jun. 2019.

RIBEIRO et al. Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Cerâmica**. [S.l.], vol.58, n.345, p. 90-98, 2012.

RIVA, Rogério D. D. **Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenoso e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. 2010. 157 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

RODRIGUES, Eleno de P. **Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado**: aplicação ao concreto da barragem de Pedro Beicht, SP. 1994. 217f. Dissertação (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-12062015-112246/publico/Rodrigues_Doutorado.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2019.

ROSA, Rafael A. dos Anjos. **Investigação dos efeitos das impurezas alcalinas e hidrogênio no quartzo submetido à eletrodifusão e radiação ionizante**. 2014. 90f. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/113853/000801981.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 fev. 2019.

SANCHEZ, Leandro F. M.; FOURNIER, Benoit; KUPERMAN, Selmo. A evolução e desenvolvimento dos ensaios laboratoriais na prevenção e avaliação da reação álcali-agregado (RAA). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 52, 2010, Fortaleza, out. 2010. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/52cbc/LEANDRO.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2019.

SILVA, Cristiane. **O que é RAA, a reação álcali-agregado**. In: Engenharia Civil. São Paulo: Engenharia 360, nov. 2016. Disponível em: <<https://engenharia360.com/o-que-e-raa-a-reacao-alkali-agregado/>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

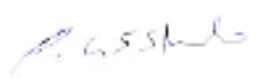
STIEVENARD-GIREAUD, D., Étude de la réaction alcalis-silice dans dès bétons. **Rapport de recherche LPC**, Paris, n. 144, 1987, 104 p.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. Londres: Thomas Telford, 1997. 439 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=1BOETtwi7mMC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 20 fev. 2019.

WIGUM, B. Johannes. **Alkali-aggregate reactions in concrete**: properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks, University of Trondheim. 1995. 227f. Dissertação (Tese PhD) - University of Trondheim, Trondheim, 1995. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/288191858_Alkali-aggregate_reactions_in_concrete_Properties_classification_and_testing_of_Norwegian_cataclastic_rocks_University_of_Trondheim>. Acesso em: 18 fev. 2019.

ZOLETT, Elis Regina; SOUZA, Luciene de. **Estudo de viabilidade da utilização da escória de aciaria na redução da expansão causada no concreto pela reação álcali-agregado**. 2012. 60f. Dissertação (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/449/1/PB_COECI_2012_1_02.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2019.

ANEXO A – Especificações do cimento CP III

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO					LIMITE NBR 6736 / 6737
		TIPO / CLASSE : CP III 40 RS FÁBRICA BARROSO					
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		
ENSAIOS FÍSICOS							
# 400 (%) IT Holcim	Média Desv. Pad. Nº Amostras	1,9 0,63 7	2,1 0,41 8	1,7 0,45 8	2,2 0,34 8		
Blaine (cm³/g) NBR NM 75	Média Desv. Pad. Nº Amostras	4763 191 8	4640 100 8	4635 96 8	4822 102 8		
Início Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	189 6 8	201 8 8	200 11 8	201 7 8	≥ 60	
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	249 5 8	264 7 8	260 10 8	261 6 8	≤ 720	
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	15,0 3,19 8	12,2 0,73 8	13,0 0,60 8	12,6 0,49 8		
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	27,4 2,52 8	24,9 0,95 8	26,0 1,24 8	25,9 0,49 8	≥ 12,0	
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	37,6 2,01 8	34,1 1,06 8	36,4 1,68 8	36,0 0,84 6	≥ 23,0	
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	48,9 1,16 8	47,4 1,11 8	48,4 1,22 8		≥ 40,0	
ANÁLISE QUÍMICA (%)							
PF 1000°C	NBR NM 18	2,58	2,58	2,67	2,68	≤ 4,5 %	
SiO₂	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 %	
Al₂O₃	NBR 14656	7,33	7,65	7,61	7,44		
Fe₂O₃	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		
SO₃	NBR 14656	1,72	1,67	1,64	1,70	≤ 4,0 %	
CO₂	NBR NM 20					≤ 3,0 %	
K₂O	NBR 14656	0,70	0,67	0,69	0,67		
PF 500°C	IT Holcim	0,71	0,78	0,68	0,77		
C₃A (Teórico)	Equação Bogue						
OBSERVAÇÕES:							
1. IT - Instrução de Trabalho							
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 8,0% (NBR 11579)							
				 Eng. Carlos Melo Supervisor A. Técnicos SP			
AB00_CP_III_40_RS_VENDAS.xls		7 maio, 2018					

ANEXO B – Especificações do cimento CP V

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO					LIMITES NBR 16697/2018
		TIPO / CLASSE : CP V ARI PLUS FÁBRICA PEDRO LEOPOLDO					
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		
ENSAIOS FÍSICOS							
	Média	2,9	2,5	4,1	2,9		
# 400 (%)	Desv. Pad.	0,19	0,16	1,33	0,27		
IT Holcim	Nº Amostras	8	8	8	8		
	Média						
# 325 (%)	Desv. Pad.						
NBR 9202	Nº Amostras						
	Média	4607	4572	4631	4590		
Blaine (cm²/g)	Desv. Pad.	49	54	69	50	≥ 3000	
NBR 16372	Nº Amostras	8	8	8	8		
	Média	134	132	136	134		
Início Pega (min)	Desv. Pad.	8	7	12	8	≥ 60	
NBR NM 65	Nº Amostras	8	8	8	8		
	Média						
Fim Pega (min)	Desv. Pad.					≤ 600	
NBR NM 65	Nº Amostras						
	Média						
Exp. Quente (mm)	Desv. Pad.					≤ 5	
NBR 11582	Nº Amostras						
	Média	27,6	26,6	26,9	27,0		
R 1 dia (MPa)	Desv. Pad.	0,60	0,68	0,72	1,22	≥ 14,0	
NBR 7215	Nº Amostras	8	8	8	8		
	Média	41,6	41,1	40,1	40,5		
R 3 dias (MPa)	Desv. Pad.	0,90	0,69	1,18	1,06	≥ 24,0	
NBR 7215	Nº Amostras	8	8	8	8		
	Média	46,5	45,7	44,6	45,6		
R 7 dias (MPa)	Desv. Pad.	1,21	0,78	1,64	0,78	≥ 34,0	
NBR 7215	Nº Amostras	8	8	8	8		
	Média	51,8	51,1	50,5	51,4		
R 28 dias (MPa)	Desv. Pad.	0,86	1,03	1,39	0,89		
NBR 7215	Nº Amostras	8	8	8	8		
ANÁLISE QUÍMICA (%)							
PF 1000°C	NBR NM 18	5,65	5,74	5,69	5,34	≤ 6,5	
SiO₂	NBR 14656	18,14	17,51		17,48		
R.I.	NBR NM 15	0,95	0,76		0,61	≤ 3,5	
Al₂O₃	NBR 14656	4,90	5,11		4,90		
Fe₂O₃	NBR 14656	2,99	3,03		2,87		
CaO	NBR 14656	64,58	64,17		63,81		
MgO	NBR 14656	0,76	0,78	0,96	0,95		
SO₃	NBR 14656	2,73	2,48	2,78	2,72	≤ 4,5	
CO₂	NBR NM 20	4,87	4,77		4,47	≤ 5,5	
K₂O	NBR 14656	0,78	0,73		0,69		
PF 500°C	IT Holcim	0,58	0,66		0,22		
C₃A (Teórico)	Equação Bogue	6,88	7,67	7,86	7,59		
OBSERVAÇÕES:							
1. IT = Instrução de Trabalho							
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)							
							
						Eng. Luciano dos Reis Bento Assessoria Técnica MG	
APLO_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls		3 abril, 2019					

Fonte: (LAFARGE HOLCIM, 2019).

ANEXO C – Ensaios Químicos do Cimentos Portland CP III e CP V



BOLETIM DE RESULTADOS

CLIENTE: ALESSANDRA LORENZETTI (USP SC).

NATUREZA DO TRABALHO: Análise química em cimento.

REFERÊNCIA: E-mail de 09.05.2019.

1 MATERIAIS

Dois (02) materiais recebidos na área de química do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT em 03.07.2019. Na Tabela 1 estão descritas informações complementares referentes à identificação dos materiais.

Tabela 1: Dados de identificação dos materiais.

Identificações do Cliente	Dados do IPT	
	Massa (g)	LMCC N.º
"Cimento CP III"	~ 50	3231-19
"Cimento CP V"		3232-19

2 MÉTODOS UTILIZADOS

- *Perda ao fogo:* ABNT NBR NM 18:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo", item 5.2 (Procedimento IPT70 - CT-OBRAS- LMCC-Q-PE-001 – Revisão 1 de 26.10.2012, Métodos A e B).

Nota 1: A presença de sulfeto é detectada por meio de teste qualitativo com acetato de chumbo.

- *Anidrido silícico (SiO₂):* ABNT NBR NM 11-2:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.1.2, ABNT NBR NM 22:2012 "Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise Química - Método de arbitragem". (Procedimento IPT86 - CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-003 – Revisão 1 de 26.10.2012, Método B).
- *Óxido férrico (Fe₂O₃):* ABNT NBR NM 11-2:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.1.

(Procedimento IPT88 – CT – OBRAS – LMCC-Q-PE-005 – Revisão 1 de 21.09.2012, Método B).

- *Óxido de alumínio (Al_2O_3)*: ABNT NBR NM 11-2:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.2 (Procedimento IPT89 – CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-006 – Revisão 1 de 21.09.2012, Método B).
- *Óxido de cálcio (CaO)*: ABNT NBR NM 11-2:2012 "Cimento Portland – Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.3 (Procedimento IPT90 – CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-007 – Revisão 1 de 12.09.2012, Método B).
- *Óxido de magnésio (MgO)*: ABNT NBR NM 11-2:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.4 (Procedimento IPT91 – CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-008 – Revisão 1 de 21.09.2012, Método B).
- *Anidrido sulfúrico (SO_3)*: ABNT NBR NM 16:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico" (Procedimento IPT92 – CT-OBRAS- LMCC-Q-PE-009 008 – Revisão 1 de 21.09.2012).
- *Óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O)*: com base nas diretrizes gerais da ASTM C114-18 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement" e ABNT NBR 13810:1997 "Determinação de metais - Método de Espectrometria de Absorção Atômica". (Procedimento IPT128 – CT-OBRAS- LMCC-Q-PE-061 – Revisão 2 de 08.12.2016).
- *Óxido de cálcio livre (CaO livre)*: ABNT NBR NM 13:2012 (Errata 1:2013) "Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol" (Procedimento IPT93 – CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-010 – Revisão 2 de 11.08.2015).
- *Resíduo Insolúvel*: ABNT NBR NM 15/12 "Cimento Portland – Análise química - Determinação de resíduo insolúvel" (Procedimento IPT85 – CT-OBRAS-LMCC-Q- PE-002 – Revisão 1 de 21.09.2012, Método B).
- *Anidrido carbônico (CO_2)*: ABNT NBR NM 20:2012 "Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria", item 5 (Procedimento IPT94 – CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-011 – Revisão 2 de 21.09.2012).
- *Sulfeto (S^{2-})*: ABNT NBR-NM 19:2012 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de enxofre na forma de sulfeto" (IPT95 - CT-OBRAS-LMCC-Q-PE- 012 - Revisão 1 de 21.09.2012).

3 RESULTADOS

Os resultados das análises químicas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados das análises químicas.

Determinações	Resultados, em %		Limites da ABNT NBR-16.697:18	
	"Cimento CP III" (LMCC N.º 3231-19)	"Cimento CP V" (LMCC N.º 3232-19)		
			CP III	CP V
Perda ao fogo (PF)	4,05	7,14	≤ 6,5	
Anidrido silícico (SiO ₂)	26,9	17,6	---	
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	8,32	4,67	---	
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	1,50	3,09	---	
Óxido de cálcio (CaO)	50,1	63,7	---	
Óxido de magnésio (MgO)	4,38	0,56	---	≤ 6,5
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,84	2,36	≤ 4,5	
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,23	0,14	---	
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,51	0,71	---	
Equivalente alcalino (em Na ₂ O) <i>Nota 2</i>	0,57	0,61	---	
Óxido de cálcio livre (CaO)	0,75	1,30	---	
Resíduo insolúvel (RI)	0,96	0,58	≤ 5,0	≤ 3,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	2,56	4,97	≤ 5,5	
Sulfeto (S ²⁻)	0,57	---	≤ 1,0	---

Nota 2: Equivalente alcalino (em Na₂O) = % Na₂O + 0,658 x % K₂O.

EQUIPE TÉCNICA

Engenheiro Químico Sérgio Soares de Lima
– IPT Técnico Químico Daniel Polato
Malvestuto – FIPT

São Paulo, 05 de agosto de
2019.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil
Assinado Digitalmente
Eng. Quím. Sérgio Soares de Lima
Supervisor de Ensaio
CRQ nº 9302257 - NRE 9059

Fonte: (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2019).