

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS MG

ENGENHARIA CIVIL

FELIPE KRAUSS DE SOUZA E SILVA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE
CONCRETO: Avaliação de agregados gnáissicos provenientes do município de
Varginha**

Varginha

2019

FELIPE KRAUSS DE SOUZA E SILVA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE
CONCRETO: Avaliação de agregados gnáissicos provenientes do município de
Varginha**

Trabalho apresentado no curso de engenharia civil do
centro universitário do sul de minas como pré-requisito
para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do
Prof. Me. Ivan Francklin Junior.

Varginha

2019

FELIPE KRAUSS DE SOUZA E SILVA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO PELO MÉTODO ACELERADO EM PRISMAS DE
CONCRETO: Avaliação de agregados gnáissicos provenientes do município de
Varginha**

Trabalho apresentado no curso de engenharia civil do
centro universitário do sul de minas como pré-requisito
para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do
Prof. Me. Ivan Francklin Junior.

Aprovado em / /

Prof. Me. Ivan Francklin Junior

Prof.

Prof.

Dedico este trabalho a minha mãe Lilia Krauss
e minhas avós Aparecida Salles e Selma
Gorgulho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha parceira Lilian Fonseca, meu colega Gabriel Menezes, ao técnico de laboratório Everton Máximo e ao meu coordenador Prof. Me Ivan Francklin Junior, assim como a Mineração Santo Antônio de Varginha LTDA por serem essenciais na construção deste trabalho.

RESUMO

Esse trabalho tem a finalidade de constatar a reação álcali-sílica em prismas de concreto produzidos com a rocha de gnaisse proveniente do município de Varginha-MG, utilizada como agregado graúdo, e areia potencialmente inócua como agregado miúdo, utilizando o método acelerado de acordo com ABNT NBR 15577-7: 2018, com o intuito de atestar somente a reatividade do gnaisse como agregado graúdo frente a utilização dos tipos de cimento CPIII e CPV. Para analisar os materiais utilizados na composição do concreto foram realizados ensaios de caracterização dos índices físicos dos agregados graúdo e miúdo, dos cimentos, assim como uma análise física e uma análise química do gnaisse e uma análise química dos cimentos. O ensaio durou 5 meses e teve medições realizadas na 5^ª, 10^ª, 15^ª e 20^ª semana o que possibilitou medir as expansões causadas pela reação álcali-sílica e classificar o grau de reatividade do agregado como R1, de acordo com a ABNT NBR 15577-1: 2018.

Palavras-chave: Concreto. Gnaisse. Reação álcali-sílica.

ABSTRACT

This study aims to verify the alkali-silica reaction in concrete prisms produced with gneiss rock from the municipality of Varginha-MG, used as coarse aggregate, and potentially harmless sand as fine aggregate, using the accelerated method according to ABNT NBR 15577-7: 2018, in order to attest only the reactivity of the gneiss as coarse aggregate when using the types of cement CPIII and CPV. To analyze the materials used in the concrete composition, tests were performed to characterize the physical indexes of coarse and fine aggregates, cements, as well as a physical analysis and a chemical analysis of the gneiss and a chemical analysis of cements. The test lasted 5 months and measurements were taken at 5, 10, 15 and 20 weeks, which allowed measuring the expansions caused by the alkali-silica reaction and classifying the degree of reactivity of the aggregate as R1, according to ABNT NBR 15577-1: 2018.

Keywords: Alkali-silica reaction. Concrete. Gneiss.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Fissuração em blocos de fundação causada pela RAA.....	12
Figura 02 – Stanton e estruturas de concreto afetadas pelo RAA.....	14
Figura 03 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado.....	17
Figura 04 – Representação dos processos do mecanismo da reação álcali-sílica.....	18
Figura 05 – Tipos de sílica.....	19
Figura 06 – Expansões em prismas de concreto pelo método acelerado com o gnaisse de Recife.....	23
Figura 07 – Bancadas de exploração do gnaisse na área da Fazenda Ribeirão Santana.....	25
Figura 08 – Esteiras e pilhas de agregado.....	25
Figura 09 – Jazida de gnaisse situada na fazenda Ribeirão Santana	26
Figura 10 – Realização do ensaio para obtenção dos valores de massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo.....	27
Figura 11 – Realização do ensaio de massa específica do agregado miúdo.....	28
Figura 12 – Realização do ensaio de massa específica do cimento.....	29
Figura 13 – Molde utilizado para fabricação dos prismas de concreto.....	31
Figura 14 – Realização do peneiramento dos agregados graúdos.....	32
Figura 15 – Agregado graúdo já separado.....	33
Figura 16 – Agregado miúdo já separado.....	33
Figura 17 – Realização do adensamento do concreto nos moldes.....	35
Figura 18 – Prismas na cura inicial.....	36
Figura 19 – Recipiente utilizado para acondicionar os prismas.....	37
Figura 20 – Prisma recém desenformado.....	37
Figura 21 – Leitura sendo realizada no pórtico com relógio comparador.....	38
Figura 22 – Expansões em prismas de concreto com o gnaisse de Varginha.....	45
Figura 23 – Variação de massa nos prismas de concreto.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Barragens de concreto no Brasil com reação álcali-agregado.....	15
Tabela 02 – Classificação do grau de reatividade do agregado.....	22
Tabela 03 – Grau de risco de ocorrência de RAS.....	22
Tabela 04 – Granulometria requerida do agregado graúdo.....	32
Tabela 05 – Granulometria requerida do agregado miúdo.....	33
Tabela 06 – Cronograma de medições dos prismas.....	39
Tabela 07 – Determinação dos índices físicos do agregado graúdo.....	39
Tabela 08 – Determinação dos índices físicos do agregado miúdo.....	40
Tabela 09 – Minerais identificados na difração de raios X.....	40
Tabela 10 – Resultado da análise química dos cimentos.....	41
Tabela 11 – Massa específica dos cimentos utilizados nos ensaios.....	42
Tabela 12 – Equivalente alcalino obtido através da análise química.....	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Alguns regulamentos e normas sobre a reação álcali-agregado.....	15
Quadro 02 – Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado.....	21
Quadro 03 – Tipos de cimento com seus respectivos lotes e fábricas.....	29
Quadro 04 – Fator de conversão de Na_2O para NaOH	34
Quadro 05 – Composição química do gnaisse de Varginha.....	41
Quadro 06 – Valores de expansão e massa dos prismas CPIII.....	43
Quadro 07 – Valores de expansão e massa dos prismas CPV.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Contexto e Justificativa da Pesquisa.....	12
1.2 Objetivo.....	13
1.2.1 Objetivo geral.....	13
1.2.2 Objetivo específico.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Reação álcali-agregado (RAA).....	14
2.1.1 O histórico da reação álcali-agregado.....	14
2.1.2 Os mecanismos da reação álcali-agregado e seus fatores condicionantes.....	16
2.1.3 Reação álcali-sílica (RAS).....	18
2.1.4 Reação álcali-carbonato (RAC).....	19
2.2 Agregado.....	20
2.2.2 Reatividade do agregado.....	20
2.2.3 O gnaïsse oriundo do município de Varginha-MG.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 Materiais.....	26
3.1.1 Escolha e caracterização dos índices do agregado graúdo.....	26
3.1.2 Escolha e caracterização dos índices do agregado miúdo.....	27
3.1.3 Escolha e caracterização dos índices dos cimentos.....	28
3.1.4 Análise física e análise química do agregado gnaïsse.....	30
3.1.5 Análise química dos cimentos.....	30
3.2 Produção dos corpos de prova prismáticos de concretos.....	31
3.2.1 Instrumentos e aparelhos necessários.....	31
3.2.2 Separação dos agregados.....	32
3.3.3 Adição de hidróxido de sódio (NaOH).....	34
3.3.4 Condições de umidade e temperatura.....	34
3.3.5 Dosagem do concreto.....	34
3.3.6 Procedimento de mistura.....	35
3.3.7 Moldagem.....	35
3.3.8 Cura inicial.....	36
3.3.9 Acondicionamento dos prismas durante o período de ensaio.....	36
3.3.10 Leituras e cálculo de variação do comprimento.....	37
3.3.11 Variação de massa.....	39
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	39
4.1 Índices físicos dos agregados.....	39
4.2 Análise Petrográfica.....	40
4.3 Índices físicos e químicos dos cimentos.....	41
4.4 Cálculo do traço do concreto.....	42
4.5 Expansão dos prismas.....	43
5 CONCLUSÃO.....	46

REFERÊNCIAS.....	48
ANEXO A.....	51
Especificações do cimento CP III.....	51
Especificações do cimento CP V.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Justificativa da Pesquisa

O concreto que é constituído de aglomerante (cimento), agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia) e água, é um dos materiais mais usados na indústria da construção civil, com diversas aplicações e é submetido a diversos tipos de ambientes agressivos, que podem comprometer sua vida útil.

O objeto de estudo desse artigo é a anomalia em peças de concreto e argamassa conhecida como reação álcali-agregado (RAA), mais especificamente a reação álcali-sílica (RAS), que é a reação que envolve os álcalis do cimento e as sílicas do agregado.

Essa reação é muito comum em estruturas ou elementos estruturas que ficam em contato permanente com a água ou em ambientes de alta umidade, como no caso de barragens, pontes, estruturas marinhas, blocos e estacas de fundação.

A reação álcali-agregado deletéria pode causar fissuras e deslocamentos diferenciais em peças de concreto e argamassa como mostra a Figura 01, o que ocasiona no comprometimento da vida útil de edificações ou até mesmo seu colapso (MIZUMOTO, 2009).

Figura 01 – Fissuração em blocos de fundação causada pela RAA.



Fonte: (Salles et. al., 2003, apud Mizumoto, 2009, p.29).

Em 1930 foram registrados os primeiros casos de manifestações patológicas em estruturas de concreto ligadas a reação álcali-agregado, apesar do meio técnico considerar por muito tempo os agregados como materiais inertes (SILVA, 2007).

No Brasil foram relatadas várias ocorrências patológicas geradas pela reação álcali-agregado, como os casos da barragem de Apolônio Sales (situada entre os estados da Bahia e Alagoas) e a ponte Paulo Guerra (estado de Pernambuco), além de diversos casos confirmados de blocos de fundação de edifícios residenciais no Recife deteriorados pela RAA, o que chamou atenção do meio técnico nacional (ANDRADE, 2006).

Levando em consideração o risco de ocorrência de um sinistro em uma estrutura de concreto ocasionado pela reação álcali-agregado, fica evidente a necessidade do estudo de como a reação acontece, e qual a relação da reação deletéria com os materiais constituintes do concreto e o ambiente em que ele é exposto.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Constatar a potencialidade reativa álcali agregado em prismas de concretos produzidos com gnaisses provenientes de Varginha-MG.

1.2.2 Objetivo específico

- Realizar a amostragem dos agregados.
- Escolher os cimentos para realização da pesquisa.
- Realizar a caracterização física dos materiais componentes dos concretos
- Determinar a composição química das amostras de cimentos.
- Determinar a composição química e física dos gnaisses.
- Dosar os concretos conforme procedimento estabelecido pela ABNT NBR 15577-7: 2018.
- Produzir os prismas de concreto em laboratório
- Determinar os índices de expansibilidade dos prismas de concreto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

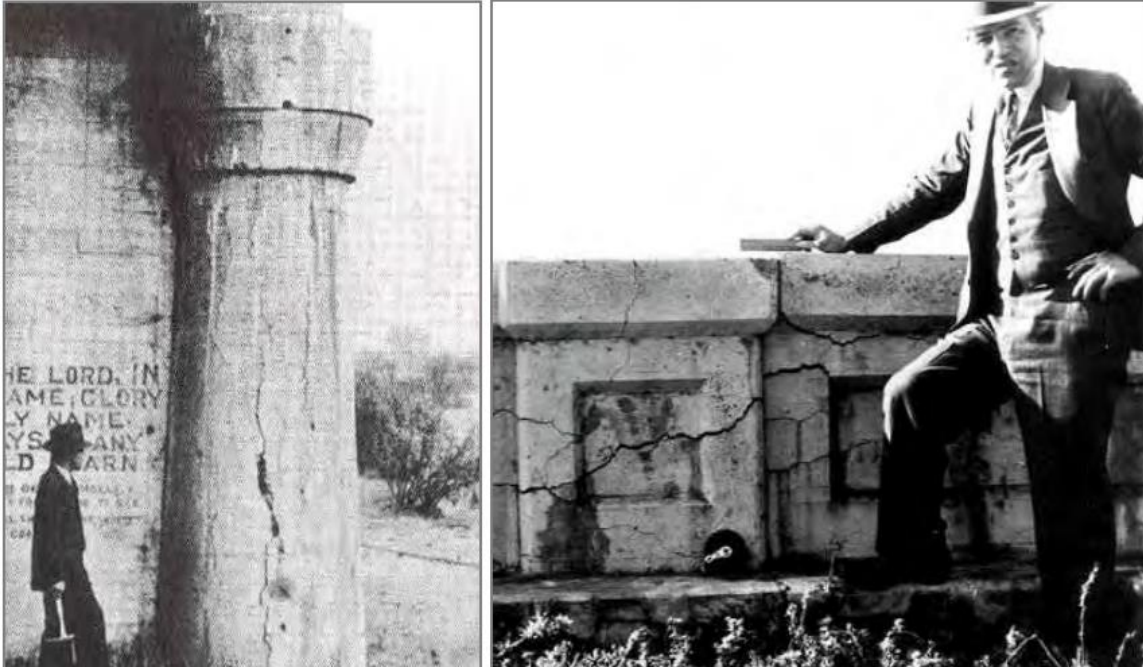
2.1 Reação álcali-agregado (RAA)

Nesta seção são apresentados os históricos da reação álcali-agregado e os diferentes tipos de manifestações que ocorrem nas rochas comercializadas como agregado no concreto.

2.1.1 O histórico da reação álcali-agregado

Em 1940, Stanton foi o primeiro pesquisador a aprofundar os estudos da reação álcali-agregado, observando que várias pontes e rodovias de concreto na costa da Califórnia apresentavam grande quantidade de fissuras que estavam ligadas a reações químicas geradas do contato entre os agregados utilizados (Opala e chert) e os álcalis criados no processo de hidratação do cimento (PREZZI et al., 1997). Na Figura 02 podemos observar Stanton e estruturas de concreto comprometidas pelo RAA.

Figura 02 – Stanton e estruturas de concreto afetadas pelo RAA.



Fonte: (Thomas, 2008, p. 27, apud Mizumoto, 2009, p. 27).

Com o passar do tempo, vários países relataram problemas em estruturas de concreto relacionados a reação álcali-agregado, criando a necessidade de normas técnicas e regulamentos

específicos. O Quadro 01 mostra alguns exemplos de normas e regulamentos sobre a reação álcali-agregado e seus respectivos países.

Quadro 01 – Alguns regulamentos e normas sobre a reação álcali-agregado.

Regulamento/Norma	País
Structural effects of alkali-silica reaction- Technical guidance on the appraisal of existing structures	Inglaterra
State of the Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity (ACI)	Estados Unidos
ABNT NBR 15577- Agregados – Reatividade álcali-agregado	Brasil
Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-Aggregate Reaction	Canadá

Fonte: (O autor, 2019).

No Brasil, em 1963 os pesquisadores do IPT (Instituto de pesquisas tecnológicas) Gitahy e Ruiz foram os responsáveis pelo primeiro registro que abordava o assunto, através de um trabalho intitulado “Reação expansiva álcali-agregado em concretos” que tratava de ações para mitigação da reação e o risco de sua manifestação deletéria (PRISZKULNIK, 2005).

Segundo Kihara e Scanduzzi (1993), o primeiro caso no Brasil em que foi identificada a possibilidade da reação álcali-agregado, foi na barragem de Jupuíá, cujo o cascalho oriundo do Rio Paraná utilizado como agregado, era potencialmente reativo, fazendo-se necessário um estudo sobre mitigação da reação. Desde então, no Brasil foram relatados vários casos de reação álcali-agregado em barragens, na Tabela 01 é possível observar vários exemplos.

Tabela 01 – Barragens de concreto no Brasil com reação álcali-agregado.

Nome da barragem	Fim da construção	RAA notada no ano	Tipo de agregado
Billings-Pedras	1936	1992	Granito
Furnas	1963	1976	Quartzito
Ilha dos Pombos	1924	1991	Gnaisse
Jaguara	1971	1996	Quartzito Granito
Joanes II	1971	1988	Gnaisse
Paulo Afonso I	1955	1978	Granito-gnaisse
Paulo Afonso II	1962	1978	Granito-gnaisse
Paulo Afonso III	1973	1978	Granito-gnaisse
Paulo Afonso IV	1979	1985	Granito-gnaisse
Pedro-Beicht	1932	1991	Granito-gnaisse
Peti	1945	1964	Gnaisse

Fonte: (Adaptado de Munhoz, 2007).

2.1.2 Os mecanismos da reação álcali-agregado e seus fatores condicionantes.

A Reação álcali-agregado (RAA) é uma manifestação patológica, que acontece por meio de reações químicas entre hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) do cimento Portland e alguns tipos de minerais reativos presentes na composição dos agregados, que na presença de umidade criam expansões, o que ocasiona tensões internas em peças de concreto e argamassa, causando fissuras e perda de suas características mecânicas (ABNT NBR 15577-1: 2018).

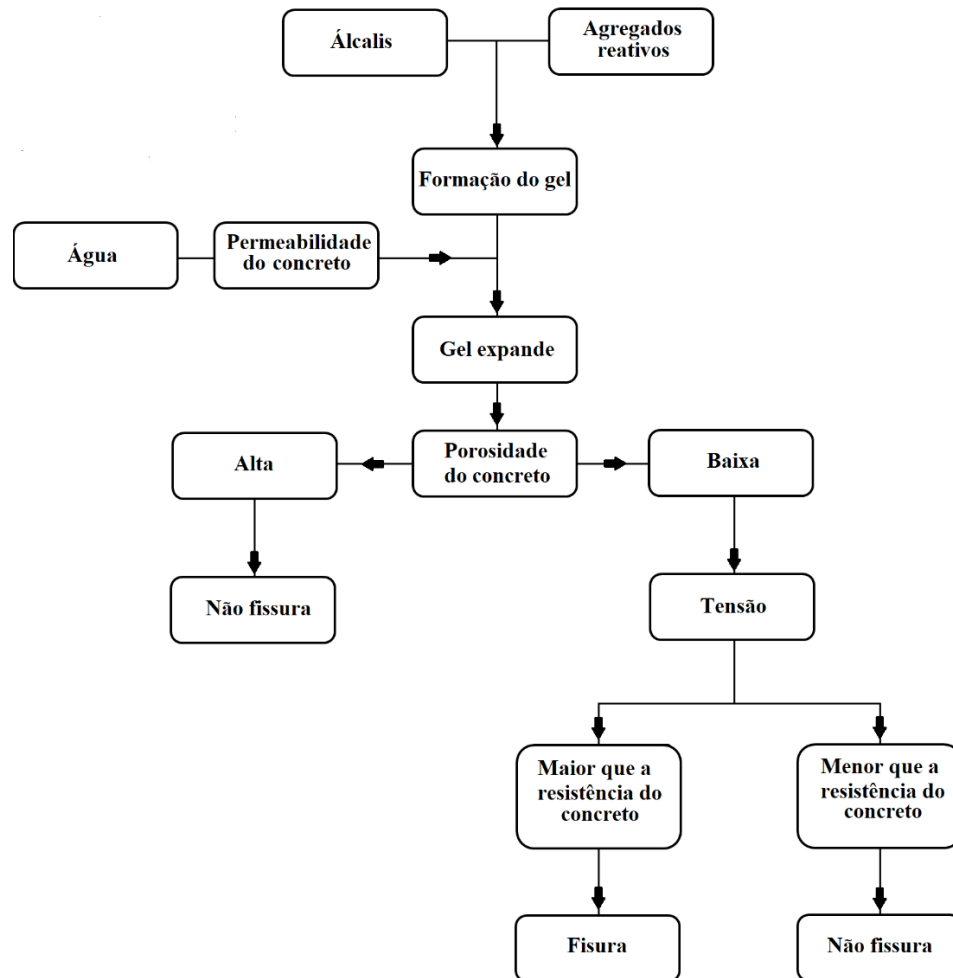
Os principais fatores condicionantes para desenvolvimento e intensidade da reação álcali-agregado são:

- O teor de álcalis provenientes do cimento e a relação água/cimento utilizada no traço, quanto maior a quantidade de cimento e seu teor de álcalis, maior é a expansão (GOMES NETO e BARRETO, 2013)
- A umidade relativa que deve ser acima de 80% no elemento de concreto para ocorrência de expansões, embora com umidades mais baixas possa ocorrer a criação do gel. No caso da ausência total da umidade, mesmo com agregados reativos e um alto teor de álcalis no concreto, a produção do gel e a expansão não acontecem (ANDRADE, 2006).
- A estrutura do mineral reativo que influencia a velocidade de ocorrência da reação, e o formato, a granulometria e a área específica dos grãos do agregado que afetam a magnitude da reação de acordo com a área de contato dos grãos do agregado com a pasta do cimento (GAO et al. 2012) e (ISLAM and GHAFUORI, 2013).
- A temperatura, que é um catalizador do desenvolvimento da reação álcali-agregado. Conforme a temperatura sobe, a expansão do concreto tende a aumentar (GOMES NETO e BARRETO, 2013).

A tensão causada pelo aumento de volume do gel é em média de 6 a 7 MPa, como comumente a resistência a tração do concreto é de 2 a 3 MPa o concreto fatura criando condições favoráveis para o desenvolvimento de outras manifestações patológicas no material como processos de corrosão e infiltração (Lacasse et al. 2003).

O fluxograma desenvolvido no trabalho de Valduga (2002) representado na Figura 03, elucida as etapas da reação álcali-agregado desde a criação do gel até a fissuração e destaca a influência da porosidade do concreto para o desenvolvimento da reação deletéria.

Figura 03 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado.



Fonte: (Modificado de Valduga, 2002, p. 16).

Segundo a NBR 15577-1 os álcalis são sais de sódio (Na_2O) ou potássio (K_2O) que podem estar presentes em elementos internos ou externos ao concreto que quando em contato com a água são solubilizáveis instantaneamente ou com o passar do tempo.

De acordo com Gomes Neto e Barreto (2013) a principal fonte de álcalis do cimento está nas argilas presentes na composição do clínquer, que podem ser ricas em mica e argila ilítica que contem potássio ou serem ricas em feldspato que contém tanto potássio como sódio.

A edição de 2008 a ABNT NBR 15577-1 determinava que a deterioração de peças de concreto e argamassa pelo processo químico da RAA era dividida em três classes em função do tipo do agregado e seus minerais constituintes, a reação álcali-sílica, reação álcali-carbonato e a reação álcali-silicato, porém com a atualização de 2018 a ABNT NBR 15577-1 passou a considerar a reação álcali-silicato equivalente a reação álcali-sílica, já que se tratam de reações muito parecidas, e que segundo Gomes Neto e Barreto (2013) tendem a acontecer simultaneamente.

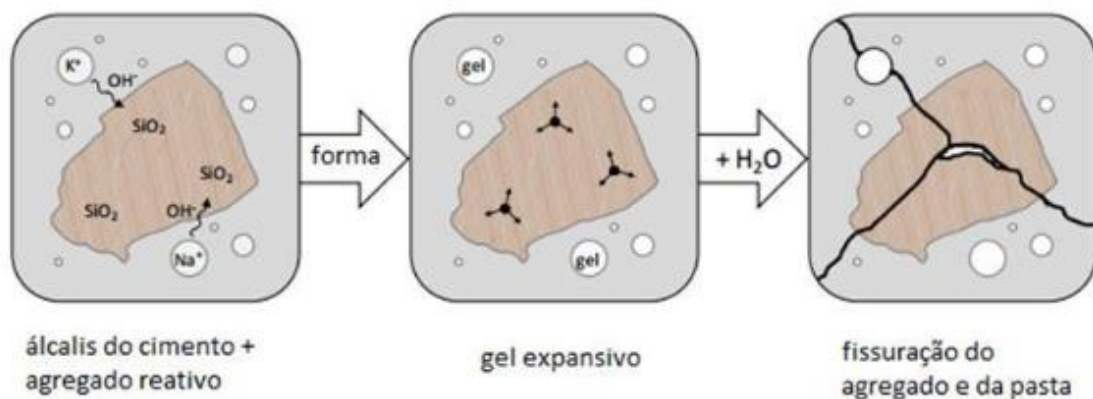
Segundo Deschenes (2009) para identificar o acontecimento da reação álcali-agregado deve-se ter atenção em uma reação química, que é uma forma de ataque de sulfato, chamada etringita tardia, essa reação resulta na criação de um composto químico mineral de sulfato de cálcio e alumínio hidratado, que cria uma tensão de tração no concreto de maneira muito semelhante ao gel expansivo da reação álcali-agregado, e só é possível constatar o acontecimento da etringita tardia por meio da microscopia eletrônica de varredura.. Para a formação da etringita tardia se faz necessário temperaturas do concreto superiores a 70°C e uma alta umidade.

2.1.3 Reação álcali-sílica (RAS)

Segundo a ABNT NBR 15577-1: 2018 a reação álcali-sílica (RAS) é definida como uma reação química entre hidróxidos alcalinos provenientes do cimento Portland e outras fontes de sílica como rochas que contem minerais silicosos (opalas, cherts, quartzo deformado, quartzo microcristalino, vidro vulcânico, vidros reciclados...) presentes em alguns tipos de agregados, que pode ocasionar na produção de um gel álcali-sílica, que causa uma expansão e fissuração no concreto.

Deschenes (2009) descreve que o mecanismo da reação álcali-sílica tem início na criação do produto reativo do gel na união dos álcalis com a sílica reativa que se torna expansivo com a presença de umidade. Na Figura 04 é possível observar as etapas da reação álcali-sílica no interior do agregado.

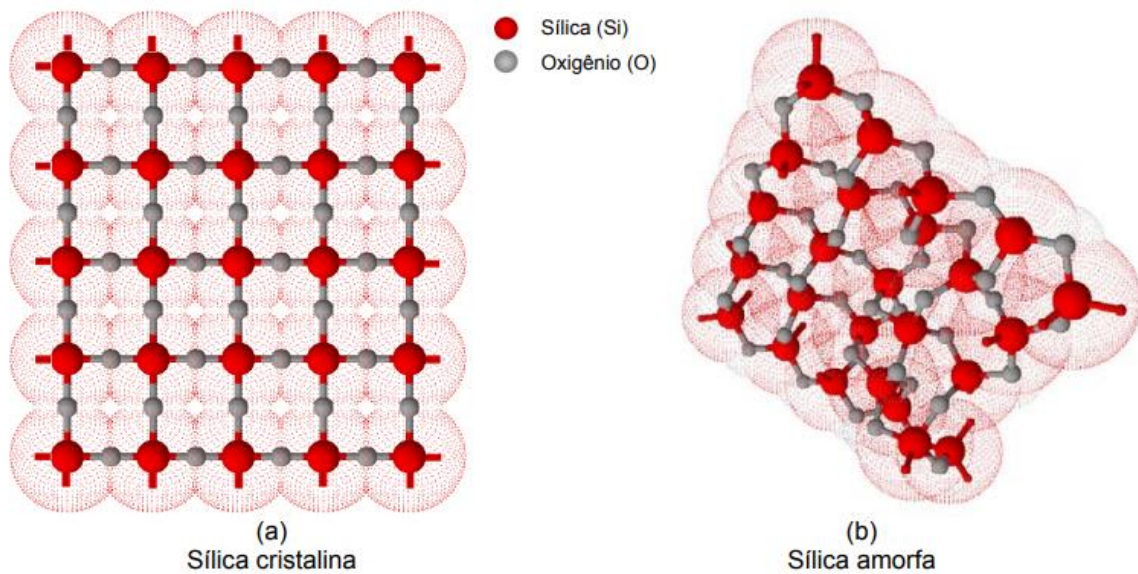
Figura 04 – Representação dos processos do mecanismo da reação álcali-sílica.



Fonte: (Deschenes, 2009, p. 10).

Segundo Islam and Ghafoori (2013) é o tipo de RAA que ocorre com mais frequência e a que se desenvolve em um menor período de tempo, que pode variar de acordo com o formato da sílica, podendo estar presente no agregado na forma de sílica cristalina e sílica amorfa como mostra a Figura 05.

Figura 05 – Tipos de sílica.



Fonte: (Couto, 2008, p. 51).

Em função da organização estrutural da sílica cristalina os íons hidroxila atacam em sua maioria a sua superfície, devido ao fato de poucos íons de sílica passarem para a fase fluida, resultando em um processo mais lento, já a estrutura da sílica amorfa recebe o ataque de íons hidroxilas e alcalinos (sódio ou potássio) no seu interior o que acarreta a criação do gel mais rapidamente (Sachlovaet et al, 2015).

2.1.4 Reação álcali-carbonato (RAC)

A ABNT NBR 15577-1: 2018 descreve que a reação álcali-carbonato como uma reação entre hidróxidos alcalinos presentes no cimento Portland ou outras fontes, e certos agregados calcários dolomíticos argilosos, acompanhada da desdolomitização, que em um ambiente favorável, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa. Se não houver expansão deletéria envolvendo a reação dos agregados carbonáticos, não é considerada reação álcali-carbonato.

Esse tipo de RAA produz cristais debrucita e calcita que são partículas finas rodeadas por vácuo, que ocupam um volume maior que a dolomita, dessa forma o aumento de volume dos cristais (processo chamado de desdolomitização) cria uma tensão que causa fissurações e enfraquecimento do concreto e argamassa (SILVEIRA, 2006).

Diferentemente da reação álcali-sílica que tem a origem de sua alcalinidade em função da concentração álcalis, a reação álcali-carbonato causa uma elevação do PH de acordo com que as reações dos carbonatos alcalinos com o hidróxido de cálcio acontecem, estimulando sucessivamente a reação de acordo com o aumento da alcalinidade (COUTO, 2008).

2.2 Agregado

2.2.2 Reatividade do agregado.

A reatividade do agregado está ligada aos minerais encontrados na rocha que o compõe, o que evidencia a necessidade de uma análise do agregado para conhecer sua composição mineralógica. Segundo a ABNT NBR 15577-3: 2018 as porcentagens de minerais reativos aceitáveis para que um agregado seja considerado potencialmente inócuo são de até 5% de quartzo microgranular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de tridimita ou cristobalita, 3% de vidro vulcânico e 0,5% de opala. O Quadro 02 apresenta as rochas e seus respectivos minerais propensos ao desenvolvimento da reação álcali-agregado.

Quadro 02 – Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado.

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica metaestável e vidros vulcânicos		
Material reativo	Rochas de ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riólito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, além de alguns basaltos
Rochas Potencialmente Reativas Contendo Quartzo		
Material reativo	Tipos de rocha	
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino. Quartzo macrogranular fraturado, e/ou deformado, podendo conter agregados de quartzo microcristalino no contato do grão (textura mortar)	Chert, veio de quartzo, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso e calcário com quartzo microgranular disperso Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino. Outras rochas que contenham quartzo deformado, microcristalino ou criptocristalino, tais como: Rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito (desde que apresentem feições e fases indicativas de reatividade) Rochas sedimentares: grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso e arcóseo Rochas metamórficas: gnaiss, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia, rochas miloníticas e cataclásticas.	

Fonte: (ABNT NBR 15577-3: 2018, p.07).

A potencialidade do agregado para uma manifestação deletéria no concreto não pode ser atestada com base somente na análise petrográfica e a caracterização mineralógica, mas são informações muito importantes para essa análise (ABNT NBR 15577-1: 2018).

De acordo com a ABNT NBR 15577-1: 2018 o grau de reatividade do agregado deve ser estabelecido com base nos ensaios de expansão de prismas de concreto (agregado graúdo) e ensaio de expansão em barras de argamassa (agregado miúdo), assim como deve-se observar os minerais constituintes da rocha do agregado por meio de uma análise petrográfica.

A ABNT NBR 15577-1: 2018 determina o grau de reatividade do agregado em função da expansão em 30 dias para o método acelerado das barras de argamassa (ABNT NBR 15577-4: 2018) e para a expansão em 365 dias para o método dos prismas de concreto (ABNT NBR

15577-6: 2018) de acordo com a Tabela 02, mas não possui valores de classificação para a expansão em 20 semanas do método acelerado dos prismas de concreto (ABNT NBR 15577-7: 2018), porém segundo Sanchez et al. (2011) o método acelerado dos prismas de concreto tem a mesma eficácia que o método dos prismas em 365 dias, e os parâmetros para consideração de expansão deletéria ou reativa do método acelerado dos prismas de concreto podem ser considerados os mesmos do método dos prismas de concreto com expansão em 365 dias.

Tabela 02 – Classificação do grau de reatividade do agregado.

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

Fonte: (ABNT NBR 15577-1: 2018, p.03).

Segundo a ABNT NBR 15577-1: 2018 outro fator a ser observado para estabelecer o risco de comprometimento de desempenho do concreto pela ocorrência da reação álcali-agregado vai além da análise do grau de reatividade do agregado, e deve-se classificar a utilização do concreto de acordo com a Tabela 03, que relaciona a classe de reatividade do agregado, com as condições de exposição da estrutura ou do elemento de concreto ao ambiente.

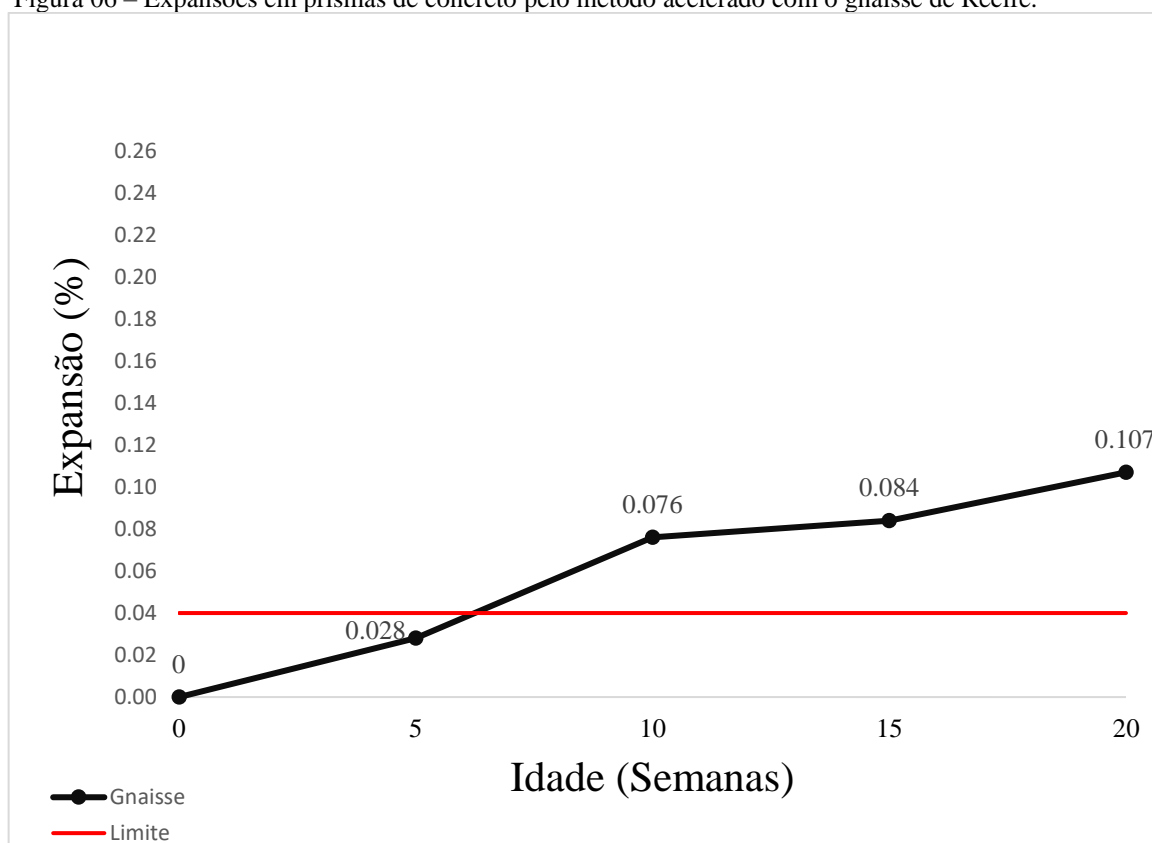
Tabela 03 – Grau de risco de ocorrência de RAS.

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

Fonte: (ABNT NBR 15577-1: 2018, p. 04).

Sanchez et al. (2011) realizaram uma pesquisa do método acelerado dos prismas de concreto com diversos agregados, dentre esses agregados, o gnaiss brasileiro oriundo de Recife, que possui um histórico comportamento reativo, Sanchez et al. (2011) utilizaram a mesma dosagem e os mesmos procedimentos indicados pela ABNT NBR 15577-7: 2018. Embora não seja citado em sua pesquisa qual tipo de cimento foi usado, foi descrito como um cimento altamente alcalino. Sanchez et al. (2011) constataram a reatividade do agregado com uma expansão que superou os valores da classificação R1, estabelecida pela ABNT NBR 15577-1: 2018, como pode ser observado na Figura 06.

Figura 06 – Expansões em prismas de concreto pelo método acelerado com o gnaiss de Recife.



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

2.2.3 O gnaiss oriundo do município de Varginha-MG

Segundo Silva e Cazotti (2009) o gnaiss é uma rocha metamórfica que originar-se tanto de rochas ígneas como de rochas sedimentares, o que causa uma grande variação em sua composição mineralógica, e pode receber varios nomes de acordo com suas rochas de origem como granito gnaiss, diorito gnaiss, sienito gnaiss, paragnaiss (proveniente de sedimentos), e de acordo com o seu aspecto e estrutura, são denominados fitados, ocelares e facoidais.

“Na cidade de Varginha-MG a exploração é feita em paragneisses ricos em K-feldspato, cianita, localmente sillimanita, e granada, com intercalações de rochas meta básicas e calcissilicáticas, pertencentes à Unidade Arantina, em fácies granulítica” (TROUW et al., 2008).

De acordo com Trouw et al. (2008), no município de Varginha-MG existem três áreas de exploração de gnaiss, mas uma já não está mais em atividade e fica na Fazenda Santa Maria, próximo à rodovia MG-26, e as outras duas cadastradas no Departamento Nacional de Produção Mineral que estão em plena atividade são:

- Área da fazenda das Posses, onde a exploração está a cargo da Britadora Niemeyer S.A., sendo sua produção de brita utilizada quase que exclusivamente para abastecer a empresa de asfalto do mesmo grupo.
- Área da fazenda Ribeirão Santana onde foi retirado o agregado abordado nessa pesquisa e tem sua exploração é feita pela Mineração Santo Antônio de Varginha LTDA, que produz brita, pedrisco, pó granulado, matacão para usos diversos como produção de asfalto, concreto, artefatos de cimento, compactação de solo, lastro de ferrovia, contenção de encosta entre outros. Sua capacidade de produção atual é de 30.000 toneladas, atendendo a várias cidades no sul de Minas Gerais.

Durante uma visita realizada na pedreira Santo Antônio foi possível observar que a exploração da gnaiss na área da Fazenda Ribeirão Santana é realizada a céu aberto em encostas por meio de bancadas como mostra a Figura 07, com a utilização de explosivos é feito o desmonte da rocha e retroescavadeiras e caminhões transportam a rocha até um britador de mandíbulas, onde é feita a britagem primária, logo após, é feita a britagem secundária em um britador cônico, obtendo-se assim diversas granulometrias do material.

Figura 07 – Bancadas de exploração do gnaiss na área da Fazenda Ribeirão Santana.



Fonte: (O autor, 2019).

Após o britador cônico é feita a distribuição das granulometrias por esteiras transportadoras móveis que armazenam o gnaiss em diferentes pilhas de acordo com a granulometria em pátio a céu aberto como mostra a Figura 08.

Figura 08 – Esteiras e pilhas de agregado.



Fonte: (O autor, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo de constatar a reatividade potencial álcali-sílica do gnaiss do município de Varginha, foi necessário preparar e caracterizar materiais e realizar o método acelerado dos prismas de concreto em laboratório de acordo com a ABNT NBR 15577-7: 2018.

3.1 Materiais

3.1.1 Escolha e caracterização dos índices do agregado graúdo.

O gnaiss da cidade de Varginha é a rocha abordada nesse artigo por ser um dos agregados mais utilizados na produção de concreto na região do sul de Minas Gerais, o que evidenciou a necessidade de um estudo quanto a sua potencialidade reativa ou inócua em relação a reação álcali-sílica.

As amostragens foram cedidas pela Mineração Santo Antônio de Varginha LTDA em várias granulometrias diferentes e retiradas direto da jazida indicada na Figura 09 situada na fazenda Ribeirão Santana.

Figura 09 – Jazida de gnaiss situada na fazenda Ribeirão Santana.



Fonte: (Adaptado Google Earth, 2019).

Foi realizada a caracterização física do agregado graúdo por meio dos ensaios de massa específica, massa específica aparente e absorção de água prescritos na ABNT NBR NM 53: 2009. Na Figura 10 é possível observar o ensaio sendo realizado.

Figura 10 – Realização do ensaio para obtenção dos valores de massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo.



Fonte: (O autor, 2019).

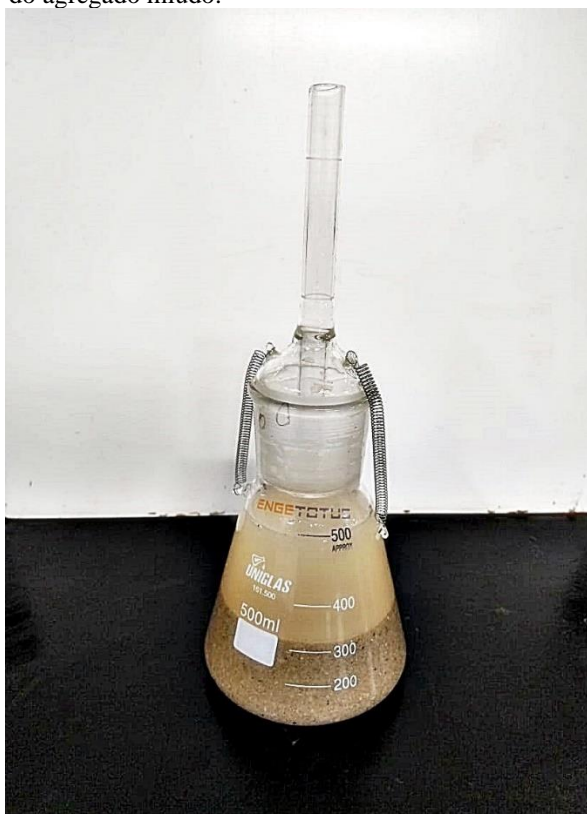
3.1.2 Escolha e caracterização dos índices do agregado miúdo.

A ABNT NBR 15577-7: 2018 determina que o agregado miúdo deve ser potencialmente inócuo em relação a reação álcali-agregado, com a finalidade de atestar somente a reatividade do agregado graúdo pelo método acelerado em prismas de concreto, por tanto foi utilizada uma areia distribuída pelo IPT-SP (instituto de pesquisas tecnológicas de São Paulo) que é produzida com o propósito de ser potencialmente inócua, o que a torna o agregado miúdo ideal para o ensaio proposto.

Vale ressaltar que para as granulometrias de agregado miúdo requeridas para o ensaio do método acelerado dos prismas de concreto indicadas na ABNT NBR 15577-4: 2018, somente a parcela passante na peneira 4,75 mm e retida na 2,36 mm é proveniente do mesmo gnaisse utilizada no agregado graúdo, devido a falta dessa granulometria na amostragem da areia do IPT-SP.

Foi realizado o ensaio do descrito na ABNT NBR NM52: 2009 para obter o valor da massa específica do agregado miúdo. Na Figura 11 é possível observar o procedimento sendo realizado.

Figura 11 – Realização do ensaio de massa específica do agregado miúdo.



Fonte: (O autor, 2019).

3.1.3 Escolha e caracterização dos índices dos cimentos.

Foram escolhidos os cimentos CPIII e CPV da empresa Lafarge Holcim para constatar a reatividade do agregado e observar qual cimento contribuiu mais para o desenvolvimento da reação deletéria.

De acordo com a ABNT NBR 5733: 1991 o cimento CPV deve ser composto de 100% a 95% de clínquer com sulfatos de cálcio, o que torna esse tipo de cimento potencialmente alcalino, devido ao fato dos álcalis do cimento serem provenientes das argilas que compõe o clínquer.

A ABNT NBR 5737: 1992 estabelece o cimento CPIII como um cimento resistente a sulfatos que possui de 60% a 70% de sua composição de escória, portanto possui menor permeabilidade, o que o torna um cimento muito utilizado em estruturas em contato com a água

ou em ambiente de alta umidade, que pode resultar em uma reação potencialmente deletéria no seu uso com agregados reativos, embora seja um cimento com baixo teor de álcalis em relação ao CPV.

Segundo Munhoz (2007), a escória presente no cimento CPIII é uma adição que pode interferir na reação, causando redução e controle da expansão deletéria na manifestação da reação álcali-agregado.

As amostras utilizadas nos prismas de concreto possuem os respectivos números de série e locais de fabricação representados no Quadro 03.

Quadro 03 – Tipos de cimento com seus respectivos lotes e fábricas.

Tipo	Nº do lote	Local de origem
CPV	APLO S7E3PZ1	Fábrica de Pedro Leopoldo - MG
CPIII	ABDO F2PZ1S2	Fábrica de Barroso - MG

Fonte: (O autor, 2019).

Foi realizado o ensaio de massa específica do cimento de acordo com o ensaio descrito na ABNT NBR 6474 NM-23: 2000 no frasco de Le Chatelier. Na Figura 12 é possível observar a realização do ensaio.

Figura 12 – Realização do ensaio de massa específica do cimento.



Fonte: (O autor, 2019).

3.1.4 Análise física e análise química do agregado gnaisse.

Foi realizada uma análise física e uma análise química do gnaisse do município de Varginha de acordo com a ABNT NBR 15577-3: 2018, todas as duas nos laboratórios do CRTI (Centro regional para o desenvolvimento tecnológico e inovação), sendo a análise física pelo método Rietveld com a utilização do difratômetro de raio x, e a análise química por meio da fluorescência de raio x.

3.1.5 Análise química dos cimentos.

A ABNT NBR 15577-7 determina que por meio do método acelerado em prisma de concreto, o equivalente alcalino do cimento deve ser obtido através da Equação 01, tornando necessário conhecer os valores do teor de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O).

$$\text{Na}_2\text{O eq.} = (0,658 \text{ K}_2\text{O \%} + \text{Na}_2\text{O \%}) \quad (\text{Equação 01})$$

As composições dos cimentos fornecidas pelo fabricante conforme o Anexo A, possuem apenas o valor do teor de potássio (K_2O), impossibilitando o cálculo do equivalente alcalino para execução dos prismas de concreto.

Foi realizada uma análise química das amostras dos cimentos pela Prof. Dr. Alessandra Lorenzetti de Castro no laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP), porém o resultado só foi obtido após os prismas já estarem prontos e o cronograma de medições estar em andamento.

Com base na dificuldade de obter os valores desses teores alcalinos das amostras no momento da execução dos prismas foram adotados os valores de 0,9% para o CPV com base no valor máximo estipulado por norma, por se tratar de um cimento sem adições, e o valor de 0,6% para o CPIII por se tratar de um cimento com a uma grande porcentagem de escória adicionada ao clínquer.

3.2 Produção dos corpos de prova prismáticos de concretos

Foram confeccionados três prismas com o cimento de alta resistência inicial CPV e três prismas com o cimento de alto forno CPIII.

3.2.1 Instrumentos e aparelhos necessários.

Para a realização do método acelerado dos prismas de concreto, de acordo com a ABNT NBR 15577-7: 2018 foram utilizados os seguintes instrumentos e aparelhos:

- Balança com precisão de 0,1g;
- Peneiras com abertura de malha de: 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm ;
- Paquímetro com resolução mínima de 0,1 mm;
- Espátula com comprimento entre 100 mm e 150 mm;
- Comparador de comprimento capaz de medir variações de até 0,001mm.
- Barra-padrão de liga de aço, com comprimento total de $(295,0 \pm 1,5)$ mm e coeficiente de dilatação linear máximo de $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.
- Recipiente de polietileno, resistente a exposição prolongada a 60°C;
- Estufa, com uma temperatura de $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Moldes capazes de produzir prismas nas dimensões de 7,5cm x 7,5 cm x 28,5 cm

Na Figura 13 é possível observar o molde usado.

Figura 13 – Molde utilizado para fabricação dos prismas de concreto.



Fonte: (O autor, 2019).

3.2.2 Separação dos agregados.

Foi realizado o peneiramento dos agregados graúdos de acordo com a proporção granulométrica da Tabela 04 da ABNT NBR 15577-7:2018.

Tabela 04 – Granulometria requerida do agregado graúdo.

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

Fonte: (ABNT NBR 15577-7, 2018)

Na Figura 14 é possível observar a realização do peneiramento dos agregados graúdos.

Figura 14 – Realização do peneiramento dos agregados graúdos.



Fonte: (O autor, 2019).

Na Figura 15 é possível ver o material separado pelas granulometrias.

Figura 15 – Agregado graúdo já separado.



Fonte: (O autor, 2019).

Foi realizado também o peneiramento do agregado miúdo de acordo com a Tabela 05 da ABNT NBR 15577-4: 2018.

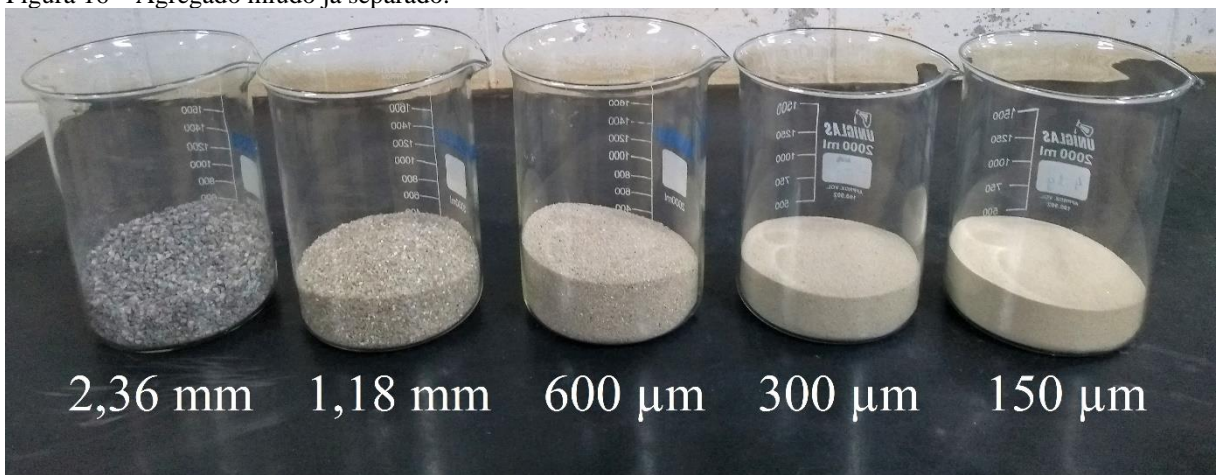
Tabela 05 – Granulometria requerida do agregado miúdo.

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

Fonte: (ABNT NBR 15577-4, 2018)

Na Figura 16 é possível observar o material já separado.

Figura 16 – Agregado miúdo já separado.



Fonte: (O autor, 2019)

3.3.3 Adição de hidróxido de sódio (NaOH).

A ABNT NBR 15577-7: 2018 determina que para a execução do método acelerado dos prismas de concreto deve ter que o equivalente alcalino elevado para 1,25% para acelerar a manifestação da reação e conseqüentemente a expansão do prisma.

O cálculo da quantidade de teor de álcalis adicional foi feito com base na diferença entre o teor de álcalis descrito por norma e o teor de álcalis do cimento, obtendo o valor de Na₂O em massa a ser adicionada, e segundo o Quadro 04 da ABNT NBR 15577-6: 2018 realizar a conversão para NaOH, para adicionar o hidróxido de sódio na água de amassamento.

Quadro 04 – Fator de conversão de Na₂O para NaOH.

$\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH}$	
Composto	Peso molecular
Na ₂ O	61,98
NaOH	39,997
Fator de conversão = $2 \times 39,997/61,98 = 1,291$	
Quantidade de NaOH necessária no exemplo = $1,47 \times 1,291 = 1,898 \text{ kg/m}^3$	

Fonte: (ABNT NBR 15577-6, 2018).

3.3.4 Condições de umidade e temperatura

A ABNT NBR 15577-7: 2018 estabelece que a temperatura ambiente no local de moldagem, assim como nos materiais utilizados no procedimento deve ser de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, e a umidade na sala de moldagem deve ser maior ou igual a 50%.

3.3.5 Recomendações de dosagem do concreto.

Os parâmetros de dosagem indicados abaixo foram seguidos de acordo com ABNT NBR 15577-7: 2018:

- Dimensão máxima característica do agregado graúdo: 19 mm;
- Módulo de finura do agregado miúdo: $2,7 \pm 0,2$;
- Agregado com sua absorção de água compensada;
- Consumo de cimento: $(420 \pm 10) \text{ kg/m}^3$;
- Relação água/cimento: 0,45;

- O volume de agregado graúdo, no estado compactado seco, de $(70,0 \pm 0,2)$ % do volume total do concreto produzido.

3.3.6 Procedimento de mistura.

A mistura do concreto foi realizada manualmente, com auxílio de espátulas seguindo a procedimento de acordo com a ABNT NBR 15577-7: 2018:

- Antes de iniciar a homogeneização foi acrescentado o agregado graúdo e um pouco da água de amassamento;
- Deu-se início ao processo de mistura e acrescentou-se o agregado miúdo, o cimento e o restante da água de amassamento;
- Foi realizada a mistura por 3 minutos, seguidos de 3 minutos de descanso com um pano úmido sobre o recipiente e mais 2 minutos de mistura.

3.3.7 Moldagem.

A moldagem deve ser de no mínimo 3 prismas por vez de acordo com a ABNT NBR 15577-7: 2018, colocando concreto em metade de cada forma realizando o adensamento e logo após colocando o restante e realizando novamente o adensamento para acabamento da superfície. Vale ressaltar que foi utilizado uma mesa de “flow test”, com o devido cuidado para não realizar a segregação do material durante o adensamento, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Realização do adensamento do concreto nos moldes.



Fonte: (O autor, 2019).

3.3.8 Cura inicial

Após o processo de moldagem, os moldes com concreto ainda fresco foram colocados em um ambiente com alta umidade com a finalidade de realizar uma cura inicial por 24 horas como indicado na Figura 18.

Figura 18 – Prismas na cura inicial.

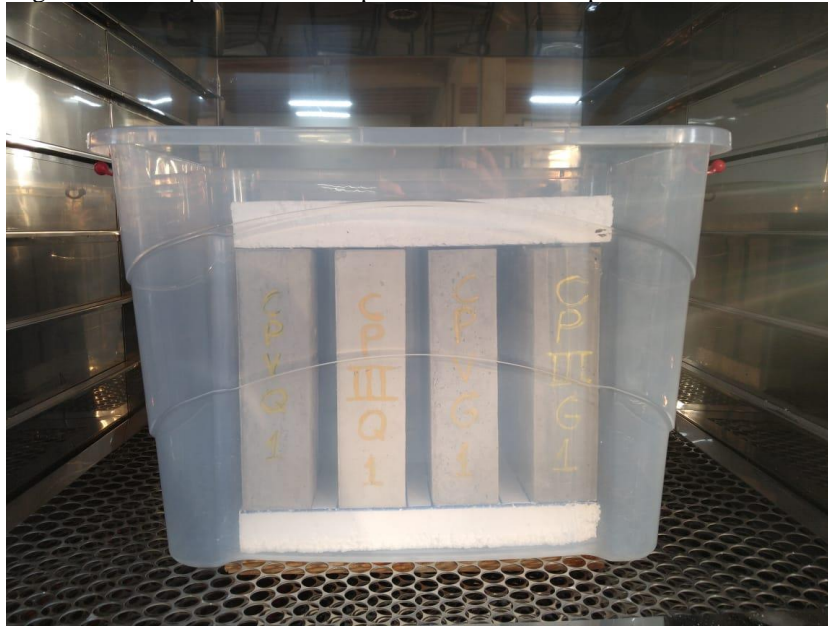


Fonte: (O autor, 2019).

3.3.9 Acondicionamento dos prismas durante o período de ensaio.

Os prismas foram colocados em um recipiente fechado hermeticamente, com o objetivo de manter a umidade no recipiente, que deve ter uma lâmina d'água de aproximadamente 3cm, garantindo que os prismas não entrem em contato com a água. O recipiente permaneceu em estufa com temperatura constante de 60°. Na Figura 19 é possível observar o recipiente utilizados no ensaio.

Figura 19 – Recipiente utilizado para acondicionar os prismas.



Fonte: (O autor, 2019).

3.3.10 Leituras e cálculo de variação do comprimento.

O procedimento de realização de leitura deve começar sempre com a leitura da barra-padrão utilizando relógio comparador, e posteriormente a leitura do prisma.

Logo após desenformar os prismas como pode ser visualizado na Figura 20, foi realizada a pesagem e medição para posteriormente submergir os prismas em água durante 30 minutos. Feito isso, os prismas foram secos superficialmente, pesados e medidos novamente e armazenados de volta nos recipientes.

Figura 20 – Prisma recém desenformado.



Fonte: (O autor, 2019).

A partir da leitura inicial devem ser realizadas leituras em 5, 10, 15 e 20 semanas. Os prismas não devem ser retirados do recipiente antes das 5 semanas.

Para a realização das medições subsequentes os prismas foram ser retirados da estufa, colocados em recipiente com umidade controlada por 24 horas antes da realização da medição. Após esse período os prismas foram pesados, medidos e levados de volta ao recipiente de maneira que sejam acondicionados no sentido inverso ao que estavam anteriormente. Na Figura 21 é possível observar uma medição sendo realizada.

Figura 21 – Leitura sendo realizada no pórtico com relógio comparador



Fonte: (O autor, 2019).

Para calcular a variação de comprimento, utiliza-se a diferença entre valor da medição na idade requerida e o valor da medição inicial. Essa diferença deve ser expressa em porcentagem com precisão de 0,001%.

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

O método abordado no estudo da reatividade potencialmente inócua ou deletéria do agregado estudado nesse artigo não possui parâmetros de expansão deletéria de acordo com a ABNT NBR 15577-1; 2018, portanto os parâmetros de reatividade para o método acelerado dos prismas realizado nesse trabalho serão baseados nos parâmetros do ensaio de expansão dos prismas em 365 dias.

O cronograma de medições é representado na Tabela 06 abaixo, sendo realizada a última medição na data de 22 de novembro de 2019, quando vai ser possível realizar a classificação final de reatividade potencialmente inócua ou deletéria com os valores adquiridos.

Tabela 06 – Cronograma de medições dos prismas

Cronograma de medições
1º - 05/07/2019
2º - 09/08/2019
3º - 13/09/2019
4º - 18/10/2019
5º - 22/11/2019

Fonte: (O autor, 2019).

3.3.11 Variação de massa

A variação da massa é calculada de maneira muito semelhante a variação do comprimento, utilizando valores em porcentagem em relação a massa inicial do prisma, com precisão de 0.01%.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Índices físicos dos agregados

Com base nos procedimentos descritos na seção 3.1.1 os valores obtidos nos índices físicos do agregado graúdo são representados na Tabela 07.

Tabela 07 – Determinação dos índices físicos do agregado graúdo.

GNAISSE	
MASSA ESPECÍFICA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE
2,90 g/cm ³	2,87 g/cm ³
MASSA UN. COMPACTADA	ABSORÇÃO DE ÁGUA
1,5241 kg/dm ³	0,38%

Fonte: (O autor, 2019).

Com base nos procedimentos descritos na seção 3.1.2 a Tabela 08 indica os valores dos índices físicos do agregado miúdo.

Tabela 08 – Determinação dos índices físicos do agregado miúdo.

AREIA DO IPT	
MASSA ESPECÍFICA	ABSORÇÃO DE ÁGUA
2,65 g/cm ³	5%

Fonte: (O autor, 2019).

Os valores dos índices físicos dos agregados, obtidos através dos ensaios foram satisfatórios e se mostraram dentro dos parâmetros de repetibilidade exigidos por suas respectivas normas.

4.2 Análise Petrográfica

Conforme o que foi descrito anteriormente na seção 3.1.4, foram feitas as análises laboratoriais para obtenção da composição física e química do gnaiss da área da fazenda Ribeirão Santana no município de Varginha-MG. Na Tabela 09 é possível observar os minerais presentes em quantidades acima do limite quantificável, identificados por meio da difração de raios X.

Tabela 09 – Minerais identificados na difração de raios X.

Mineral	%
Quartzo	27,83%
Labradorita	26,54%
Rutilo	1,22%
Microclínio	13,83%
Biotita	3,99%
Almandina	24,87%
Dolomita	0,56%

Fonte: (Adaptado de Centro regional para o desenvolvimento tecnológico e inovação, 2019).

Por meio da análise química pelo método da fluorescência de raios X, foram obtidos os valores das porcentagens de cada elemento, representados no Quadro 05.

Quadro 05 – Composição química do gnaiss de Varginha-MG.

Elemento	%
SiO ₂ (Sílica)	60,99
Al ₂ O ₃ (Alumina)	16,19
Fe ₂ O ₃ (Óxido de ferro)	9,37
CaO (Óxido de cálcio)	2,64
MgO (Óxido de magnésio)	4,30
TiO ₂ (Dióxido de titânio)	0,8475
P ₂ O ₅ (Pentóxido de fósforo)	0,29
Na ₂ O (Óxido de sódio)	1,97
K ₂ O (Óxido de potássio)	2,30
MnO (Óxido de manganês)	0,17
LOI	0,13

Fonte: (Adaptado de Centro regional para o desenvolvimento tecnológico e inovação, 2019).

Com os valores da análise física e da análise química, foi possível observar que o gnaiss explorado em Varginha-MG possui uma porcentagem de quartzo bem maior que 5%, que é o limite para se considerar o agregado potencialmente inócuo segundo a ABNT NBR 15577-3: 2018, além de um teor considerável de sílica em sua composição devido ao quartzo, e que se tratando de ser uma rocha metamórfica, tem a tendência a possuir sílica amorfa, contribuindo para a reatividade potencialmente deletéria do agregado.

4.3 Índices físicos e químicos dos cimentos

Nas seções 3.1.3 e 3.1.5 desta pesquisa, foi citada a norma referente aos métodos para obtenção dos valores de massa específica para os cimentos utilizados nos ensaios e valores de alcalinidade estipulados para o cálculo de adição de hidróxido de sódio. Tais valores estão disponíveis na Tabela 10.

Tabela 10 – Massa específica e equivalente alcalino estipulado para os cimentos utilizados nos ensaios.

	Cimento Holcim CP V-ARI	Cimento Holcim CP III
ρ (g/cm ³)	3,06	3,07
NaOH eq.	0,9%	0,6%

Fonte: (O autor, 2019).

Após os resultados da análise química dos cimentos estarem prontos foi possível observar os valores de Na₂O (sódio) e K₂O (potássio) descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado da análise química dos cimentos.

(%)	CPIII	CPV
Na ₂ O	0,23	0,14
K ₂ O	0,51	0,71

Fonte: (Adaptado do IPT-SP, 2019).

Foi possível observar com os resultados obtidos da análise química que os valores de equivalente alcalino, tanto para o CPV quanto para o CPIII foram menores que os valores estipulados para o cálculo de adição do hidróxido de sódio como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Equivalente alcalino obtido através da análise química.

(%)	CPIII	CPV
NaOH eq.	0,565	0,607

Fonte: (Adaptado do IPT-SP, 2019)

De acordo com a Tabela 11, embora o CPIII tenha uma maior porcentagem de sódio (Na₂O), sua porcentagem de potássio (K₂O) é muito menor, resultando em uma alcalinidade equivalente menor que o CPV como esperado, porém com uma pequena diferença de 0,042% entre os dois cimentos, uma diferença consideravelmente menor que a estipulada de 0,3%.

4.4 Cálculo do traço do concreto

O cálculo do traço do concreto foi determinado com base na dosagem recomendada na ABNT NBR 15577-7: 2018 e desenvolvido pelo método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), levando em consideração a adição de água necessária para compensar a absorção do agregado miúdo e graúdo.

O traço calculado foi de 1: 1,96: 2,50: 0,54, com valores em quilogramas para cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. Devido a diferença da massa específica dos cimentos CPIII e CPV ser de apenas 0,01 g/cm³, a diferença nos valores do traço para cada cimento foi irrisória.

A água adicionada em função da absorção dos agregados foi de 0,38% da massa dos agregados retidos nas peneiras 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, e 5% da massa dos agregados retidos nas peneiras 1,18 mm, 600 µm, 300 µm e 150 µm, aumentando a quantidade

de água necessária no traço em relação a um quilograma de cimento de 0,45 para 0,54, mantendo assim a relação água/cimento.

4.5 Expansão dos prismas

Como o resultado dos ensaios até a 20ª semana foi possível classificar o grau de reatividade do agregado. No Quadro 06 são expressos os valores da média de expansão e variação de massa para os prismas com cimento CPIII.

Quadro 06 – Valores de expansão e massa dos prismas CPIII.

IDADE (Semanas)	TRAÇO				
	Corpos de Prova	CP III - GNAISSE			
		ΔL (mm)	ΔL (%)	Δm (g)	Δm (%)
0	CP 1	0,000	0,000	0,0	0,0
	CP 2				
	CP 3				
5	CP 1	0,133	0,05%	114,0	3,09%
	CP 2				
	CP 3				
10	CP 1	0,163	0,06%	130,7	3,54%
	CP 2				
	CP 3				
15	CP 1	0,245	0,09%	139,0	3,77%
	CP 2				
	CP 3				
20	CP 1	0,243	0,09%	145,0	3,93%
	CP 2				
	CP 3				

Fonte: (O autor, 2019).

O valor médio de expansão e variação de massa, de acordo com a idade de medição dos prismas com cimento CPV são indicados no Quadro 07.

Quadro 07 – Valores de expansão e massa dos prismas CPV.

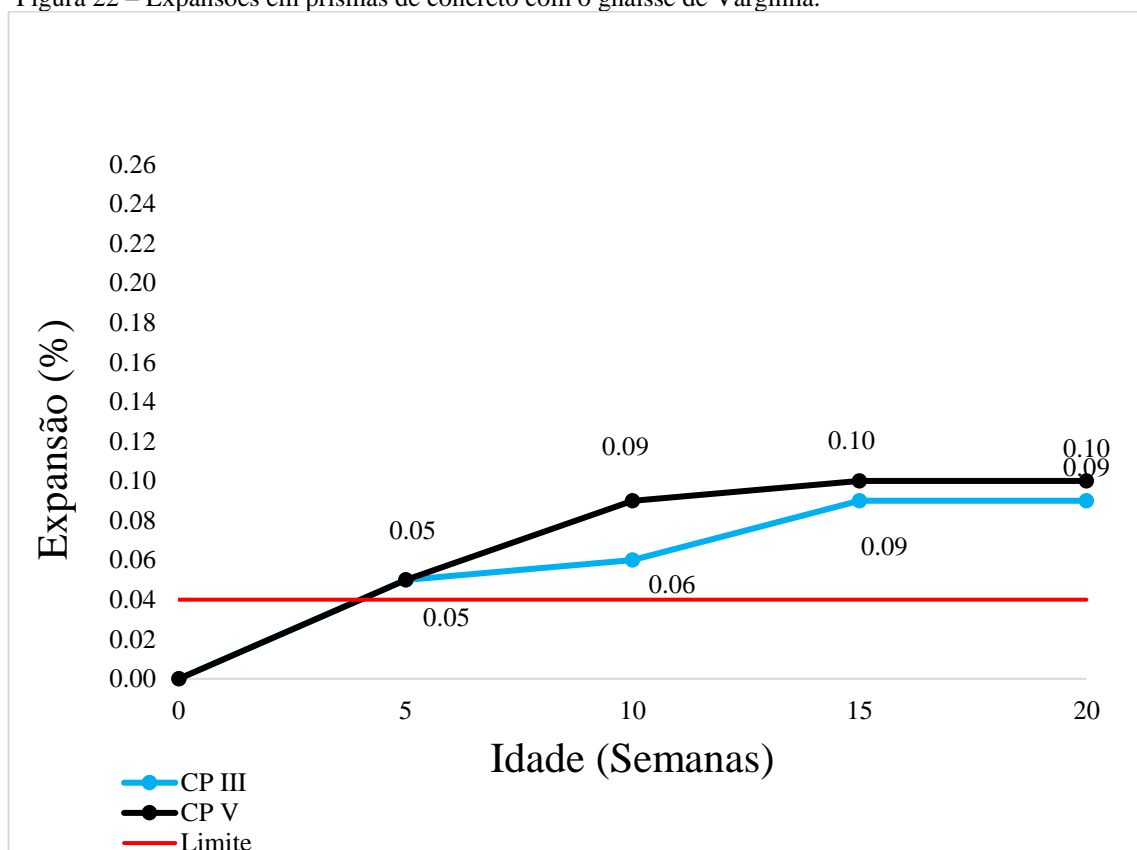
IDADE (Semanas)	TRAÇO				
	Corpos de Prova	CP V - GNAISSE			
		ΔL (mm)	ΔL (%)	Δm (g)	Δm (%)
0	CP 1	0,000	0,000	0,0	0,0
	CP 2				
	CP 3				
5	CP 1	0,141	0,05%	129,3	3,50%
	CP 2				
	CP 3				
10	CP 1	0,240	0,08%	148,0	4,01%
	CP 2				
	CP 3				
15	CP 1	0,285	0,10%	157,0	4,25%
	CP 2				
	CP 3				
20	CP 1	0,276	0,10%	161,7	4,38%
	CP 2				
	CP 3				

Fonte: (O autor, 2019).

Foi possível observar uma maior expansão nos prismas com o cimento CPV, apesar da adição de hidróxido de sódio ser insuficiente, como o valor de equivalente alcalino estipulado foi de 0,9%, foi adicionado 0,35%, usando o equivalente alcalino real seria necessário adicionar um valor de 0,643% para chegar no valor estipulado pela ABNT NBR 15577-7: 2018 de equivalente alcalino de 1,25%.

O gnaise de Varginha-MG apresentou para os valores de medição até a 20ª semana um comportamento potencialmente reativo classificado como R1 pela ABNT NBR 15577-1: 2018, tanto para o cimento CPV quanto para o cimento CIII, expandindo mais do que o gnaise de Recife utilizado na pesquisa de Sanchez et al. (2011), como pode ser observado no Figura 22.

Figura 22 – Expansões em prismas de concreto com o gnaiss de Varginha.

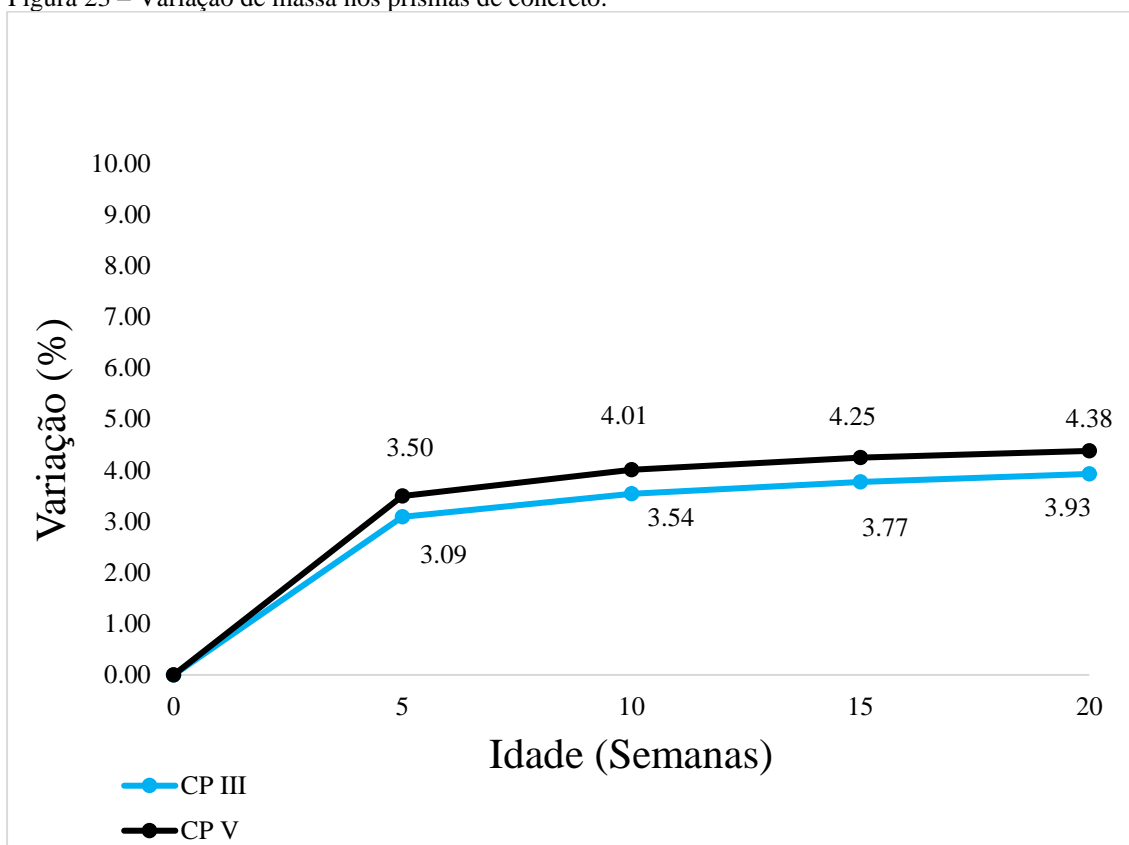


Fonte: (O autor, 2019).

É possível observar como os valores de expansão foram muito parecidos na 5ª e 15ª semana, e depois estabilizaram na 20ª semana, apesar da adição de hidróxido de sódio ser menor que o necessário no CPV, evidenciando que a diferença de álcalis dos cimentos não influenciou de maneira significativa as expansões.

A variação de massa de 4,38% do CPV foi um pouco maior do que a variação do CPIII que teve um aumento de 3,93% na massa. Essa variação de massa é justificada pela absorção da umidade, que foi menor no CPIII justamente pelo fato desse tipo de cimento contribuir para uma maior estanqueidade no concreto. São expressos na Figura 23 os valores de variação de massa dos prismas para os dois tipos de cimento.

Figura 23 – Variação de massa nos prismas de concreto.



Fonte: (O autor, 2019).

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível concluir a importância da escolha dos materiais constituintes do concreto, com a finalidade de evitar a manifestação da reação álcali-sílica deletéria, que pode levar elementos estruturais de concreto ao colapso.

Durante a realização da pesquisa foram encontradas algumas dificuldades em relação a equipamentos que a universidade não possui em seu laboratório. Com isso, foi necessário improvisar alguns procedimentos de modo que simulasse a condições previstas por norma, como a substituição do uso do misturador pelo processo manual, a substituição da mesa vibratória por uma mesa de “flow test” para a realização correta do adensamento, e também a falta de uma câmara úmida, que teve de ser improvisada em um recipiente fechado com água para manter uma umidade alta durante a cura dos prismas.

Os ensaios de caracterização dos índices físicos do agregado graúdo, miúdo e dos cimentos resultaram em valores satisfatórios e dentro dos intervalos previstos por suas respectivas normas, indicando uma caracterização física adequada dos materiais.

Quanto a realização da análise física e análise química, foi observado uma grande porcentagem de quartzo e conseqüentemente um alto teor de sílica presente no gnaiss explorado no município de Varginha-MG, que associada aos resultados de expansão até a 20ª semana, foi possível concluir que se trata de um agregado potencialmente reativo.

Com os valores da análise química do cimento obtidos após os prismas prontos, com base nos equivalentes alcalinos estipulados, ocorreu uma menor adição de hidróxido de sódio do que o recomendado pela ABNT NBR 15577-7: 2018, principalmente nos prismas de cimento CPV que mesmo menos alcalino (menos hidróxido de sódio em sua água de amassamento) expandiu mais que os prismas com cimento CPIII, porém com diferenças de expansão pouco consideráveis, indicando que a diferença entre os dois cimentos não contribuiu para grandes diferenças nos valores de expansão até a 20ª semana.

Existe a possibilidade de ocorrer interferência da entrigita tardia nas análises de expansão ocasionadas pela reação álcali-sílica, e só é possível constatar essa interferência por meio da microscopia eletrônica de varredura, embora as chances de tal interferência sejam pequenas pelo fato da entringita tardia se desenvolver em uma ambiente com temperatura superior a 70°, sendo que os prismas foram mantidos a uma temperatura igual ou inferior a 60° durante o experimento.

A pesquisa realizada para a classificação de potencialidade reativa do gnaiss de Varginha-MG é importante pelo fato de ser um dos agregados mais utilizados para concreto na região, que mesmo interagindo com tipos de cimentos diferentes (CPIII e CPV), demonstrou potencial reativo nível R1, o que torna necessário o cuidado com sua utilização em ambientes de alta umidade ou a utilização de métodos mitigadores.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. **Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife. RAA 2006** - II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2006, setembro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó**: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. Julho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo**: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Novembro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório**: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Abril.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados**: reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Julho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. Julho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Junho.

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

COUTO, TIAGO ANDRADE. **Reação álcali-agregado**: estudo do fenômeno em rochas silicosas. Goiânia: Universidade Federal de Goiás. 2008.

DESCHENES, D. J. **Damaged bent caps: shear tests and field implications**. Master of Science in Engineering, The University of Texas. 2009.

GAO, XIAO XIAO; MULTON, STÉPHANE; CYR, MARTIN; SELLIER, ALAIN. **Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimum effect versus scale effect**. Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC, France, 2012.

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, p. 9, 2013, João Pessoa, 2013.

ISLAM, MOHAMMAD S; GHAFOORI, NADER. **Evaluation of Alkali-Silica Reactivity Using Aggregate Geology, Expansion Limits of Mortar Bars and Concrete Prisms, and Kinetic Model**. Journal of Materials Science Research, p.108, 2013.

KIHARA, Y & SCANDIUZZI, L. **Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros**. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 1993, São Paulo. Anais...São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, v.1, p. 319-338, 1993.

LACASSE, C.; LABOSSIERE, P.; NEALE, K.W. **On fiber-reinforced polymer rehabilitation of alkali-aggregate reaction-damaged beams**. In: ACI Structural Journal, V. 100, n.1, p. 66-74, 2003.

MIZUMOTO, CAMILO – **Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA): Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes**. Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira, 2009.

MUNHOZ, Flávio André da Cunha – **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílicas e álcali-silicato**. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 2007.

PREZZI, M.; KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. **Importância da química de superfície na reação álcali-agregado**. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, 1., 1997, Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997.

PRISZKULNIK, S., **Inspeção e diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-Agregado** – Cap. 34, Vol. 2. In: ISAIA, G. C., CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. 1º Ed. São Paulo: Ibracon, 2005.

SANCHEZ, Leandro Francisco Moretti; KUPERMAN, Selmo; HELENE, Paulo. **Reação álcali-agregado (RAA) - Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT)**. RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal, [S.l.], v. 4, n. 4, 2011, July.

SACHLOVA, SARKA; KUCHAROVA, ANETA; PERTOLD, ZDENEK; PRIKRYL, RICHARD; FRIDRICOVA, MICHAELA. **Quantitative assessment of alkali silica reaction potential of quartz-rich aggregates: comparison of chemical test and accelerated mortar bar test improved by SEM-PIA**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p. 9, 2015.

SILVA, P. N., **Reação Álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo de Paulo Afonso/CHESF**. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, 2007.

SILVA, V; & CAZZOTI, E. **Infraestrutura de vias de transporte**. Rochas Metamórficas. Espírito Santo, Vitória, Brazil: Instituto Federal do Espírito Santo, 2009.


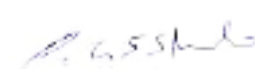
SILVEIRA, A.L.Z.P. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 202p. 2006.

TROUW, RUDOLPH ALLARD. **Programa geologia Brasil** – Geologia da folha Varginha. Brasília, 2008.



VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado** – Mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002

ANEXO A

Especificações do cimento CP III

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO				LIMITE NBR
		TIPO / CLASSE : CP III 40 RS				
		FÁBRICA BARROSO				
ENSAIOS	PERÍODO	01.01.2018	29.01.2018	28.02.2018	28.03.2018	6736 / 6737
		25.01.2018	19.02.2018	12.03.2018	19.04.2018	
ENSAIOS FÍSICOS						
# 400 (%) IT Holcim	Média	1,9	2,1	1,7	2,2	
	Desv. Pad.	0,63	0,41	0,45	0,34	
	Nº Amostras	7	8	8	8	
Blaine (cm ² /g) NBR NM 75	Média	4763	4640	4635	4822	
	Desv. Pad.	191	100	96	102	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
Início Pega (min) NBR NM 65	Média	189	201	200	201	≥ 60
	Desv. Pad.	6	8	11	7	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média	249	264	260	261	≤ 720
	Desv. Pad.	5	7	10	6	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média	15,0	12,2	13,0	12,6	
	Desv. Pad.	3,19	0,73	0,60	0,49	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média	27,4	24,9	26,0	25,9	≥ 12,0
	Desv. Pad.	2,52	0,95	1,24	0,49	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média	37,6	34,1	36,4	36,0	≥ 23,0
	Desv. Pad.	2,01	1,06	1,68	0,84	
	Nº Amostras	8	8	8	6	
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média	48,9	47,4	48,4		≥ 40,0
	Desv. Pad.	1,16	1,11	1,22		
	Nº Amostras	8	8	8		
ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	2,58	2,58	2,67	2,68	≤ 4,5 %
SiO ₂	NBR 14656	24,92	26,02	25,90	26,49	
R.I.	NBR NM 15	0,78	0,78	1,24	0,95	≤ 1,5 %
Al ₂ O ₃	NBR 14656	7,33	7,65	7,61	7,44	
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,04	1,94	1,93	1,90	
CaO	NBR 14656	55,41	54,18	54,36	53,94	
MgO	NBR 14656	3,21	3,50	3,47	3,51	
SO ₃	NBR 14656	1,72	1,67	1,64	1,70	≤ 4,0 %
CO ₂	NBR NM 20					≤ 3,0 %
K ₂ O	NBR 14656	0,70	0,67	0,69	0,67	
PF 500°C	IT Holcim	0,71	0,78	0,68	0,77	
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue					
OBSERVAÇÕES:						
1. IT - Intrução de Trabalho						
2. Resíduo na penetra #200: ≤ 8,0% (NBR 11579)						
				 Eng. Carlos Melo Supervisor A. Técnicos SP		
AB00_CP_III_40_RS_VENDAS.xls		7 maio, 2018				

Especificações do cimento CP V

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO 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	LIMITES NBR 16697/2018
ENSAIOS FÍSICOS						
# 400 (%) IT Holcim	Média Desv. Pad. Nº Amostras	2,9 0,19 8	2,5 0,16 8	4,1 1,33 8	2,9 0,27 8	
# 325 (%) NBR 9202	Média Desv. Pad. Nº Amostras					
Blaine (cm²/g) NBR 16372	Média Desv. Pad. Nº Amostras	4607 49 8	4572 54 8	4631 69 8	4590 50 8	≥ 3000
Início Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	134 8 8	132 7 8	136 12 8	134 8 8	≥ 60
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 600
Exp. Quente (mm) NBR 11582	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 5
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	27,6 0,60 8	26,6 0,68 8	26,9 0,72 8	27,0 1,22 8	≥ 14,0
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	41,6 0,90 8	41,1 0,69 8	40,1 1,18 8	40,5 1,06 8	≥ 24,0
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	46,5 1,21 8	45,7 0,78 8	44,6 1,64 8	45,6 0,78 8	≥ 34,0
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	51,8 0,86 8	51,1 1,03 8	50,5 1,39 8	51,4 0,89 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 = Intrusão 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				