



**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**NÍVEL MESTRADO**

**MOISÉS MÁRIO CACHEPA**

**MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETO**  
**COM O EMPREGO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E**  
**METACAULIM**

São Leopoldo

2017



MOISÉS MÁRIO CACHEPA

MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETO COM O EMPREGO  
DE RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA E METACAUULIM

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Coorientador: Dra. Aguida Gomes de Abreu

São Leopoldo

2017

C119m Cachepa, Moisés Mário.

Mitigação da reação álcali-agregado em concreto com o emprego de resíduo de cerâmica vermelha e metacaulim / Moisés Mário Cachepa. – 2017.

134 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.

“Orientador: Profª. Dra. Marlova Piva Kulakowski ;  
coorientador: Dra. Aguida Gomes de Abreu.”

1. Reação álcali-agregado. 2. Resíduos de cerâmica vermelha. 3. Metacaulim. 4. Pozolana. 5. Material cimentício suplementar. I. Título.

CDU 624

MOISÉS MÁRIO CACHEPA

MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETO COM O EMPREGO  
DE RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA E METACAU LIM

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Aprovado em 22 de maio de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Fernanda Macedo Pereira – Ulbra

Prof. Dr. Maurício Mancio – Unisinos

Profª. Dra. Marlova Piva Kulakowski – Orientadora – Unisinos

Dra. Aguida Gomes de Abreu- Co-orientadora - Unisinos



Dedico este trabalho a todos que me  
incentivaram e apoiaram principalmente, à  
minha esposa Antónia Seda, aos meus filhos  
Marvin e Hadassa e à minha mãe Inácia  
Cachigamba.





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela saúde, pela sabedoria e sucesso alcançado nesta caminhada.

A minha orientadora professora Dra. Marlova Piva Kulakowski e co-orientadora Professora Dra. Aguida Gomes de Abreu pelo apoio e transmissão de conhecimentos para a materialização deste trabalho. Ao Professor Dr. Marco Aurélio que acreditou nas minhas capacidades e por ter contribuído na minha vinda a esta Universidade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação pela dedicação, seriedade e transmissão de conhecimentos científicos, e fundamentalmente pela disponibilidade de transmitir as suas experiências sobre matérias da área de engenharia civil.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção-LMC, Maurício Schafer, Ingrid, David Camacho, Júlio César, Tiago e André, que sempre me receberam com um bom sorriso, compartilharam as suas experiências comigo, me ajudaram nos trabalhos experimentais do laboratório e diversas sugestões.

Ao pessoal do Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais-LCVMAT, Alini, Tamires e Débora pela atenção e carinho.

A Patrícia Guillante pelo apoio no trabalho.

A Universidade Pedagógica de Moçambique, por ter permitido a minha vinda a Brasil.

À todos, muito obrigado!



## **FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA**

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.



Convênio CNPq/MCT-Mz



## RESUMO

CACHEPA, M. M. **Mitigação da reação álcali-agregado em concreto com o emprego de resíduos da cerâmica vermelha e metacaulim.** São Leopoldo, 2017. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2017.

O uso de adições minerais, como as pozolanas, tem sido adotado como adição ou substituição parcial do cimento, fundamentalmente na produção de concretos, com intuito de melhorar algumas das características, tais como redução de calor de hidratação, melhoria da trabalhabilidade, aumento da resistência à compressão, aumento da durabilidade em meios agressivos, redução da emissão de CO<sub>2</sub>, redução do aparecimento de eflorescência. Um sério problema de durabilidade é a reação álcali-agregado (RAA), que é um fenômeno que em geral se manifestam em estruturas de concreto massa, como barragens. A RAA é entendida como sendo um processo químico que ocorre em concreto, em que alguns constituintes mineralógicos presentes no agregado reagem com íons alcalinos, provenientes de hidróxidos originados na hidratação do cimento que estão dissolvidos na solução dos poros, formando um gel higroscópico expansivo. Este trabalho teve como objetivo avaliar a mitigação da reação álcali-agregado em concreto mediante o emprego de resíduos da cerâmica vermelha (RCV) e metacaulim (MK) como pozolanas. O RCV foi adquirido como resíduo de indústria da produção de blocos cerâmicos, enquanto que o MK é um produto comercializado, sabidamente mitigador da RAA e, geralmente, com elevada atividade pozolânica. Para se alcançar o objetivo, foram analisadas as características físicas, químicas, mineralógicas do RCV e do MK, e determinou-se o índice da atividade pozolânica. Tanto o RCV como o MK apresentaram índice de atividade pozolânica superior a 90%. O agregado utilizado foi classificado como potencialmente reativo por meio de análise de petrografia e do método acelerado de barras de argamassa. Para avaliação da eficiência das adições minerais na mitigação da RAA, empregou-se o método acelerado de barras de argamassa. As pozolanas isoladas e combinadas foram empregadas em teores de substituição de cimento de 20% e 30%. Avaliou-se também resistência à compressão e absorção capilar de água em 48h e 28 dias, submetidos à solução saturada de em Ca(OH)<sub>2</sub>; e em 28 dias de imersão em solução de NaOH. Com os resultados de expansão, foi possível verificar que todos os materiais e teores propostos promoveram uma mitigação da RAA em relação às amostras confeccionadas somente com cimento, com valores de expansão inferiores a 0,10%. Para os aglomerantes estudados, foi possível verificar que entre as pozolanas, quanto menor o equivalente alcalino, menores são as expansões. No entanto, as misturas somente com MK apresentam valores de equivalente alcalino similares ao cimento e as expansões são significativamente reduzidas. Para uma mesma relação Ca/Si dos aglomerantes, quanto maior for o teor de RCV menor é a expansão. Quando se avalia o teor de alumina dos aglomerantes, percebe-se que aqueles que contém MK apresentam o maior teor, mas, no entanto, não retornam as menores expansões, o que se explica pela sua maior dimensão média equivalente, em relação aos aglomerantes que contém RCV. A menor dimensão das partículas de RCV parecem aumentar o efeito mitigador que o teor de Al possui, pois a superfície de dissolução destas partículas é maior. A comparação dos resultados da resistência à compressão e absorção de água antes de iniciar o ensaio acelerado e após, bem como a comparação com as argamassas aos 28 dias que não sofreram ataques ajudam a entender o comportamento das pozolanas na mitigação da RAA.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado; resíduos de cerâmica vermelha, metacaulim; pozolana; material cimentício suplementar.



## ABSTRACT

CACHEPA, M. M. **Mitigation of Alkali-aggregate reaction in concrete with the use of residues of red ceramic and metakaolin.** São Leopoldo, 2016. 136 sheet. Dissertation (Master in Civil Engineering) - postgraduate Program in Civil Engineering, Unisinos, São Leopoldo. 2016.

The use of mineral additions through pozzolans, both naturally and artificially, has been adopted by several civil engineering professionals through the partial substitution of cement primarily in the production of concrete slabs, with the aim of improving some of the characteristics such as: Reduction of the heat of hydration, improvement of the workability, increase of the resistance to compressive strength, increase of the durability in aggressive environments, reduction of the emission of CO<sub>2</sub>, reduction of the appearance of efflorescence and reduction of the expansions due to the alkali-aggregate reactions. One of the pathologies that greatly affects mass concrete structures such as dams is the alkali-aggregate reaction, which is understood to be a chemical process occurring in concrete, in which some mineralogical constituents present in the aggregate react with hydroxides from the cement that are dissolved in the solution of the pores forming an expansive hygroscopic gel. The elaboration of this work, on the one hand, was motivated by the fact that one of the main dams in Africa located in Mozambique, shows signs of expansion according to several authors and, on the other hand, as a way of evaluating the Pozolan potential of RCV and MK. This work aimed to evaluate the mitigation of the alkali-aggregate reaction in concrete through the use of residues of red ceramics and metakaolin as pozzolans. The RCV was purchased as a waste from the production of ceramic blocks, while the MK was from a commercial product. In order to reach the objective, the RCV and MK underwent an investigation taking into account physical, chemical, mineralogical characteristics and the determination of the index of the pozzolanic activity. Both RCV and MK had pozzolanic activity index higher than the 90% established by NBR 12653 (2014). The aggregate used was classified as potentially reactive through analyzes of petrography, DRX, FRX and accelerated method of mortar bars. For the evaluation of RAA, samples were prepared and analyzes of aggregate reactivity and mineral additions efficiency were performed using the accelerated method of mortar bars, compressive strength and water capillary absorption in a substitution of 20% and 30% of cement by RCV, MK and RCV + MK, in the following curing ages: 48h, 28 days in Ca (OH) 2 and 28 days of immersion in NaOH solution. By the expansion results, it was possible to verify that all materials and cement substitution contents by pozzolans proposed had a reduction of less than 0.10% recommended by ASTM C1567 (2013), classified as insufficient to cause deleterious reactions due to potential Pozolânico of the MK and RCV. It was possible to verify that the higher the alkaline equivalent, the larger the expansions, the smaller the Ca / Si ratio, the smaller the expansions, the higher the alumina content, the smaller the expansions, the smaller the average equivalent size of the particles, the smaller the expansions, and the larger the total porosity, the larger the expansions. The results of the compressive strength and water absorption showed that the mixtures submitted to the accelerated test presented worse performance in relation to the cured mixtures in Ca (OH) 2 due to the microstructure of the mortars, creating internal microcracks, or because the formed gel permeable to water penetration.

Keywords: Alkali-aggregate reaction (RAA); Red ceramic residues (RCV), metakaolin (MC); cement; Pozolana; Aggregate; concrete.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem de estrutura de concreto afetada pela RAA. ....	30
Figura 2 – Fissuras na face lateral e na seção transversal de um pilar de UHE Furnas. ....	31
Figura 3 – Ataque dos íons hidroxilas à sílica. ....	33
Figura 4 – Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas. ....	34
Figura 5 – Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos ions hidroxilas. ....	34
Figura 6 – Distribuição de íons conforme o modelo da dupla camada. ....	36
Figura 7 – Modelo de ocorrência de RAA proposto por Ichikawa e Miura (2007). ....	37
Figura 8 – Produtos de formação da RAA. ....	40
Figura 9 – O efeito da umidade relativa na expansão do concreto. ....	41
Figura 10 – Relação temperatura e expansão da RAA. ....	42
Figura 11 – Relação álcalis disponível e consumo de cimento no concreto. ....	44
Figura 12 – Influência do tamanho do agregado na expansão do concreto. ....	45
Figura 13 – Combinação de fatores que influenciam a ocorrência da RAA. ....	47
Figura 14 – Curvas de expansão de substituição de cimento por RCV. ....	57
Figura 15 – Etapas do programa experimental. ....	59
Figura 16 – Moinho de bolas. ....	62
Figura 17 – Distribuição granulométrica de cimento, MK e RCV. ....	65
Figura 18 – MEV do RCV: (a) Aumento de 1030x (b) Aumento de 5000x. ....	66
Figura 19 – MEV do MK: (a) aumento de 1000x e (b) aumento de 10.000x (d). ....	67
Figura 20 – Difratoograma de Raios X do MK. ....	68
Figura 21 – Difratoograma de Raios X do RCV. ....	69
Figura 22 – Difratoograma de Raios X do agregado. ....	71
Figura 23 – Expansão média X idade- Agregado. ....	72
Figura 24 - Moldagem dos corpos de prova para RAA. ....	74
Figura 25 – Leitura da barra com base no relógio comparador. ....	75
Figura 26 - Prensa e corpo de prova após o ensaio. ....	77
Figura 27 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	78
Figura 28 – Formas de cura dos corpos de prova. ....	79
Figura 29 – Barras de argamassas submersa em água, colocadas em estufa à 80°C. ....	80
Figura 30 – Banho termorregulador. ....	81
Figura 31 – Índice de atividade pozoalânica de RCV, MK e RCV+MK aos 28 dias. ....	82
Figura 32 – Avaliação da pozoalanicidade de RCV, MK e RCV+MK aos 63 dias. ....	82

Figura 33 – Resultados de equivalente alcalino das misturas .....	84
Figura 34 – Expansão média das argamassas estudadas .....	85
Figura 35 –Relação entre expansão aos 15 dias e relação Ca/Si . .....	86
Figura 36 – Relação entre expansão aos 15 dias e equivalente alcalino .....	87
Figura 37 –Relação entre expansão o aos 15 dias e teor de alumina .....	88
Figura 38 –Relação entre expansão aos 15 dias e diâmetro médio .....	88
Figura 39 –Relação entre dimensão média equivalente, teor de alumina e expansão aos 15 dias. ....	89
Figura 40 – Resistências médias à compressão das misturas aos 28 dias de cura em Ca(OH) <sub>2</sub> e 28 dias de imersão em NaOH . ....	91
Figura 41 – Absorção de água entre 28 dias de cura em Ca(OH) <sub>2</sub> e 28 dias de imersão em NaOH . ....	93
Figura 42 – Comparação da porosidade total entre 28 dias de cura em Ca(OH) <sub>2</sub> e 28 dias de imersão em NaOH .....	94
Figura 43 – Comparação da porosidade total entre 2 dias e 28 dias de imersão em NaOH ....	95
Figura B 1 – Absorção de água ao longo do tempo – 48h00 e cura em Ca(OH) <sub>2</sub> .....	122
Figura C 1 - Resistência média à compressão aos 2 dias de cura .....	128
Figura F 1 - Aspecto macroscópico. Aumento de 6x e escala gráfica de 1 mm. ....	134
Figura F 2 - Fotomicrografias. (a) técnica de LN, com aumento de 25X, escala gráfica de 1 mm. (b) técnica de LP, com aumento de 25X, escala gráfica de 1 mm. ....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ocorrência de casos de Reação Álcali-Agregado no mundo.....	24
Tabela 2 – Amostras de agregados do Rio Grande do Sul. ....	46
Tabela 3 – Requisitos físicos de materiais pozoalânicos.....	50
Tabela 4 – Requisitos químicos dos materiais pozoalânicos.....	51
Tabela 5 – Propriedades dos principais constituintes da argila. ....	53
Tabela 6 – Principais fatores do planejamento experimental. ....	60
Tabela 7 – Combinações de teor de substituição. ....	60
Tabela 8 – Números de corpos de prova em função do método de ensaio e tipo de mistura. ..	61
Tabela 9 – Resultados da moagem de blocos cerâmicos coletados no Vale do Caí.....	63
Tabela 10 - Composição em óxidos, por FRX, do cimento, RCV e MK .....	63
Tabela 11 – Avaliação das características químicas do MK e RCV - NBR 12653 (2014). ....	64
Tabela 12 – Características físicas do MK e RCV em função a NBR 12653 (2014). ....	65
Tabela 13 – Área superficial específica, massa específica e granulometria à laser .....	65
Tabela 14 – Atividade pozoalânica do RCV, MK e RCV + MK aos 28 dias .....	68
Tabela 15 – Granulometria e percentagem do material requerido para o ensaio. ....	70
Tabela 16 – Composição mineralógica do agregado, através da análise petrográfica. ....	71
Tabela 17 – Composição química do agregado, através da FRX. ....	71
Tabela 18 – Especificação e quantidade de material utilizado para a elaboração de 27 corpos de prova para o ensaio da ASTM C 1260 e ASTM C 1567 .....	75
Tabela 19 – Especificação e quantidade de material utilizado para a elaboração de seis corpos de prova para o ensaio da NBR 7215 .....	77
Tabela 20 – Especificação e quantidade de material utilizado para a elaboração de três corpos de prova para o ensaio RILEM TC 116 PCD.....	78
Tabela 21 – Desempenho da atividade pozoalânica do cimento, MK, RCV e MK + RCV .....	83
Tabela 22 – Redução percentual das expansões médias entre REF e cada mistura .....	85
Tabela 23 – Diferença percentual das resistências médias entre REF e cada mistura .....	92
Tabela 24 – Diferença entre os resultados dos ensaios de absorção de entre 28 dias de cura em Ca(OH) <sub>2</sub> e 28 dias de imersão em NaOH .....	96
Tabela 25 – Diferença entre os resultados dos ensaios de absorção de água entre 2 dias de cura e 28 dias de imersão em NaOH .....	96
Tabela 26 – Diferença entre os resultados dos ensaios de absorção de água entre 2 dias de cura e 28 dias de cura em Ca(OH) <sub>2</sub> .....	97

Tabela A 1 – Resultados de expansão/RAA - repetição 1 e 2 .....	114
Tabela A 2 – Resultados de expansão/RAA - repetição 3 e médias .....	115
Tabela B 1 – Absorção de água (cura NaOH) - dimensões dos corpos de prova.	116
Tabela B 2 – Resultados de absorção de água (cura NaOH) – leituras de massa ao longo do tempo	117
Tabela B 3 – Absorção de água (cura solução $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) - dimensões dos corpos de prova.	118
Tabela B 4 – Resultados de absorção de água (cura solução $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) - leituras de massa ao longo do tempo.	119
Tabela B 5 – Absorção de água (cura 48h00) - dimensões dos corpos de prova.	120
Tabela B 6 – Resultados de absorção de água (cura 48h00) - leituras de massa ao longo do tempo.	121
Tabela C 1 - Resultados resistência à compressão de referência aos 48h de cura .....	124
Tabela C 2 - Resultados resistência à compressão de 20% de MC aos 48h de cura .....	124
Tabela C 3 - Resultados resistência à compressão de 30% de MC aos 48h de cura .....	125
Tabela C 4 - Resultados resistência à compressão de 20% de RCV aos 48h de cura .....	125
Tabela C 5 - Resultados resistência à compressão de 30% de RCV aos 48h de cura .....	126
Tabela C 6 - Resultados resistência à compressão de 10MC + 10RCV aos 48h de cura .....	126
Tabela C 7 - Resultados resistência à compressão de 20MC + 10RCV aos 48h de cura .....	127
Tabela C 8 - Resultados resistência à compressão de 10MC + 20RCV aos 48h de cura .....	127
Tabela C 9 - Resultados resistência à compressão de 15MC + 15RCV aos 48h de cura .....	128
Tabela D 1 - Resultados do índice de atividade pozolânica para Referência aos 28 dias .....	130
Tabela D 2 - Resultados do índice de atividade pozolânica para MC aos 28 dias .....	130
Tabela D 3 - Resultados do índice de atividade pozolânica para RCV aos 28 dias .....	131
Tabela D 4 - Resultados do índice de atividade pozolânica para MC e RCV aos 28 dias ....	131
Tabela E 1 – ANOVA para expansão média aos 15 e 30 dias de ensaio .....	132
Tabela E 2 – ANOVA para resistência à compressão entre 28 dias de cura em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	132
Tabela E 3 – ANOVA (Grupo Tukey) para resistência à compressão entre 28 dias de cura em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	132

Tabela E 4 – ANOVA para resultados de absorção total de água entre 28 dias de cura em $\text{Ca(OH)}_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	132
Tabela E 5– ANOVA - taxa de absorção entre 28 dias de cura em $\text{Ca(OH)}_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	132
Tabela E 6 – Análise de variância (valor-p) - porosidade total entre 28 dias de cura em $\text{Ca(OH)}_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	133
Tabela E 7– Análise de variância (valor-p) - porosidade capilar 28 dias de cura em $\text{Ca(OH)}_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	133
Tabela E 8 – ANOVA (Grupo Tukey) - absorção total (a), porosidade total (b), taxa de absorção (c) e porosidade capilar (d) entre 28 dias de cura em $\text{Ca(OH)}_2$ e 28 dias em imersão na solução de NaOH .....	133
Tabela F 1 - Composição mineralógica do agregado, através da análise petrográfica. ....	134



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>28</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	28
1.2.2 Objetivos Específicos .....	28
<b>1.3 Estrutura da pesquisa.....</b>	<b>28</b>
<b>1.4 Delimitações do Trabalho .....</b>	<b>29</b>
<b>2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1 Histórico.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2 Mecanismos de ocorrência e expansão da RAA.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3 Tipos de reação álcali-agregado .....</b>	<b>38</b>
2.3.1 Reação álcali-sílica (RAS) .....	38
2.3.2 Reação álcali-silicato (RASS) .....	39
2.3.3 Reação álcali-carbonato (RAC).....	40
<b>2.4 Fatores que influenciam a RAA .....</b>	<b>41</b>
2.4.1 Umidade e temperatura.....	41
2.4.2 Relação a/c.....	42
2.4.3 Teor de álcalis.....	43
2.4.4 Agregados .....	45
<b>2.5 Mitigação da RAA .....</b>	<b>47</b>
2.5.1 Tipos de mitigação da RAA. ....	48
2.5.2 Ação das pozolanas .....	48
<b>3 ARGILAS CALCINADAS .....</b>	<b>53</b>
3.1.1 Argilas .....	53
3.1.2 Efeito da temperatura de calcinação nas propriedades das argilas .....	55
3.1.3 Efeito das argilas calcinadas no concreto .....	55
3.1.4 Emprego de RCV como adição mineral.....	56
3.1.5 Mitigação da RAA com emprego de argila calcinada .....	57
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Planejamento dos experimentos .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 Materiais.....</b>	<b>61</b>

4.2.1 Cimento e adições minerais .....	61
4.2.2 Agregado.....	69
4.2.3 Água.....	73
<b>4.3 MÉTODOS .....</b>	<b>73</b>
4.3.1 Determinação do potencial reativo do agregado e da mitigação da RAA das adições minerais .....	73
4.3.2 Determinação da resistência à compressão.....	76
4.3.3 Determinação da absorção de água por capilaridade.....	77
4.3.4 Cura dos corpos de prova .....	79
<b>5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.1 Pozolanicidade.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2 Avaliação da eficiência das adições minerais na mitigação da RAA.....</b>	<b>84</b>
<b>5.3 Resistência à compressão.....</b>	<b>90</b>
<b>5.4 Absorção de água e porosidade .....</b>	<b>92</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>100</b>
<b>6.1 Considerações finais.....</b>	<b>100</b>
<b>6.2 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE A - RESULTADOS DE EXPANSÃO/RAA .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE B - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE C - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....</b>	<b>124</b>
<b>APÊNDICE D - RESULTADOS DE ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA.....</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE E - ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE F-ANÁLISE PETROGRÁFICA.....</b>	<b>134</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto é uma das propriedades mais importantes durante a vida útil de qualquer estrutura. A não ocorrência desta propriedade pode permitir o ataque dos agentes externos ou internos ao concreto, mediante processos químicos, físicos ou ainda mecânico. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Prizskulnik (2005), a Reação Álcali-Agregado (RAA) é um fenômeno que afeta a durabilidade do concreto através de um processo químico em que alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos do cimento que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto.

As estruturas mais afetadas pela Reação Álcali-Agregado são as barragens, pontes, plataformas, fundações, estruturas marinhas e outras estruturas localizadas em ambientes marinhos (MEHTA, MONTEIRO, 1994; HASPARYK, 2011). Portanto, qualquer estrutura de concreto que contenha agregado reativo e localizada em ambientes úmidos, como estacas de pontes, blocos de fundações, viadutos, pavimentos de concreto rígido e outros elementos estruturais podem ser afetados por este tipo de reação. (HOBBS, 1988; HEIJNEN, 1992; THAULOW et al., 1996).

Para Posterlli (2017), as características do agregado como mineralogia, tamanho e quantidade dos grãos podem influenciar na reatividade. Quanto mais desorganizada a estrutura do mineral, isto é, se o agregado for constituído por minerais com estrutura amorfa, semi-cristalina ou criptocristalina como é o caso da opala, os vidros, a cristobalita, a tridimita, a calcedônia, maior será a reatividade. Em relação ao tamanho, quanto mais fino, maior é a expansão da RAA, pois a maior área superficial do agregado permite maior contato com a solução dos poros do concreto.

Existem três tipos de Reações Álcali-Agregado (RAA), reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. (HOBBS, 1988; FURNAS, 1997; HASPARYK, 1999). Alguns fatores que influenciam no desenvolvimento da Reação Álcali-Agregado no concreto, além da presença de minerais reativos, são porosidade do agregado, quantidade de álcalis no cimento, disponibilidade de água na pasta e permeabilidade da pasta de cimento. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A Reação Álcali-Agregado começou a ser estudada em 1930, quando inexplicáveis fissurações, expansões e eflorescências começaram a aparecer em estruturas de concreto na Califórnia, e foi identificada através de uma análise laboratorial efetuada por um engenheiro civil americano chamado Stanton.

No Brasil, segundo Priszkulnik (2005:1017) “os primeiros registros sobre Reação Álcali-Agregado foram de autoria de Gitahy e Luiz em 1963 no âmbito dos estudos realizados para a construção de Barragem de Jupia, no rio Paraná”.

De acordo com a Tabela 1, dos 142 casos registrados no mundo da Reação Álcali-Agregado em estruturas hidráulicas construídas até 1998, 20 são do Brasil, nos quais se destacam: barragem de Apolônio Sales (Moxotó situada entre os estados de Bahia e Alagoas), as barragens de Billings/Pedras (estado de São Paulo), barragem de Furnas (estado de Minas Gerais), barragem Joanes (estado de Bahia) além da ponte Paulo Guerra (cidade de Recife) (SILVA, 2007 apud SANCHEZ, 2008). Na África existem 17 casos registrados da Reação Álcali-Agregado, dos quais 10 na África do Sul e 01 em cada um dos seguintes países: Costa de Marfim, Ghana, Moçambique, Nigéria, Quênia, Uganda e Zâmbia.

Tabela 1 – Ocorrência de casos de Reação Álcali-Agregado no mundo.

País	Nº de casos	País	Nº de casos	País	Nº de casos
África do Sul	10	Estados Unidos	29	País de Gale	01
Argentina	01	França	05	Paquistão	02
Austrália	02	Ghana	01	Portugal	04
Áustria	01	Índia	02	Quênia	01
Brasil	20	Inglaterra	01	Romênia	01
Canadá	41	Moçambique	01	Suiça	01
Costa do Marfim	01	Nigéria	01	Uganda	01
Espanha	03	Noruega	07	Zâmbia	01

Fonte: KIHARA *et al.* (1998) apud TIECHER (2006)

Em estruturas novas, especialmente aquelas em que não se utilizam agregado potencialmente reativo, materiais cimentícios suplementares, incluindo pozolanas numa proporção conveniente e suficiente, reduzem em primeiro lugar, a quantidade de substâncias alcalinas e em segundo lugar o aumento da quantidade de álcalis fixo pelos hidratos de cimento e assim a redução do pH através do consumo de hidróxido de cálcio, de tal modo que a reatividade dos agregados e conseqüentemente a sua libertação de substâncias alcalinas é minimizada. (CHARLWOOD *et al.*, 1995).

Assim, o uso de argilas calcinadas em concretos tem sido apontado como uma alternativa eficiente para prevenir a reação expansiva da Reação Álcali-Agregado, em conjunto com o uso de agregados não reativos e a limitação dos teores de álcalis no cimento e concreto; bem como o emprego de variedade de materiais, como a cinza volante, a sílica ativa, a escória granulada, de alto-forno, o metacaulim e a cinza de casca de arroz. (HOBBS,

1983; VIVIAN, 1983; DUCHESNE; BÉRUBÉ, 1994; HASPARYK, 1999; RAMLOCHAN, 2000; XU et al., 1995 apud SILVEIRA,2007).

O metacaulim (MK) é a argila calcinada mais estudada e empregada como material cimentício suplementar. Desde que o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) é originado a partir da calcinação de misturas de argilas, também pode ser tratado como “argila calcinada”. Ambos materiais antes da calcinação são constituídos fundamentalmente por partículas cristalinas, muito pequenas composta por argilominerais que, por sua vez, são compostos quimicamente por silicatos hidratados de alumínio e ferro. Tanto o MK como o RCV, possuem em sua composição química os óxidos de silício e alumínio em quantidade suficiente para caracterizá-los como pozolanas. Contudo, a sua maior ou menor atividade dependerá das temperaturas de calcinação e processos de resfriamento, bem como da finura proporcionada pelos processos de moagem. As argilas caulínicas, quando submetidas a temperaturas que variam entre 600°C e 900°C, têm a modificação da estrutura cristalina dos íons hidroxilas, ocorrendo a destruição do arranjo atômico, resultando em um composto não cristalino e instável quimicamente designado por metacaulinita ( $Al_2Si_2O_7$ ) que influencia na atividade pozolânica do material. Jimenez et al. (2013), apontam que quanto maior for a área superficial específica do RCV, maior é a atividade pozolânica, para tanto, devem passar por uma moagem.

Neste contexto, propõe-se o estudo comparativo de resíduos de cerâmica vermelha e metacaulim para a mitigação de RAA de concretos.

## 1.1 Justificativa

A exigência de um melhor desempenho das estruturas de concreto tem ocasionado existência de maiores desafios dos profissionais da área na busca de soluções que incluem a obtenção de concretos cada vez mais resistentes e duráveis. Desta maneira, deve-se procurar maximizar a durabilidade das estruturas, não somente ao nível de processos construtivos, através do controle da qualidade de todas as etapas da produção, mas também através da manipulação das características dos materiais empregados na sua produção. (SILVEIRA, 2007).

Sendo a RAA um fenômeno causado por uma reação química que ocorre entre os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado, ela pode causar a deterioração e desintegração do concreto, pois os seus subprodutos podem tornar-se expansivos na presença de umidade, originando fissuração,

diminuição da resistência e aumento da permeabilidade e, eventualmente a ruptura da estrutura. (SILVEIRA, 2007; Carlos et al., 2004).

Embora este fenômeno tenha sido descoberto há mais de 60 anos, ainda existem grandes dificuldades de entender melhor os mecanismos envolvidos e controlar a ação deletéria instalada no concreto, uma vez que ainda não se dispõe de uma maneira totalmente eficiente de interromper a evolução da RAA, existindo apenas medidas preventivas que devem ser tomadas, com a finalidade de inibir ou minimizar os efeitos de expansão da reação química em qualquer tipo de estrutura de concreto.

Uma das estratégias suscetíveis de mitigação da RAA em concretos de acordo com Silveira (2007) “tem sido o uso de adições minerais como alternativa eficiente para prevenir a reação expansiva e a limitação dos teores de álcalis no cimento ou concreto”.

O emprego de material pozolânico, como metacaulim e sílica ativa, segundo Hong e Glasser (2002), reduz a RAA ao diminuir a relação Ca/Si das pastas, bem como ao formar mais C-S-H que parece adsorver os álcalis da solução dos poros. Os autores colocam, ainda, que pozolanas com maior teor de alumina parecem ter maior poder de mitigação. Já Chapepex e Scrivner (2012a), comparando o poder de fixação de álcalis de C-S-H formado tanto por pozolanas silicosas como por pozolanas sílico-aluminosas, afirmam que, ao estudar a solução aquosa extraída de pastas de cimento sem agregados, a capacidade de fixação de álcalis por ambos produtos de hidratação é a mesma. A maior taxa de mitigação da RAA observada nas pozolanas sílico-aluminosas, como o metacaulim, parece residir na inibição da dissolução da sílica amorfa dos agregados frente ao alumínio dissolvido (CHAPPEX; SCRIVENER, 2012b)

Mitrovic (2011) salienta que os resíduos da cerâmica vermelha bem como metacaulim contêm elevadas quantidades de sílica e alumina o que lhes confere um material de alto potencial pozolânico. Embora possuam uma estrutura cristalina, quando submetidos ao processo térmico, a estrutura cristalina é destruída e se obtém uma estrutura amorfa.

No estudo de Bektas *et al.* (2007) e Afsinnia e Poursaee (2015), foi concluído que o uso de resíduo da cerâmica vermelha (RCV) reduz a expansão da RAA no concreto, dependendo do teor utilizado, da finura e da área superficial da mesma.

Poursaee (2015) e Bektas *et al.* (2007), concluíram que numa substituição de 20 e 35% de cimento por resíduos da cerâmica vermelha, há redução de expansões em concreto e argamassa. Labrincha e Morelli (2013), afirmam que a substituição de cimento por argila calcinada, obtidos na forma de RCV, em teor de 15% melhora a resistência à compressão e oferece melhores benefícios ambientais.

Yazici et al. (2014) e Agredo et al. (2011) tendo substituído cimento por metacaulim em proporções de 10, 15 e 20% obtiveram redução das expansões, melhoria considerável da resistência à compressão, a absorção de água (sucção capilar) e a permeabilidade de íons cloretos.

No Brasil, o metacaulim é uma pozolana comercial, com elevado custo, o que pode inviabilizar o seu emprego em teores elevados como os estudos apresentados empregam. Por sua vez, o resíduo de cerâmica vermelha é uma fração significativa na composição de resíduos de construção e demolição, na ordem de 30% dos resíduos Classe A (KAZMIERCZAK et al., 2006), e o seu emprego em teores mais elevados pode ser benéfico na mitigação da RAA, inclusive sob o ponto de vista econômico. No entanto, em algumas situações, a resistência à compressão pode não ter o mesmo desempenho que o apresentado pelo metacaulim (SEBASTIANY, 2014), principalmente nas primeiras idades. Também deve-se destacar que as argilas ílticas, que são empregadas na produção de cerâmica vermelha, apresentam, em geral, um teor significativo de álcalis.

Assim, o uso de pozolana (resíduos de cerâmica vermelha e metacaulim) em proporções adequadas (20 a 30%) na confecção de concreto, pode contribuir significativamente na mitigação da RAA em concretos, e o emprego combinado de ambos pode resultar em um efeito sinérgico positivo para o concreto, sendo estas algumas motivações deste trabalho.

Por sua vez, o autor desta dissertação de mestrado desenvolve o trabalho com o apoio de um convênio entre CNPq e MCT-Mz (Ministério de Ciência e Tecnologia de Moçambique) e um tema que se aproxime de demandas daquele país é de interesse. A elaboração deste trabalho por um lado foi motivada pelo fato de uma das principais barragens de África localizada em Moçambique, apresentar manifestações de expansão.

Em Moçambique há registro de ocorrência de RAA na barragem de Cahora-Bassa, construída entre 1971 a 1974. É uma barragem de dupla curvatura fina em arco, 170m de altura, 300m de comprimento da crista, 23m de espessura da base. “A manifestação da expansão tornou-se possível mediante análises sobre a evolução do tronco em 1979”. (RAMOS, 1979).

Segundo Ramos (1979), a expansão desenvolvida na barragem de Cahora-Bassa é bastante moderada, com uma evolução a taxas constantes e com uma distribuição simétrica nas estruturas. A existência permanente de altas temperaturas, e elevada umidade relativa são apontados como as prováveis causas do desenvolvimento das reações.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos do trabalho dividem-se em Objetivo Geral e Objetivos Específicos e são apresentados na sequência.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a influência das características físicas e químicas de resíduos oriundos da cerâmica vermelha (RCV) e metacaulim (MK) na mitigação da ocorrência da reação álcali-agregado (RAA) em concreto.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar os cimentos e as argilas calcinadas quanto aos aspectos físicos, químicos, mineralógicos e estruturais;
- b) Caracterizar a morfologia das partículas das argilas calcinadas;
- c) Avaliar o potencial pozolânico das argilas calcinadas;
- d) Caracterizar o potencial reativo do agregado empregado;
- e) Avaliar o potencial de mitigação da RAA das argilas calcinadas;
- f) Avaliar a resistência à compressão e a absorção de água das argamassas antes e após a submissão ao banho de NaOH e relacionar com o comportamento frente a RAA.

## 1.3 Estrutura da pesquisa

O trabalho está estruturado em quatro capítulos:

No primeiro capítulo para além de uma breve introdução sobre o tema, constam a justificativa, as hipóteses, delimitação do trabalho, os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo descreve a revisão bibliográfica sobre a reação álcali-agregado, as pozolanas (resíduo da cerâmica vermelha e metacaulim) como adições minerais na substituição parcial do cimento.

Os materiais e métodos para a realização do programa experimental, com vista ao alcance dos objetivos traçados nesta pesquisa, são descritos no capítulo três.

O capítulo quatro apresenta a análise e interpretação dos resultados.

A conclusão do trabalho é apresentada no capítulo cinco e finalmente as referências bibliográficas.

#### **1.4 Delimitações do Trabalho**

Nesta pesquisa foram delimitados alguns fatores que podem interferir no resultado das análises a serem efetuadas, conforme comentado na sequência.

O tipo de cimento utilizado nesta pesquisa foi CPV-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), para melhor garantir o monitoramento e análises, pois este cimento possui baixo teor de adição mineral não pozolânica (aproximadamente 5%). Além disto, a NBR 15577-4 esclarece que o equivalente alcalino do cimento deve estar entre  $(0,90 \pm 0,10)\%$  e a finura deve situar-se entre  $(4900 \pm 200) \text{ cm}^2/\text{g}$ . O cimento CPV-ARI adotado nesta pesquisa possui equivalente alcalino de 1,65%, superior ao preconizado pela NBR 15577-4, pressupõe-se que o cimento possa influenciar a concentração de íons hidroxilas na solução dos poros das argamassas.

O resíduo da cerâmica vermelha e metacaulim foram os tipos de adições minerais usados na substituição parcial do cimento, em teores de 20% e 30%. A substituição de cimento foi feita por cada uma das pozolanas de forma isolada ou combinadamente. A justificativa da escolha destes teores foi mencionada no item 1.1.

Empregou-se um único agregado reativo, obtido a partir de uma jazida localizada na cidade de Flores de Cunha/RS, previamente identificado por um geólogo (Prof. Andrea Sander) como agregado potencialmente reativo, caracterizado e estudado no trabalho de Guillante (2015).

## 2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

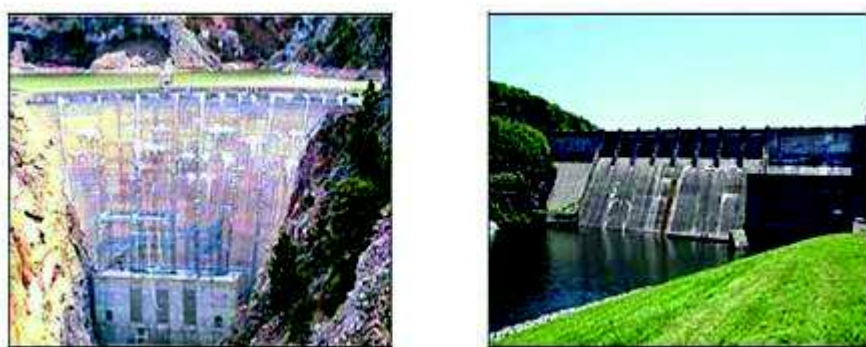
Segundo Hasparyk (2005) e Priszkulnik (2005), a reação álcali-agregado (RAA) é um processo químico que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, em que alguns constituintes mineralógicos presentes no agregado, reagem com hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento, que estão dissolvidos na solução dos poros formando um gel higroscópico expansivo.

O gel cristalino expansivo resultante desta reação, na presença de umidade gera tensões de tração na matriz do concreto, podendo originar fissuras, trincas, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência à compressão e a tração, movimentações diferenciais nas estruturas, exsudação de gel, redução da vida útil e consequente rotura da estrutura. (GOMES NETO; BARRETO, 2013; SILVEIRA et al., 2013; PRISZKULNIK, 2005).

Para Hasparyk (2005) a deterioração que ocorre no concreto devido a RAA pode afetar de forma significativa a sua durabilidade, uma vez que a fissuração expõe o concreto às condições ambientais e à ação de agentes agressivos, acelerando o processo de degradação.

De acordo com Paulon (1981 apud TIECHER 2006) a RAA evidencia-se a partir do aparecimento de fissuras mapeadas nas superfícies expostas do concreto, descoloração do concreto adjacente à fissura, bem como o fechamento de junta de dilatação, deslocamento de elementos estruturais e, em alguns casos, exsudação de gel sílico-alcálico de cor esbranquiçada na superfície do concreto, como se pode observar na Figura 1.

Figura 1 – Imagem de estrutura de concreto afetada pela RAA.



Fonte: ACRES (2005)



## 2.1 Histórico

Os primeiros registros de anomalias em estruturas de concreto construídas foram constatados no estado de Califórnia, nos Estados Unidos, nos anos 30, embora date de 1940 a publicação dos estudos de Thomas Elwood Stanton III, associando o fenômeno expansivo à reação álcali-agregado. (PRISZKULNIK, 2005).

Segundo Silveira (2007) foi no estudo de Stanton que, pela primeira vez, foi reconhecida a deterioração do concreto através da reação álcali-agregado, onde foram constatadas inexplicáveis expansões em estruturas de diversos prédios escolares, pontes, pavimentos e construções portuárias, tendo sido concluído que as causas do problema estavam relacionadas ao uso de cimento com alto teor de álcalis e que a deterioração ocorrida foi causada por uma reação álcali-sílica, sendo a opala a fase reativa do agregado utilizado.

Entre meados de 1950 a 1960 havia desaparecido virtualmente o interesse pelo problema, voltando a ser estudado por volta do ano 70, onde começaram a surgir com frequência relatos de anomalias em estruturas de vários países. Desde então, e até aos dias atuais, o assunto tem sido tratado de maneira muito mais rigorosa.

De acordo com um levantamento realizado por Charlwood (1995 apud SILVEIRA 2007), “a reação álcali-agregado era ativa em 104 barragens e vertedouros ao redor do mundo”. No Brasil, dos 20 casos referenciados, as primeiras constatações de reação álcali-agregado ocorreram na barragem UHE Furnas, em 1976, 13 anos após a sua construção, onde foram observados sintomas como a fissuração dos pilares dos vertedouros, nos blocos de ancoragem dos condutos forçados e na casa de força, bem como o desnivelamento do coroamento central e blocos adjacentes, como se pode observar na Figura 2.

Figura 2 – Fissuras na face lateral e na seção transversal de um pilar de UHE Furnas.



## 2.2 Mecanismos de ocorrência e expansão da RAA

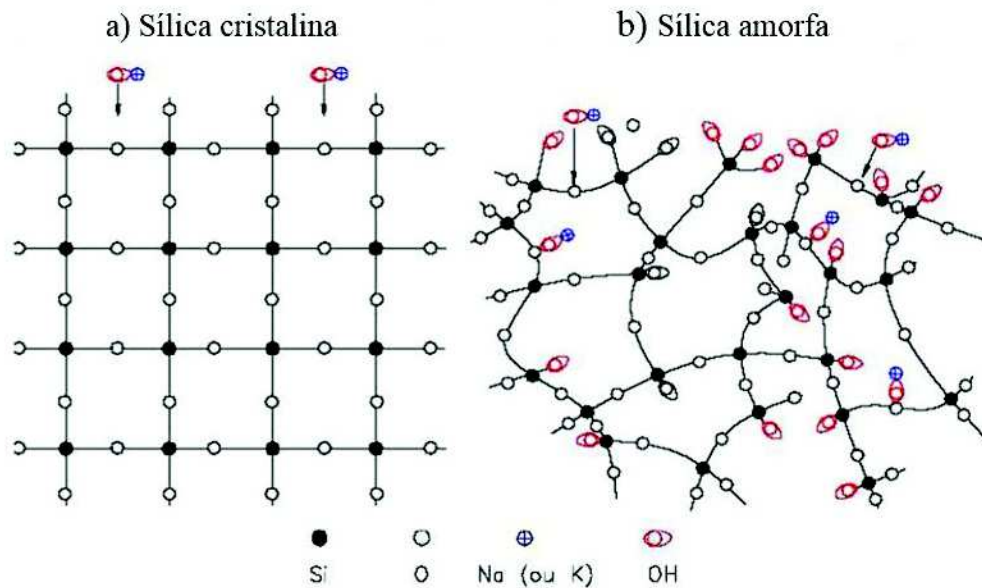
Tiecher (2006) e Sanchez (2008) afirmam que a RAA é um processo químico que envolve íons alcalinos, principalmente sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) derivados das matérias primas utilizados para a produção de cimento como feldspatos, micas e minerais argilosos contidos no calcário e argila (matéria prima do cimento) e íons hidroxilas- $\text{OH}^-$  provenientes da dissolução do cimento com certos minerais que compõem os agregados. Como consequência da hidratação do cimento, a solução dos poros do concreto fica com elevada concentração  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$  e  $\text{OH}^-$ . Entre 2 e 12h, registra-se pouca mudança da concentração dos íons, indicando e aproximando o equilíbrio entre a contínua dissolução das fases de cimento e a precipitação dos produtos. Entre 12 e 16h, há uma diminuição drástica da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^-$  e predominância de hidróxidos alcalinos. Com mais de 24h de idade, os únicos íons presentes na concentração são  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$ . Os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  são os que contribuem para elevar o pH dentro da solução dos poros do concreto. (TAYLOR. 1997).

Segundo Diamond (1975) e Glasser (1992) os álcalis do cimento podem se encontrar na forma solúvel (encontram-se presentes nos sulfatos) e insolúvel (encontram-se nas fases sólidas presentes no clínquer). O fornecimento dos álcalis para a solução ocorre de forma mais rápida a partir daqueles presentes nos sulfatos, e de forma mais lenta para os demais incorporados nos grãos de clínquer. Independentemente da fonte dos álcalis (solúveis ou insolúveis), uma vez que a RAA ocorre lentamente, os autores são unânimes em afirmar que todos os álcalis existentes poderão participar na reação.

Na RAA, um dos minerais que causa a deterioração é a sílica amorfa, pois segundo Munhoz (2007), as estruturas amorfas não apresentam regularidades ou organização em termos de disposição espacial de átomos, tornando mais reativas com os álcalis, o vidro, a opala, a calcedônia, a tridimita, a cristobalita, entre vários. Já as estruturas cristalinas geralmente se destacam pela organização em seu arranjo atômico.

Glasser e Kataoka (1981) representaram duas formas nos seus estudos sobre a química da RAA, onde a primeira ocorre quando o ataque dos íons hidroxila vindos da hidratação do cimento, se dá na superfície bem cristalizada da sílica, e a segunda quando a sílica é amorfa. A Figura 3, ilustra as formas de ocorrência.

Figura 3 – Ataque dos íons hidroxilas à sílica.



Fonte: DENT GLASSER; KATAOKA (1981)

Observando a Figura 3(a), constata-se que o ataque dos íons hidroxilas se dá somente na superfície externa quando a sílica é bem cristalizada, sendo que este processo é muito lento, e poucos íons de sílica passam para a fase fluida. Na Figura 3 (b), observa-se que a sílica pouco cristalina permite a penetração generalizada dos íons hidroxilas e dos íons alcalinos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), o que acaba por romper as ligações do sistema Si-O-Si (siloxano), resultando numa estrutura polieletrólítica contendo álcalis, o gel da RAA. (GLASSER; KATAOKA, 1981 apud HASPARYK, 2005).

As fases vítreas reagem rapidamente com hidróxidos alcalinos em função da sua alta energia interna, isto é, todas as rochas que apresentam sílica amorfa ou microcristalina reagem muito rapidamente com os álcalis em função da sua desordem estrutural da fase amorfa. (MUNHOZ, 2007).

A solubilidade da sílica aumenta continuamente quando o pH variar entre 5 a 11 contribuindo para a iniciação da ocorrência de RAA, uma vez que o pH da solução dos poros do concreto varia entre 12,5 a 13. (PREZZI, 1997 apud SILVEIRA, 2006).

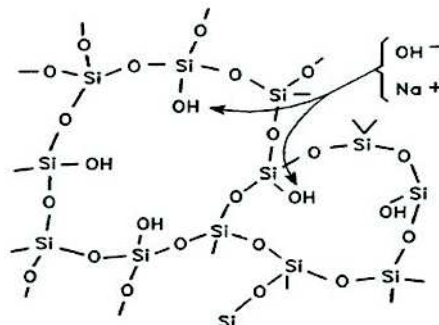
A reação começa com os íons hidroxilas presentes na solução dos poros do concreto, que atacam os agregados reativos causando sua dissolução, onde a sílica reage com hidróxido de cálcio e produz uma despolimerização adicional do silicato hidratado C-S-H. (HASPARYK, 2005).

Para Tiecher (2006), o primeiro estágio da reação é definido como sendo do tipo ácido-base no qual o **grupo silanol (Si-OH)**, presente na superfície da sílica libera água após

ter sido atacado pelo (OH<sup>-</sup>). Os cátions presentes no meio são atraídos se associando à estrutura deste grupo, desbalanceado pelo SiO<sup>-</sup>, formando um gel sílico alcalino, de acordo com as equações e da Figura 4. (HASPARYK, 2005).



Figura 4 – Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas.

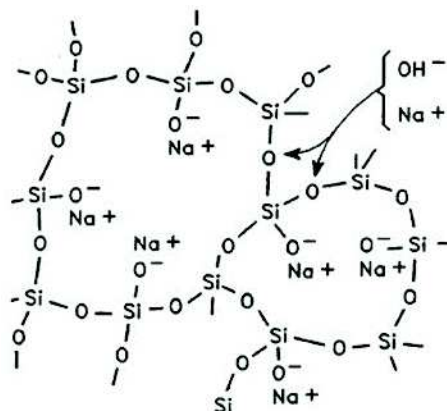


Fonte: HASPARYK (2005)

Em segundo estágio, os íons hidroxilas também atacam o **grupo siloxano (Si-O-Si)**, rompendo as suas ligações e substituindo-o por pares de SiO. “Contudo, em ambiente com alto pH, o silicato solúvel que representa o ácido ortosilícico (H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) fica em solução” (PRISZKULNIK, 2005), conforme Figura 5 e equação 3.



Figura 5 – Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos ions hidroxilas.



Fonte: TURRIZIANI (1986)

Para Prizkulnik (2005 apud TIECHER, 2006) e Poole (1992 apud HASPARYK, 2005), o gel alcalino formado é higroscópico, absorve água, e aumenta de volume, gerando

pressão interna suficiente para expandir e fissurar o concreto. O volume específico e a densidade do gel variam de acordo com a quantidade de água presente e dos álcalis, sendo normalmente superior ao volume da sílica, gerando pressões expansivas. (GLASSER, 1992). Segundo Mehta e Montero (2014) a solubilidade do gel de silicato alcalino formado na água é resultante da sua mobilidade do interior do agregado para regiões microfissuradas do próprio agregado e do concreto, e as microfissuras atingem a superfície externa do concreto devido à disponibilidade de água junto ao concreto. Uma das consequências do sistema de fissuras gerado pelo gel é o surgimento de outros mecanismos de deterioração como, a lixiviação que ocorre com a consequente precipitação dos carbonatos de cálcio na superfície do concreto pela percolação de água. (POOLE, 1992 apud HASPARYK, 2005).

Na verdade, ainda prevalecem dúvidas quanto à modificação da composição química do gel durante a reação e como esta composição afeta a capacidade do gel expandir. (PREZZI; MONTEIRO; SPOSITO, 1997). Segundo Silveira (2001) e Hasparyk (2005) as duas principais teorias propostas para explicar os mecanismos de expansão são a teoria de pressão osmótica, desenvolvida por Hansen, e a teoria de adsorção, desenvolvida por Vivian, sendo esta última a mais aceita atualmente.

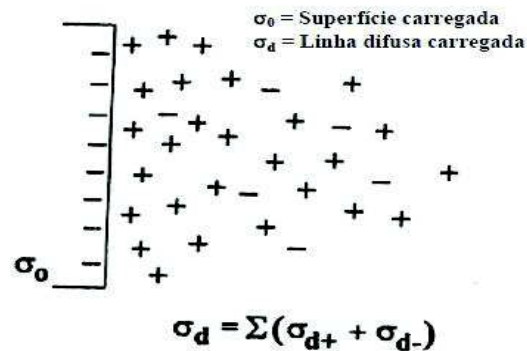
Segundo Hobbs (1988) na teoria de pressão osmótica, a pasta de cimento age como uma membrana impermeável aos íons de sílica, mas permite a passagem de água e dos hidróxidos alcalinos, exercendo um aumento na pressão e fissuração da pasta de cimento, sendo que a difusão de água pelos poros acelera a reação. Os íons alcalinos do cimento desenvolvem-se na água do amassamento do concreto e com a hidratação do cimento a concentração da solução aumenta, tornando-se básica e atacando as partículas do agregado reativo resultando num gel que atrai as moléculas aquosas que provocam sua expansão.

Para Vivian (1952 apud HASPARYK, 2005) assegurou que a expansão dependerá da concentração volumétrica do gel, da sua taxa de crescimento e suas propriedades físicas, sendo que o gel pode migrar ao longo do concreto dissipando as tensões, caso a taxa de crescimento ocorra lentamente; e as tensões internas são capazes de aumentar a ponto de causar fissuração e expansão do gel, caso a taxa de crescimento ocorra rapidamente.

De acordo com Prezzi, Monteiro e Sposito (1997) a química de superfície explica que as expansões causadas pelo inchamento do gel ou as variações volumétricas são causadas pelas forças de repulsão da dupla camada elétrica, isto é, quando uma fase sólida entra em contato com uma fase líquida, a superfície do sólido carrega excesso de carga ficando a interface eletrificada e alterando as propriedades das duas fases. Segundo os mesmos autores, o gel da sílica é formado por partículas muito pequenas que se aproximam, mas nunca

atingem o tamanho de uma molécula, e na superfície da sílica amorfa existem íons de oxigênio com ligações incompletas, que permitem uma troca iônica com os íons alcalinos adsorvidos por forças eletrostáticas à superfície da sílica (semelhante a reação ácido-base), conforme a Figura 6.

Figura 6 – Distribuição de íons conforme o modelo da dupla camada.



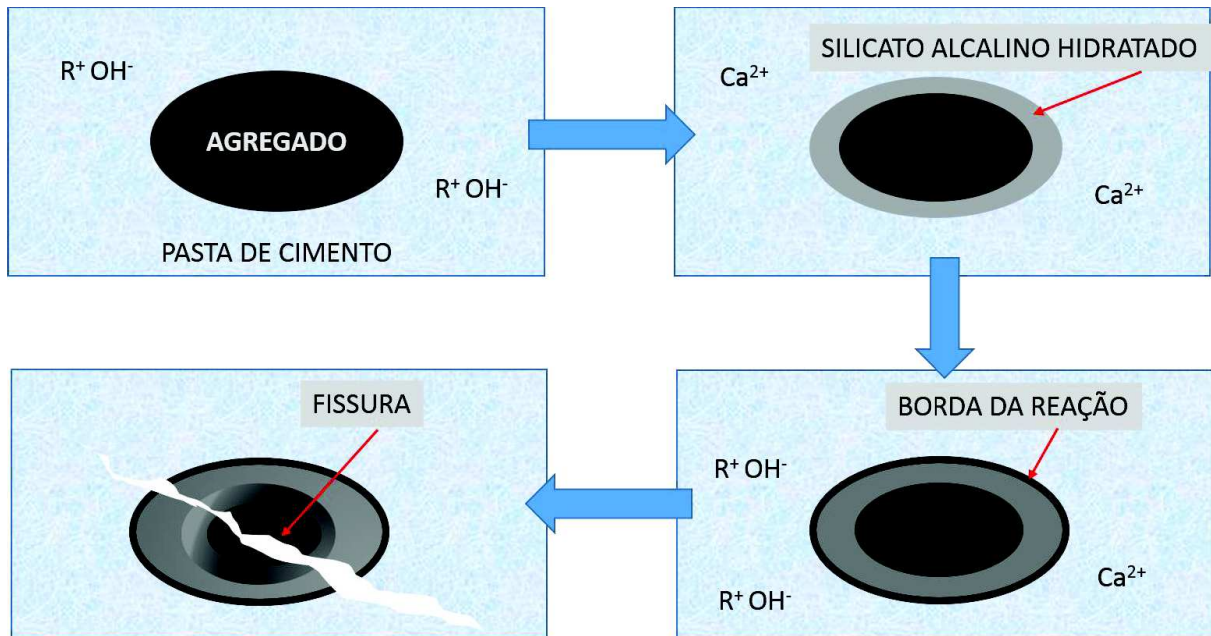
Fonte: PREZZI; MONTEIRO; SPOSITO (1997)

A interação entre a superfície da sílica altamente carregada negativamente presente no agregado e a solução alcalina dos poros do concreto, promove a formação de uma dupla camada elétrica, composta por íons alcalinos:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{++}$ , para neutralizar sua carga negativa. Portanto o processo de dissolução da sílica torna constante, e dependendo da continuidade dos fluidos nos poros, os íons ficam difusos nas áreas afetadas. Com a passagem do tempo, surge o aumento da concentração dos íons como resultado do processo e, se o gel formado tiver contato com água torna-se expansivo.

A teoria mais convincente sobre a RAA foi proposta por Ichikawa e Miura (2007) apud Tiecher (2010), onde propuseram um novo modelo de RAA, salientando que os íons hidroxilas  $\text{OH}^-$  e íons alcalinos  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  presentes na solução dos poros do concreto degradam os agregados ricos em sílica, convertendo-os em um fluido sílico alcalino hidratado. O silicato alcalino homogeneamente convertido envolve toda região superficial da sílica e o consumo de  $\text{OH}^-$  pelas reações faz com que haja à dissolução do  $\text{Ca}^{2+}$  na solução. Para repolimerizar, o  $\text{Ca}^{2+}$  penetra facilmente na camada de silicato alcalino, onde agora o agregado é rodeado pela borda da reação que surge da penetração de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  formando geles de silicato de cálcio, sódio e potássio alcalino. Nesta reação, a velocidade de penetração do  $\text{Ca}^{2+}$  é mais lenta que a dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , sendo que os íons  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  penetram através da borda de reação de modo a converter o silicato livre em uma massa de silicato alcalino. O resultado deste processo é o surgimento de uma pressão expansiva que é

concentrada no agregado, acabando por fissurar juntamente com a pasta de cimento em seu arredor, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Modelo de ocorrência de RAA proposto por Ichikawa e Miura (2007).



Fonte: Adaptado de Ichikawa e Miura (2007)

Esta ideia desenvolvida por Ichikawa e Miura (2007) foi confirmada por Munhoz (2007), onde afirma que a reação álcali silicato dentro de grãos de agregado gera produtos cristalizados, na qual  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $OH^-$  penetram nos grãos e reagem com a sílica, rompendo as ligações químicas dos silicatos, tornando frágil a estrutura dos grãos.

Ribeiro et al. (2012) salientam que se houver uma elevada concentração de íons  $Na^+$ ,  $K^+$  na solução intersticial maior será o pH e a velocidade de penetração de íons cálcio ( $Ca^{2+}$ ) no gel faz originar geles de silicato de cálcio, sódio e potássio capazes de absorver moléculas de água e expandir gerando forças expansivas, isto é, com a presença de  $Ca(OH)_2$  livre, os íons  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $OH^-$  e água penetram nos grãos reativos, quebrando as ligações Si-O-Si e levando a difusão da sílica.

Segundo Zheng et al. (2016) podem ser descritos três passos de expansão da RAA:

1. Ataque da solução alcalina à sílica reativa;
2. Formação do silicato alcalino e início da interação com  $Ca^{2+}$ ;
3. Formação do silicato alcalino de cálcio gerando fissuras.

Portanto, a partir das ideias acima descritas pode-se evitar a ocorrência da expansão removendo o  $Ca(OH)_2$  livre na pasta de cimento com a utilização de uma adição pozolânica, rica em sílica, com elevado teor de finura, em proporções adequadas (TIECHER, 2010).

Embora haja várias propostas de ocorrência e expansão da RAA, pode-se salientar que, tanto os mecanismos quanto a velocidade de expansão variam de acordo com os minerais envolvidos, ou seja, de acordo como o tipo de reação (álcali-sílica, álcali-silicato ou álcali-carbonato).

### 2.3 Tipos de reação álcali-agregado

Segundo a NBR 15577 (ABNT, 2008a), Poole (1992), Priszkulnik (2005), Furnas (1997) e Tiecher (2006), Hasparyk (2011) a RAA é classificada basicamente de três formas, em função da composição mineralógica reativa dos agregados:

- a) Reação álcali-sílica;
- b) Reação álcali-silicato;
- c) Reação álcali-carbonato.

#### 2.3.1 Reação álcali-sílica (RAS)

Conforme Hasparyk (2011) a RAS é a mais conhecida e mencionada, que dependendo da forma de minerais de sílica reativa envolvidas, ocorre mais rapidamente. É obtida a partir da reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados. (DIAMOND, 1997 apud TIECHER, 2006).

As formas mais comuns dos minerais (agregados reativos) são: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais (vulcânicos), vidros artificiais (vidro pyrex) e o quartzo microcristalino/criptocristalino e deformado. (SILVEIRA, 2007; TIECHER, 2006; RODRIGUES, 1994 apud HASPARYK, 2005).

Wang e Gillot (1991 apud TIECHER, 2006) descrevem as etapas da RAS, afirmando que o grupo silanol (Si OH) presente na superfície da sílica, é atacado pelos álcalis Na, K e/ou  $Ca^{++}$ , havendo troca de  $Ca^{++}$  por prótons desse grupo e uma associação de  $Na^+$  e do  $K^+$  aos ions  $H^-$ . Na sequência ocorre a quebra as ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) pela ação dos ions hidróxidos (Na OH e KOH), surgindo um grupo silanol na estrutura interna da sílica, o que pode propiciar a formação de um gel sílico-alcalino através da difusão de ions alcalinos internamente.

Segundo Farny e Kosmatka (1997 apud SANCHEZ, 2008), “o produto desta reação é um gel silicato-alcalino (sílico-cálcico-potássico) [C-S-K-H], ou (sílico-cálcico-sódico) [C-



Na-S-H] que na presença de água, é expansivo, aumentando as tensões internas e posteriores fissurações no concreto”.

### 2.3.2 Reação álcali-silicato (RASS)

Hobbs (1988), Poole (1992), Kihara (1993) definem reação álcali-silicato como sendo aquela que ocorre entre os álcalis disponíveis no cimento (presentes na solução dos poros do concreto) com alguns tipos de minerais do grupo de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), rochas metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels) e ígneas (basalto e granito). É uma reação relativamente mais lenta, sendo pouco difundida e compreendida, mas da mesma natureza com a reação álcali-sílica.

Segundo Monteiro et al. (2001) o aspecto que torna o agregado mais reativo é a presença do quartzo microcristalino. Os mesmos autores salientam que o tamanho do grão, a porosidade e presença de camadas finas no agregado proporcionam uma maior acomodação de álcalis acelerando a reação, mas a textura do quartzo não influencia na reatividade do agregado. A presença do quartzo microcristalino influencia na reatividade do agregado devido ao deslocamento e imperfeições dos cristais, maior área específica para reação, e a presença de cristais de silicatos deformados, não obstante o quartzo microcristalino ser um agregado termodinamicamente mais estável. (FURNAS, 1997; HASPARYK, 2005).

A reação entre o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com feldspato para a formação do gel higroscópico, é influenciada pela aderência desenvolvida nas primeiras idades entre o agregado e a pasta de cimento, e na presença de umidade é solúvel e pode expandir de acordo com a chegada ou a saída de água. (VAN AARDT; VISSER, 1977).

No Brasil a reação álcali-silicato é o tipo de RAA mais predominante, pelo fato de grande parte de problemas terem sido identificadas primeiramente em barragens que foram construídas com concretos que empregaram agregados de rocha granítica, como: Barragem de Apolônio Sales (Rio São Francisco na divisa entre Bahia e Alagoas), a barragem de Joanes (Salvador BA), a Barragem de Paulo Afonso (Paulo Afonso, BA), a Barragem de Pedras (Jequié, BA) e a Barragem de Billings/Pedras (São Bernardo dos Campos, SP). (VADUCA, 2002 apud HASPARYK, 2005).

### 2.3.3 Reação álcali-carbonato (RAC)

A reação álcali-carbonato é entendida como sendo uma reação entre os álcalis disponíveis no cimento e alguns agregados rochosos carbonáticos como calcário dolomíticos argiloso. (NBR 15.577, ABNT, 2008a; SILVEIRA, 2006). Neste processo ocorre a deterioração do concreto originada pela desdolomitização do calcário e conseqüente enfraquecimento da interface pasta-agregado. Não há formação de gel expansivo como na reação álcali-silica, mas sim a formação de brucita ( $Mg(OH)_2$ ), calcita ( $CaCO_3$ ), ocorre a regeneração de hidróxido de cálcio. (FURNAS, 1997; PRISZKULNIK, 2005). As equações 4 e 5 descrevem o processo.

a) Desdolomitização do calcário dolomítico em meio alcalino, formando brucita, calcita e carbonato de sódio:

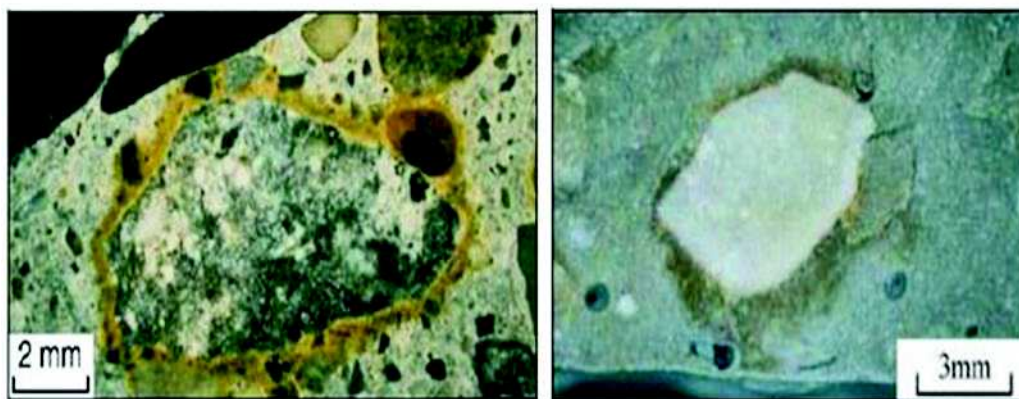


b) O carbonato alcalino resultante da desdolomitização reage com hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, formando calcita:



Segundo Katayama (2004), apesar da reação álcali-carbonato caracterizar-se pelo surgimento de pontos de brucita dentro das bordas da reação e halos de carbonato de cálcio na pasta de cimento, não é notória a sua expansão ou fissuração. O que contribui para o desenvolvimento da expansão segundo Kihara (1993) é a illita, um argilomineral sempre presente neste tipo de reação. A Figura 8 – Produtos de formação da RAA. apresenta as imagens de produtos de formação na interface entre a pasta de cimento e o agregado, obtidas através do MEV por microscópio óptico..

Figura 8 – Produtos de formação da RAA.



Fonte: GILLOTT e ROGERS (2003) e KATAYAMA (2004)

## 2.4 Fatores que influenciam a RAA

Para Silveira (2006) e Prizskulnik (2005) as condições básicas que influenciam a ocorrência da reação álcali-agregado são: a presença do agregado reativo no concreto (tipo, forma, tamanho e proporção), teor de álcalis presente na solução dos poros do concreto (tipo e proporção), umidade e temperatura às quais as estruturas de concreto estão expostas.

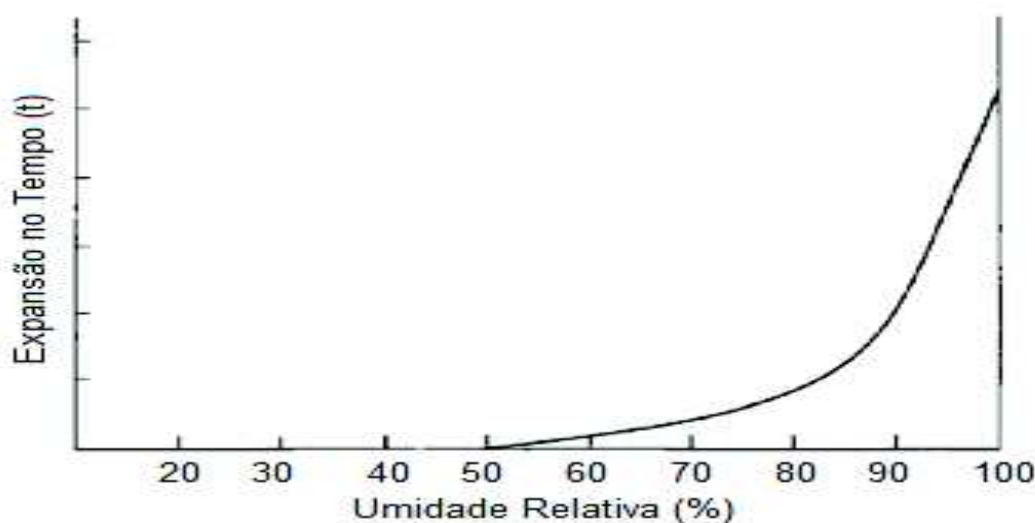
### 2.4.1 Umidade e temperatura

Hasparyk (2011) salienta que a umidade e a temperatura devem ser entendidas como requisitos distintos na RAA, pois a umidade é responsável pelo surgimento da reação, enquanto a temperatura é responsável pela aceleração do processo. A umidade, além de influenciar no transporte de álcalis e íons hidroxilas, auxilia na expansão do gel higroscópico.

Com base nas pesquisas de Hasparyk (1999 apud SILVEIRA, 2006) e Wang (1990), a ocorrência da RAA é efetiva em ambientes com umidade relativa acima de 80%, e abaixo disso pode não ocorrer. No entanto, se a umidade decrescer a certo nível, o teor de umidade “seguro” irá depender da temperatura.

Em ambientes com umidade relativa acima de 85% e com ciclos de molhagem e secagem, há uma maior intensificação da migração e solubilização dos íons alcalinos na solução dos poros. (KIHARA, 1986). Para Poole (1992), ambientes com umidade relativa inferior a 70% as reações de expansão são praticamente inferiores, já em ambientes com umidade superior a 70%, há maiores possibilidades de ocorrência de expansões, como se pode observar na Figura 9.

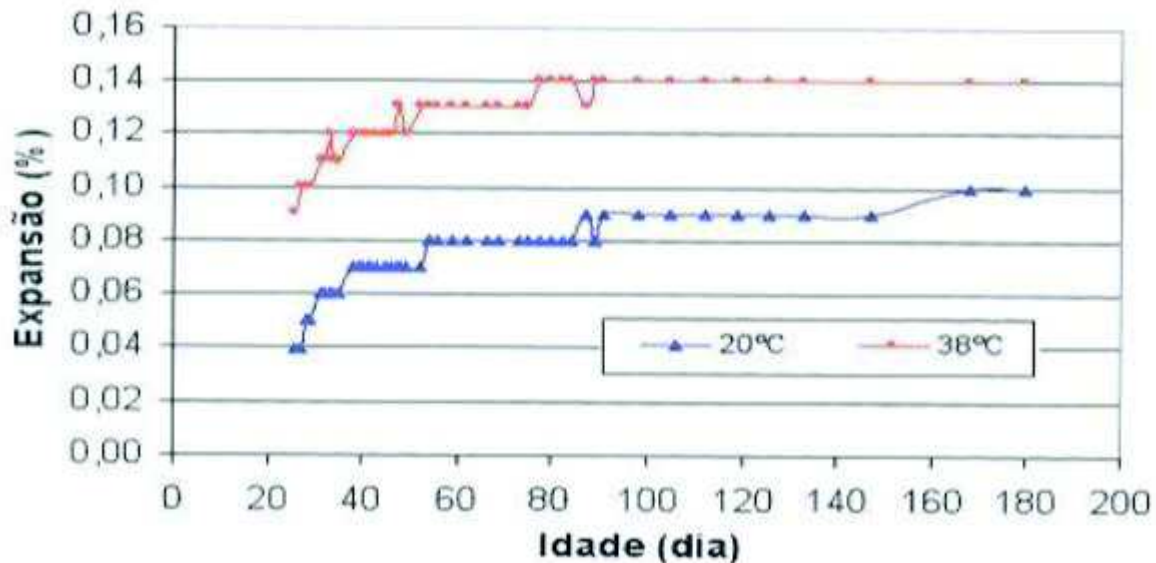
Figura 9 – O efeito da umidade relativa na expansão do concreto.



Fonte: POOLE (1992)

Em relação à temperatura, quanto maior for à mesma, maior será a cinética, pois as reações químicas se intensificam na presença de calor, e consequentemente aceleram as reações de expansão e a formação de gel higroscópico. (ANDRADE, 1997; SILVEIRA, 2006), como ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Relação temperatura e expansão da RAA.



Fonte: HASPARYK (2011)

#### 2.4.2 Relação a/c

Segundo Fournier e Bérubé (2000), concretos com alta relação a/c (maior permeabilidade) permitem a entrada de umidade de forma mais acentuada, aumentando o potencial de expansão criada pela RAA. Quanto menor a relação a/c há maior formação de uma pasta densa, que, conforme Mehta e Aitcin (2014), tornam mais lento o processo de transporte e entrada de água no concreto, reduzindo assim, a umidade relativa e consequentemente as expansões. Já as pastas de cimento com uma relação a/c cimento mais elevadas, ainda conforme os mesmos autores, contém maiores volumes de poros capilares e maiores cristais de produtos de hidratação de cimento, que, apesar de melhorar a estabilidade dimensional do concreto, diminuem a resistência à compressão e aumentam a permeabilidade.

A maior porosidade originada a partir da maior relação a/c no concreto, dispõe de maior espaço físico interno ocasionando capacidade de armazenar maior volume de água intersticial, indispensável para a ocorrência da RAA, e permite que o gel tenha maior espaço físico para expandir antes de iniciar a pressão e fissuração no concreto. Se a porosidade for

baixa, a mobilidade de água e do gel no seu interior é limitada, reduzindo assim a expansão do gel e até mesmo a sua formação. Portanto menor relação a/c reduz a permeabilidade, permite a menor difusão iônica, menor velocidade de reação, aumenta a resiliência e rigidez do concreto. (MADUREIRA, 2007).

#### 2.4.3 Teor de álcalis

O termo álcalis se atribui aos metais alcalinos lítio (Li), sódio (Na), potássio (K), rubídio (Rb), célio (Cs) e frâncio (Fr) do grupo 1º da tabela periódica. Destes elementos alcalinos, apenas sódio e potássio estão presentes no cimento em quantidades significativas, e estes influenciam diretamente no pH do concreto. (SILVEIRA, 2006).

Segundo Roy et al. (2003), a concentração de íons hidroxilas na solução dos poros do concreto é influenciada pela quantidade de teor de álcalis no cimento, sendo que concretos executados com cimentos de baixo teor de álcalis têm concentrações de íons hidroxilas 10 vezes menores que concretos executados com cimento de alto teor de álcalis. Ainda o mesmo autor afirma que o alto pH facilita e acelera a dissolução de certas formas de sílica, o que contribui na formação do gel.

Hobbs (1988 apud TIECHER, 2005), afirma que a quantidade total de álcalis solúveis presente no cimento é representada através da porcentagem equivalente de óxido de sódio que é calculada pela expressão da Equação 6.

$$Na_2O_{equivalente} = \%Na_2O + 0,658(\%K_2O) \quad \text{Equação (6)}$$

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que cimentos com teor de álcalis menor ou igual a 0,60%, geralmente são considerados como não suficientes para causar problemas, independentemente do potencial relativo do agregado. Já a ASTM C 150 (2015) salienta que cimentos com mais de 0,6 % de Na<sub>2</sub>O, são classificados como de alta alcalinidade, e cimentos com menos de 0,6 % de Na<sub>2</sub>O, como de baixa alcalinidade.

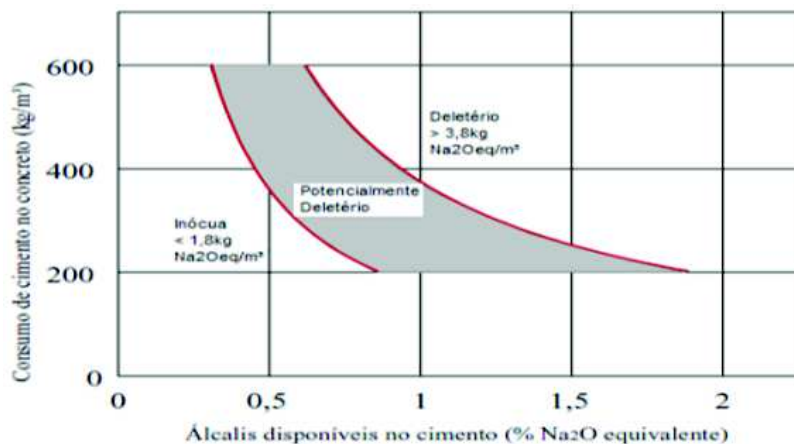
De acordo com Paulon (1981), tem-se adotado o conceito de teor de álcalis por m<sup>3</sup> de concreto, e a concentração alcalina de um concreto depende dos seguintes fatores:

- a) O teor de álcalis do cimento;
- b) Suplemento alcalino promovido pelos agregados;
- c) Consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto;
- d) Consumo de água por m<sup>3</sup> de concreto.

Com base nos estudos realizados por Scanduzzi et al (2001), na África do Sul foram analisadas as expansões em função do teor de álcalis solúveis e do consumo de cimento por  $m^3$  tendo sido estabelecidos os seguintes parâmetros (Figura 11):

- Ocorrência de mecanismos de expansão quando o equivalente alcalino ( $Na_2O$ ) estiver acima de  $3,8kg/m^3$ ;
- Quando o teor de álcalis solúveis estiver entre  $1,8kg/m^3$  e  $3,8kg/m^3$  considera-se potencialmente alcalino podendo ou não ocorrer reações expansivas;
- Quando o teor de álcalis solúveis estiver abaixo de  $1,8kg/m^3$ , não ocorrem reações expansivas.

Figura 11 – Relação álcalis disponível e consumo de cimento no concreto.



Fonte: Oberholster, Van Aardt e Brandt (1983) apud Hasparyk (1999)

Hobbs (1988) nos seus estudos sobre a RAA utilizou várias combinações de concretos com diferentes consumos de cimento e agregados reativos, e concluiu que, as reações deletérias só ocorrem em concretos com teor de álcalis acima de  $3kg/m^3$ . Esta ideia é apoiada por Berubé (2000) que afirma que uma maneira eficiente de minimizar o efeito da RAA é limitar o teor de álcali do concreto em  $3kg/m^3$ , através do baixo consumo de cimento no concreto ou ainda pela substituição de parte do cimento por adições ativas ou inertes.

Porém Swamy (1992) constatou que quando os álcalis são oriundos de fontes externas como sais de degelo, água do mar, água de amassamento, aditivos químicos e pozolanas, a utilização de cimento com baixo teor de álcalis ou redução no consumo de cimento não tem sido eficaz para reduzir expansões.

#### 2.4.4 Agregados

As características do agregado que podem afetar diretamente a ocorrência e desenvolvimento da RAA no concreto são: a granulometria, a estrutura cristalina (composição mineralógica), a granulação, o estado de alterações da deformação sofridas pelas rochas da qual foi extraído. (HASPARYK, 2010; PRISZKULNIK, 2005).

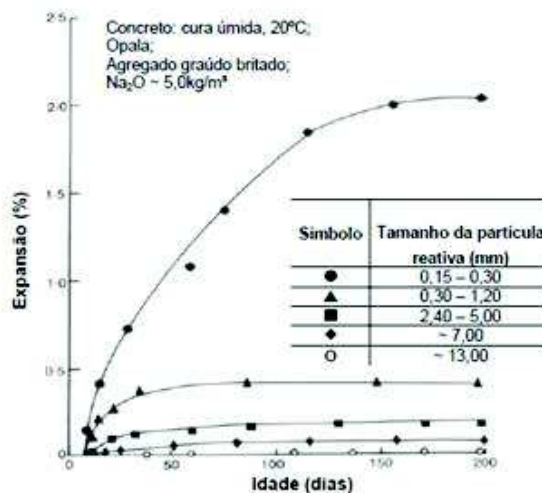
Para Hobbs (1988) o quartzo metamórfico em filitos e gnaisses, vidros naturais e vulcânicos, e certos vidros artificiais (fused sílica e vidro pyrex) são minerais do grupo de sílica que constituem o agregado reativo. Neste caso, a estrutura da sílica se apresenta de forma desordenada podendo dar origem um potencial reativo elevado em presença de álcalis.

Os silicatos são minerais que correspondem a 92% dos minerais da crosta terrestre, na qual se encontra o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), abundante em rochas ácidas (granito) e em areias, possui alta dureza e confere as rochas a resistência à abrasão e à degradação. Conforme Kihara (1993 apud HASPARYK, 2010) a reatividade entre os minerais e os álcalis depende:

- da granulação: quanto mais fino for o agregado, maior a superfície de reação e consequentemente mais reação;
- da estrutura cristalina: quanto mais desordenada e instável for a estrutura, mais reativa se torna;
- do conteúdo da água de cristalização e dos grupos silanol ( $\text{Si OH}$ ).

A ideia de Kihara é sustentada por Valduga (2002) e Hasparyk (2011) que afirmam que quanto mais finas forem as partículas dos agregados, maior será a reação expansiva, pois a superfície em que ocorrem as reações é maior, como se pode observar na Figura 12.

Figura 12 – Influência do tamanho do agregado na expansão do concreto.



Fonte: Hobbs (1988)

Além dos minerais que contêm a sílica, os minerais que pertencem ao grupo dos carbonatos como: a dolomita, a calcita e a Magnesita também participam da reação álcali-carbonato. (TIECHER, 2005). Mehta e Monteiro (1994) afirmam que todos os silicatos e todos minerais da sílica tais como: a sílica hidratada (opala) ou amorfa, tridimita, cristobalita e obsidiana podem reagir com soluções alcalinas do cimento, dependendo do tempo, temperatura e tamanho da partícula. Esta ideia é sustentada pelo estudo realizado por Teacher (2006), onde a partir de uma análise petrográfica, avaliou o comportamento de 40 agregados do sul do Brasil, tendo concluído que todos apresentaram minerais potencialmente reativos em sua composição, tais como: silicatos deformados ou amorfos e feldspatos alcalinos, enquanto que os feldspatos, piroxênios, anfibólios, micas e quartzo, também identificados nos agregados, são considerados minerais não reativos. Na Tabela 2 são relacionados agregados oriundos do Rio Grande do Sul que foram analisados pela autora, mostrando a localização geográfica e as expansões médias obtidas através do ensaio acelerado do ASTM 1260/01.

Tabela 2 – Amostras de agregados do Rio Grande do Sul.

Número da amostra	Cidade	Tipo de agregado para concreto	Expansão média		Classificação		
			16 dias	28 dias	Reativa	Pot. Reativa	Inócua
30	Santa Maria	Areia de Rio	0,36		x		
31	Porto Alegre	Areia de Rio	0,27		x		
32	Erechim	Brita	0,77		x		
33	Montenegro	Brita	0,37		x		
34	Passo Fundo	Brita	0,39		x		
35	B. Gonçalves	Brita	0,25		x		
36	Estrela	Areia de Britagem	0,35		x		
37	Itaara	Brita	0,22		x		
38	Flores da Cunha	Brita	0,74		x		
39	Porto Alegre	Brita	0,11	0,19		x	
40	Vacaria	Brita	0,36		x		

Fonte: adaptado de Tiecher (2006)

Pode-se observar na Tabela 2 que as amostras de número 32 e 38 apresentam maiores expansões na ordem de 0,77 e 0,74% respectivamente.

A ASTM C-1260 (2014), classifica os agregados como inócuos, aqueles que têm expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias; inócuos ou deletérios os que possuem comportamento de expansão entre 0,10 e 0,20% aos 16 dias; e deletérios aqueles que têm expansões superiores a 0,20%. A norma esclarece que no caso do agregado apresentar



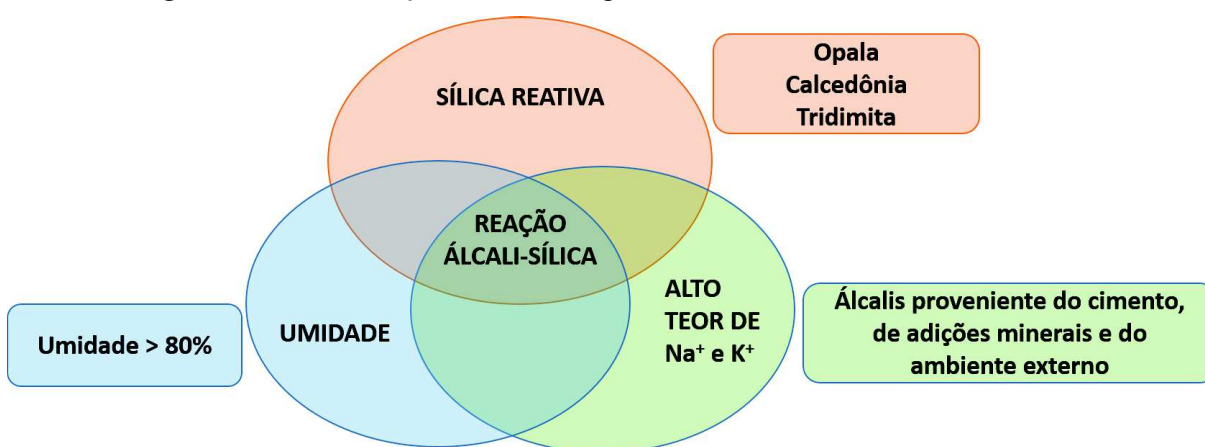
comportamento inócuo ou deletério, será necessário prosseguir com o ensaio até 30 dias, para obtenção de informações auxiliares, quanto ao real comportamento do agregado.

A NBR 15577-4 (ABNT, 2008) também se assemelha a ASTM C-1260 (2014), ao classificar os agregados como deletérios quando a expansão é igual ou superior a 0,19% aos 30 dias de ensaio, e inócuos quando a expansão aos 30 dias for inferior a 0,19%.

A ASTM C-1260 (2014) e a NBR 15577-4 (ABNT, 2008), sugerem o uso de outras técnicas de ensaio com o intuito de complementar os resultados observados e obter maior certeza na classificação do agregado.

De uma forma sucinta sobre fatores que influenciam na RAA, Owsiak, et al. (2015) na sua pesquisa sobre diagnóstico de estruturas de concreto devido à reação álcali-agregado, salientam que para a ocorrência da reação álcali-agregado em concreto, é necessário que haja combinação dos seguintes fatores: agregado contendo sílica reativa, a solução de poros do concreto deve ter um elevado teor de íons sódico e potássico, e deve haver uma umidade suficiente dentro do concreto (maior que 80%), como ilustra a Figura 13.

Figura 13 – Combinação de fatores que influenciam a ocorrência da RAA.



Fonte: Owsiak, et al. (2015)

Apesar de estes fatores influenciarem significativamente na ocorrência e expansão da RAA, vários autores são unânimes em propor alternativas de mitigar a tal ocorrência, como descreve o item 2.5.

## 2.5 Mitigação da RAA

Dentre vários métodos de mitigação da RAA em concretos, destacam-se a diminuição de teor de álcalis em cimentos e o emprego de pozolanas como adição mineral, tanto em cimentos como em concretos. Munir et al. (2016), as diferentes possibilidades que podem ser

adotadas como solução para mitigar a RAA são: o emprego de cimentos de baixo teor de álcalis, uso de adições minerais como a escória granulada de alto-forno, argila calcinada, cinzas volante, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana e sílica ativa.

### 2.5.1 Tipos de mitigação da RAA.

#### a) Cimentos com baixo teor de álcalis

No item 2.4.2 referenciou-se que quanto maior for a quantidade de álcalis no cimento, maior será o pH do concreto, pois a quantidade de ions hidroxilas na solução dos poros do concreto é influenciada pela quantidade de teor de álcalis no cimento. Neste contexto, pode-se mitigar a ocorrência de expansões em concreto com o uso de cimentos com teor de álcalis menor ou igual a 0,60% de equivalente alcalino.

#### b) Uso de adições minerais

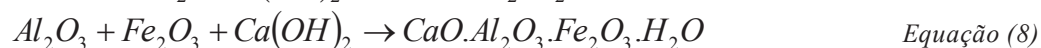
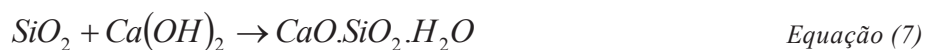
As adições minerais com base na sua ação físico-química são geralmente classificadas em três grupos: material pozolânico, material cimentante e filler. As adições minerais, além de reduzir o consumo de energia durante a produção de cimento ou concreto, reduzem a poluição e contribuem na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, pois modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada, contribuindo na diminuição do calor de hidratação. (DAL MOLIN, 2011). Dos grupos mencionados, as pozolanas são as adições preferidas para a produção de concretos de maior durabilidade e na mitigação da RAA devido na sua composição química ser constituída de alumina, sílica e óxido de ferro, conforme a sua origem, o que contribui para um material de alto potencial pozolânico.

Munir et al. (2016) salientam que por razões econômicas ou de dificuldade de encontrar agregados não reativos, pode-se optar em misturar os agregados reativos e não reativos permitindo assim uma redução de sua expansão.

### 2.5.2 Ação das pozolanas

Dal Molin (2011), NBR 12653 ABNT (2014), Mehta e Monteiro (1994), definem material pozolânico como sendo material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando finamente moído e na presença de água, à temperatura ambiente, desencadeia reações químicas com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com propriedades cimentícias.

Muitas pozolanas contêm expressivas quantidades de outros constituintes além da sílica e alumina tais como, óxidos de ferro e álcalis, que são outros constituintes que também reagem com o hidróxido de cálcio e álcalis (Na e K), formando componentes complexos. Estes exibem características ligantes como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato hidratado de cálcio (C-A-H), sílico-aluminato hidratado de cálcio (C-A-S-H), ferro aluminato hidratado de cálcio (C-A-F-H) e sulfoaluminatos de cálcio hidratado (monossulfoaluminato e trissulfoaluminato), formados a partir do  $C_3A$ , ou sulfoaluminatos com substituição parcial do alumínio pelo ferro, formados pela hidratação do  $C_4AF$  (ACI 232, 1994; MONTANHEIRO et al., 2011). Portanto a reação da pozolana com hidróxido de cálcio pode resultar em silicato de cálcio hidratado ou ferro aluminato hidratado de cálcio contribuindo na diminuição da porosidade e aumentando a resistência conforme as equações 7 e 8:



As vantagens do uso de pozolanas na reação com hidróxido de cálcio são: reduzir o calor de hidratação em pastas de cimento ou concreto, melhorar a trabalhabilidade, aumentar resistência à compressão aos 28 dias, aumentar a resistência ao ataque de sulfatos, aumentar a durabilidade em meios agressivos, impermeabilizar e reduzir os impactos ambientais, reduzir o aparecimento de eflorescências e diminuir as expansões decorrentes das reações álcali-agregado. (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Outros benefícios não menos importantes do uso das pozolanas são: melhorias quanto ao aumento da resistividade elétrica, redução dos custos de energia e da produção do cimento, redução das emissões de  $CO_2$ , e preservação de matérias primas e de fontes não renováveis de combustíveis, além de reciclagem de subprodutos de outros processos industriais. (MUNHOZ, 2007).

O desempenho da atividade pozolânica, além de ser influenciado pela qualidade e quantidade de fases amorfas presente em sua estrutura, depende também da composição química e granulométrica, área superficial específica, da textura (forma e tamanho do grão), densidade e da relação a/c. (MEHTA, 1987).

No que se refere à área superficial específica, quanto maior for a mesma, maior será o potencial da reação pozolânica. Portanto, se a substituição do cimento por pozolana for em teores elevados e com uma maior área específica, pode aumentar o consumo de água (relação a/c maior que 0,5) na busca de consistência ideal, fazendo com que a quantidade de poros da matriz predomine sobre a atividade pozolânica, reduzindo seu efeito. Como forma de reduzir o consumo de água, mediante uma alta relação a/c, podem-se empregar aditivos

superplastificantes. (VIEIRA, 2005). Em relação à granulometria, ocorre dificuldade das reações pozolânicas quando o material apresentar dimensão média de partículas elevada. Portanto é necessário diminuir o tamanho médio dos grãos mediante um processo de moagem.

A NBR 12653 ABNT (2014) classifica os materiais pozolânicos quanto à origem em: naturais (de origem vulcânica ou sedimentar), e artificiais (provenientes de tratamento térmico como é o caso das argilas calcinadas ou provenientes de subprodutos industriais, cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa). A mesma norma também classifica as pozolanas em:

- a) Classe N - pozolanas naturais ou artificiais, como materiais vulcânicos, cherts silicosos, argilas calcinadas e outras;
- b) Classe C - cinzas volantes obtidas através de queima de carvão mineral;
- c) Classe E - quaisquer pozolanas que não se enquadram nas classes N e C.

A NBR 12653 (2014) esclarece que os requisitos físicos e químicos devem ser atendidos para que um material possa ser utilizado como uma pozolana, mediante a sua classe. As características físicas são: a granulometria, índice de desempenho da pozolana com cimento e a atividade pozolânica com a cal, como são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos físicos de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3*
Índ. de desempenho com cim Portland, 28d	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	ABNT NBR 5752
Ativ. pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

\* Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partícula

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014, p.04)

Em relação às características químicas, a norma estabelece que devem ser analisadas a soma de sílica, alumina, óxido de ferro, perda ao fogo, teor de umidade, entre outros, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Alcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico  
Valores em porcentagem (%)

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014, p.03)

Estudos mostram que o conteúdo de hidróxido de cálcio diminui de 2,2 para 0,7 % em concreto feito com cimento portland com 40 % de adição de pozolana em comparação com o concreto preparado com cimento Portland puro ( Lea 1971) , o que indica um conteúdo maior de C-S-H e outros produtos de hidratação com baixa porosidade. (MEHTA 1987 apud ESPINOZA-HIJAZIN, 2012).

Quanto a origem a NBR 12653 (2014) classifica as pozolanas em naturais e artificiais. O primeiro tipo de pozolana é de origem vulcânica de caráter petrográfico ou de origem sedimentar com atividade pozolânica; o segundo proveniente de tratamento térmico (argilas calcinadas) ou produtos industriais com atividade pozolânica, como a cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa. Tanto materiais naturais como artificiais podem necessitar de um processamento adicional como a britagem ou a moagem para adquirirem potencial pozolânico para uso em cimento e concreto. (DAL MOLIN, 2011).

A cinza volante é um tipo de pozolana obtido a partir da queima de carvão mineral pulverizado em usinas termoeletricas a temperatura entre 1200 e 1600° C. As características químicas e morfológicas dependem das condições de queima e os minerais associados ao carvão mineral que, por sua vez, influenciam nas propriedades tecnológicas da mesma quando adicionadas ao concreto. A cinza volante é composta principalmente por silício, alumínio, ferro, cálcio e magnésio e as suas partículas são tipicamente esféricas. (DAL MOLIN, 2011). Devido a sua composição química ser formada na sua maioria por sílica, alumina e óxido de ferro, a cinza volante possui certas propriedades pozolânicas, sendo utilizada como adição ou substituição parcial ao cimento ou em concreto. (DAL MOLIN, 2011).

Munir et al. (2016) afirmam que a utilização de cinza volante até 30% em substituição parcial do cimento é eficaz na redução das expansões devidas a RAA.

A sílica ativa é um tipo de pozolana resultante do processo de fabricação de ferro-silício e silício-metálico em grandes fornos elétricos com temperaturas acima de 2000°C. Possui partículas na sua maioria com diâmetro menor que 1  $\mu\text{m}$ , mais finas que as partículas

do cimento ou de cinza volante. O elevado teor de sílica na sua composição, confere à sílica ativa, altas propriedades pozolânicas, podendo contribuir na durabilidade do concreto e na redução das expansões da RAA numa substituição parcial do cimento. (MUNIR et al., 2016).

De acordo com Pradhan et al. (2014) a sílica é um material pozolânico que quando adicionado em substituição parcial do cimento melhora as propriedades do concreto por ser constituída principalmente por partículas muito finas e com alto teor de sílica.

A cinza de casca de arroz é um resíduo obtido a partir da combustão da casca de arroz comumente usada pelas indústrias beneficiadoras do mesmo como fonte na geração de calor e vapor capaz de contribuir na secagem dos grãos de arroz. (DAL MOLIN, 2011). A casca de arroz contém aproximadamente 20% de sílica, 50% de celulose e 30% de lignina, sendo que o silício contido na casca de arroz apresenta geralmente uma forma amorfa hidratada de sílica, com uma estrutura similar ao vítreo. (DAL MOLIN, 2011).

O potencial pozolânico da cinza de casca de arroz depende do processo controlado de combustão, sendo que o estado amorfo é adquirido com temperaturas entre 500 a 700° C. Durante a combustão, a lignina e a celulose podem ser removidas em torno de 20% da massa da casca é convertida em cinza, adquirindo uma estrutura porosa com maior superfície específica e com uma quantidade de sílica de 85%. (DAL MOLIN, 2011).

De acordo com Jimil (2013) e Zain (2011) o uso da cinza de casca de arroz em cerca de 20% em substituição do cimento reduz as expansões da RAA e aumenta a resistência e a durabilidade do concreto.

A escória granulada de alto-forno é um resíduo obtido na produção de ferro gusa em altos-fornos. A escória de alto-forno adquire o estado amorfo e potencialmente reativo quando o resfriamento for brusco, normalmente realizado com jato de água sob alta pressão, ocasionando a ausência de formação de cristais. (DAL MOLIN, 2011).

Para Wapda (2004) e Hassan (1987) o uso da escória entre 30 a 40% na substituição parcial do cimento reduz a expansão da RAA e o calor de hidratação do cimento gerado em concreto de massa. Os principais compostos da escória granulada de alto-forno são a sílica, o óxido de cálcio, alumina, óxido de magnésio e óxido de ferro.

Tendo em vista a proposta do trabalho, argilas calcinadas são descritas de forma mais detalhada no item 2.6.

### 3 ARGILAS CALCINADAS

Para o melhor entendimento do comportamento das argilas calcinadas empregadas como pozolanas, neste item são abordados os diferentes tipos de argilas e suas características, a influência da temperatura na ativação, o efeito das argilas no concreto e na mitigação da RAA.

#### 3.1.1 Argilas

Argila é um material natural, terroso composto de partículas (argilominerais) com possibilidades de possuir impurezas e quando adicionada a água em quantidade ideal, desenvolve propriedades plásticas, e endurece após a secagem, podendo adquirir resistência mecânica ao longo do processo de queima em elevadas temperaturas. (SANTOS,1989; MEIRA, 2001; PUREZA, 2004 apud SEBASTIANY, 2014).

SANTOS (1989) informa que as argilas são constituídas fundamentalmente por partículas cristalinas, muito pequenas composta por argilominerais que, por sua vez, estes são compostos quimicamente por silicatos hidratados de alumínio e ferro com certo teor de elementos alcalinos e alcalino-terrosos.

As argilas, além de serem compostas fundamentalmente por argilominerais, também são constituídas por certos minerais como quartzo, feldspato, mica piritita e hematita. (KAZMIERCZAK, 2010). As principais propriedades dos compostos presentes na argila são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades dos principais constituintes da argila.

Elementos	Principais propriedades
Alumina	Propicia estabilidade dimensional em temperaturas elevadas.
Carbonato e sulfato de cálcio e magnésio	Resultam em expansão volumétrica, agem como fundentes.
Matéria Orgânica	Resulta em retração, fissuras durante o processo de sazonalidade e queima, e diferenças de coloração em um mesmo componente cerâmico.
Sílica livre	Diminui a retração durante os processos de sazonalidade e queima, reduz a plasticidade da argila.
Silicatos e fosfatos	São fundentes, alguns aumentam a resistência da cerâmica.
Sais solúveis	Propiciam o aparecimento de eflorescências nos componentes cerâmicos.

Fonte: Kazmierczak (2010)

Segundo Kazmierczak (2010) os argilominerais encontram-se divididos em três grupos: a caulinita, a ílita e montmorilonitas, sendo que a caulinita utilizada na fabricação de materiais refratários, enquanto que a ílita e a montmorilonitas são mais apropriadas para a fabricação de cerâmicas vermelhas.

No estudo comparativo entre os três grupos de argilominerais realizado por Fernandez, Martiren e Scrivener (2010) concluiu-se que a argila caulinita calcinada apresenta maior reatividade, seguida das montmorilonitas, ao passo que a ílita calcinada se apresentou como um material inerte de enchimento.

Esta ideia é confirmada por Tironi et al. (2013) onde confirmaram que as argilas caulinitas quando são ativadas termicamente possuem um potencial pozolânico, após o processo adequado de moagem.

Além de possuir quartzo e muscovita, caulinita é constituída majoritariamente por sílica e alumina, o que confere ao metacaulim um material com maior potencial pozolânico. Esta ideia é sustentada por Trusilewicz (2012), que afirma que as argilas caulínicas calcinadas (Metacaulim) são quimicamente compostos na sua maioria por óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o que confere um material de elevada pozolanicidade. A argila íltica é utilizada principalmente na produção de produtos da cerâmica vermelha como, por exemplo, blocos, tijolos, telhas, tabelas, e é rica em óxido ferro e de potássio na sua composição.

Amorim et al. (2000) e Jimenéz et al. (2013), salientam que o potencial da atividade pozolânica da cerâmica vermelha é diretamente proporcional ao aumento da área superficial específica, para tanto, devem passar por uma moagem; pois devido ao seu tamanho original, sua composição química, a cerâmica vermelha apresenta pouca atividade pozolânica. A temperatura e o tempo de queima também são outros fatores que influenciam na atividade pozolânica da cerâmica vermelha. A densidade das argilas calcinadas varia entre  $2,40 \text{ g/cm}^3$  e  $2,61 \text{ g/cm}^3$  e a finura Blaine, entre  $650 \text{ m}^2/\text{kg}$  e  $1350 \text{ m}^2/\text{kg}$ . (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

Devido ao seu melhor desempenho no concreto e maior disponibilidade de matéria prima, em algumas zonas do Brasil o resíduo da cerâmica vermelha tem sido proposto como material pozolânico. (GONÇALVES, 2005; SEBASTIANY, 2014).



### 3.1.2 Efeito da temperatura de calcinação nas propriedades das argilas

As argilas contêm elevadas quantidades de sílica e alumina, mas possuem uma estrutura cristalina. (MITROVIC, 2011). No entanto, devido ao processo térmico à que são submetidas, a estrutura cristalina é destruída e se obtém uma estrutura quase amorfa ou amorfa.

Cordeiro e Désir (2010) no seu estudo mostraram que a temperatura de queima influencia na reatividade das argilas, devido ao grau de desordem cristalina do material. No mesmo estudo, os autores salientam que o maior pico da atividade pozolânica da argila estudada foi alcançada com a temperatura de 650° C e o menor com 900° C.

Ao estudar o efeito de diferentes temperaturas de calcinação na atividade pozolânica de argilas ílticas, cujo tempo de calcinação foi de 1 hora, Kubiliüté (2013) obteve o melhor desempenho com uma temperatura de 600°C, e quando houve aumento da temperatura de 700°C a 900°C, registrou-se uma diminuição da atividade pozolânica.

Os estudos de Kubiliüté (2013) confirmam as observações de Dal Molin (2011), que afirma que nas argilas caulínicas, quando submetida a temperaturas que variam entre 600°C e 900°C, os íons hidroxilas são retirados da estrutura cristalina, ocorrendo a destruição do arranjo atômico, resultando em um composto não cristalino e instável quimicamente designado por metacaulinita ( $Al_2Si_2O_7$ ) que influencia na atividade pozolânica do material. Mas, quando o mesmo tipo de argila é submetido a temperaturas acima de 900° C, são formados compostos cristalinos estáveis e sem nenhum potencial pozolânico.

### 3.1.3 Efeito das argilas calcinadas no concreto

Usando o método do Frattini, na avaliação da pozolanicidade da argila calcinada, Tironi (2013) identificou um consumo considerável de  $Ca(OH)_2$  aos 28 dias, empregando 30% em substituição ao cimento. O autor atribuiu este desempenho à presença de aluminatos na sua composição, observando ainda que a resistência à compressão aumentou aos 28 dias em relação à referência.

Yazici et al. (2014) avaliaram a resistência das argamassas face ao ataque do sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ) e absorção de água por capilaridade numa substituição de cimento por metacaulim em 0, 5, 10, 15 e 20%, tendo concluído que as argamassas com substituição de 10, 15 e 20% tiveram melhores resultados, e o pior desempenho foi alcançado com argamassa de referência, sem nenhuma substituição.

A influência do teor de metacaulim, em substituição ao cimento, nas propriedades do concreto também foi investigada por Agredo et al. (2011). Os autores, tendo substituído cimento por metacaulim em 10%, 20% e 30%, concluíram que as substituições nos teores de 10% e 20% melhorou consideravelmente a resistência à compressão, a absorção de água (sucção capilar) e a permeabilidade à íons cloretos.

Para Bahiense (2012) e Labrincha e Morelli (2012), a incorporação de argila calcinada obtidos na forma de RCV, em substituição ao cimento em 15%, melhora a resistência à compressão do concreto e oferece melhores benefícios ambientais.

No estudo desenvolvido por Poll-legrá et al. (2015) onde se compararam a resistência à compressão de argamassas confeccionadas com argilas calcinadas a 650 e 750°C, numa substituição de 30% de cimento, as argamassas confeccionadas com argilas ativadas a temperatura de 750°C apresentaram maior resistência devido a maior atividade pozolânica da mesma, pois nessa temperatura ocorre a desidratação química, o que provoca uma elevada desordem estrutural.

#### 3.1.4 Emprego de RCV como adição mineral

Segundo Kazmierczak (2010) a cerâmica vermelha é um material com coloração avermelhada obtida a partir de uma massa a base de argila principalmente íltica. Para a obtenção da cerâmica, a mesma é submetida a um processo de secagem lenta com finalidade de retirar grande parte de água presente no material e posteriormente sinterizada em temperaturas relativamente elevadas. Os materiais a base da cerâmica são: tijolos, blocos, elementos vazados, tabelas, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas, bem como utensílios de uso doméstico e adorno. A cerâmica vermelha recebe o nome de resíduos aos fragmentos normalmente de blocos, tijolos, telhas, lajotas durante o processo de fabricação, transporte, rejeito ou demolição de um empreendimento.

A cerâmica vermelha com melhor composição química se torna potencialmente reativa, ou seja, adquire o estado amorfo instável durante o processo de queima onde surgem alterações físico-químicas irreversíveis, sendo que até 150°C ocorre a evaporação da água livre, de 150°C até 600°C ocorre a perda de água adsorvida, posteriormente ocorrem vários processos como a desidratação química, a decomposição da matéria orgânica e a oxidação, e finalmente entre 800 e 1100°C ocorre a vitrificação da argila; provocando a destruição da sua estrutura cristalina. (KAZMIERCZAK, 2010). Quando combinados com hidróxido de cálcio e

água, iniciam reação pozolânica formando compostos de alta resistência e durabilidade. (MURAT 1983; VEJMEJKOVÁ et al., 2012).

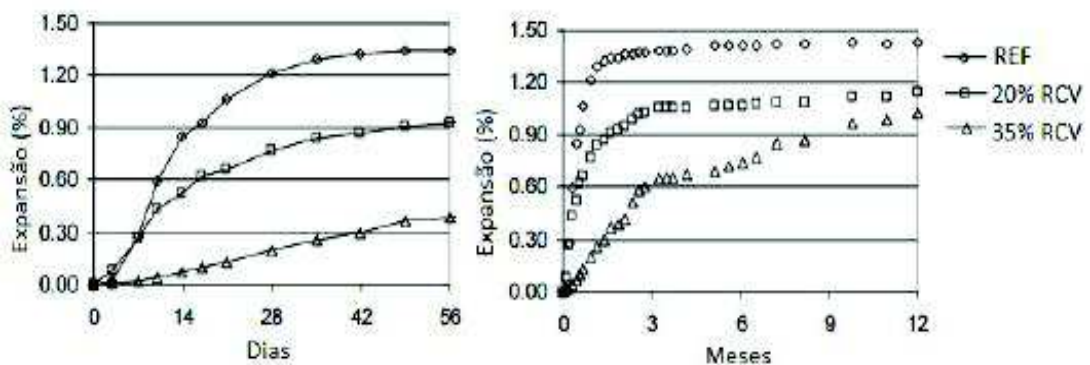
### 3.1.5 Mitigação da RAA com emprego de argila calcinada

Para Lerch (1950), uma substituição de cimento por argila calcinada num teor de 15%, pode mitigar a RAA.

No seu estudo sobre influência do metacaulim na durabilidade e propriedades químicas nas argamassas, Yazici et al. (2014) substituíram cimento por metacaulim em proporções de 0, 5, 10, 15 e 20% constataram que, embora todas as argamassas com substituição parcial do cimento por metacaulim tenham apresentado menor expansão em relação a referência, somente as argamassas de 15 e 20% de substituição obtiveram expansões inferiores a 0,1%.

Bektas et al. (2007) substituíram 20 e 35% de cimento por resíduos da cerâmica vermelha, mediante o uso da ASTM C1260 ao longo de 56 dias e 12 meses. Os autores constataram que a substituição de 35% apresentou menor expansão que 20%, não obstante as duas substituições tenham reduzido o percentual de expansões em relação a referência, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Curvas de expansão de substituição de cimento por RCV.



Fonte: Bektas et al. (2007)

A mesma tendência de comportamento observada por Bektas et al. (2007) foram observadas por Poursaee (2015), quando pesquisou a substituição de 10, 25 e 50% de cimento por RCV moído, tendo mostrado a redução das expansões em 31%, 67% e 95%, respectivamente, em relação à amostra referência.

Portanto, pode-se afirmar que numa substituição que varia entre 10 a 30% de cimento por argila calcinada com melhor composição química e potencial pozolânico, mediante um controle efetivo da calcinação e moagem, pode mitigar as expansões resultantes da RAA em concreto.

De acordo com Wong e Razak (2005), a adição de metacaulim em substituição parcial do cimento aumenta a resistência à compressão, reduz o pH, permite menor concentração de íon hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) na solução dos poros e reduz a permeabilidade de pastas e concreto. Em relação a temperatura de calcinação, Medina (2011) afirma que o metacaulim quando é ativado a temperaturas superiores a  $900^\circ\text{C}$ , tende a cristalizar-se, e quando temperatura for de  $650$  a  $850^\circ\text{C}$  adquire estado amorfo. A finura do metacaulim tem grande influência na resistência à compressão nas primeiras idades, e pouca influência em idades superiores a 90 dias (WILD et al., 1997).

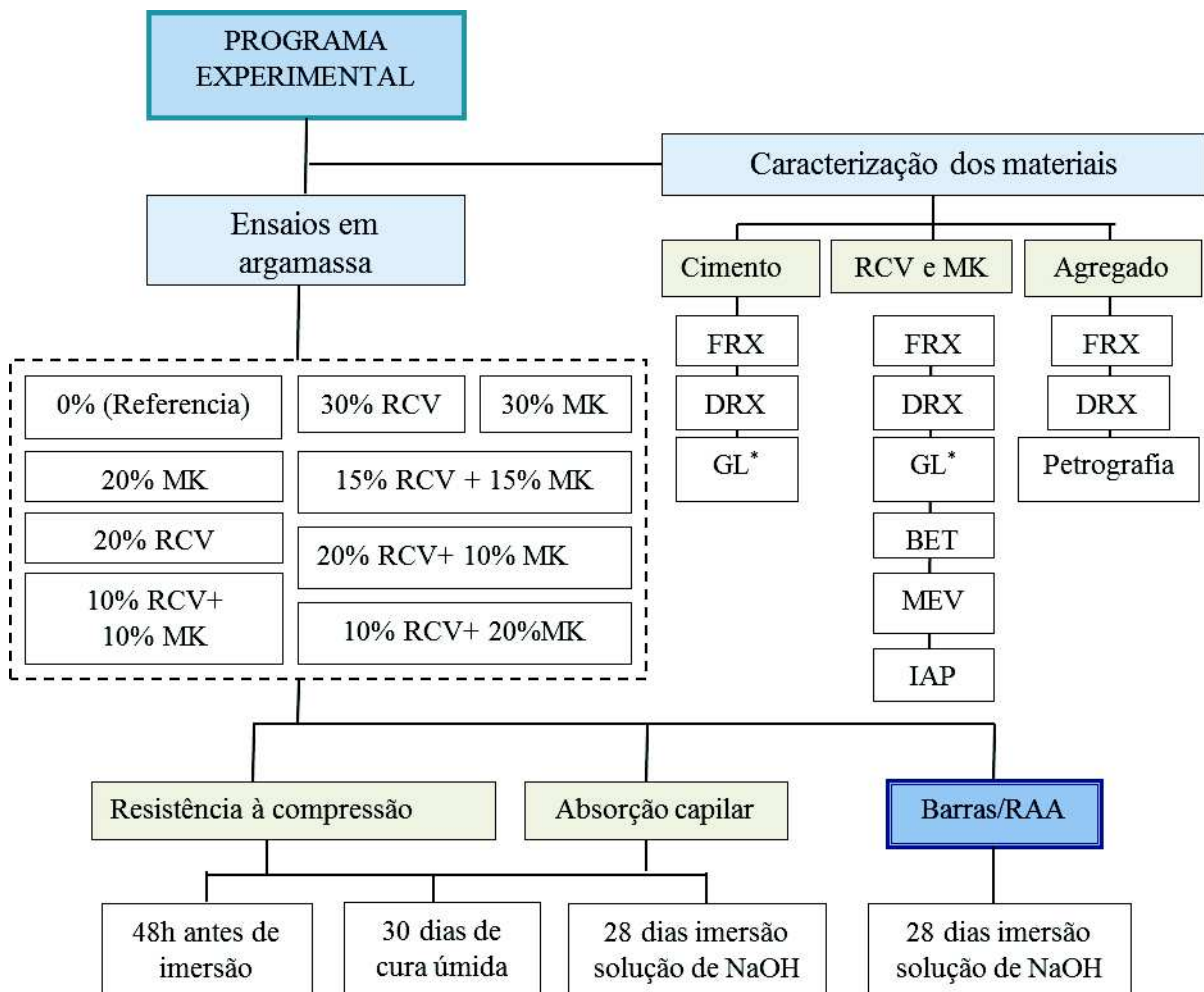
Cunha et al., (2010), realizaram estudo da reação álcali-agregado tendo substituído parcialmente cimento por metacaulim em teores de 5, 10, 15 e 20%, concluiu que o teor mínimo de substituição para a mitigação da RAA conforme a ASTM C (1567) é de 13%, sendo que teores inferiores a 13%, as expansões situam-se acima de 0,10%. Munhoz (2007) também avaliou a reação álcali-agregado numa substituição de 5, 10, 15 e 20%, tendo concluído que teores acima de 15% são adequados para mitigar a RAA.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi desenvolvido com a finalidade de alcançar os objetivos propostos na pesquisa, através de técnicas de análise e seleção dos materiais com o intuito de analisar a influência do resíduo da cerâmica vermelha e do metacaulim na mitigação da reação álcali-agregado, levando-se em consideração variáveis de resposta, fatores fixos e fatores de controle.

A pesquisa consiste na caracterização primeiramente do cimento, do agregado, das pozolanas (resíduo de cerâmica vermelha e metacaulim) e posteriormente na investigação da reatividade álcali-agregado (método de barras de argamassa) e avaliação da eficiência das adições minerais), e determinação da resistência à compressão e absorção de água. A Figura 15 apresenta de forma resumida os ensaios.

Figura 15 – Etapas do programa experimental



RCV - resíduo de cerâmica vermelha; MK – metacaulim; GL\* - Granulom à laser

#### 4.1 Planejamento dos experimentos

A Tabela 6 apresenta os principais fatores fixos, de controle, não controláveis e fatores de resposta do programa experimental proposto.

Tabela 6 – Principais fatores do planejamento experimental.

Fatores fixos	Fatores de controle	Fatores não controlados	Variáveis de resposta
-Traço (1:2, 25) e relação a/c (0,47);	-Tipo de pozolana;		- Expansões de barras de argamassa;
-Tipo de agregado;	- Teor de pozolana;	- Temperatura e umidade ambiental durante a produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova	- Resistência à compressão;
-Tipo de cimento (CPV-ARI).	-Condição de cura (para compressão e absorção de água);		- Absorção total de água;
			- Porosidade capilar;
			- Porosidade total.

Fonte: Elaborado pelo autor

A combinação do tipo de pozolana e o teor de substituição em porcentagem, resultou nove combinações apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Combinações de teor de substituição.


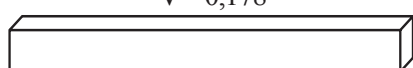
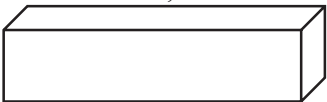
METACAULIM	POZOLANA	RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA				
		0%	10%	15%	20%	30%
	0%	X			X	X
	10%		X		X	
	15%			X		
	20%	X	X			
	30%	X				

Fonte: Elaborado pelo autor

No ensaio de resistência à compressão foram considerados três idades de cura: 48h antes de imersão, 28 dias de imersão em NaOH a temperatura de 80° C e 28 dias em cura

úmida submersa em solução saturada de cal. Para cada mistura foram moldados 6 corpos de prova, totalizando 162 CPs. No ensaio de absorção também foram considerados as mesmas idades, com três corpos para cada mistura, totalizando 81 CPs. Enquanto que no ensaio de barras de argamassa, para cada mistura foram moldados 3 corpos de prova, totalizando 27 CPs imersos em NaOH, como descrito na Tabela 8.

Tabela 8 – Números de corpos de prova em função do método de ensaio e tipo de mistura.

Método de ensaio	Idade de ensaio	Nº corpos de prova	Volume (dm <sup>3</sup> ) e Dimensões do CP	Volume total (dm <sup>3</sup> )
Resistência à compressão ( $f_c$ )	48h em cura úmida	6x9=54	$V=0,196$  $\text{Ø}=50 \text{ mm}, h=100 \text{ mm}$	31,7
	28 dias imersão em NaOH	6x9=54		
	28 dias em cura úmida	6x9=54		
Barras de argamassa	30 dias imersão em NaOH	3x9=27	$V=0,178$  $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$	4,8
Absorção de água	48h antes de imersão	3x9=27	$V=0,256$  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$	20,7
	28 dias após a imersão em NaOH	3x9=27		
	28 dias em $\text{Ca}(\text{OH})_2$	3x9=27		
Total		270		57,3

## 4.2 Materiais

Neste item são apresentados as origens, os processos de beneficiamento e caracterização do cimento, MK, RCV e agregado.

### 4.2.1 Cimento e adições minerais

O cimento utilizado para a realização de experimentos foi CP V-ARI, para melhor garantir o monitoramento e análise do comportamento do resíduo da cerâmica vermelha e do metacaulim na mitigação de RAA, pois este cimento pode possuir até 5% de filer. Devido sua importância para RAA, como descrito no referencial teórico, foi analisado o equivalente alcalino.

O resíduo da cerâmica vermelha utilizado neste trabalho, em substituição parcial do cimento, foi originado a partir de blocos cerâmicos coletados de um mesmo lote de produção como resíduo, no Vale do Caí (rio Caí), na cidade Feliz, RS. O tipo de argila usado na produção de blocos é íltica e a temperatura de queima dos mesmos não foi monitorada. Alguns dos fatores que determinam o processo de vitrificação da argila são: a temperatura de queima, a porcentagem e proporção dos óxidos alcalinos bem como a sua procedência mineralógica. O metacaulim utilizado nesta pesquisa foi adquirido comercialmente de cor cinza.

Para obtenção do RCV, após coleta, os blocos passaram por um processo de moagem em um britador de mandíbulas, no Laboratório de Construção Civil (LCC) da Unisinos. Em seguida os fragmentos passaram por um moinho de rolos no Laboratório de Materiais de Construção (LMK), com distância entre rolos de 3 mm. Na sequência foi feita a moagem do resíduo em um moinho de bolas de alumina (Figura 16). A proporção usada para a moagem em cada lote foi de 3kg de bolas de alumina de 2cm de diâmetro para 1,5 kg de resíduos de cerâmica.

Figura 16 – Moinho de bolas.



Fonte: Registrado pelo autor

Para a definição do tempo de moagem, para cada intervalo de tempo, foi coletada uma amostra, caracterizando-as na peneira de nº 200 (malha de abertura de 75  $\mu\text{m}$ ), na qual objetivava-se que 100% do material fosse passante, e na peneira nº 325 (malha de abertura de 45  $\mu\text{m}$ ), onde a meta era atingir um teor retido máximo de 20%, como preconiza a ABNT NBR 12653 (2014). Foi necessário moer por 4 horas para se obter um teor inferior a 20% retido na peneira nº 325.



Definido o tempo de moagem de 4 horas, o material foi moído em 6 lotes e cada lote foi amostrado em 75 g para fins de controle por peneiramento. A média dos 6 lotes retornou um teor retido de 18,66% de material na peneira nº 325 (Tabela 9).

Tabela 9 – Resultados da moagem de blocos cerâmicos coletados no Vale do Caí.

Tempo/porção	Passante (%)	Retido (%)	Passante (%)	Retido (%)
	75 µm	75 µm	45 µm	45 µm
2h	87,46	12,54	58,66	41,3
3h	94,9	5,1	73,73	26,26
4h-1ª porção	97,6	2,4	82	18
4h-2ª porção	98,66	1,33	82,4	17,6
4h-3ª porção	98,4	1,6	80,53	19,46
4h-4ª porção	98,4	1,6	81,2	18,8
4h-5ª porção	98,53	1,46	80,4	19,6
4h-6ª porção	97,73%)	2,26	81,46	18,5
Média dos lotes 1 a 6			81,34%	18,66%

Fonte: Elaborado pelo autor

#### a) Caracterização química

O ensaio de Fluorescência de raios X (FRX) por dispersão de energia foi utilizado para determinar a composição química do cimento e das adições minerais. A análise do cimento por FRX foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (LCV Mat) da Unisinos, enquanto que as análises do RCV e MK foram realizadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A Tabela 10 apresenta a composição química quantitativa por FRX, em óxidos, do cimento, RCV e MK.

Tabela 10 - Composição em óxidos, por FRX, do cimento, RCV e MK

Parâmetro	Cimento	RCV	MK
	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,50	20,99	33,87
SiO <sub>2</sub>	14,89	60,09	59,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,41	13,19	2,2
MgO	3,20	0,88	1,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,05	0,19
SO <sub>3</sub>	2,17	ND	0,03
K <sub>2</sub> O	0,74	0,94	2,66
Na <sub>2</sub> O	1,16	0,14	0,04
CaO	57,26	0,86	0,11
TiO <sub>2</sub>	0,20	1,70	1,1
MnO	0,04	0,20	ND
Perda ao Fogo	2,99	1,26	2,66

ND- Não determinado

Fonte: Elaborado pelo autor

A NBR 12653 (2014) estabelece que o valor do equivalente alcalino não exceda a 1,5%. Já a NBR 15577-4 estabelece que o equivalente alcalino do cimento padrão deve estar entre  $(0,90 \pm 0,10)\%$ . Como referenciado no item 1.4, o equivalente alcalino do cimento utilizado nesta pesquisa é de 1,65%, superior ao máximo exigido pelas duas normas. Portanto, espera-se que o cimento influencie na concentração de íons hidroxilas na solução dos poros das argamassas.

A Tabela 11 apresenta a análise dos resultados das características químicas do MK e RCV em função dos requisitos químicos e físicos estabelecidos pela NBR 12653 (2014).

Tabela 11 – Avaliação das características químicas do MK e RCV - NBR 12653 (2014).

Propriedades	Limites da NBR	MK	RCV
Soma dos óxidos (%)	$\geq 70$	92,44	94,27
Teor de SO <sub>3</sub> (%)	$\leq 4$	0,03	ND
Perda ao fogo-PF (%)	$\leq 10$	2,66	1,26
Equivalente alcalino (%)	$\leq 1,5$	1,79	0,76
Teor de umidade	ND	ND	ND

ND- Não determinado

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o RCV atendeu aos requisitos estabelecidos pela norma, embora o teor de SO<sub>3</sub> não tenha sido determinado. Já para o MK, a única propriedade que esteve fora dos parâmetros preconizados pela norma é o equivalente alcalino que excedeu o máximo de 1,5%. Como o valor de equivalente alcalino do MK excedeu ao limite estabelecido pela NBR 12653 (2014). Este aspecto poderia prejudicar o desempenho das misturas com MK, pois a concentração de íons hidroxilas na solução dos poros do concreto é influenciada pela quantidade de teor de álcalis o que contribui na formação do gel e consequente fissuração (ROY et al., 2003).

#### b) Caracterização física

A caracterização física foi realizada empregando-se as seguintes análises: área superficial específica por adsorção de nitrogênio (BET), massa específica por picnometria agás hélio, granulometria a laser, realizadas no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (LCV Mat) da Unisinos e MEV. A Tabela 12 apresenta os resultados das características físicas do MK e RCV em função dos requisitos químicos e físicos estabelecidos pela NBR 12653 (2014).

Tabela 12 – Características físicas do MK e RCV em função a NBR 12653 (2014).

Propriedades	Limites da NBR	MK	RCV
Material retido na peneira 45 $\mu\text{m}$ (%)	< 20 %	ND	18,66
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle (%)	$\geq 90\%$	104,57	107,05
Atividade pozolânica com cal aos sete dias (%)	ND	ND	ND

ND- Não determinado

Fonte: Elaborado pelo autor

Com estes resultados, espera-se que o RCV apresente melhor desempenho na mitigação da RAA em relação ao MK, pois apresenta maior índice de atividade pozolânica.

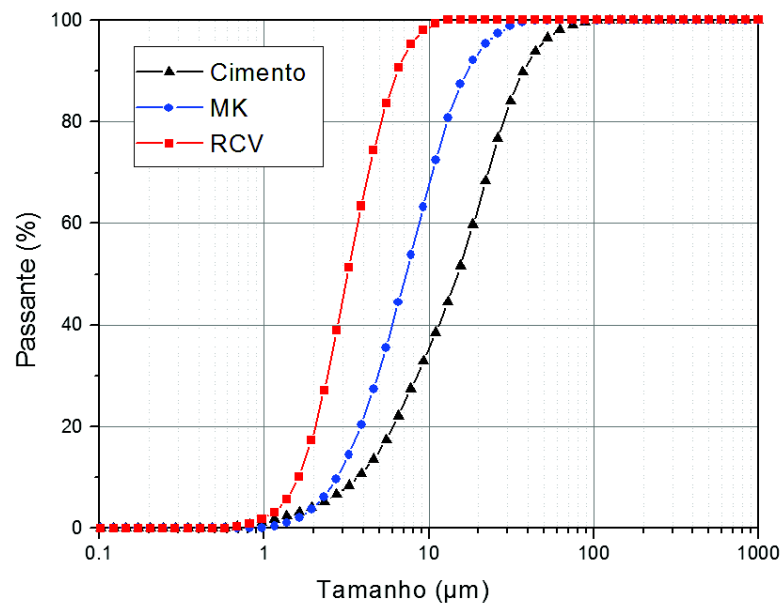
A Tabela 13 apresenta os resultados da área superficial específica, massa específica e dimensão das partículas do cimento, MK e RCV. A Figura 17 apresenta as curvas da distribuição granulométrica do cimento, MK e RCV.

Tabela 13 – Área superficial específica, massa específica e granulometria à laser

		Cimento	MK	RCV
Área Superficial Específica BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )		4,54	16,63	22,85
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		3,09	2,53	2,71
Granulometria a laser ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>10</sub>	3,70	2,78	1,63
	D <sub>50</sub>	14,97	7,25	3,21
	D <sub>90</sub>	37,24	16,95	6,42
	Dimensão Média	17,07	8,28	3,55

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – Distribuição granulométrica de cimento, MK e RCV.



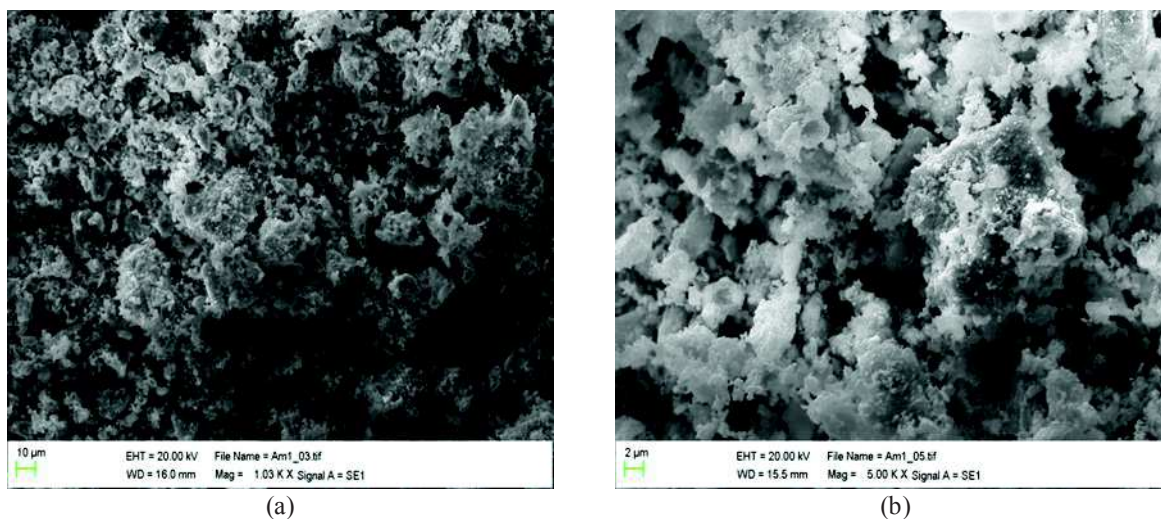
Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados obtidos na análise de granulometria a laser e nos resultados obtidos da análise de área superficial específica, o RCV apresenta partículas mais finas que o cimento e MK, embora a sua curva de distribuição granulométrica tende a mostrar uma ligeira uniformidade em relação aos dos outros materiais, que apresentam uma curva com comportamento ligeiramente contínuo.

Diante dos resultados de área superficial específica dos materiais, observa-se que o RCV apresentou maior valor que de MK. De acordo com Cunha (2012) quanto maior for a área superficial específica do material, maior será a sua atividade pozolânica. De acordo com Matias, Farias e Torres (2014b), maiores valores de área superficial específica do RCV podem torna-lo um material de alto potencial pozolânico

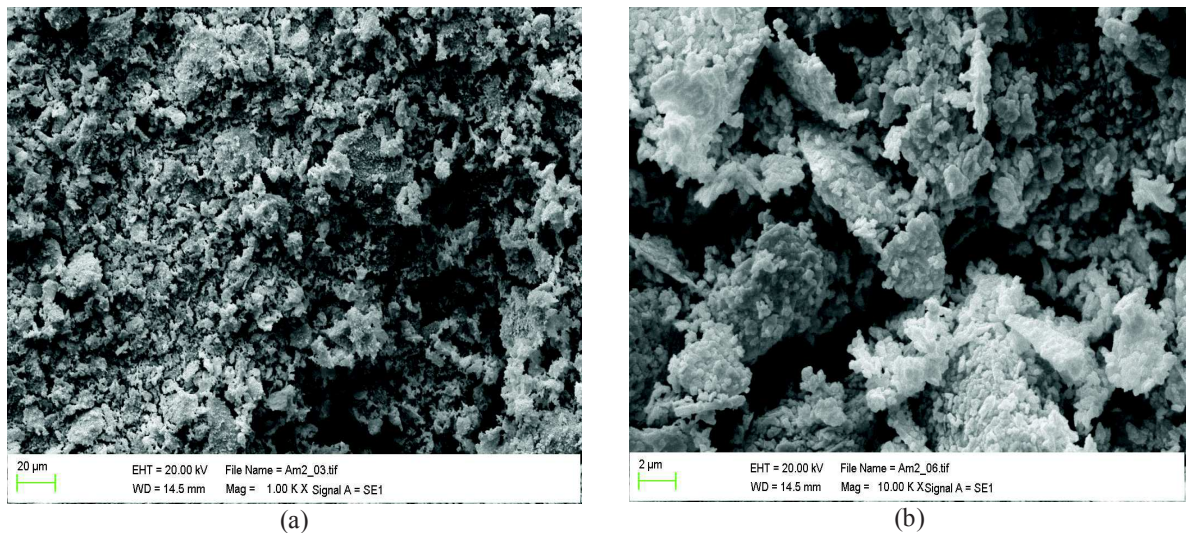
A fim de complementar os ensaios de área superficial específica e granulometria por difração a laser, são apresentadas a morfologia e a dimensão do MK e RCV, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, em microscópio eletrônico de varredura ZEISS, modelo EVO MA15, realizado no IIT Fóssil da Unisinos (Figura 18 e Figura 19).

Figura 18 – MEV do RCV: (a) Aumento de 1030x (b) Aumento de 5000x



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – MEV do MK: (a) aumento de 1000x e (b) aumento de 10.000x (d).



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o RCV, é possível verificar a predominância de partículas inferiores a 10 µm (a) e a presença em maior quantidade de partículas superiores que 2 µm (b). Em relação ao MK, verifica-se na Figura 19, que apresenta menor quantidade de partículas inferiores a 10 µm (c) e maior predominância de partículas inferiores a 20. Além disso, em ambos os casos, é possível verificar algumas irregularidades na superfície dos grãos com aglomeração de partículas. Constata-se também a forma lamelar, menos evidente pelo fato das partículas se apresentarem normalmente depositadas umas sobre as outras.

### c) Índice de atividade pozolânica

O ensaio para caracterização quanto à pozolanicidade foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), pelo método NBR 5752 (ABNT, 2014). Foram moldados quatro corpos de prova por misturas, para cada uma das idades estudadas (28 e 63 dias). A mistura, os procedimentos de moldagem e a cura foram executados mediante a NBR 7215 (ABNT, 1996). O ajuste da consistência das argamassas foi com base na consistência da amostra de referência, considerada uma tolerância de  $\pm 10$  mm. O ajuste foi feito usando um aditivo superplastificante de base química de éter policarboxílico. Além dos 28 dias preconizados pela NBR 12653 (2014), também foram considerados 63 dias como forma de avaliar a atividade pozolânica destes materiais em idades superiores.

A norma NBR 7215 (ABNT, 1996) estabelece que o desvio relativo máximo de 4 valores não exceda a 6%, podendo em última circunstância para o ajustamento se considerar três valores. Em alguns casos tanto para os 28, bem como 63 dias, como forma de ajuste se

optou em excluir os resultados que influenciavam o maior desvio relativo máximo superior a 6%, mantendo três resultados. A Tabela 14 apresenta a especificação, quantidade e caracterização do material utilizado para avaliação do índice de atividade pozolânica de todas as combinações de tipo e teor de adição.

Tabela 14 – Atividade pozolânica do RCV, MK e RCV + MK aos 28 dias

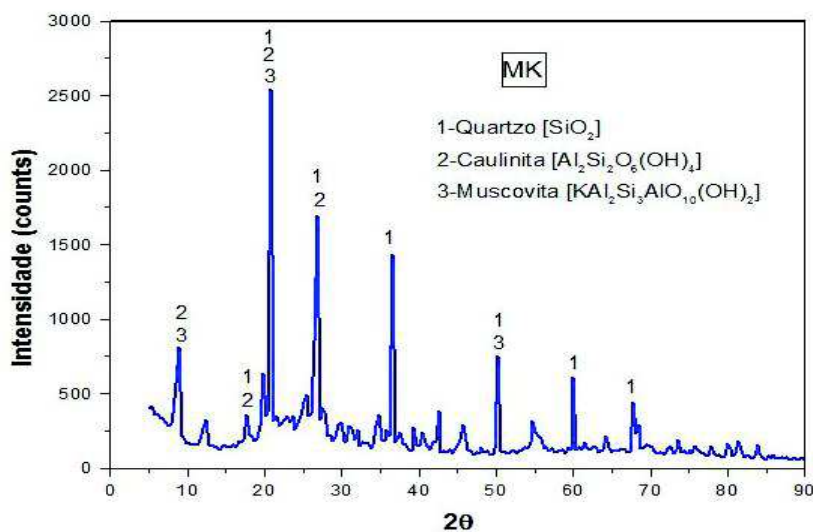
Material	Cimento (g)	RCV (g)	MC (g)	Água (g)	Aditivo (g)	Consistência (mm)
Cimento	624	-	-	300	-	199
RCV	468	156	-	300	0,55	190
MK	468	-	156	300	1,40	196
RCV+MK	468	78	78	300	0,80	193

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### d) Caracterização mineralógica

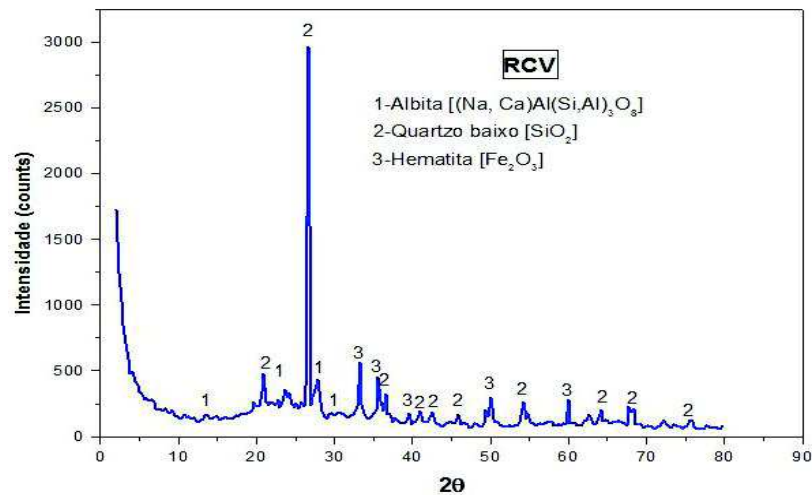
A técnica mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) foi utilizada para determinar os compostos mineralógicos do RCV, MK e dos agregados. O ensaio foi realizado no Instituto de Física da UFRGS em difratômetro Siemens D5000. O RCV foi moído em grau de ágata até que os grãos alcançassem uma finura que não se sentisse pelo toque dos dedos. O preparo do RCV foi realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (LCV Mat) da Unisinos. Os resultados do ensaio da DRX podem ser observados na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 20 – Difratograma de Raios X do MK.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Difratoograma de Raios X do RCV.



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando-se o difratograma da Figura 20, nota-se que o MK apresenta picos cristalinos na forma de quartzo, caulinita e muscovita (pertencente a classe dos silicatos). O difratograma do RCV mostra picos cristalinos de albita e quartzo baixo (pertencente a classe dos silicatos) e ferro na forma de hematita (responsável pela cor vermelha e alaranjada). Comparando o ensaio de DRX e de FRX, constata-se uma concordância entre os minerais e elementos químicos de maior predominância, como é caso de alumínio, ferro e silício.

#### 4.2.2 Agregado

O agregado utilizado neste trabalho é de origem basáltica, coletado numa jazida situada na cidade de Flores da Cunha. O agregado foi armazenado em sacos e transportado para o LMC da UNISINOS. A escolha deste local para aquisição de areia de britagem deveu-se ao fato de ter sido identificado como agregado reativo no trabalho de Guillante (2015).

Para o uso nos ensaios da pesquisa, o agregado foi peneirado num agitador de peneiras num período de aproximadamente 15 minutos, posteriormente lavado e seco em estufa de 100° C, de forma a atender os requisitos de fração granulométrica necessários para a realização dos ensaios prescritos pela ASTM C1260 (ASTM, 2014), conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Granulometria e percentagem do material requerido para o ensaio.

Abertura da peneira (mm)		Massa
Passante	Retido	Percentagem
4,75	2,36	10
2,36	1,18	25
1,18	0,60	25
0,60	0,30	25
0,30	0,15	15

Fonte: ASTM C1260 (2014) e NBR 15577-4 (ABNT, 2008)

#### a) Caracterização petrográfica

A análise petrográfica dos agregados foi realizada com o objetivo de identificar os minerais potencialmente reativos do agregado utilizado e verificar características como a granulção, alterações e deformações da rocha, que podem indicar a susceptibilidade do agregado para a ocorrência da RAA. A preparação foi feita no Laboratório de Laminação da Unisinos, e foram confeccionadas lâminas a partir do agregado. Posteriormente, com ajuda do microscópio ótico, foram identificadas as propriedades da rocha a partir da observação dos minerais e características petrográficas presentes na amostra.

A NBR 15577-3 (ABNT, 2008) descreve os procedimentos do ensaio e análise petrográfica foi realizada no Laboratório de Laminação da Unisinos.

Os resultados da análise petrográfica, cujo o laudo se encontra no apêndice F, apresenta micrografias óticas, usando técnica de Luz Natural (LN), na qual é notória a textura microporfírica, rica em resíduos vítreos e domínios esferulíticos, evidenciando-se microfénocristais de plagioclásio (pl) e de piroxênio (px). Evidencia-se, ainda, que os resíduos vítreos são potencialmente reativos devido ao seu alto teor de sílica com uma estrutura desordenada em sua composição. A Tabela 16 apresenta o percentual da composição mineralógica do agregado, onde foram constatados minerais como o plagioclásio que possui grãos finos (inferiores à 0,75 mm), clinopiroxênio possui grãos muito finos entre 0,5 mm e 0,15, o quartzo ocorre com grãos de diâmetro inferior à 0,35 mm, constituindo domínios de quartzo residual ou agrupamentos com o feldspato, os opacos correspondem possivelmente à magnetita e hematita, como produto da oxidação de ferro e magnésio.



Tabela 16 – Composição mineralógica do agregado, através da análise petrográfica.

Mineralogia	%
Plagioclásio	67
Quartzo	15
Clinopiroxênio	15
Opacos	3
Apatita	tr

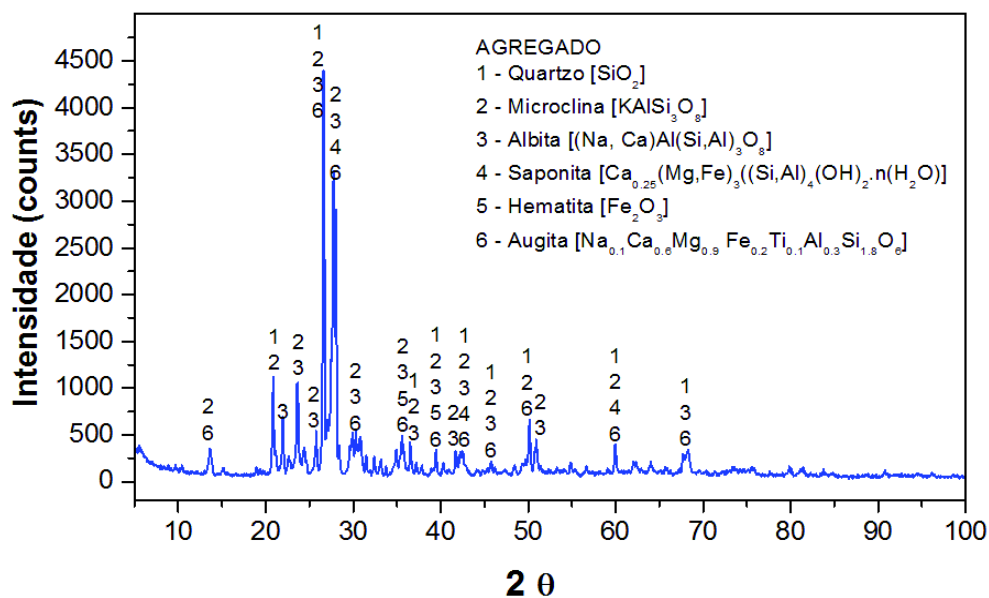
tr= traços (minerais em proporções menores que 1%).

Fonte: Guillante (2015)

## b) Caracterização química e mineralógica

O ensaio de Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX) foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UPF), e serviu como complemento da análise petrográfica na obtenção da composição química das amostras. Para avaliação das características mineralógicas do agregado, foi usada a técnica de Difração de raios X (DRX), efetuada no Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Física da UFRGS e interpretada no LCVMat da Unisinos. A Figura 22 apresenta o Difratoograma de Raios X, enquanto que a Tabela 17 apresenta a composição química do agregado.

Figura 22 – Difratoograma de Raios X do agregado.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 – Composição química do agregado, através da FRX.

Parâmetro	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Agregado (%)	65,06	13,88	6,71	3,84	1,33	3,65	3,31	1,04	0,11	0,28

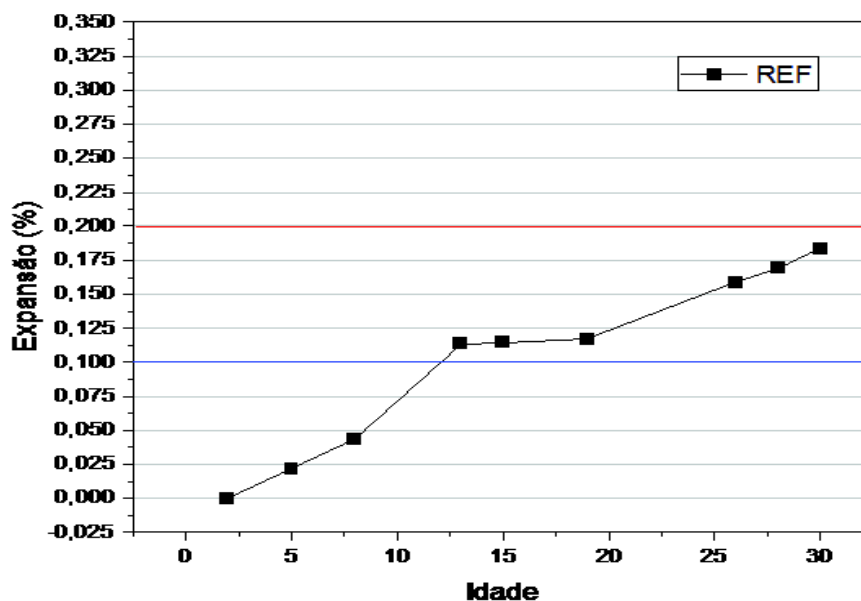
Fonte: Guillante (2015)

Fazendo uma comparação entre análise por DRX e por petrografia em microscópio ótico, constata-se que há uma coerência nos resultados obtidos no que se refere aos minerais presentes na amostra. Constatou-se no DRX picos cristalinos de quartzo, microclina (feldspatos), albita (família dos plagioclásios), augita (conjunto dos piroxênios), saponita e hematita (grupo dos opacos). Verifica-se também uma concordância entre os resultados obtidos na análise por DRX e FRX, onde os minerais mais predominantes no difratograma de raios X são compostos formados por elementos químicos com teores mais elevado na FRX.

c) Determinação do potencial reativo do agregado

O gráfico da Figura 23 apresenta a evolução da expansão da amostra de referência imersa em solução de NaOH, com leituras realizadas aos 2, 5, 8, 13, 15, 19, 26, 28 e 30 dias de idade.

Figura 23 – Expansão média X idade- Agregado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico da Figura 23, verifica-se que o agregado ao longo do tempo apresentou um comportamento linear crescente, alcançando o primeiro limite de expansão aos 13 dias de 0,113%, superior ao limite máximo preconizado pela ASTM C 1260 (2014). Portanto, o agregado enquadra-se entre nos limites de 0,10% a 0,20%, onde a norma classifica como agregado potencialmente reativo. Pelo fato do agregado apresentar um potencial reativo aos 13 dias, o ensaio foi prolongado até aos 30 dias conforme recomendado por norma. Na idade limite de 30 dias, a amostra apresentou expansão de 0,184%, evidenciando o seu

potencial reativo. No lote de agregado analisado por Guillante (2015), autora encontro expansões de 0,13%, 0,17% e 0,22%, aos 12, 16 e 30 dias respectivamente. Tomando-se em conta a variabilidade do experimento e o lote de cimento empregado, que foram diferentes, pode-se dizer que ambos lotes de amostragem apresentam a mesma tendência de comportamento com variações dos valores percentuais de expansão na ordem de 8% entre as duas amostras.

Não obstante o agregado ter sido considerado potencialmente reativo, segundo critérios da ASTM 1260 (2014), não foram visualizados fissuras ou exsudação do gel das amostras ensaiadas. Os resultados de expansão verificados neste ensaio, bem como nos resultados da análise petrográfica e DRX possibilitaram classificar o agregado empregado na pesquisa como potencialmente reativo,

#### 4.2.3 Água

A água utilizada na pesquisa durante os ensaios foi da rede pública de abastecimento à cidade de São Leopoldo. Para ensaios específicos, conforme recomendam as normas, foi utilizada água deionizada.

### 4.3 MÉTODOS

Neste item são apresentados os métodos de avaliação da RAA propostos neste trabalho de pesquisa, bem como os métodos complementares de resistência à compressão axial e absorção de água.

#### 4.3.1 Determinação do potencial reativo do agregado e da mitigação da RAA das adições minerais

As especificações dos procedimentos usados no ensaio de determinação do potencial reativo do agregado e avaliação das adições minerais na mitigação da RAA pelo método de barras de argamassa seguem a ASTM C 1260 (2014) e ASTM C 1567 (2013), normas que regulam o ensaio de barras de argamassa. Os métodos determinam que sejam empregadas fôrmas com dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm; que a relação cimento: agregado da argamassa seja de 1:2, 25 e relação água/cimento seja igual a 0,47. Durante a moldagem, não se usou aditivo para ajuste de consistência, pois a ASTM C 1260 não prevê o seu uso.

Neste trabalho, foram moldados três corpos de prova em nove misturas diferentes, totalizando 27 corpos de prova. Como os materiais possuem massas específicas diferentes, as substituições foram calculadas em massa compensando os volumes. Os valores foram obtidos mediante a equação 9.

$$M_{MAT} = (M_{CIM} / \gamma_{CIM}) \times 100\% \times \gamma_{RVMK} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$M_{MAT}$  – Massa de RCV ou MK

$M_{CIM}$  – Massa de cimento

$\gamma_{CIM}$  – Massa específica do cimento

$\gamma_{RVMK}$  – Massa específica da RCV ou do MK

A moldagem das barras de argamassa foi realizada em duas camadas de 25 golpes e nivelada à parte superior com o auxílio de uma régua metálica como mostra a Figura 24 (a) e (b).

Figura 24 - Moldagem dos corpos de prova para RAA



Fonte: Registrado pelo autor

As formas usadas para a moldagem possuem um sistema fixo, composto por parafusos e pinos de aço inoxidável que posteriormente foram usados como ponto de referência para medir o comprimento das barras.

A Tabela 18 apresenta a quantidade de material utilizado para a confecção das 27 barras de argamassa, de acordo com os requisitos da ASTM C 1260 (2014) E ASTM C 1567 (2013).

Tabela 18 – Especificação e quantidade de material utilizado para a elaboração de 27 corpos de prova para o ensaio da ASTM C 1260 e ASTM C 1567

Nomenclatura	Tipo de material	Teores de Substituição (%)	Relação a/c	Material Pozolanico (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)
REF	-	-	0,47	-	440	990	206,8
20MK	MK	20	0,47	72	352	990	206,8
30MK	MK	30	0,47	108	308	990	206,8
20RCV	RCV	20	0,47	77,31	352	990	206,8
30RCV	RCV	30	0,47	115,96	308	990	206,8
20MK10RCV	MK+RCV	20+10	0,47	72+38,65	308	990	206,8
10MK20RCV	MK+RCV	10+20	0,47	36+77,31	308	990	206,8
10MK10RCV	MK+RCV	10+10	0,47	45,82+49,20	448	990	206,8
15MK15RCV	MK+RCV	15+15	0,47	68,73+73,79	392	990	206,8

Fonte: Elaborado pelo autor

As formas usadas para a moldagem possuem um sistema fixo, composto por parafusos e pinos de aço inoxidável que posteriormente foram usados como ponto de referência para medir o comprimento das barras através de um extensômetro, relógio comparador.

O monitoramento da expansão foi realizado através da medição do comprimento das barras de argamassa aos 2, 5, 8, 13, 15, 19, 26, 28 e 30 dias após a imersão. O instrumento de leitura usado na expansão das argamassas foi um relógio comparador (Figura 25).

Figura 25 – Leitura da barra com base no relógio comparador.



Fonte: Registrado pelo autor

Antes da leitura de cada barra, a calibração era feita com recurso de uma barra padrão. A retirada de cada barra era realizada com auxílio de uma pinça e para evitar a contaminação, era usada uma luva térmica. Como forma de minimizar o escoamento da solução, era usado um pano seco para enxugar, num período de cinco segundos. Após a leitura, as barras eram

novamente colocadas no banho termorregulador, e o processo de leitura de cada barra de argamassa era realizado dentro de 15 segundos como descreve a norma.

Para a determinação do potencial reativo, o resultado da expansão é estabelecido pela ASTM C-1260 (2014), que afirma que a expansão acima de 0,20% aos 16 dias após a moldagem, é indicada como agregado reativo. A expansão entre 0,10% e 0,20% indica que o agregado é potencialmente reativo, ao passo que a expansão inferior a 0,10% indica que é inócuo. Enquanto que para a avaliação da eficiência das adições minerais, o resultado da expansão é preconizado pela ASTM C-1567 (2013) que considera as expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias como sendo aceitáveis e tem menor possibilidade de ocorrer expansões deletéria. Ao passo que as expansões superiores a 0,10% aos 16 dias têm a possibilidade de gerar expansões potencialmente deletérias.

#### 4.3.2 Determinação da resistência à compressão

A NBR 7215 (ABNT, 1996) tem como objetivo determinar a resistência à compressão do cimento Portland e suas adições minerais. O ensaio desta pesquisa foi realizado com base na adaptação da NBR 7215 (ABNT, 1996), pois se substituiu a areia normal preconizada pela norma, pelo emprego de areia de britagem usado em todos os ensaios. Como forma de se adaptar ao ensaio acelerado preconizado pela ASTM C 1260, os corpos de prova para a resistência à compressão, nas três condições de cura, não tiveram ajuste de consistência através de uso de aditivo e, a relação a/c foi de 0,47 conforme a mesma norma e não 0,48 como estabelece a NBR 7215.

Para cada mistura foram confeccionados seis corpos de prova cilíndricos com dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, totalizando 162 corpos de prova. Não houve ajuste da consistência através do uso de aditivos ou alteração da relação água/cimento. A moldagem dos CPs foi realizada em quatro camadas de 30 golpes. A quantidade, o tipo de material, os teores de substituição são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Especificação e quantidade de material utilizado para a elaboração de seis corpos de prova para o ensaio da NBR 7215

Nomenclatura	Tipo de material	Teores de Substituição (%)	Relação a/c	Material Pozolânico (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)
REF	-	0	0,47	-	880	1980	413,60
20MK	MK	20	0,47	144	704	1980	413,60
30MK	MK	30	0,47	216	616	1980	413,60
20RCV	RCV	20	0,47	154,62	704	1980	413,60
30RCV	RCV	30	0,47	231,93	616	1980	413,60
20MK10RCV	MK+RCV	20+10	0,47	144+77,31	616	1980	413,60
10MK20RCV	MK+RCV	10+20	0,47	72+154,62	616	1980	413,60
10MK10RCV	MK+RCV	10+10	0,47	72+77,31	704	1980	413,60
15MK15RCV	MK+RCV	15+15	0,47	108+115,96	616	1980	413,60

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 26 registra a prensa utilizada para a realização do ensaio de um corpo de prova (a) e após o rompimento (b). A prensa foi previamente programada com área padrão de 0,001963 m<sup>2</sup> e velocidade de 0,25 m/s. Os resultados foram colocados numa planilha e tratados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

Figura 26 - Prensa e corpo de prova após o ensaio.



Fonte: Registrado pelo autor

#### 4.3.3 Determinação da absorção de água por capilaridade

Para a determinação de absorção de água por capilaridade foi adotado o método de teste da RILEM TC 116 PCD. (RILEM, 1999), adaptado por Troian (2010). Este método prevê a confecção de corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e com altura de 50 mm.

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de seção quadrada de 40 mm e comprimento de 160 mm, seccionados transversalmente em corpos de prova com altura de 40

mm, descartando as suas extremidades, empregando-se três secções intermediárias. A moldagem dos CPs foi realizada em duas camadas de 30 golpes. A Tabela 20 apresenta quantidade do material, o tipo de material e o teor de substituição.

Tabela 20 – Especificação e quantidade de material utilizado para a elaboração de três corpos de prova para o ensaio RILEM TC 116 PCD

Nomenclatura	Tipo de material	Teores de Substituição (%)	Relação a/c	Material Pozolânico (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)
REF	-	0	0,47	-	560	1260	263,20
20MK	MK	20	0,47	91,64	448	1260	263,20
30MK	MK	30	0,47	137,46	392	1260	263,20
20RCV	RCV	20	0,47	98,39	448	1260	263,20
30RCV	RCV	30	0,47	147,59	392	1260	263,20
20MK10RCV	MK+RCV	20+10	0,47	91,64+49,20	392	1260	263,20
10MK20RCV	MK+RCV	10+20	0,47	45,82+98,39	392	1260	263,20
10MK10RCV	MK+RCV	10+10	0,47	45,82+49,20	448	1260	263,20
15MK15RCV	MK+RCV	15+15	0,47	68,73+73,79	392	1260	263,20

Fonte: Elaborado pelo autor

Após secos em estufa a 60° C, os corpos de prova foram medidos e vedados as suas laterais com uma fita adesiva de alta aderência e coberta a parte superior por uma película de látex, com a superfície da parte inferior livre para o contato com água, conforme a Figura 27. As vedações foram feitas com objetivo de tornar impermeáveis as áreas que não devem absorver umidade. Após a vedação os corpos de prova foram pesados em uma balança com precisão de 0,01g.

Figura 27 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Registrado pelo autor

O ensaio foi realizado numa bandeja plástica com fundo nivelado, a face inferior livre de cada corpo de prova era coberta por uma lâmina de água de 3 mm de altura encobrendo-a totalmente. A bandeja plástica era dotada de orifícios de para extravasar imediatamente acima



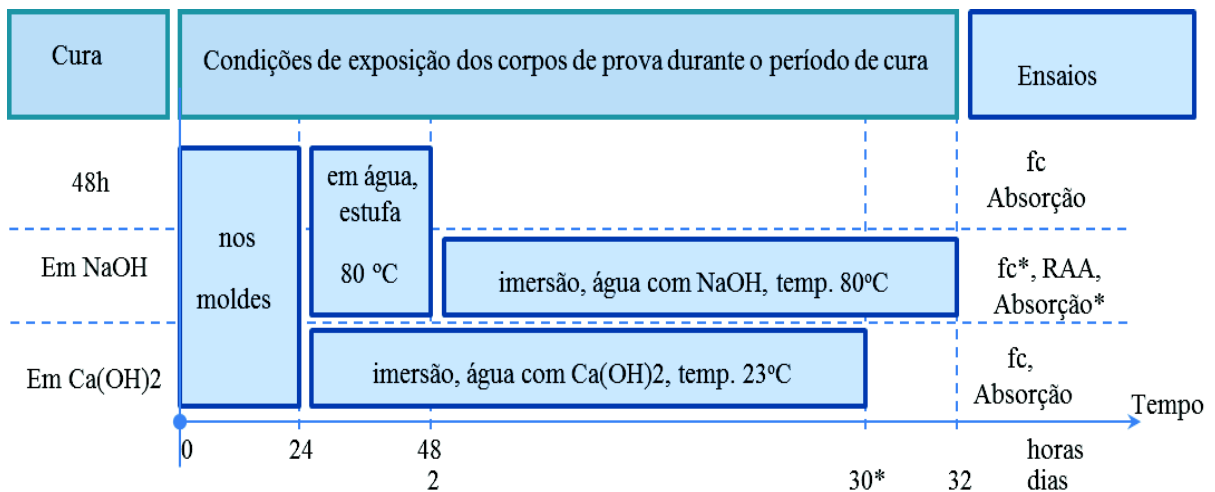
do nível de ensaio, com a finalidade de manter o nível de água constante, e adotou-se também um sistema de reservatório que fornecesse a água para vazão constante.

A quantidade de absorção por capilaridade dos corpos de prova foi obtida mediante a pesagem dos corpos de prova nos períodos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 24, 48, 72 e 96 horas. À medida que eram retirados da água para a pesagem, eram secos por um pano úmido com intuito de retirar o excesso de água.

#### 4.3.4 Cura dos corpos de prova

Neste item são apresentadas três formas distintas de cura dos corpos de prova usadas para a avaliação da RAA, determinação da resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade: 48h antes de imersão, 28 dias de cura em água saturada com cal e 28 dias de imersão na solução de NaOH, conforme a Figura 29.

Figura 28 – Formas de cura dos corpos de prova.



\* ensaios realizados após 30 dias da moldagem.

Fonte: Elaborado pelo autor

##### a) Corpos de prova curados por 48h antes de imersão

Para dois ensaios, foram empregados corpos de prova com este tipo de cura: determinação da resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade. Terminada a moldagem dos corpos de prova, após serem cobertas as fôrmas, foram armazenadas por um período de 24h. Após 24h os corpos de prova foram desmoldados, identificados e imersos num recipiente com água a temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e colocadas na estufa a  $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  onde permaneceram por um período de 24h.

Passado este período, os corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, foram retificados em uma retífica, seguidamente medidos a altura e diâmetro, com auxílio de um paquímetro digital e levados para a realização dos ensaios. Já os corpos de prova para o ensaio de absorção de água foram secos em estufa à 60°C até atingir a constância de massa e posteriormente realizado o ensaio pelo método de RILEM.

b) Corpos de prova curados aos 28 dias em água saturada com cal

Para os corpos de prova submetidos a este tipo de cura, também foram realizados dois ensaios: resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade. Terminada a moldagem, após serem cobertas, foram armazenadas por um período de 24h.

Após 24h de cura, os CPs de resistência à compressão foram identificados, retificados e imersos em tanques de água saturada de cal até a idade de 28 dias para a realização do respectivo ensaio a temperatura ambiente de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$ .

Os CPs para absorção de água por capilaridade, após 24h, foram identificados, seccionados, medidos e imersos em tanques de água saturada de cal até a idade de 28 dias. Após este período, também foram secos em estufa de 60°C até atingir a constância da massa para avaliação da absorção de água por capilaridade.

c) Corpos de prova imersos em solução de NaOH (cura acelerada)

Além dos CPs para medição das expansões no ensaio de RAA através do método de acelerado de barras de argamassa, foram submetidos a este tipo de cura os CPs para a determinação da resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.

A semelhança do que aconteceu com a cura de 48h antes de imersão, passadas 24h de armazenamento, as barras de argamassa para o ensaio de RAA, foram submersas num recipiente com água a temperatura de  $23^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$  e colocadas na estufa a  $80^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$  onde permaneceram por um tempo de 24h como mostra a Figura 29. Salienta-se que as barras de argamassa foram colocadas numa posição horizontal, para evitar o seu apoio sobre os pinos.

Figura 29 – Barras de argamassas submersa em água, colocadas em estufa à 80°C.



Fonte: Registrado pelo autor

Passado este período, as barras de argamassas foram retiradas da estufa e efetuadas a leitura zero. Em seguida, as barras foram submersas numa solução de NaOH, à 1N à temperatura de  $80^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  em um banho termorregulador, no qual permaneceram por um período de 30 dias. A preparação do NaOH foi realizada na capela do LMC conforme as orientações da ASTM C 1260 (2014).

As barras de argamassa foram mergulhadas no termorregulador (Figura 30) na posição vertical e seus pinos encaixados em furos existentes na parte inferior do mesmo.

Figura 30 – Banho termorregulador.



Fonte: Registrado pelo autor

Para o ensaio da resistência à compressão, os corpos de prova após a imersão em água a temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  e colocados na estufa a  $80^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ , foram retirados e imersos em um banho termorregulador com solução de NaOH por onde permaneceram durante 28 dias e posteriormente realizados o respectivo ensaio.

Enquanto que os CPs para o ensaio de absorção de água por capilaridade, os corpos após a imersão em água a temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  e colocados na estufa a  $80^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ , foram retirados, seccionados, medidos, identificados e imersos em um mergulhador com solução de NaOH por onde permaneceram durante 28 dias. Fim deste período, foram secos em estufa de  $60^{\circ}\text{C}$  até atingir a constância da massa para posterior avaliação de absorção de água por capilaridade.

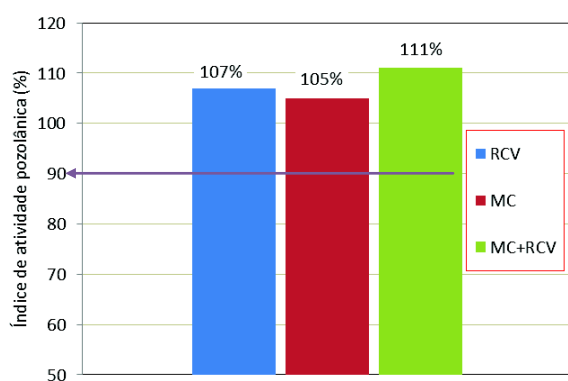
## 5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e interpretados os resultados obtidos na atividade pozolânica dos materiais, dos ensaios de RAA, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.

### 5.1 Pozolanicidade

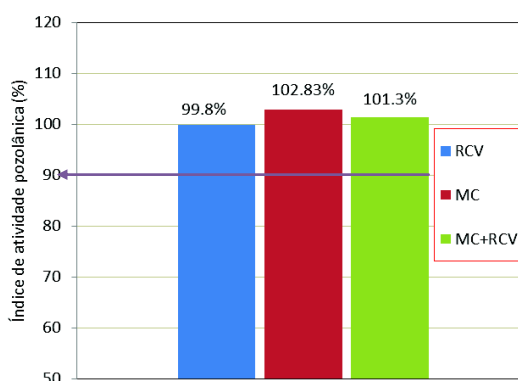
A norma NBR 7215 ABNT (1996) estabelece que o desvio relativo máximo de 4 valores não exceda à 6%, podendo em última circunstância para o ajustamento se considerar três valores. Em alguns casos tanto para os 28, bem como 63 dias, como forma de ajuste se optou em excluir os resultados que apresentavam o maior desvio relativo máximo, mantendo três resultados, como pode-se observar em apêndice D. A Figura 31 apresenta índice de atividade pozolânica do 25MK, 25RCV e 12,5MK + 12,5RCV aos 28 dias de cura. A avaliação da pozolanicidade aos 63 dias, é apresentada na Figura 32.

Figura 31 – Índice de atividade pozolânica de RCV, MK e RCV+MK aos 28 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Avaliação da pozolanicidade de RCV, MK e RCV+MK aos 63 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se na Figura 31 e na Figura 32 que todas as misturas tiveram valor de índice de atividade pozolânica superior ao mínimo exigido pela norma que é de 90%. Este melhor desempenho do RCV, MK e RCV + MK na atividade pozolânica, pode ser atribuído as suas propriedades químicas e físicas que atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 12653 (2014).

A Tabela 21 apresenta as resistências médias, o desvio relativo máximo e o índice de atividade pozolânica (IAP) do cimento, RCV, MK e RCV + MK aos 28 e 63 dias.

Tabela 21 – Desempenho da atividade pozolânica do cimento, MK, RCV e MK + RCV

Material	28 dias			63 dias			(fc63/fc28)*100 (%)
	fc (média) (MPa)	Desvio Relativo m áx. (MPa)	IAP (%)	fc (média) (MPa)	Desvio Relativo m áx. (MPa)	IAP (%)	
Cimento	39,7	3,6	-	44,2	3,9	-	111,5
RCV	42,5	2,8	107,0	44,1	4,7	99,8	103,8
MK	41,5	1,6	104,6	45,5	5,9	102,8	109,7
RCV+MK	44,0	0,9	110,8	44,8	2,9	101,3	101,9

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando entre si o índice da atividade pozolânica aos 28 dias das três misturas, verifica-se que a combinação de RCV + MK apresentou melhor desempenho com 3,76% a mais que o RCV, e este por sua vez foi 2,48% superior ao MK. Portanto o desempenho das argamassas com substituição de cimento por RCV +MK, aos 28 dias, foi superior ao desempenho do RCV e este por sua vez, superior ao desempenho do MK.

Estes resultados são diferentes dos encontrados por Hansen (2016) que avaliou o desempenho da atividade pozolânica aos 28 dias de RCV oriunda de uma empresa de produção de artefatos cerâmicos localizada no município de Bom Princípio/RS. A autora observou melhor desempenho nas argamassas de substituição de cimento por MK em teor de 20% em relação a substituição de 35% de RCV. Esta diferença de resultados pode ser atribuída às diferenças nas características do RCV utilizado nas duas pesquisas em relação à origem, composição química e mineralógica, à finura e ao processo de ativação térmica. , entre outras.

Comparando entre si o índice da atividade pozolânica aos 63 dias das três misturas, verifica-se que as argamassas de substituições por MK e por combinação do MK + RCV adquiriram um desempenho ligeiramente superior em relação às argamassas de substituição por RCV.

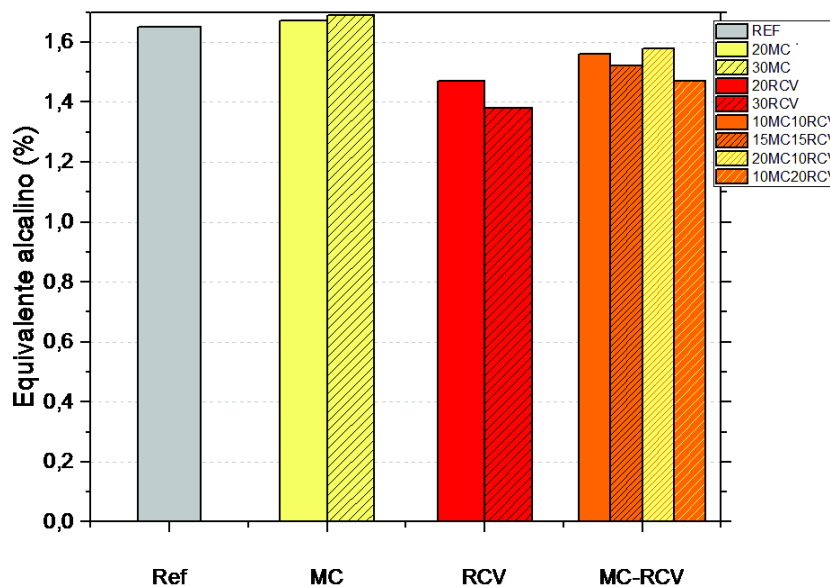
Ao comparar os resultados das resistências médias das quatro misturas (REF, 25%RCV, 25%MK e 12,5%RCV + 12,5%MK) entre 28 dias e 63 dias (fc63/fc28, tabela 21), observa-se que o valor da atividade pozolânica aos 63 dias tornou-se inferior em relação ao valor do índice de atividade pozolânica aos 28 dias. Isso se deve, provavelmente, ao maior crescimento da resistência do cimento de 28 dias para 63 dias em relação ao crescimento da resistência das misturas com adições minerais.

## 5.2 Avaliação da eficiência das adições minerais na mitigação da RAA

O agregado, previamente caracterizado como potencialmente reativo, conforme a ASTM C 1260 (2014), foi usado para avaliar a capacidade de mitigação da RAA através do uso das adições minerais em teores de misturas propostos nesta pesquisa.

Com base na caracterização química dos aglomerantes, calculou-se o equivalente alcalino de cada mistura. A Figura 33 apresenta os teores de equivalente alcalino das nove misturas.

Figura 33 – Resultados de equivalente alcalino das misturas

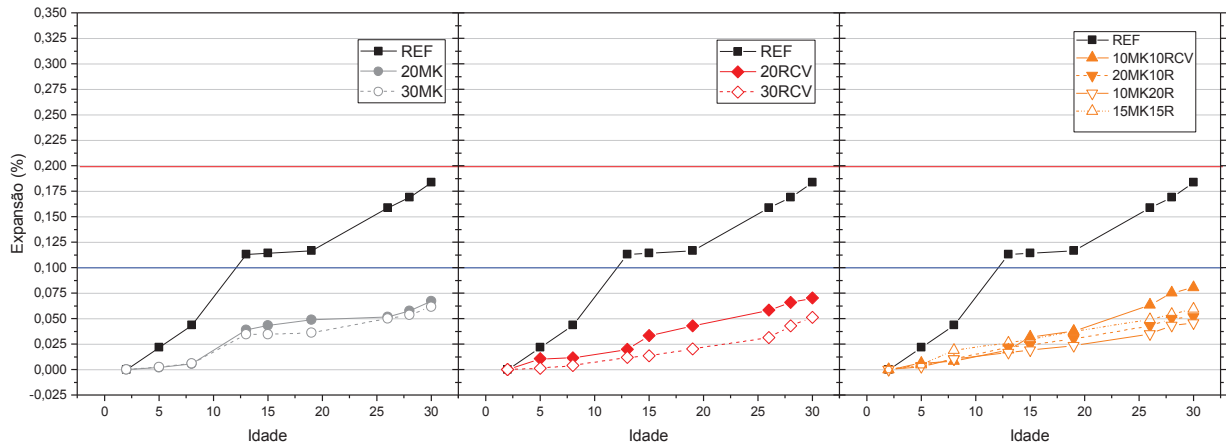


Fonte: Registrado pelo autor

Observa-se que a REF, 20MK e 30MK tiveram equivalente alcalino superior em relação as demais misturas. Conforme Roy et al. (2003), a concentração de íons hidroxilas na solução dos poros do concreto é influenciada pela quantidade de álcalis no cimento, permitindo a dissolução acelerada de certas formas de sílica, o que contribui na formação do gel e conseqüente fissuração. Como os corpos de prova são expostos à solução de NaOH, o equivalente alcalino será um fator significativo exercendo influência na expansão.

Na Figura 34 são apresentados os resultados das expansões médias das argamassas de REF, 20MK, 30MK, 20RCV, 30RCV, 10MK10RCV, 20MK10RCV, 10MK20RCV e 15MK15RCV no período entre 2 e 30 dias de idade. Podem ser vistos no apêndice A os comparativos entre as expansões médias de cada mistura e a referência ao longo de todos os tempos estudados.

Figura 34 – Expansão média das argamassas estudadas.



Observa-se na Figura 34 que todas as argamassas com substituição parcial de cimento por MK, RCV ou combinação de MK+RCV tiveram redução nas suas expansões em relação a referência ao longo de todo o período de ensaio, com maior destaque para as argamassas com 30RCV, 10MK20RCV, 20MK10RCV e 15MK15RCV que reduziram em 87,7, 83,3, 78,4 e 73,7%, respectivamente aos 15 dias de ensaio. Todas as expansões das amostras com substituição de cimento por pozolanas se situaram abaixo do limite de expansão estabelecido pela ASTM C1567 (2013). Embora todas argamassas com pozolanas tivessem redução abaixo do limite preconizado pela norma, a amostra de substituição de 10MK + 10RCV apresentou pior desempenho, tendo apresentando aos 30 dias de ensaio, uma redução de expansões de 55,9% em relação a referência, enquanto que o melhor desempenho foi alcançado pela amostra de 10MK + 20RCV que obteve no final de ensaio redução de 75%, conforme a Tabela 22.

Tabela 22 – Redução percentual das expansões médias entre REF e cada mistura

Misturas	15 dias de expansão		30 dias de expansão	
	Expansão média (%)	Redução da Expansão média (%)	Expansão média (%)	Redução da Expansão média (%)
REF	0,114	0	0,184	0
20MC	0,043	62,3	0,067	63,6
30MC	0,034	70,2	0,061	66,8
20RCV	0,033	71,1	0,070	62,0
30RCV	0,014	87,7	0,051	72,3
10MC + 10RCV	0,032	71,9	0,081	56,0
20MC + 10RCV	0,024	78,4	0,052	71,7
10MC + 20RCV	0,019	83,3	0,046	75
15MC + 15RCV	0,030	73,7	0,059	67,9

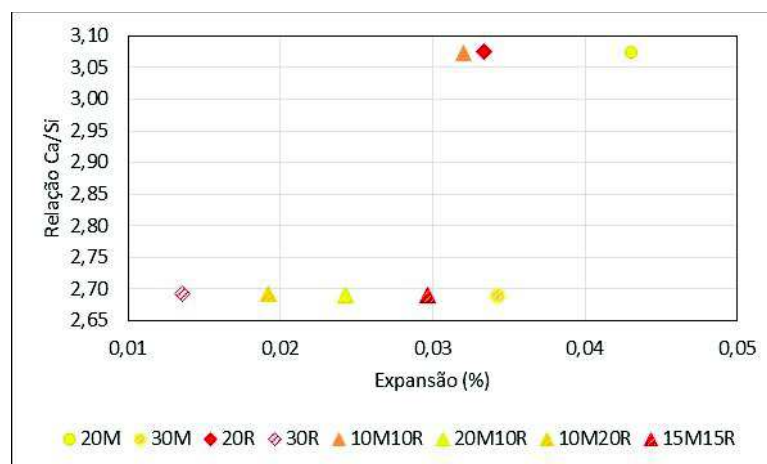
Fonte: Elaborado pelo autor

A análise estatística (análise de variância) apresentada na Tabela E 1, do apêndice E mostrou que as diferenças das médias das expansões de todas as misturas aos 15 e 30 dias de

ensaio, são estatisticamente significativas, pois o valor de significância (p-valor) foi inferior a 5%. Embora todas as misturas com substituição parcial do cimento por pozolanas, tenham apresentado um comportamento de expansão quase similar nestas duas idades, as diferenças existentes entre elas são significativas, evidenciando maior redução de expansão de algumas misturas em detrimento de outras como descrito na Tabela 22.

Nas Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38 podem ser observadas as relações existente entre a expansão das barras de argamassas das diferentes misturas com a relação Ca/Si, com o equivalente alcalino dos teores propostos, com teor de alumina e com o diâmetro médio equivalente, calculado a partir de uma ponderação entre o teor de material pozolânico e cimento e seus respectivos diâmetro médios, numa tentativa de avaliar o efeito da finura no comportamento das adições frente a expansão.

Figura 35 –Relação entre expansão aos 15 dias e relação Ca/Si .



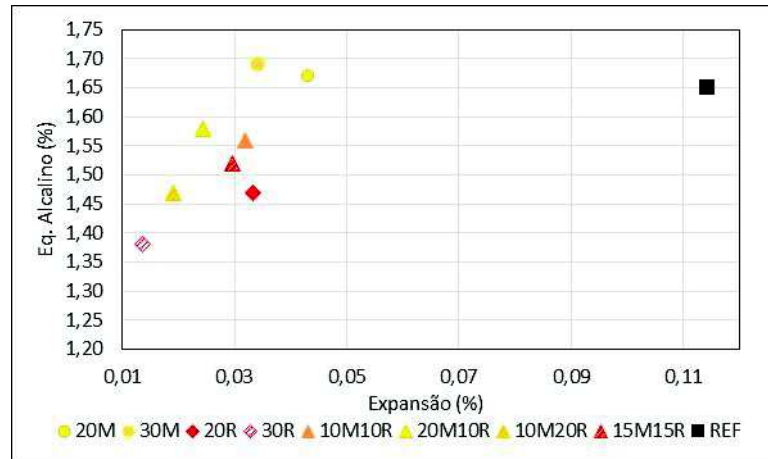
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 35, constata-se que há uma tendência da relação Ca/Si influenciar nas expansões das argamassas. Podem ser observados dois grupos, o primeiro constituído por misturas com 20MK, 20RCV e 10MK10RCV que a sua maior relação Ca/Si coincide com maiores expansões, isto é, quanto maior for a relação Ca/Si, maior são as expansões. O segundo grupo formado por misturas com 30RCV, 20MK10RCV, 10MK20RCV e 15MK15RCV, a sua menor relação Ca/Si coincide com menores expansões. A única mistura que apresentou menor relação Ca/Si e maior expansão, foi a de 30MK. Acredita-se que este comportamento se deve a maior dimensão das partículas do MK em relação ao RCV, que provavelmente tenham dificultado a dissolução da mesma diferentemente do RCV, que apresenta uma dimensão menor como posteriormente será discutido. Estes resultados são sustentados por Munhoz (2007), maiores teores de sílica e menores de cálcio minimizam as



expansões, pois reduzem a quantidade de álcalis na solução dos poros. Portanto, mediante estes resultados, pode se afirmar que a menor relação Ca/Si, induz a menores expansões.

Figura 36 – Relação entre expansão aos 15 dias e equivalente alcalino.

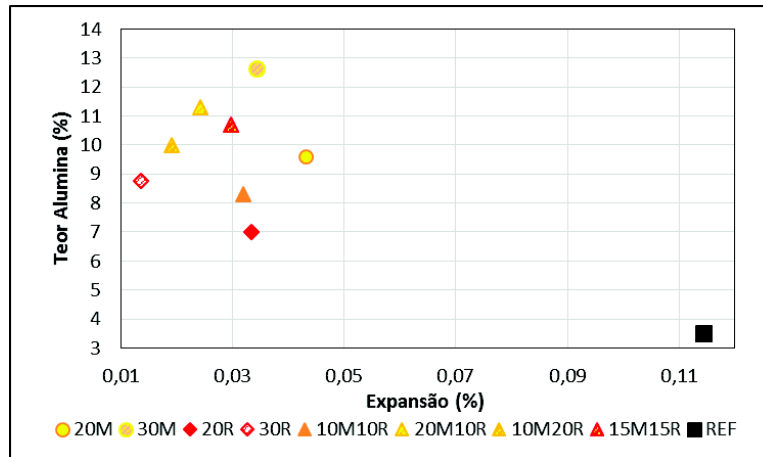


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 36, é notório verificar que o teor de equivalente alcalino das pozolanas parece influenciar nas expansões das misturas, pois as argamassas REF, com 20MK e com 30MK apresentaram os teores de equivalente alcalino mais elevados associados às maiores expansões. Roy et al. (2003) sustentava a teoria de que a quantidade de álcalis, que rege a concentração de íons hidroxilas na solução dos poros do concreto ou argamassa, poderia ocasionar o surgimento de expansões. No entanto, as argamassas citadas apresentam níveis de equivalente alcalino similares, mas aquela composta somente com cimento teve uma expansão por volta de 3 vezes maior do que as outras duas, o que contraria Roy et al. (2003). Neste sentido, o o comportamento destas três argamassas destacadas é semelhante ao comportamento observado por Tiecher (2006) que, ao estudar RAA em argamassas com CP IV, comparadas a argamassas compostas com CP V, verificou que mesmo com maior teor de álcalis, as argamassas com CP IV retornaram menores expansões. Logo, é de se supor que outras características químicas e/ou físicas podem estar influenciando este comportamento.

Assim, outro fator importante a ser analisado é o teor de alumina nas misturas. Na Figura 37 constata-se que a argamassa REF com menor teor de alumina apresentou expansões muito elevadas em relação às misturas com pozolanas, que apresentaram redução significativa das expansões. Para Chappex e Scrivener (2012), o teor de alumina não aumenta a fixação alcalina disponível na solução dos poros, mas sim contribui para a inibição da dissolução da sílica reativa presente nos agregados reativos. Conclui-se com base neste estudo que há uma tendência do teor de alumina influenciar nas expansões da RAA.

Figura 37 –Relação entre expansão o aos 15 dias e teor de alumina

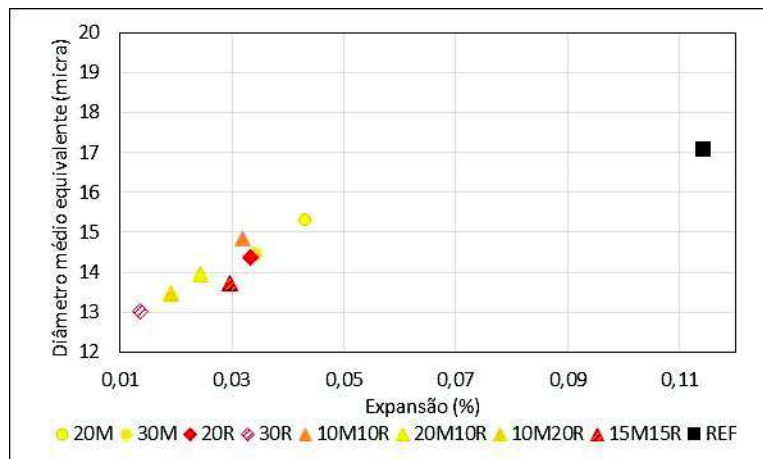


Fonte: Elaborado pelo autor

Contudo, se forem analisadas somente as argamassas com pozolanas, percebe-se que algumas argamassas com menor teor de alumina tiveram menor expansão do que outras com mais Al na sua composição. Assim, há a necessidade de se analisar também questões de características físicas das pozolanas.

Na Figura 38 é apresentada a relação entre a expansão das argamassas das misturas e a dimensão média equivalente das partículas. Verifica-se que a argamassa REF, 20MK e 30MK apresentaram diâmetro médio equivalente e expansões mais elevadas em relação às demais misturas. Le Siewert (2015) afirma que os materiais pozolânicos com maior área superficial específica e menor tamanho, tendem a diminuir as expansões decorrentes devido a RAA. Portanto, os resultados do presente estudo mostram que quanto menor for a dimensão das partículas das pozolanas, menor serão as expansões.

Figura 38 –Relação entre expansão aos 15 dias e diâmetro médio

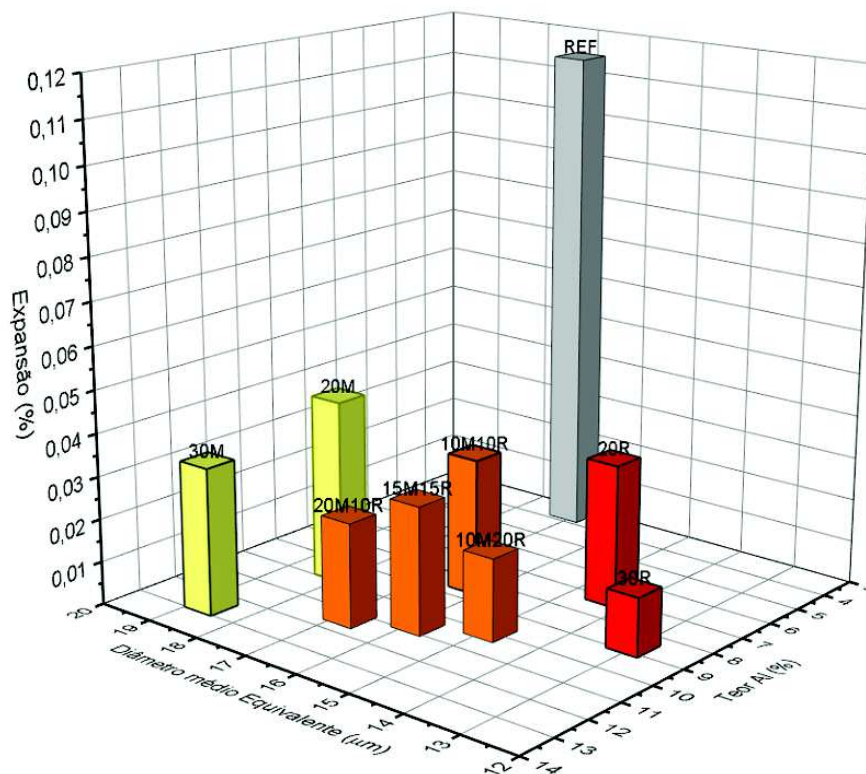


Fonte: Elaborado pelo autor

Visto que tanto as características físicas como as químicas das pozolanas parecem estar influenciando nas expansões, é necessário realizar-se uma análise conjunta das mesmas.

A relação entre dimensão média equivalente das partículas, teor de alumina e as expansões é apresentada na Figura 39.

Figura 39 –Relação entre dimensão média equivalente, teor de alumina e expansão aos 15 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise da Figura 39 confirma-se que os dois fatores, dimensão média equivalente e teor de alumina, influenciam de forma sinérgica no comportamento das expansões das misturas. Nas argamassas somente com adição de MK, que possuem maior teor de alumina, as expansões diminuíram significativamente em relação à argamassa REF, No entanto, as argamassas com RCV, mesmo com menor teor de alumina, retornaram expansões menores ainda do que aquelas com MK. Provavelmente a menor dimensão das partículas de RCV faz com que a alumina tenha uma maior superfície de dissolução da alumina, compensando, assim, o menor teor. Estes resultados são confirmados por Munhoz (2007) que afirma que a composição química e o diâmetro das partículas tornam o material com elevada reatividade pozolânica, influenciam consideravelmente na redução do teor de hidróxido de cálcio do concreto ou argamassa e favorecem a diminuição das expansões devido a RAA. Portanto, o

melhor desempenho do RCV e MC na mitigação das expansões é atribuído às suas características físicas e químicas, conforme a NBR 12653 (2014), sendo que a maior finura pode ainda compensar o menor teor de alumina na ação de mitigação da RAA.

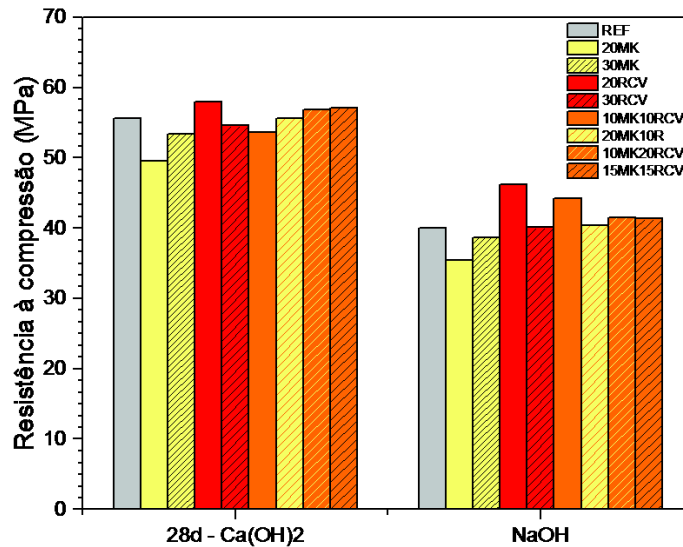
Yazici et al. (2014) tendo substituído cimento por MK em teores de 0, 5, 10 15 e 20% também encontraram redução das expansões aos 14 dias, mas somente os teores de 15 e 20% tiveram expansões abaixo do limite estabelecido pela ASTM C1567 (2013). Bektas et al. (2007) estudaram a substituição de cimento por RCV para mitigação da RAA. Os autores utilizaram teores de 20% e 30% de RCV em substituição ao cimento, e embora tenham observado redução de expansões aos 14 dias para ambos os teores, a substituição de 30% apresentou melhor desempenho.

### 5.3 Resistência à compressão

Neste item foram analisadas as resistências médias das nove misturas entre 28 dias de cura úmida em  $\text{Ca(OH)}_2$  e 28 dias de imersão em NaOH a temperatura de 80° C, conforme a Figura 40 – Resistências médias à compressão das misturas aos 28 dias de cura em  $\text{Ca(OH)}_2$  e 28 dias de imersão em NaOH .. Os resultados das resistências médias aos 2 dias, em comparação com as outras idades, são apresentados no apêndice B.

Na Figura 40, pode-se verificar que as resistências médias das argamassas expostas a solução de NaOH durante 28 dias, reduziram significativamente (análise de variância-grupo Tukey na Tabela E 3 do apêndice E) em relação às resistências médias das argamassas em cura úmida com água e cal (Tabela 23). Esta redução provavelmente está associada ao aparecimento microfissuras internas geradas pela alteração da microestrutura das argamassas face à reação dos agregados. Analisando o desempenho das misturas quanto à resistência à compressão das nove misturas em cada uma das formas de cura, observa-se que as argamassas confeccionadas por RCV e MK + RCV registraram maior resistência quando comparadas com argamassas de REF e MK, embora esta diferença não seja significativa, de acordo com o análise de variância-grupo Tukey na tabela Tabela E 3 do apêndice E. O melhor desempenho das argamassas com RC e com MK+RCV, em relação ao MK, pode ser atribuída a maior área específica do RCV, pois a superfície específica é diretamente proporcional ao melhor desempenho da atividade pozolânica do material. (AMORIM et al., 2000; JIMENÉZ et al., 2013).

Figura 40 – Resistências médias à compressão das misturas aos 28 dias de cura em  $\text{Ca(OH)}_2$  e 28 dias de imersão em  $\text{NaOH}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que não foi usado aditivo para ajustar a consistência das argamassas, pois se optou por adequar este ensaio, ao da ASTM C 1260 (20014) que não prevê o uso de aditivo. Durante a moldagem, era visível a falta de adensamento das argamassas com MK, enquanto que as outras argamassas (RCV e MK + RCV) apresentavam melhor consistência devido as características do cimento e RCV. Portanto, é provável que a ausência de alteração de consistência para as argamassas com MK, tenha prejudicado o adensamento, e consequente a resistência à compressão das argamassas confeccionadas por MK.

Acredita-se que em idades mais avançadas, após a dissolução das partículas com maior dimensão do MK, o desempenho da resistência das argamassas confeccionadas por MK possa a ser melhor devido a diminuição da porosidade originada a partir da reação com hidróxido de cálcio. Segundo Montanheiro et al. (2011) a reação da pozolana com hidróxido de cálcio pode resultar em silicato de cálcio hidratado ou ferro aluminato hidratado de cálcio contribuindo na diminuição da porosidade e consequente aumento da resistência, fundamentalmente em idades avançadas.

A Tabela 23 apresenta as diferenças percentuais das resistências médias das misturas em relação à resistência média da referência.

Tabela 23 – Diferença percentual das resistências médias entre REF e cada mistura

Misturas	28 dias de cura em Ca(OH) <sub>2</sub>		28 dias imersos em NaOH	
	fc média (MPa)	Diferença (%)	fc média (MPa)	Diferença (%)
REF	55,54	0	40,0	0
20MC	49,55	-10,8	35,4	-11,5
30MC	53,38	-3,9	38,7	-3,25
20RCV	57,98	+4,4	46,2	+15,5
30RCV	54,57	-1,7	40,1	+0,25
10MC+10RCV	53,63	-3,4	44,3	+10,75
20MC+10RCV	55,61	+0,1	40,4	+1
10MC+20RCV	56,83	+2,3	41,6	+4
15MC+15RCV	57,11	+2,8	41,3	+1,3

Sinal “+”-representa aumento e “-“ representa diminuição.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.4 Absorção de água e porosidade

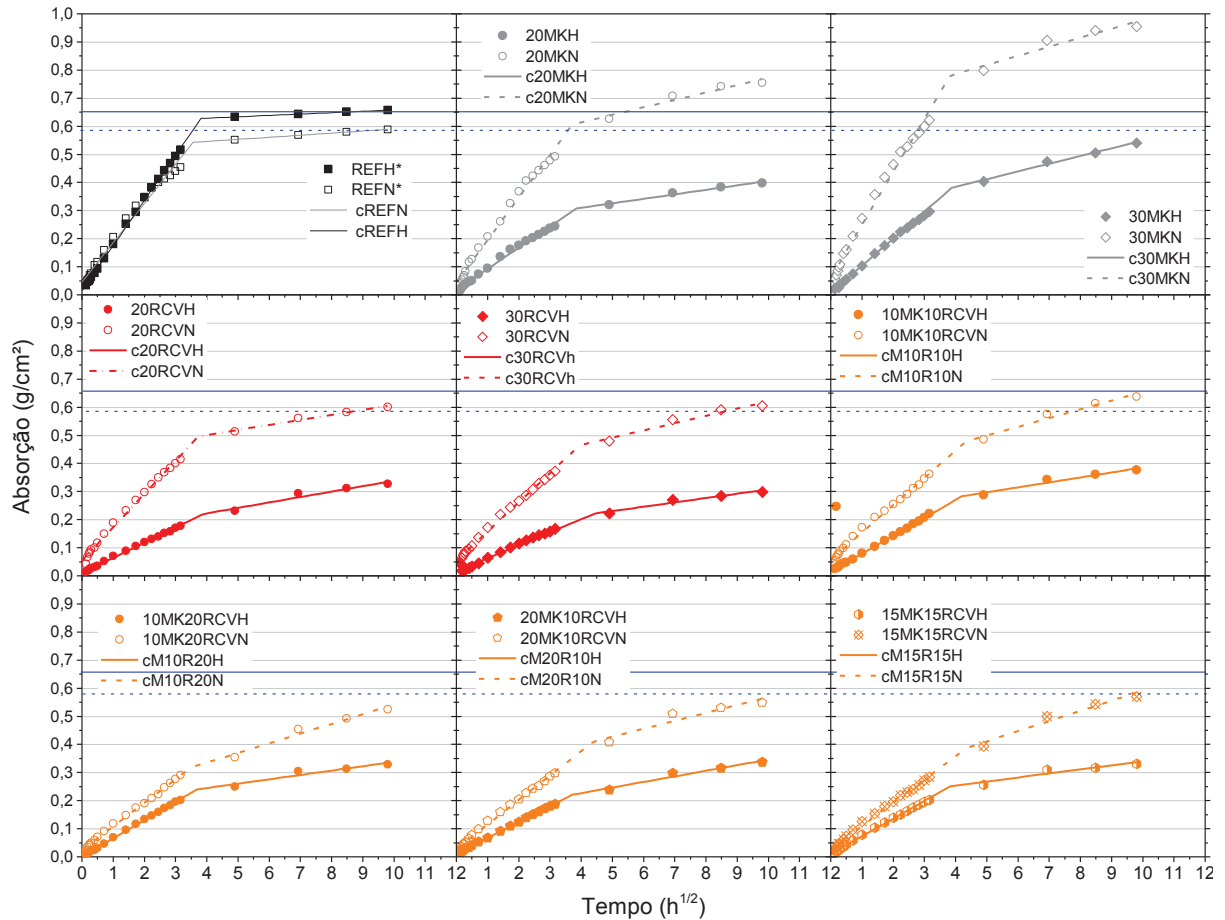
A capacidade de absorção de água por capilaridade através dos poros presentes na estrutura permite inferir sobre a quantidade de água que penetra no concreto, o que pode contribuir para que ocorra a RAA.

Normalmente, nos gráficos que relacionam a massa de água absorvida ao longo do tempo, são observados dois comportamentos distintos. Sendo o primeiro deles entre 1 minuto até por volta de 6h, os dados representados se referindo à fase de sucção capilar do material. Já entre 24 até 96h se registra uma fase de saturação com tendência à estabilização.

O ensaio de absorção de água por capilaridade teve como principal objetivo avaliar as condições de mobilidade de fluidos nas argamassas estudadas, numa condição de porosidade em três condições de cura (48h de cura, 28 dias de cura úmida e 28 dias de imersão na solução de NaOH). Neste item, são apresentados os resultados de absorção de água dos corpos de prova entre 28 dias de cura úmida e 28 dias de imersão em NaOH, e entre 48h de cura e 28 dias de cura úmida. Os gráficos ilustram a absorção capilar em relação ao tempo, e os resultados indicam a média dos três corpos de provas testados.

A Figura 41 – Absorção de água entre 28 dias de cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e 28 dias de imersão em NaOH . apresenta a comparação da absorção de água média das amostras ensaiadas entre 28 dias de cura úmida e 28 dias de imersão em NaOH.

Figura 41 – Absorção de água entre 28 dias de cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 28 dias de imersão em  $\text{NaOH}$ .



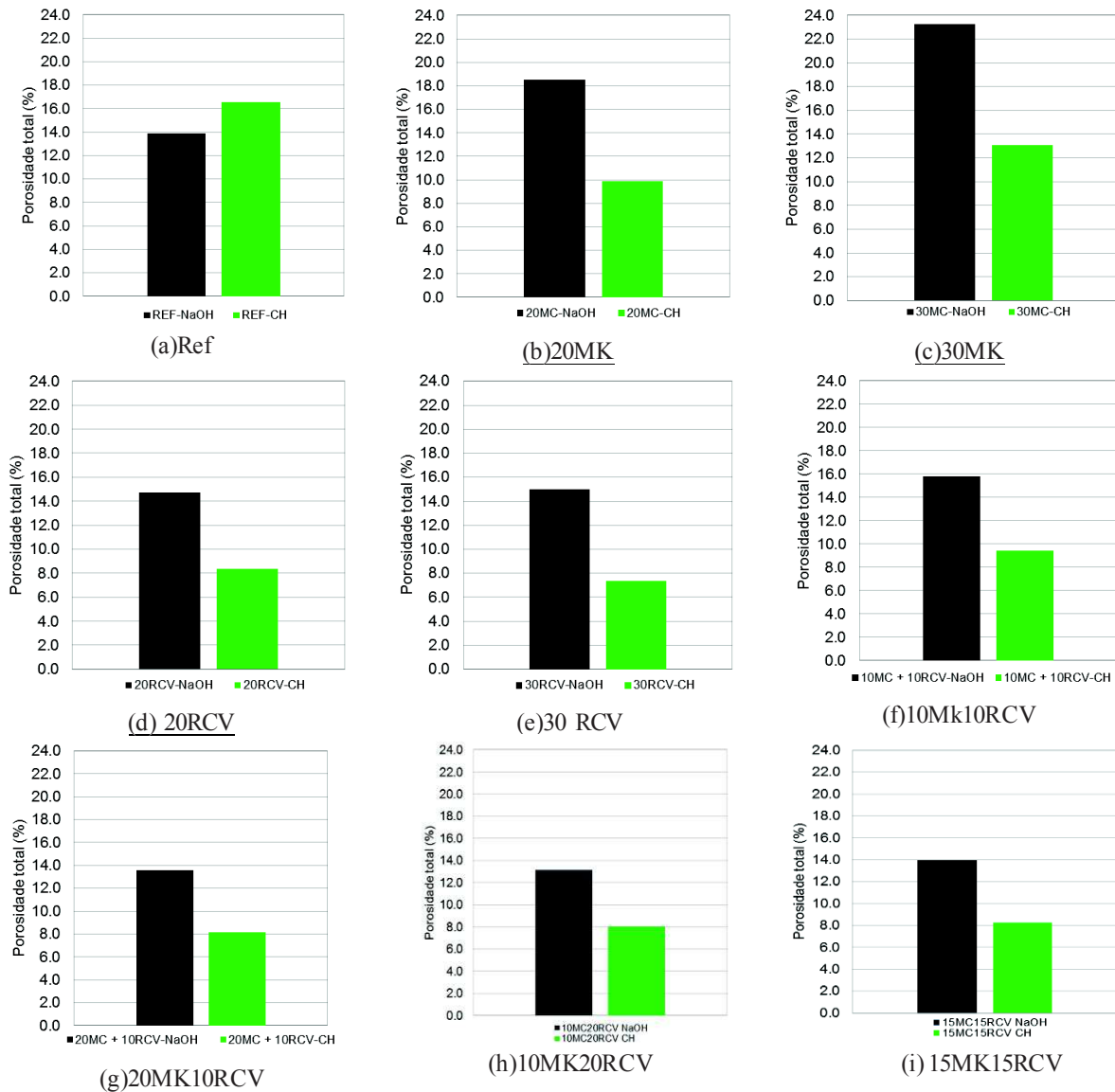
\*H-representa água saturada com cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e N-representa solução de  $\text{NaOH}$ .

Fonte: Elaborado pelo autor

Para todas as condições de cura, decorridas 96h de ensaio não foram observadas situações de saturação com tendência de estabilização, embora a absorção capilar tenha sido menos intensa entre 24h e 96h. Acredita-se que em tempos posteriores a 96h, provavelmente possa ocorrer a tendência de estabilização de absorção, para tal seria necessário realizar o ensaio por um prazo mais longo.

A comparação da porosidade é apresentada na Figura 42 – Comparação da porosidade total entre 28 dias de cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 28 dias de imersão em  $\text{NaOH}$ .. Os gráficos (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i) representam a média da absorção total da argamassa de referência, e das com as adições de 20MK, 30MK, 20RCV, 30RCV, 10MK10RCV, 20MK10RCV, 10MK20RCV e 15MK15RCV, respectivamente.

Figura 42 – Comparação da porosidade total entre 28 dias de cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 28 dias de imersão em  $\text{NaOH}$ .

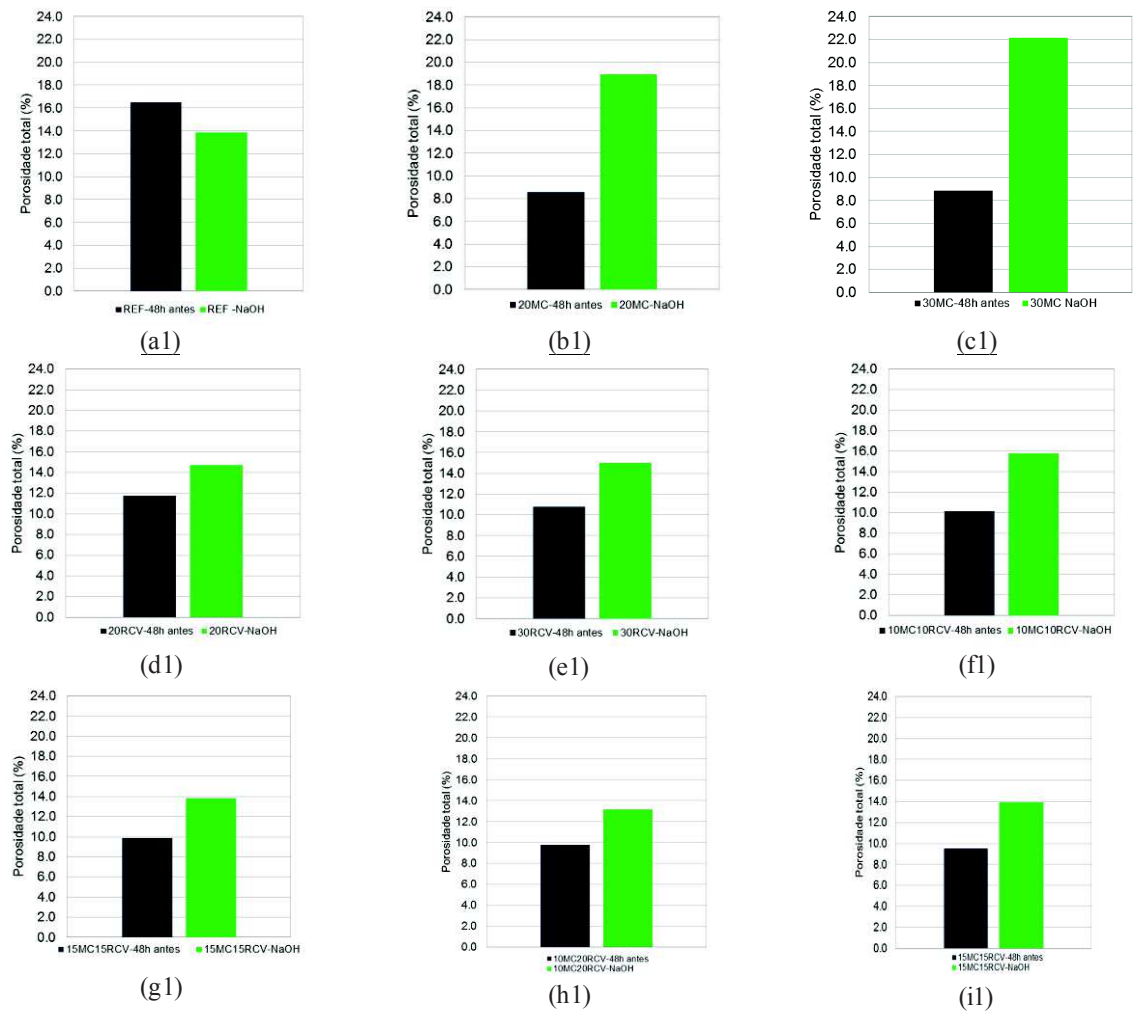


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 43 apresenta a comparação da porosidade total das amostras, curadas por 2 dias e por 28 dias de imersão em  $\text{NaOH}$ , comparando-os. Os gráficos (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i) ilustram a média da absorção total de referência, 20MK, 30MK, 20RCV, 30RCV, 10MK10RCV, 20MK10RCV, 10MK20RCV e 15MK15RCV, respectivamente.



Figura 43 – Comparação da porosidade total entre 2 dias e 28 dias de imersão em NaOH



Fonte: Elaborado pelo autor

Através dos gráficos de porosidade total entre 28 dias de cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 28 dias na solução de NaOH apresentados pela figura 42, e entre 2 dias de cura e 28 dias na solução de NaOH apresentados pela figura 43, verifica-se que as argamassas de referência, de RCV e de combinação de MK e RCV apresentaram uma diferença tecnicamente não significativa. Este comportamento provavelmente foi o resultado de não ter havido grandes alterações na microestrutura dos corpos de prova do ensaio acelerado capazes de gerar microfissuras no interior dos mesmos. Já as argamassas confeccionadas com MK apresentam uma diferença tecnicamente significativa. É provável que tenham surgido alterações substanciais na microestrutura dos corpos de prova submetidos em cura acelerada, originando microfissuras internas.

Nas Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26 estão apresentados os percentuais da diferença da taxa média de absorção, porosidade média total, absorção total e porosidade capilar nas três idades.

Tabela 24 – Diferença entre os resultados dos ensaios de absorção de entre 28 dias de cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e 28 dias de imersão em NaOH

Misturas	Taxa média de absorção (mm/h <sup>1/2</sup> )			Porosidade média Total (%)			Absorção Total (%)			Porosidade Capilar (%)		
	H	N	Diferença (%)	H	N	Diferença (%)	H	N	Diferença (%)	H	N	Diferença (%)
REF	0,47	0,56	+16,00	16,50	13,90	-15,80	8,06	7,06	-12,41	4,02	3,86	-3,98
20MC	0,54	0,44	-18,50	9,80	18,50	+47,00	4,99	9,84	+97,19	6,92	6,76	-2,31
30MC	0,92	0,34	-63,00	13,10	23,30	+43,80	6,79	11,29	+66,27	9,25	9,31	+0,65
20RCV	0,49	0,59	+16,9	8,40	14,70	+42,90	4,03	7,47	+85,36	5,64	5,26	-6,74
30RCV	0,52	0,54	+3,70	7,40	14,90	+50,30	3,61	7,49	+107,48	5,11	5,05	-1,17
10MC+10RCV	0,49	0,55	+10,90	9,40	15,80	+40,50	4,59	7,98	+73,86	4,00	4,07	+1,75
20MC+10RCV	0,45	0,52	+13,50	8,20	13,50	+39,30	3,50	6,34	+81,15	5,39	4,97	+7,79
10MC+20RCV	0,48	0,55	+12,70	8,10	13,20	+36,70	4,82	6,29	+30,50	3,89	3,95	+1,54
15MC+15RCV	0,56	0,46	-17,80	8,30	13,90	+40,30	4,74	7,31	+54,22	7,15	6,99	-2,24

H-representa cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e N -representa cura em NaOH. Sinal “+”-representa aumento e “-”- representa diminuição

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 – Diferença entre os resultados dos ensaios de absorção de água entre 2 dias de cura e 28 dias de imersão em NaOH

Misturas	Taxa média de absorção (mm/h <sup>1/2</sup> )			Porosidade média Total (%)			Absorção Total (%)			Porosidade Capilar (%)		
	2 dias	N	Diferença (%)	2 dias	N	Diferença (%)	2 dias	N	Diferença (%)	2 dias	N	Diferença (%)
REF	0,54	0,56	+3,70	16,49	13,9	-15,71	7,86	7,06	-10,18	5,74	3,86	-32,75
20MC	0,46	0,44	-4,35	8,54	18,5	+116,63	4,08	9,84	+141,18	5,33	6,76	+26,83
30MC	0,33	0,34	+3,03	8,85	23,3	+163,28	4,35	11,29	+159,54	3,51	9,31	+165,24
20RCV	0,61	0,59	-3,28	11,77	14,7	+24,89	5,85	7,47	+27,69	6,59	5,26	-20,18
30RCV	0,54	0,54	0,00	10,76	14,9	+38,48	5,43	7,49	+37,93	5,62	5,05	-10,14
10MC+10RCV	0,55	0,55	0,00	10,18	15,8	+55,21	5,07	7,98	+57,40	5,69	4,07	-28,47
20MC+10RCV	0,50	0,52	+4,00	9,90	13,5	+36,36	5,04	6,34	+25,79	5,39	4,97	-7,79
10MC+20RCV	0,56	0,55	-1,79	9,78	13,2	+34,97	4,82	6,29	+30,5	6,15	3,95	-35,77
15MC+15RCV	0,45	0,46	+2,22	9,51	13,9	+46,16	4,74	7,31	+54,22	5,38	6,99	+29,93

H-representa cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e N -representa cura em NaOH. Sinal “+”-representa aumento e “-”- representa diminuição

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 26 – Diferença entre os resultados dos ensaios de absorção de água entre 2 dias de cura e 28 dias de cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

Misturas	Taxa média de absorção ( $\text{mm/h}^{1/2}$ )			Porosidade média Total (%)			Absorção Total (%)			Porosidade Capilar (%)		
	2 dias	H	Diferença (%)	2 dias	N	Diferença (%)	2 dias	N	Diferença (%)	2 dias	N	Diferença (%)
REF	0,54	0,47	-12,96	16,49	16,5	+0,06	7,86	8,06	+2,54	5,74	4,02	-29,97
20MC	0,46	0,54	+17,39	8,54	9,8	+14,75	4,08	4,99	+22,30	5,33	6,92	+29,83
30MC	0,33	0,92	+178,79	8,85	13,1	+48,02	4,35	6,79	+56,09	3,51	9,25	+163,53
20RCV	0,61	0,49	-19,67	11,77	8,4	-28,63	5,85	4,03	-31,11	6,59	5,64	-14,41
30RCV	0,54	0,52	-3,70	10,76	7,4	-31,22	5,43	3,61	-33,52	5,62	5,11	-9,07
10MC+10RCV	0,55	0,49	-10,91	10,18	9,4	-7,66	5,07	4,59	-9,47	5,69	4,00	-29,70
20MC+10RCV	0,50	0,45	-10,00	9,90	8,2	-17,17	5,04	3,50	-30,56	5,39	5,39	0,00
10MC+20RCV	0,56	0,48	-14,29	9,78	8,1	-17,18	4,82	4,82	0,00	6,15	3,89	-36,75
15MC+15RCV	0,45	0,56	+24,44	9,51	8,3	-12,72	4,74	4,74	0,00	5,38	7,15	+32,90

H-representa cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e N -representa cura em NaOH. Sinal “+” -representa aumento e “-“ - representa diminuição

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando as Figura 41, Figura 42, Figura 43 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e as Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26, constata-se três comportamentos diferenciados de todas as misturas entre “28 dias de cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ” e “28 dias de imersão em  $\text{NaOH}$ ” quanto a absorção de água por capilaridade. A argamassa de referência apresentou uma diferença não significativa da absorção total (análise de variância-grupo Tukey apresentada na tabela Tabela E 8 do apêndice E) entre as duas curas. Apesar da argamassa curada em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  apresentar maior absorção em relação a argamassa submetida em cura acelerada, esta diferença de absorção não é expressiva. Provavelmente ocorreu uma mudança na estrutura dos poros após a execução do ensaio acelerado, mas não o suficiente para criar alterações na microestrutura capaz de gerar microfissuras internas significativas.

No segundo comportamento, verifica-se que para as amostras com 20MK e 30MK registrou-se uma diferença significativa da absorção total (conforme análise de variância-grupo Tukey apresentada na Tabela E 8 do apêndice E) entre amostras curadas em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e amostras submersas em  $\text{NaOH}$ , isto é, a argamassa submersa em cura acelerada absorveu mais água em relação a argamassa da cura em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Assim, acredita-se que apesar dos corpos de prova com 20MKMC e 30MK submetidos ao ensaio de RAA terem apresentado redução de expansões em 62,3 e 70,2% respectivamente, estas expansões podem ter sido expressivas suficientemente para alterar a microestrutura das argamassas, criando microfissuras internas. Outra hipótese, é que os possíveis produtos formados pela RAA, ao se acomodarem nos poros existentes das argamassas, absorvam água, tornando-as mais permeáveis.

No terceiro comportamento para as misturas de 20RCV, 30RCV, 10MK10RCV, 20MK10RCV, 10MK20RCV e 15MK15RCV, embora a argamassa exposta a solução tenha apresentado maior absorção total em relação a argamassa curada em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , essa diferença segundo análise de variância-grupo Tukey apresentada na Tabela E 8 do apêndice E, não é significativa. Numa comparação com os resultados obtidos no ensaio da RAA, verifica-se que há concordância, pois as seis amostras tiveram expansões bastante reduzidas, e com valores de absorção não expressivos.

De uma forma resumida, as amostras depois da imersão na solução de  $\text{NaOH}$  apresentaram um ligeiro aumento da capacidade de absorção de água por capilaridade em relação às amostras curadas na água saturada em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pois acredita-se que este aumento deve ter sido influenciado pelo ensaio acelerado que propõe condições de cura rígidas como forma de induzir a manifestação da RAA. Com este ensaio, os corpos de prova tendem a expandir devido ao gel formado, criando microfissuras na microestrutura das amostras. Enquanto que as amostras submetidas na cura com água saturada com cal, acredita-se que o

seu processo de hidratação tenha ocorrido normalmente, não sofrendo modificações na sua microestrutura

## 6 CONCLUSÃO

Neste capítulo final do trabalho, são apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros, com base na revisão bibliográfica, no programa experimental e da análise dos resultados sobre a mitigação da reação álcali-agregado em concreto com o emprego de MK e RCV.

### 6.1 Considerações finais

Sobre a caracterização do cimento e das adições minerais (MC e RCV), foi possível concluir:

- a) Quanto a análise química, o cimento, que apresentou 1,6% de equivalente alcalino, assim como o MK, que apresentou 1,75%, foram classificados como altamente alcalino, por apresentar teores de álcalis superior à 0,6%, limite estabelecido pela ASTM C150 (2015). Já o limite estabelecido pela NBR 12653 (2014) de 1,5% para o equivalente alcalino, também foi excedido pelo cimento e MK. Por sua vez, o equivalente alcalino do RCV atendeu apenas ao limite estabelecido pela NBR 12653 (2014). Embora o MK tenha apresentado elevado equivalente alcalino, os dois materiais pozolânicos atenderam aos limites das outras propriedades estabelecidas pela NBR 12653 (2014). Através da análise conjunta entre a DRX e FRX, foi possível verificar que ambos os materiais são compostos na sua maioria por alumina, sílica e óxido de ferro;
- b) A análise física mostrou que o RCV apresentou partículas mais finas que o MK e o cimento, justificando a sua melhor atividade pozolânica;
- c) Quanto a pozolanidade, tanto aos 28 dias como aos 63 dias, o MC, o RCV e a combinação MC+RCV, apresentaram índice de atividade pozolânica superior à 90%, limite estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Sobre a avaliação do potencial reativo de agregado, através do método acelerado de barras de argamassa, foi possível concluir que apresenta minerais potencialmente reativos na sua composição, contribuindo para o surgimento de expansões devido a RAA. O método acelerado de determinação do potencial reativo do agregado através de barras de argamassa evidenciou que o agregado utilizado nesta pesquisa possui potencial reativo, pois as expansões excederam ao limite de 0,10% preconizado pela ASTM C 1260 (2014).

Em relação a avaliação da eficiência das adições minerais na mitigação da RAA foi possível concluir que a utilização de MK, RCV e combinação de MKRCV mostrou eficaz perante a exigência da ASTM C-1567 (2013), pois todas as amostras apresentaram expansões abaixo do limite de 0,10% capaz de gerar expansões deletérias, na idade de 16 dias. Estas reduções de expansões estão associadas ao potencial pozolânico do MK e RCV de acordo com a NBR 12653 (2014). Foi possível verificar também que as expansões foram influenciadas pela relação  $Ca/Si_i$  equivalente alcalino dos teores propostos, por teor de alumina e por finura das partículas dos aglomerantes. Quanto menor for a relação  $Ca/Si_i$ , menor são as expansões; quanto maior for o equivalente alcalino, maior são as expansões, quanto maior for o teor de alumina na mistura, menor são as expansões devido a RAA e quanto menor for a dimensão das partículas das pozolanas, menor são as expansões.

A partir do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova das misturas, foi possível concluir que as resistências médias das argamassas expostas a solução de NaOH durante 28 dias, reduziram significativamente em relação as resistências médias das argamassas em cura úmida com água e cal devido provavelmente ao aparecimento microfissuras internas criadas pela alteração da microestrutura das argamassas face ao ataque da solução. O desempenho das misturas quanto a resistência à compressão das nove misturas em cada uma das formas cura, mostrou que as argamassas confeccionadas por RCV e MK + RCV registraram maior resistência quando comparadas com argamassas de REF e MK devido a menor dimensão média equivalente e maior área superficial específica do RCV em relação ao MK. Foi possível verificar também que não existe uma relação entre a resistência a compressão e as expansões.

De acordo o ensaio de absorção de água por capilaridade foi possível concluir que as misturas em cura acelerada absorveram mais água em relação as argamassas curadas em  $Ca(OH)_2$ . Provavelmente as expansões geradas nas misturas submersas na solução de NaOH permitiram a alteração da microestrutura das argamassas, criando microfissuras internas, ou pelo fato do gel formado ser higroscópico. Numa comparação entre a porosidade total das misturas e as respectivas expansões, foi possível concluir que quanto menor for a porosidade total da amostra, menor são as expansões devido a RAA.

Fazendo uma comparação de todas as misturas em função dos ensaios de resistência à compressão, RAA e absorção de água por capilaridade, pode-se concluir que as misturas de 20RCV e 15MK + 15RCV apresentaram melhor desempenho em relação a todas outras, embora as outras misturas com RCV e com combinação de MK + RCV tivessem também resultados satisfatórios na generalidade.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir do desenvolvimento deste trabalho, surgiram possibilidades que podem ser pesquisadas em futuras pesquisas. Dentre várias sugestões, se destacam as seguintes:

- a) Análise da influência da variabilidade do tamanho das partículas do RCV na mitigação da RAA;
- b) Avaliação conjunta do teor de equivalente alcalino, da relação Ca/Si, teor de alumina e dimensão média equivalente das amostras com adições minerais na influência das expansões da RAA, como forma de confirmar as conclusões deste trabalho;
- c) Avaliação da influência da resistência a tração das amostras com RCV em relação as expansões geradas pela RAA;
- d) Avaliação da influência da absorção total, taxa de absorção e absorção capilar das amostras com RCV em relação as expansões da RAA;
- e) Reação álcali-agregado: verificação da variabilidade das expansões em idades mais avançadas, pelo método dos prismas de concreto através da ASTM C-1293;
- f) Incremento de dias de ensaio de absorção capilar de água, além das 96h preconizadas pelo método de RILEM.





## REFERÊNCIAS

- AFSHINNIA, Kaveh; POURSAEE, Amir. The potential of ground clay brick to mitigate Alkali-Silica Reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 95, p 164-170, 2015.
- AGREDO, J. T.; GUTIÉRREZ, R. M.; ARJONA, S. D. **Effect of metakaolin percentages in the final properties of blended concrete**. Colômbia, p. 77-90, 2011.
- AMORIM, L. V.; PEREIRA, A. S. G.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de Rejeitos de Cerâmica Vermelha e da Construção Civil para Obtenção de Aglomerantes Alternativos**. Cerâmica Industrial, v. 5, p. 35-46, 2000.
- ANDRADE, Walton Pacelli de. (Ed.). **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C-1260/14: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)**. West Conshohocken, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C-1567/13: Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)**. West Conshohocken, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C-295/90**. Standard guide for petrographic examination of aggregate for concrete. Philadelphia, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C-305/14: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency**. West Conshohocken, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.
- 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, 2008a.
- BEKTAS, Fatih; TURANLI, Lutfullah; WANG, Kejin; CEYLAN, Halil. Comparative Performance of Ground Clay Brick in Mitigation of Alkali-Silica Reaction. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, v. 19, p. 1070-1078, 2007.

BERUBÉ, M. A.; DORION, J.F. **Distribution of alkalis of Concrete structures affected by alkali-silica reactivity and contribution by aggregates**. 11<sup>a</sup> ICARR-International conference of alkali-aggregate reaction, p. 139-148. Quebec, 2000.

BERUBÉ, M. A.; FOURNIER, B. **Acelerated teste Methods for Alkali-aggregate Reactivity**. In: **Advances in Concrete Technology**, Edited by: V. M. Malhotra. CANMET, Ottawa, Canada, p. 991-1044, 1994.

CALLISTER, D. W. **Ciência e engenharia dos Materiais: uma introdução**. 7<sup>a</sup> ed., p. 49-58, 2008.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K.L. Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1049-1054, 2012 (a).

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K.L. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 1645-1649, 2012 (b).

CHARLWOOD, R. G.; SOLYMAR, Z. V. **Long-term management of AAR-affected structure-an international perspective**. Second Internaciona Conference on Alkali-Aggregate Reaction in hydroelectric Plants and Dams, Chattanooga, Tennessee-USA, USCOLD, P. 19-55, 1995.

CHATTERJEE, A. K. X-Ray diffraction. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology**. Norwich/New York/U.S.A: Noyes Publications/William Andrew Publishing, cap. 8, p. 275-332, 2001.

CHATTERJI, S. The role of Ca(OH)<sub>2</sub> in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, New York, 1979. p. 185-188.

CONCEIÇÃO, E. S. **Influência da distribuição granulométrica no empacotamento materiais-primas na formulação de porcelânicos**. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, 2011.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; DÉsir, Jean Marie. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, São Paulo, v. 56, p. 71-76, 2010.

CUNHA, A. C. **Caracterização e estudo de aplicação de rejeito catalítico de unidade de FCC como material pozolânico**. Tese (Doutorado em Tecnologias de Processos químicos e Bioquímicos)- curso de Pós-Graduação em Tecnologias de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro (URFJ), Rio de Janeiro, 2012.

CUNHA, A. C.; MARIA, A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações ‘alcali-silica e ‘alcali-silicato**. São Paulo, 2008. .

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realização**. São Paulo, Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON), v. 1, p. 345-378, 2011.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 1-9, 1981.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms-1: alkalis in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 5, p. 329-345, 1975.

DIAMOND, S. **Alkali-silica reactions**. 10<sup>a</sup> ICARR-International conference of alkali-aggregate reaction, p. 3-15. Melbourne, 1976.

DUART, M.A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

DUCHESNE, J.; BÉRUBÉ, M. A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanism, Part 1: concrete expansion and portlandite depletion. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 1, p. 73-82, 1994a.

DUTRA, C. V.; GOMES, C. B. A fluorescência de raios X na geologia. In: **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. Coordenador Celso B. Gomes. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, p. 84-120, 1984.

FARNY, J. A.; KOSMATKA, S.H. **Diagnosis and control of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**. (ACPA-American Concrete Pavement Association), 1997.

FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, p. 113-122, 2010.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, A. **Alkali-Aggregate reaction in Concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Paper, Ottawa, 2000.

FURNAS. Equipe de Laboratório de Concreto; ANDRADE, W.P. (Ed.). Reatividade potencial álcali-agregado. In: **Concretos massa estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaio e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GILLOTT, J. E.; ROGERS, C. A. The behavior of silicocarbonatite aggregates from the Montreal area. **Cement and Concrete research**, v. 33, p. 471-480, 2003.

GITAHY, H. S. Reação álcali-silica: mecanismo, diagnóstico e medidas preventivas. In: SEMINÁRIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO, São Paulo. **Anais...**São Paulo, p. 1-30, 1984.

GOMES NETO, D. P.; BARRETO, L. S. **Uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seus mecanismos e os fatores que a influenciam**. In: IX INTERNATIONAL CONGRESSO ON PATOLOGY AND REPAIR OF STRUCTURES, João Pessoa, 2013.

GONÇALVES, Jardel Pereira. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. 2005. 292 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.

HANSEN, D. M. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, p. 933-1002, 2011.

HEIJNEN, W. M.M. **Alkali-silica reaction in the Netherlands**. In: Poole, AB. (Ed). Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, vl. 1, p. 432-439, 1992.

HOBBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete**. London; Ed. Thomas Telford Ltda, 1988.

HOBBS, D. W. Possible influence of small additions of pfa, gbf, and limestone flour upon expansion caused by the alkali-silica reaction. **Magazine of Concrete Research**, v. 35, n. 122, p. 55-58, 1983.

HONG, Sung Yoon; GLASSER, F. P. Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels Part II. Role of alumina. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1101-1111, 2002.

ICHIKAWA, T.; MIURA, M. Modified model álcali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 11, 1291-1297, 2007.

ISAIAS, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão de armadura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Doutorado em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 345-377, 1995.

JAMIL, M.; KAISH, A. B.; RAMAN, S. N.; ZAIN, M. F. M. Pozzolan contribution of rice husk ash in cementitious system. **Building Materials**, p. 588-593, 2013.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNANDEZ, J. M.; DE BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and building materials**, v. 40, p 679-640, 2013.

JR, C. C.; MANCIO, M.; SHOMGLIN, K.; HARVEY, J.; MONTEIRO, P.; ALI, A. Accelerated Laboratory Testing for Alkali-Silica Reaction using ASTM 1293 and comparison with ASTM 1260. p. 13-70, 2004.

KATAYAMA, T. How to identify carbonate rock reactions in concrete. **Materials characterizations**, v. 53, p. 85-104, 2004.

KAZMIERCZAK, Claudio de Souza ; KULAKOWSKI, Marlova Piva ; BOITO, Deise ; GARCIA, Ana Cristina de Almeida . Estudo comparativo da geração de resíduos de construção e demolição em São Leopoldo E Novo Hamburgo - RS. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído - ENTAC 2006, 2006, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 1826-1871.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos de cerâmica vermelha. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, p. 565-588, 2010.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: **3º Congresso Brasileiro de Cimento**, São Paulo. Anais... São Paulo, ABCP, v. 1, p. 319-337.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Natural Pozzolans. In: **Design and Control of Concrete Mixtures**. EB001, 14 ed., Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.

KUBILIŪTĖ, R.; KAMINSKAS, R. **The Pozzolanic Activity of Calcined Clay - Silica Gel Composites**. Materials Science, v. 19, n. 4, p. 453-460, 2013.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PÍNFARE, J. C.; CARNEIRO, E. F. **Detecção da Reação Álcali-Agregado**. Seminário Internacional de Barragens, Goiânia, 2005.

LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. **Estudo das reações Álcali-silica associadas ao uso da lama vermelha em argamassa de cimento Portland**. Fortaleza, p. 1-16, 2013

LERCH, W. **Studies of Some Methods of Avoiding the Expansion and Pattern Cracking Associated with the Alkali-Aggregate Reaction**. In: SIMPOSYUM ON POZZOLANIC MATERIALS IN MORTARS AND CONCRETES. Portland Cement Association, 1950.

LE, Thanh Ha; SIEWERT, Karsten; LUDWIG, Michael Horst. Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 88, p 10-19, 2015.

MADUREIRA, E. L. **Simulação numérica do comportamento mecânico de elementos de concreto armado afetado pela reação álcali-agregado**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Curso de Doutorado em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, 2007.

MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I. Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: a review. **Construction and Building Materials**, 2014b, v. 73, p.523-534.

MEHTA, P. K. **Natural pozzolans: Supplementary cementing materials**. Proc., Int. Symp. On advances in Concrete Technology, V. M. Malhotra, ed., CANMET, Athens, Greece, p. 407-430, 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MITROVIC, A. A. **Pozzolan obtained by Mechanochemical Treatment of Kaolinite Clay.** **Internacional Congress on Advances in Applied and Materials Science**, Sérbia, p. 82-86, 2011.

MONTANHEIRO, T. J.; NEGRI, F. A.; YAMAMOTO, J. K. **Pozzolana natural no Oeste Paulista.** V. 11, n. 1, p. 59-74, 2011.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato.** 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MUNIR, M. J.; QAZI, A. U.; KAZMI, S. M. S.; KITHAB, A.; ASHIQ, S. Z.; AHMED, I. literature review on alkali silica reactivity of concrete in Pakistan. **Pakistan Journal of Science**, v. 68, n. 01, p. 53-62, 2016.

MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: II. Influence of mineralogical properties of the raw-kaolinite on the reactivity of metakaolinite. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 511-518, 1983.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto.** Bookman editora Ltda, 2ª ed., São Paulo, p. 266-268, 2013.

OWSIAK, Z.; ZAPALA, J.; CZAPIK, P. **Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction**, v. 63, n. 1, p. 23-29, 2015.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto.** 1981. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

POLL-LEGRÁ, L.; REYES, R. A.; RAMÍREZ, Y. R.; DIAZ, A. A.; RODRÍGUEZ, C. A. L.; HERNÁNDEZ, J. F. Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito la Delta Moa, Cuba. v. 32, n. 1, p. 15-27, 2016.

POOLE, A. B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **The alkali-silica reaction in concrete.** Glasgow: Blackie and Son, p. 1-28, 1992.

PRADHAN, D.; DUTTA, D.; GHOSH (2014). Properties Exploration of Conventional Concrete after Silica Fume Supplementation . **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 3(1): 8431-8435.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. The alkali sílica reaction, part. I: use of the Double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 94, n. 1, p. 10-16, 1997.

PRISZKULNIK, S.. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Reação Álcali-Agregado. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 1017-1070.

RAMLOCHAN, T.; THOMAS, M.; GRUBER, K. A. The effect of metakaolin on álcali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 339-344, 2000.

RAMOS, M.; BATISTA, A. L.; OLIVEIRA, S. B. **Reliability of arch Dams subject to concrete swelling.** Portugal.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. M. S.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Estudo das reações alcalis-silica (ras) associadas ao uso da lama vermelha em argamassas de cimento Portland. **X Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas**, p. 1-16, 2013.

ROY, D. M.; TIKALSKY, P. J.; SHEETZ, B. E.; ROSENBERGER, J.; KRIZE, T.; ARJUNAN, P. **Influence of cement characteristics on alkali-silica reativity**. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF CEMENT MICROSCOPY, 2003.

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregados em concretos**. 2002. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1, 1989.

SEBASTIANY, L.D.. **Avaliação de métodos de determinação do potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

SIBILLA, J. P. **A Guide to Material Characterization and chemical Analysis**. V. C. H. Publishers, Inc. New York, p. 318, 1988.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidroelétricas do complexo Paulo Afonso/ CHESF**. 2007. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado**. 2007. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SILVEIRA, A. L. Z. **Estudo da reação álcali-agregado em rochas carbonáticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade de Brasília, n. 209, 2006.

SILVEIRA, B. A.; HOEHR, G. T.; DALMOLIN, D. **Avaliação da reação álcali-agregado da areia natural da região metropolitana de Porto Alegre, Brasil e do uso da sílica ativa**. IX Congresso Internacional sobre patologia e recuperação de estruturas, 2013.

SWAMY, R. N. **The Alkali-silica Reaction in Concrete**. Edited by R. N. Swamy, London, 1992.

TASHIMA, Mauro Mitsuuchi. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso 117 de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (UNESP), São Paulo, 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. **American Society of Civil Engineers**, 2ª ed., p. Australia, p. 213-214, 1997.



THAULOW, N.; JACOBSEN, U. H.; CLARK, B. Composition of alkali-silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-Ray diffraction analyses. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 2, p. 309-318, 1996

TIECHER, F. **Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado**. 2010. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. **Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays**. **Cement and Concrete Research**, v. xxx, p. 319-327, 2013.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

TRUSILEWICZ, L.; MARTINEZ, F. F.; RAHHAL, V. TEM and SAED Characterization of Metakaolin. Pozzolanic activity. **The American Ceramic Society**, v. 95, n. 9, p. 2989-2996, 2012.

VALDUGA, Laila. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo**. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. **Cement and Concrete Research**, v. 7, n. 6, p. 643-648, 1977.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1970.

VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ONDRÁČEK, M.; KERŠNER, C.; ČERNÝ, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement & concrete composites**, v. 34, p. 55-61, 2012.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2005.

VIEIRA, C. M. F.; SALES, H. F.; MONTEIRO, S. N. Efeito de adição de argila fundente íltica em cerâmica vermelha de argilas caulínicas. **Associação Brasileira de Cerâmica** n. 50, p. 239-246, 2005.

VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction XIX: Effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. **Australian Journal of the applied Science**, v. 2, n. 108, p. 488-494, 1952.

VIVIAN, H. E. **The process of alkali-aggregate reaction**. Proceedings...Alkali in cement and concrete, London, 1983.

WILD, S.; KHAIB, J.M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n.1, p. 137-146, 1997.

WAPDA. Study Report-Concrete Materials Studies, Mangla Dam Raising Project, 2004.

WONG , H. S.; RAZAK, H. A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 35, p. 696-702, 2005.

XU, G. J. Z.; WATT, D. F.; HUDEC, P. Effectiveness of mineral admixture in reducing ASR expansion. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n.6, p. 1225-1236, 1995.

YAZICI, S.; AREL, H. S.; ANUK, D. Influences of metakaolin on the durability and mechanical properties of mortars. **Arabian Journal for Science & Engineering**, v.39. 8585-8592, 2014.

ZAIN, M. F. M.; ISLAM, M. N.; MAHMUD, F.; JAMIL, M. Production of rice husk as for use in concrete as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, p. 798-805, 2011.



## APÊNDICE A - RESULTADOS DE EXPANSÃO/RAA

Tabela A 1 – Resultados de expansão/RAA - repetição 1 e 2

Determinação do potencial reativo do agregado e avaliação da eficiência das adições minerais - ASTM C1260 (2014) e ASTM C1567 (2013)																		
CP I																		
Idade (dias)	REF		20M		30M		20RCV		30RCV		10MC10RCV		20MC10RCV		10MC20RCV		15MC15RCV	
	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)
L0/2dias	4.534	0.000	5.885	0.000	5.95	0.000	6.48	0.000	4.466	0.000	5.096	0.000	6.745	0.000	6.199	0.000	6.411	0.000
L1/5dias	4.612	0.017	5.899	0.002	5.955	0.001	6.531	0.008	4.467	0.000	5.134	0.007	6.766	0.003	6.224	0.004	6.44	0.005
L2/8dias	4.733	0.044	5.914	0.005	5.973	0.004	6.541	0.009	4.482	0.004	5.146	0.010	6.805	0.009	6.266	0.011	6.553	0.022
L3/13dias	5.083	0.121	6.142	0.044	6.152	0.034	6.6	0.019	4.531	0.015	5.237	0.028	6.89	0.021	6.318	0.019	6.563	0.024
L4/15dias	5.088	0.122	6.147	0.045	6.175	0.038	6.68	0.031	4.536	0.016	5.272	0.035	6.892	0.022	6.319	0.019	6.587	0.027
L5/19dias	5.11	0.127	6.189	0.052	6.181	0.039	6.701	0.034	4.576	0.025	5.302	0.040	6.896	0.022	6.321	0.020	6.623	0.033
L6/26dias	5.335	0.177	6.209	0.055	6.222	0.046	6.799	0.049	4.66	0.043	5.434	0.066	6.981	0.035	6.441	0.039	6.706	0.046
L7/28dias	5.374	0.185	6.245	0.061	6.255	0.051	6.853	0.058	4.731	0.059	5.521	0.083	6.996	0.037	6.499	0.048	6.733	0.050
L8/30dias	5.449	0.202	6.290	0.069	6.313	0.061	6.886	0.063	4.774	0.069	5.571	0.093	6.999	0.038	6.519	0.052	6.773	0.056
Determinação do potencial reativo do agregado e avaliação da eficiência das adições minerais - ASTM C1260 (2014) e ASTM C1567 (2013)																		
CP II																		
Idade (dias)	REF		20M		30M		20RCV		30RCV		10MC10RCV		20MC10RCV		10MC20RCV		15MC15RCV	
	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)
L0/2dias	5.066	0.000	6.156	0.000	5.253	0.000	5.084	0.000	5.56	0.000	6.016	0.000	5.367	0.000	6.228	0.000	4.748	0.000
L1/5dias	5.1923	0.025	6.166	0.002	5.279	0.005	5.142	0.011	5.571	0.002	6.053	0.006	5.386	0.004	6.234	0.001	4.775	0.006
L2/8dias	5.307	0.048	6.191	0.006	5.3	0.009	5.147	0.012	5.584	0.004	6.061	0.007	5.409	0.008	6.28	0.008	4.842	0.020
L3/13dias	5.642	0.114	6.389	0.038	5.443	0.036	5.187	0.020	5.636	0.014	6.125	0.018	5.485	0.022	6.335	0.017	4.893	0.031
L4/15dias	5.644	0.114	6.402	0.040	5.456	0.039	5.288	0.040	5.64	0.014	6.203	0.031	5.498	0.024	6.353	0.020	4.911	0.034
L5/19dias	5.646	0.114	6.453	0.048	5.462	0.040	5.313	0.045	5.678	0.021	6.212	0.033	5.553	0.035	6.39	0.026	4.945	0.041
L6/26dias	5.865	0.158	6.463	0.050	5.574	0.061	5.439	0.070	5.721	0.029	6.373	0.059	5.648	0.052	6.431	0.033	5.013	0.056
L7/28dias	5.909	0.166	6.495	0.055	5.582	0.063	5.46	0.074	5.772	0.038	6.443	0.071	5.691	0.060	6.484	0.041	5.041	0.062
L8/30dias	5.953	0.175	6.556	0.065	5.614	0.069	5.481	0.078	5.791	0.042	6.464	0.074	5.699	0.062	6.494	0.043	5.049	0.063

Tabela A 2 – Resultados de expansão/RAA - repetição 3 e médias

Determinação do potencial reativo do agregado e avaliação da eficiência das adições minerais - ASTM C1260 (2014) e ASTM C1567 (2013)																		
CP III																		
Idade (dias)	REF		20M		30M		20RCV		30RCV		10MC10RCV		20MC10RCV		10MC20RCV		15MC15RCV	
	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)	Leit. (mm)	Expans. (%)
L0/2dias	6.053	0.000	6.201	0.000	6.06	0.000	5.694	0.000	6.602	0.000	6.075	0	5.589	0.000	5.439	0.000	5.255	0.000
L1/5dias	6.194	0.023	6.212	0.002	6.065	0.001	5.768	0.013	6.609	0.001	6.109	0.006	5.611	0.004	5.46	0.004	5.276	0.004
L2/8dias	6.291	0.039	6.235	0.005	6.09	0.005	5.769	0.013	6.627	0.004	6.125	0.008	5.671	0.015	5.501	0.011	5.335	0.015
L3/13dias	6.689	0.105	6.422	0.036	6.261	0.033	5.815	0.021	6.653	0.008	6.149	0.012	5.713	0.022	5.515	0.014	5.383	0.024
L4/15dias	6.698	0.107	6.479	0.045	6.221	0.027	5.86	0.029	6.673	0.011	6.26	0.030	5.739	0.027	5.538	0.018	5.399	0.027
L5/19dias	6.713	0.109	6.491	0.047	6.239	0.030	5.978	0.050	6.701	0.015	6.321	0.040	5.773	0.033	5.57	0.024	5.45	0.037
L6/26dias	6.912	0.142	6.511	0.050	6.321	0.043	6.011	0.056	6.743	0.021	6.471	0.065	5.82	0.041	5.621	0.033	5.498	0.046
L7/28dias	6.992	0.155	6.552	0.057	6.347	0.047	6.071	0.066	6.804	0.031	6.511	0.072	5.883	0.053	5.664	0.041	5.523	0.051
L8/30dias	7.108	0.174	6.619	0.067	6.39	0.054	6.095	0.070	6.88	0.042	6.531	0.075	5.897	0.055	5.665	0.042	5.563	0.059
Determinação do potencial reativo do agregado e avaliação da eficiência das adições minerais - ASTM C1260 (2014) e ASTM C1567 (2013)																		
MÉDIA DOS 3CP'S																		
Idade (dias)	REF		20M		30M		20RCV		30RCV		10MC10RCV		20MC10RCV		10MC20RCV		15MC15RCV	
	Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)		Expans. Média (%)	
L0/2dias	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
L1/5dias	0.022		0.002		0.002		0.011		0.001		0.006		0.004		0.003		0.005	
L2/8dias	0.044		0.005		0.006		0.012		0.004		0.009		0.010		0.010		0.019	
L3/13dias	0.113		0.039		0.034		0.020		0.012		0.019		0.022		0.017		0.026	
L4/15dias	0.114		0.043		0.034		0.033		0.014		0.032		0.024		0.019		0.030	
L5/19dias	0.117		0.049		0.036		0.043		0.020		0.038		0.030		0.023		0.037	
L6/26dias	0.159		0.052		0.050		0.058		0.031		0.064		0.043		0.035		0.049	
L7/28dias	0.169		0.058		0.054		0.066		0.043		0.075		0.05		0.043		0.054	
L8/30dias	0.184		0.067		0.061		0.070		0.051		0.081		0.052		0.046		0.059	

## APÊNDICE B - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Tabela B 1 – Absorção de água (cura NaOH) - dimensões dos corpos de prova.

TRAÇO		Rilem																				
		CP	Largura (mm)								Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Altura (mm)									
			L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>média(1,2,3)</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>média(4,5,6)</sub>			H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	H <sub>8</sub>	H <sub>média</sub> (mm)	H média (m)
A	REF NaOH	I	41.68	41.74	41.74	41.72	36.74	36.65	36.71	36.70	1531.12	15.31	42.76	42.61	42.71	42.68	42.67	42.84	42.77	42.68	42.72	0.04272
		II	37.37	37.3	37.36	37.34	41.04	41.4	41.42	41.29	1541.78	15.42	42.41	42.41	42.51	42.39	42.43	42.39	42.42	42.46	42.43	0.04243
		III	41.39	41.97	41.6	41.65	41.04	41.4	41.42	41.29	1719.73	17.20	42.32	42.25	42.29	42.33	42.27	42.36	42.33	42.33	42.31	0.04231
B	20 MC NaOH	I	37.47	37.54	37.67	37.56	42.96	43.05	43.7	43.24	1623.97	16.24	40.07	40.58	40.61	40.56	40.55	40.78	41.54	42.92	40.95	0.04095
		II	38.12	37.9	37.72	37.91	42.69	42.67	43.38	42.91	1626.99	16.27	40.61	40.62	40.52	40.61	40.77	40.61	42.74	41.46	40.99	0.04099
		III	42.37	42.5	42.55	42.47	42.9	43.77	44.04	43.57	1850.56	18.51	40.31	40.41	40.36	40.5	40.66	40.65	40.42	40.32	40.45	0.04045
C	30 MC NaOH	I	38.83	38.46	38.06	38.45	42.45	42.94	42.87	42.75	1643.87	16.44	40.91	41.02	40.89	41.04	41.22	40.87	41.51	41.11	41.07	0.04107
		II	36.4	35.95	35.9	36.08	25.71	42.59	42.53	36.94	1333.04	13.33	41.21	41.05	41.12	41.03	41.7	41.42	41.44	41.07	41.26	0.04126
		III	42.01	42.4	42.41	42.27	42.11	41.86	40.57	41.51	1754.91	17.55	40.62	40.84	40.98	40.64	40.67	40.29	40.6	40.53	40.65	0.04065
D	20 RCV NaOH	I	38.13	37.9	37.77	37.93	43.12	42.78	42.65	42.85	1625.44	16.25	40.8	40.9	40.74	40.79	40.79	40.82	40.87	40.77	40.81	0.04081
		II	43.25	43.37	43.44	43.35	37.89	37.81	39.03	38.24	1657.98	16.58	40.88	40.84	40.88	40.91	40.88	41.18	40.89	40.94	40.93	0.04093
		III	43.86	44.44	43.9	44.07	39.2	38.71	38.48	38.80	1709.64	17.10	40.98	40.87	40.91	40.87	40.79	40.87	40.85	40.88	40.88	40.88
E	30RCV NaOH	I	43.13	43.08	43.17	43.13	38.34	38.31	38.95	38.53	1661.81	16.62	40.33	40.28	40.26	40.26	40.85	40.93	40.29	40.32	40.44	0.04044
		II	37.71	37.04	37.29	37.35	42.86	42.68	42.72	42.75	1596.69	15.97	40.3	40.34	40.3	40.37	40.34	40.27	40.47	40.64	40.38	0.04038
		III	42.33	42.24	42.22	42.26	37.61	37.57	37.53	37.57	1587.83	15.88	40.34	40.28	40.36	40.36	40.31	40.35	40.32	40.29	40.33	0.04033
F	10 MC10RC NaOH	I	38.76	39.47	39.43	39.22	42.09	42.5	42.4	42.33	1660.18	16.60	40.34	40.34	40.33	40.39	40.35	40.35	40.59	40.54	40.40	0.0404
		II	42.72	42.4	42.32	42.48	37.74	38.16	38.83	38.24	1624.58	16.25	40.4	40.39	40.35	40.38	40.61	40.45	40.39	40.32	40.41	0.04041
		III	35.37	35.22	35.96	35.52	42.59	42.55	42.38	42.51	1509.70	15.10	40.42	40.45	40.88	40.61	40.42	40.44	40.4	40.54	40.52	0.04052
G	20MC10RC NaOH	I	38.33	38.14	38.16	38.21	41.26	41.48	41.63	41.46	1584.06	15.84	39.77	39.7	39.06	39.9	39.71	39.67	39.64	38.84	39.66	0.03966
		II	38.83	38.71	38.76	38.77	41.75	41.59	41.46	41.60	1612.69	16.13	39.69	39.7	39.74	39.72	39.69	39.67	39.69	39.71	39.70	0.0397
		III	36.15	36.19	36.27	36.20	41.72	41.67	41.83	41.74	1511.13	15.11	39.66	39.68	39.64	39.78	39.72	39.69	39.81	39.71	39.71	0.03971
H	10M20RC NaOH	I	42.13	42.25	42.27	42.22	37.62	37.62	37.53	37.59	1586.92	15.87	39.9	39.93	39.97	39.84	40.04	39.86	39.9	39.98	39.93	0.03993
		II	39.73	39.64	39.6	39.66	42.31	42.4	42.42	42.38	1680.52	16.81	39.9	39.93	39.97	39.84	40.04	39.86	39.9	39.98	39.93	0.03993
		III	42.36	42.51	42.52	42.46	39.18	39.24	39.47	39.30	1668.67	16.69	39.82	40	39.79	39.89	39.85	39.96	39.87	39.78	39.87	0.03987
I	15M15RC NaOH	I	39.62	39.02	38.91	39.18	41.27	42.17	42.18	41.87	1640.74	16.41	40.95	40.75	40.72	40.83	40.81	40.78	41.11	40.74	40.84	0.04084
		II	37.03	37.05	36.62	36.90	41.74	42.37	42.34	42.15	1555.34	15.55	41.02	40.98	40.9	41.06	40.95	41.01	41.15	40.9	41.00	0.041
		III	41.81	41.02	40.14	40.99	41.76	42.73	42.78	42.42	1738.93	17.39	41.03	40.95	41.02	40.9	41.09	41.01	40.95	41.18	41.02	0.04102

Tabela B 2 – Resultados de absorção de água (cura NaOH) – leituras de massa ao longo do tempo

TRACO	A			B			C			D			E			F			G			H			I		
CP	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3	G1	G2	G3	H1	H2	H3	I1	I2	I3
PESO UMIDADE E TEMPERATURA AMB. (g)	129.72	130.57	138.77	128.35	128.05	144.35	131.83	123.69	141.62	132.23	133.43	136.57	133.74	128.69	129.12	133.22	128.85	121.11	132.2	138.46	136.9	136.36	128.65	144.82	129.32	132.66	122.31
1mm	130.40	131.30	139.40	129.00	128.70	145.10	132.90	124.40	142.50	132.92	134.14	137.28	134.43	129.37	129.84	133.94	129.55	121.83	132.66	138.85	137.27	136.81	129.02	145.22	129.71	133.06	122.72
2mm	130.70	131.40	139.50	129.20	128.90	145.40	133.20	124.60	142.70	133.13	134.58	137.85	134.93	129.61	130.09	134.17	129.96	122.19	132.80	138.99	137.40	136.99	129.20	145.36	129.89	133.24	122.81
3mm	130.80	131.50	139.60	129.30	129.10	145.60	133.50	124.80	142.90	133.32	134.80	138.05	135.14	129.72	130.22	134.30	130.11	122.37	132.97	139.11	137.58	137.10	129.29	145.43	129.96	133.30	122.92
4mm	131.00	131.70	139.70	129.40	129.20	145.70	133.70	125.00	143.10	133.39	134.91	138.17	135.33	129.83	130.33	134.37	130.20	122.37	133.06	139.15	137.51	137.18	129.37	145.52	130.11	133.42	123.04
5mm	131.10	131.80	139.80	129.60	129.40	146.00	133.90	125.10	143.30	133.50	135.09	138.29	135.47	129.93	130.42	134.42	130.28	122.69	133.15	139.25	137.63	137.27	129.41	145.57	130.12	133.43	123.03
00:10:00mim	131.70	132.30	140.10	130.10	130.00	146.60	134.50	125.60	144.00	133.60	135.22	138.42	135.67	129.97	130.50	134.58	130.46	122.85	133.35	139.47	137.81	137.45	129.56	145.74	130.35	133.70	123.31
00:15:00mim	131.90	132.40	140.30	130.30	130.20	146.70	134.80	125.80	144.10	133.87	135.49	138.69	135.96	130.15	130.68	134.81	130.65	123.05	133.58	139.70	137.94	137.68	129.73	145.91	130.55	133.88	123.46
00:30:00mim	132.70	133.10	140.80	130.90	131.00	147.40	135.60	126.40	145.00	134.36	136.10	139.23	136.64	130.51	131.04	135.20	131.09	123.60	133.93	140.05	138.21	138.02	130.00	146.30	130.93	134.28	123.77
01:00:00h	133.60	133.90	141.30	131.50	131.70	148.10	136.60	127.40	146.00	134.94	136.86	139.88	137.43	130.92	131.56	135.73	131.67	124.03	134.39	140.53	138.68	138.51	130.38	146.75	131.50	134.76	124.18
02:00:00h	134.90	134.98	142.06	132.30	132.68	149.10	137.97	128.62	147.37	135.65	137.63	140.60	138.51	131.52	132.18	136.31	132.21	124.64	134.88	141.05	139.14	139.06	130.79	147.30	132.01	135.18	124.67
03:00:00h	135.80	135.71	142.59	133.54	133.63	150.19	138.94	129.57	148.37	136.20	138.17	141.30	139.05	131.84	132.56	136.71	132.56	124.99	135.28	141.52	139.56	139.56	131.15	147.71	132.43	135.62	125.06
04:00:00h	136.44	136.18	142.92	133.93	134.45	151.14	139.67	130.18	149.12	136.64	138.60	141.84	139.43	132.18	132.90	137.14	132.91	125.33	135.54	141.83	139.82	139.85	131.41	147.95	132.74	135.86	125.33
05:00:00h	137.10	136.70	143.30	134.30	135.10	152.10	140.50	130.80	149.80	137.05	139.04	142.39	139.86	132.47	133.17	137.36	133.21	125.60	135.89	142.26	140.14	140.23	131.64	148.24	133.15	136.24	125.68
06:00:00h	137.50	137.00	143.50	134.52	135.49	152.33	140.72	131.12	150.12	137.46	139.45	142.77	140.20	132.90	133.42	137.60	133.59	125.88	136.12	142.49	140.37	140.47	131.84	148.50	133.29	136.41	125.87
07:00:00h	137.65	137.31	143.66	134.78	135.87	152.73	141.19	131.46	150.63	137.75	139.76	143.13	140.56	133.29	133.68	137.95	133.92	126.19	136.28	142.69	140.52	140.64	131.98	148.64	133.54	136.55	126.00
08:00:00h	137.70	137.59	143.88	134.99	136.20	153.08	141.52	131.78	151.00	137.99	140.07	143.36	140.82	133.55	133.87	138.11	134.16	126.44	136.53	143.01	140.71	140.91	132.31	148.82	133.78	136.81	126.23
09:00:00h	137.90	137.87	144.11	135.26	136.50	153.43	141.91	132.11	151.34	138.29	140.28	143.65	141.11	133.79	134.07	138.53	134.46	126.70	136.80	143.34	140.94	141.16	132.45	149.03	134.21	137.05	126.43
10:00:00h	138.09	138.17	144.34	135.55	136.78	153.52	142.24	132.46	151.70	138.50	140.52	143.90	141.33	134.07	134.25	138.82	134.64	127.07	137.01	143.51	141.04	141.34	132.47	149.16	134.41	137.23	126.58
24h	138.62	139.61	147.16	137.72	138.81	156.21	144.84	135.13	154.67	140.31	142.12	145.43	142.90	136.17	135.76	140.91	136.55	128.94	139.06	145.47	142.28	142.91	133.57	150.77	136.41	139.17	128.08
48h	138.78	139.76	147.69	139.39	139.99	157.49	146.13	136.87	156.66	141.16	142.81	146.29	143.57	137.93	137.03	142.40	137.97	130.33	140.62	147.17	143.82	144.70	134.92	152.59	138.14	140.77	129.96
72h	138.96	139.85	147.94	140.29	140.44	157.80	146.40	137.54	157.36	141.69	143.10	146.56	143.76	138.62	137.79	143.01	138.81	130.76	140.61	147.45	144.50	145.45	135.46	153.14	138.82	141.44	130.76
96h	139.07	140.04	148.08	140.64	140.61	157.96	146.55	137.83	157.56	141.89	143.40	146.96	143.98	138.87	138.01	143.56	139.21	130.98	140.82	147.57	145.02	145.84	136.04	153.79	139.14	141.90	131.33

Tabela B 3 – Absorção de água (cura solução  $\text{Ca(OH)}_2$ ) - dimensões dos corpos de prova.

Rilem																						
TRAÇO		CP	Largura (mm)								Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Altura (mm)									
			L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>média(1,2,3)</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>média(4,5,6)</sub>			H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	H <sub>8</sub>	H <sub>média</sub> (mm)	H média (m)
A	REF Ca(OH) <sub>2</sub>	I	42.5	42.39	42.38	42.42	42.43	41.06	39.77	41.09	1743.03	17.43	39.63	39.55	40.24	40.2	39.56	39.62	39.46	39.67	39.74	0.039741
		II	37.23	37.28	38.02	37.51	42	41.93	42.03	41.99	1574.92	15.75	39.34	39.46	39.43	39.41	39.43	39.31	39.52	39.66	39.45	0.039445
		III	41.83	41.89	41.98	41.90	37.95	38.21	39.11	38.42	1609.94	16.10	39.6	39.92	39.77	39.93	39.86	39.59	39.9	39.77	39.79	0.039793
B	20 MC Ca(OH) <sub>2</sub>	I	42.44	42.74	43.07	42.75	40.26	38.56	38.49	39.10	1671.67	16.72	39.99	40.08	39.87	40.07	40.28	40.01	39.98	39.8	40.01	0.04001
		II	37.81	37.7	37.83	37.78	42.27	42.59	42.1	42.32	1598.85	15.99	39.93	40.06	40.88	40.66	39.98	39.96	39.97	40.09	40.19	0.040191
		III	41.37	41.98	43.88	42.41	42.23	42.13	41.94	42.10	1785.46	17.85	40.63	41.44	40.83	40.83	40.93	40.4	40.91	40.82	40.85	0.040849
C	30 MC Ca(OH) <sub>2</sub>	I	37.24	37.27	37.38	37.30	42.05	42.1	41.67	41.94	1564.22	15.64	41.28	41.26	41.45	41.09	41.33	41.43	41.17	41.38	41.30	0.041299
		II	43.36	43.67	43.22	43.42	41.82	41.77	41.8	41.80	1814.67	18.15	40.96	40.85	41	40.62	40.93	40.8	40.66	41.62	40.93	0.04093
		III	42.56	42.53	42.38	42.49	35.97	35.99	36.06	36.01	1529.92	15.30	41.84	41.75	42.31	42.18	41.74	41.91	41.82	41.69	41.91	0.041905
D	20 RCV Ca(OH) <sub>2</sub>	I	39.08	39.21	39.26	39.18	42.34	42.4	42.48	42.41	1661.63	16.62	38.96	39.16	38.88	39.07	39.14	38.78	39.11	39.28	39.05	0.039048
		II	37.19	37.1	37.05	37.11	43.05	42.85	42.75	42.88	1591.54	15.92	38.81	38.86	39.05	38.88	38.86	38.74	38.95	38.77	38.87	0.038865
		III	43.38	43.4	43.53	43.44	37.7	37.75	37.72	37.72	1638.58	16.39	39.13	39.63	39.5	39.57	39.48	39.11	39.59	39.49	39.44	0.039438
E	30RCV Ca(OH) <sub>2</sub>	I	42.14	42.2	42.13	42.16	37.48	37.7	37.64	37.61	1585.37	15.85	40.58	40.42	40.43	40.47	40.42	40.55	40.52	40.44	40.48	0.040479
		II	42.32	42.63	42.74	42.56	36.7	36.73	36.7	36.71	1562.50	15.62	40.8	40.61	40.6	40.6	40.65	40.6	40.57	40.62	40.63	0.040631
		III	41.78	42.55	42.8	42.38	37.93	38.41	37.6	37.98	1609.47	16.09	40.48	40.42	40.44	40.48	41.87	42.42	40.48	40.45	40.88	0.04088
F	10 MC10RC Ca(OH) <sub>2</sub>	I	39.88	40.31	41.43	40.54	42.63	42.53	42.48	42.55	1724.84	17.25	40.11	40.05	39.83	40.17	40.02	40.16	40.11	39.68	40.02	0.040016
		II	42.38	42.28	42.32	42.33	36.5	36.36	36.36	36.41	1540.97	15.41	40	39.7	39.66	39.74	40.03	39.58	39.71	39.66	39.76	0.03976
		III	37.78	37.65	37.54	37.66	42.42	42.48	42.49	42.46	1599.03	15.99	40.14	40.18	40.1	40.18	40.15	39.95	40.11	40.09	40.11	0.040113
G	20MC10RC Ca(OH) <sub>2</sub>	I	41.96	42.1	42.35	42.14	42.41	42.18	42.08	42.22	1779.15	17.79	41.02	41.42	41.19	41	41.11	40.9	41.04	41.08	41.10	0.041095
		II	39.62	39.42	39.43	39.49	42.41	42.18	42.08	42.22	1667.40	16.67	41.15	41.13	41.08	41.12	41.12	41.15	41.18	41.11	41.13	0.04113
		III	38.39	38.21	37.94	38.18	42.68	42.37	42.16	42.40	1618.96	16.19	41.19	41.13	41.45	40.95	41.11	41.15	41.11	46.73	41.85	0.041853
H	10M20 Ca(OH) <sub>2</sub>	I	37.62	37.84	37.86	37.77	42.53	42.56	42.52	42.54	1606.75	16.07	40.62	40.74	40.52	40.71	40.72	40.66	40.78	40.57	40.67	0.04067
		II	39.25	39.42	39.45	39.37	42.39	42.46	42.45	42.43	1670.74	16.71	40.84	40.81	40.86	40.81	41.01	40.79	40.82	40.89	40.85	0.04085
		III	38.28	38.59	38.92	38.60	42.3	42.15	42.14	42.20	1628.65	16.29	40.76	40.72	40.79	40.69	40.72	40.74	40.71	40.78	40.74	0.04074
I	15M15RC Ca(OH) <sub>2</sub>	I	42.88	42.86	42.84	42.86	38.13	38.31	38.26	38.23	1638.68	16.39	40.4	39.93	39.73	39.9	39.91	39.7	39.83	39.69	39.89	0.03989
		II	37.99	38.22	38.12	38.11	42.32	42.28	42.33	42.31	1612.43	16.12	39.99	39.87	39.74	39.89	39.92	39.87	41.34	40.68	40.16	0.04016
		III	38.63	38.49	38.02	38.38	42.35	42.16	42.13	42.21	1620.15	16.20	39.89	39.91	39.96	40.07	39.94	39.9	41.02	40.58	40.16	0.04016



Tabela B 4 – Resultados de absorção de água (cura solução Ca(OH)<sub>2</sub>) - leituras de massa ao longo do tempo.

TRAÇO CP	A			B			C			D			E			F			G			H			I		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3	G1	G2	G3	H1	H2	H3	I1	I2	I3
PESO UMIDADE E TEMPERATURA AMB. (g)	129.72	130.57	138.77	128.35	128.05	144.35	131.83	123.69	141.62	132.23	133.43	136.57	133.74	128.69	129.12	133.22	128.85	121.11	132.2	138.46	136.9	136.36	128.65	144.82	129.32	132.66	122.31
1mm	130.40	131.30	139.40	129.00	128.70	145.10	132.90	124.40	142.50	132.92	134.14	137.28	134.43	129.37	129.84	133.94	129.55	121.83	132.66	138.85	137.27	136.81	129.02	145.22	129.71	133.06	122.72
2mm	130.70	131.40	139.50	129.20	128.90	145.40	133.20	124.60	142.70	133.13	134.58	137.85	134.93	129.61	130.09	134.17	129.96	122.19	132.80	138.99	137.40	136.99	129.20	145.36	129.89	133.24	122.81
3mm	130.80	131.50	139.60	129.30	129.10	145.60	133.50	124.80	142.90	133.32	134.80	138.05	135.14	129.72	130.22	134.30	130.11	122.37	132.97	139.11	137.58	137.10	129.29	145.43	129.96	133.30	122.92
4mm	131.00	131.70	139.70	129.40	129.20	145.70	133.70	125.00	143.10	133.39	134.91	138.17	135.33	129.83	130.33	134.37	130.20	122.37	133.06	139.15	137.51	137.18	129.37	145.52	130.11	133.42	123.04
5mm	131.10	131.80	139.80	129.60	129.40	146.00	133.90	125.10	143.30	133.50	135.09	138.29	135.47	129.93	130.42	134.42	130.28	122.69	133.15	139.25	137.63	137.27	129.41	145.57	130.12	133.43	123.03
00:10:00mm	131.70	132.30	140.10	130.10	130.00	146.60	134.50	125.60	144.00	133.60	135.22	138.42	135.67	129.97	130.50	134.58	130.46	122.85	133.35	139.47	137.81	137.45	129.56	145.74	130.35	133.70	123.31
00:15:00mm	131.90	132.40	140.30	130.30	130.20	146.70	134.80	125.80	144.10	133.87	135.49	138.69	135.96	130.15	130.68	134.81	130.65	123.05	133.58	139.70	137.94	137.68	129.73	145.91	130.55	133.88	123.46
00:30:00mm	132.70	133.10	140.80	130.90	131.00	147.40	135.60	126.40	145.00	134.36	136.10	139.23	136.64	130.51	131.04	135.20	131.09	123.60	133.93	140.05	138.21	138.02	130.00	146.30	130.93	134.28	123.77
01:00:00h	133.60	133.90	141.30	131.50	131.70	148.10	136.60	127.40	146.00	134.94	136.86	139.88	137.43	130.92	131.56	135.73	131.67	124.03	134.39	140.53	138.68	138.51	130.38	146.75	131.50	134.76	124.18
02:00:00h	134.90	134.98	142.06	132.30	132.68	149.10	137.97	128.62	147.37	135.65	137.63	140.60	138.51	131.52	132.18	136.31	132.21	124.64	134.88	141.05	139.14	139.06	130.79	147.30	132.01	135.18	124.67
03:00:00h	135.80	135.71	142.59	133.54	133.63	150.19	138.94	129.57	148.37	136.20	138.17	141.30	139.05	131.84	132.56	136.71	132.56	124.99	135.28	141.52	139.56	139.56	131.15	147.71	132.43	135.62	125.06
04:00:00h	136.44	136.18	142.92	133.93	134.45	151.14	139.67	130.18	149.12	136.64	138.60	141.84	139.43	132.18	132.90	137.14	132.91	125.33	135.54	141.83	139.82	139.85	131.41	147.95	132.74	135.86	125.33
05:00:00h	137.10	136.70	143.30	134.30	135.10	152.10	140.50	130.80	149.80	137.05	139.04	142.39	139.86	132.47	133.17	137.36	133.21	125.60	135.89	142.26	140.14	140.23	131.64	148.24	133.15	136.24	125.68
06:00:00h	137.50	137.00	143.50	134.52	135.49	152.33	140.72	131.12	150.12	137.46	139.45	142.77	140.20	132.90	133.42	137.60	133.59	125.88	136.12	142.49	140.37	140.47	131.84	148.50	133.29	136.41	125.87
07:00:00h	137.65	137.31	143.66	134.78	135.87	152.73	141.19	131.46	150.63	137.75	139.76	143.13	140.56	133.29	133.68	137.95	133.92	126.19	136.28	142.69	140.52	140.64	131.98	148.64	133.54	136.55	126.00
08:00:00h	137.70	137.59	143.88	134.99	136.20	153.08	141.52	131.78	151.00	137.99	140.07	143.36	140.82	133.55	133.87	138.11	134.16	126.44	136.53	143.01	140.71	140.91	132.31	148.82	133.78	136.81	126.23
09:00:00h	137.90	137.87	144.11	135.26	136.50	153.43	141.91	132.11	151.34	138.29	140.28	143.65	141.11	133.79	134.07	138.53	134.46	126.70	136.80	143.34	140.94	141.16	132.45	149.03	134.21	137.05	126.43
10:00:00h	138.09	138.17	144.34	135.55	136.78	153.52	142.24	132.46	151.70	138.50	140.52	143.90	141.33	134.07	134.25	138.82	134.64	127.07	137.01	143.51	141.04	141.34	132.47	149.16	134.41	137.23	126.58
24h	138.62	139.61	147.16	137.72	138.81	156.21	144.84	135.13	154.67	140.31	142.12	145.43	142.90	136.17	135.76	140.91	136.55	128.94	139.06	145.47	142.28	142.91	133.57	150.77	136.41	139.17	128.08
48h	138.78	139.76	147.69	139.39	139.99	157.49	146.13	136.87	156.66	141.16	142.81	146.29	143.57	137.93	137.03	142.40	137.97	130.33	140.62	147.17	143.82	144.70	134.92	152.59	138.14	140.77	129.96
72h	138.96	139.85	147.94	140.29	140.44	157.80	146.40	137.54	157.36	141.69	143.10	146.56	143.76	138.62	137.79	143.01	138.81	130.76	140.61	147.45	144.50	145.45	135.46	153.14	138.82	141.44	130.76
96h	139.07	140.04	148.08	140.64	140.61	157.96	146.55	137.83	157.56	141.89	143.40	146.96	143.98	138.87	138.01	143.56	139.21	130.98	140.82	147.57	145.02	145.84	136.04	153.79	139.14	141.90	131.33

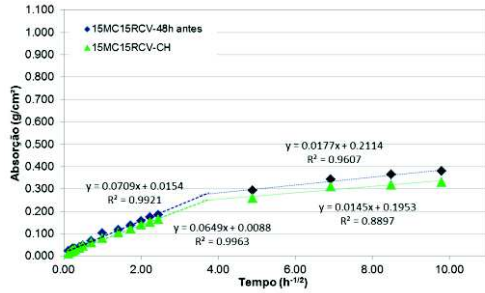
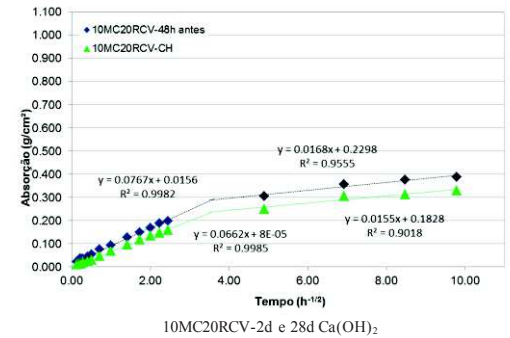
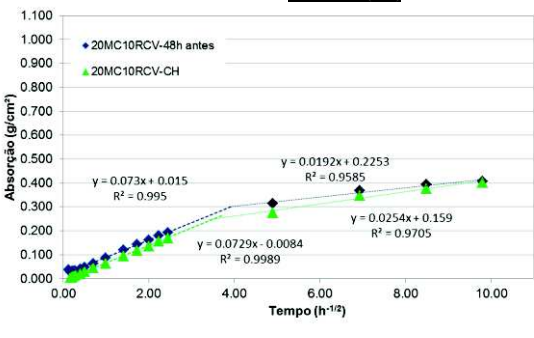
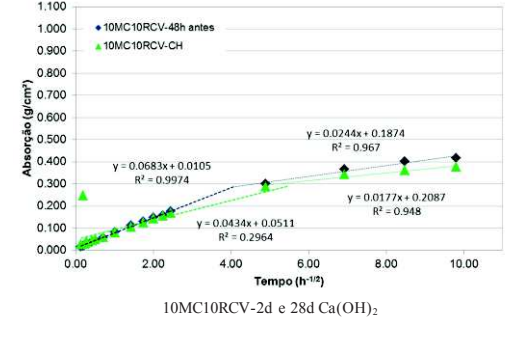
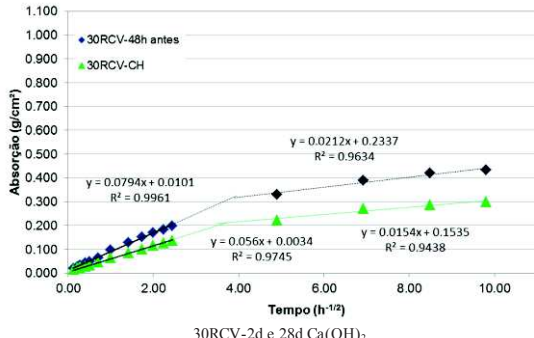
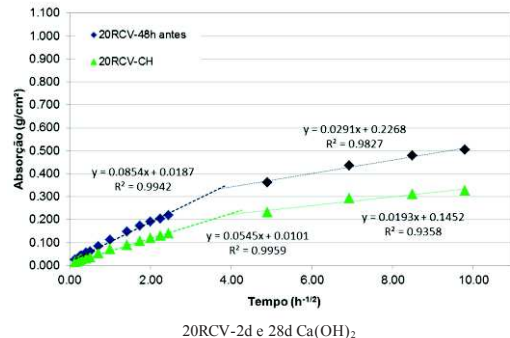
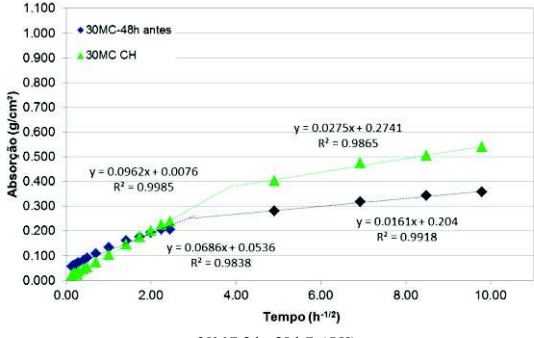
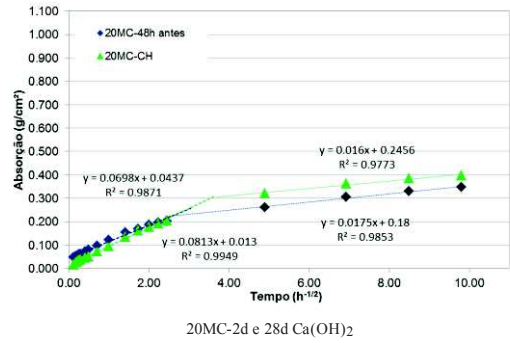
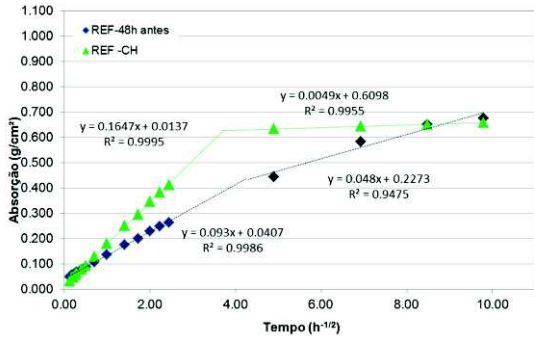
Tabela B 5 – Absorção de água (cura 48h00) - dimensões dos corpos de prova.

Rilem																						
TRAÇO	CP	Largura (mm)									Área (mm <sup>2</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Altura (mm)									
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>média(1,2,3)</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>média(4,5,6)</sub>	H <sub>1</sub>			H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	H <sub>8</sub>	H <sub>média</sub> (mm)	H média (m)	
A	REF 48h	I	41.71	41.90	41.92	41.84	39.33	38.88	39.14	39.12	1636.77	16.37	40.92	40.82	41.08	40.97	40.88	40.99	40.89	40.86	40.93	0.04093
		II	41.29	41.38	41.43	41.37	42.40	42.59	42.77	42.59	1761.67	17.62	40.96	40.86	40.85	40.88	40.78	40.96	40.93	40.93	40.89	0.04089
		III	41.54	41.60	41.73	41.62	38.28	38.69	38.89	38.62	1607.49	16.07	41.01	41.02	41.28	40.97	40.99	40.96	40.96	41.03	41.03	0.04103
B	20MC 48h	I	41.19	41.23	41.31	41.24	41.64	41.67	41.73	41.68	1719.02	17.19	41.45	41.31	40.68	40.75	40.72	40.54	40.71	40.73	40.86	0.04086
		II	41.48	41.59	41.45	41.51	37.89	38.51	38.40	38.27	1588.32	15.88	40.20	39.98	40.07	40.11	39.98	40.07	40.08	40.03	40.07	0.04007
		III	38.30	38.07	37.86	38.08	40.94	41.00	41.11	41.02	1561.78	15.62	40.81	40.87	40.78	40.83	40.81	40.82	40.85	41.22	40.87	0.04087
C	30MC 48h	I	38.99	38.74	38.58	38.77	40.69	41.34	41.32	41.12	1594.09	15.94	40.61	40.27	40.57	40.35	40.40	40.73	40.33	40.71	40.50	0.04050
		II	40.93	40.68	41.20	40.94	40.49	41.56	41.87	41.31	1690.96	16.91	40.94	41.10	41.08	40.72	41.00	40.76	40.90	41.05	40.94	0.04094
		III	40.62	41.07	41.17	40.95	39.29	39.71	39.41	39.47	1616.43	16.16	40.23	40.25	40.17	39.87	40.14	40.27	39.91	40.33	40.15	0.04015
D	20 RCV 48h	I	38.16	37.91	37.73	37.93	42.23	42.39	42.44	42.35	1606.60	16.07	43.43	43.33	43.01	43.03	43.14	42.85	43.06	42.99	43.11	0.04311
		II	37.18	36.91	37.02	37.04	42.74	42.77	42.93	42.81	1585.66	15.86	42.92	42.96	43.22	43.02	43.02	42.89	42.97	42.98	43.00	0.043
		III	36.57	36.68	37.18	36.81	43.20	43.19	43.02	43.14	1587.86	15.88	42.24	42.32	42.58	41.67	42.38	42.38	43.07	42.85	42.44	0.04244
E	30RCV 48h	I	42.64	42.85	42.70	42.73	39.41	39.42	39.31	39.38	1682.71	16.83	40.66	40.82	40.26	40.16	40.22	40.17	40.15	40.22	40.33	0.04033
		II	42.54	42.68	42.41	42.54	37.00	37.02	37.48	37.17	1581.19	15.81	40.17	40.08	40.04	40.11	41.05	40.76	40.16	40.01	40.30	0.0403
		III	38.12	38.03	38.04	38.06	42.11	42.12	42.20	42.14	1604.12	16.04	40.09	40.08	40.11	40.01	39.97	40.06	40.22	40.56	40.14	0.04014
F	10MC10RC V48h	I	42.25	42.68	42.68	42.54	36.72	36.79	36.78	36.76	1563.79	15.64	41.10	41.10	40.88	41.10	41.19	41.06	41.52	41.86	41.23	0.04123
		II	42.64	42.60	42.50	42.58	37.27	37.43	38.09	37.60	1600.87	16.01	41.10	41.11	41.06	41.43	41.10	41.10	41.29	40.90	41.14	0.04114
		III	38.03	38.27	38.80	38.37	42.60	42.63	42.52	42.58	1633.78	16.34	40.70	40.71	41.37	40.82	40.66	40.61	40.69	40.51	40.76	0.04076
G	20MC10RC V 48h	I	38.99	38.86	38.74	38.86	42.11	42.92	42.85	42.63	1656.61	16.57	40.15	40.17	40.67	40.36	40.18	40.14	40.26	40.06	40.25	0.04025
		II	37.37	37.39	37.33	37.36	42.27	43.11	42.89	42.76	1597.53	15.98	40.16	40.16	40.35	40.30	40.16	40.24	40.16	40.05	40.20	0.0402
		III	42.39	43.13	42.95	42.82	38.16	38.22	38.25	38.21	1636.28	16.36	40.13	40.18	40.19	40.16	40.22	40.40	40.23	40.18	40.21	0.04021
H	10M20RCV 48h	I	38.13	38.02	37.98	38.04	42.07	42.10	42.15	42.11	1601.88	16.02	39.55	39.48	39.57	39.47	39.47	39.59	39.62	40.36	39.64	0.03964
		II	42.19	42.20	42.20	42.20	39.46	38.61	38.64	38.90	1641.59	16.42	39.54	39.46	39.43	39.50	39.50	39.77	39.67	39.37	39.53	0.03953
		III	37.43	37.12	37.04	37.20	42.46	42.53	42.46	42.48	1580.24	15.80	39.91	39.79	39.86	39.91	39.76	39.84	40.11	39.62	39.85	0.03985
I	15M15RCV 48h	I	42.26	42.69	42.67	42.54	38.44	37.93	38.03	38.13	1622.19	16.22	39.78	39.95	39.92	39.97	39.92	39.87	39.92	39.88	39.90	0.0399
		II	38.89	39.04	39.06	39.00	42.06	42.56	42.45	42.36	1651.77	16.52	39.55	39.72	39.62	39.60	39.61	39.51	39.83	39.86	39.66	0.03966
		III	42.19	42.25	42.22	42.22	40.02	40.03	39.81	39.95	1686.83	16.87	39.77	39.78	39.82	39.75	40.18	39.86	39.80	39.66	39.83	0.03983

Tabela B 6 – Resultados de absorção de água (cura 48h00) - leituras de massa ao longo do tempo.

TRAÇO	A			B			C			D			E			F			G			H			I		
CP	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3	G1	G2	G3	A1	A2	A3	B1	B2	B3
PESO UMIDADE E TEMPERATURA AMB. (g)	140.68	150.36	138.65	145.33	133.83	134.84	132.73	140.52	131.04	139.08	136.92	136.45	134.40	124.34	129.74	130.09	132.34	132.64	132.71	128.81	132.35	129.02	130.86	128.70	129.18	132.38	134.76
1mim	141.48	151.21	139.47	146.11	134.55	135.61	133.70	141.40	131.91	139.40	137.30	136.90	134.70	124.60	130.10	130.40	132.60	132.90	132.97	129.06	133.67	129.47	131.23	128.97	129.60	132.74	135.07
2mim	141.56	151.33	139.58	146.17	134.63	135.71	133.77	141.48	131.98	139.50	137.30	137.00	134.70	124.70	130.10	130.40	132.60	133.00	133.12	129.18	132.85	129.51	131.35	129.08	129.67	132.82	135.12
3mim	141.64	151.37	139.65	146.24	134.67	135.78	133.83	141.56	132.07	139.60	137.40	137.10	134.80	124.70	130.20	130.40	132.70	133.10	133.22	129.27	132.93	129.60	131.54	129.19	129.84	132.89	135.22
4mim	141.70	151.44	139.75	146.29	134.72	135.87	133.91	141.60	132.11	139.70	137.50	137.20	134.90	124.80	130.30	130.50	132.80	133.20	133.26	129.35	132.88	129.60	131.52	129.15	129.84	132.85	135.21
5mim	141.76	151.50	139.88	146.39	134.77	135.88	133.95	141.66	132.17	139.80	137.50	137.20	134.90	124.90	130.30	130.50	132.90	133.20	133.28	129.29	132.90	129.51	131.55	129.18	129.86	132.87	135.25
00:10:00mim	141.93	151.69	140.00	146.52	134.92	136.09	134.12	141.82	132.36	140.00	137.70	137.40	135.10	125.00	130.50	130.70	133.00	133.30	133.31	129.41	133.12	129.75	131.67	129.34	130.00	133.00	135.32
00:15:00mim	142.10	151.85	140.15	146.63	135.03	136.24	134.28	141.95	132.53	140.10	137.80	137.50	135.20	125.00	130.60	130.70	133.10	133.40	133.45	129.53	133.24	129.88	131.85	129.46	130.11	133.12	135.51
00:30:00mim	142.39	152.19	140.53	146.92	135.28	136.56	134.54	142.25	132.84	140.40	138.10	137.90	135.40	125.40	130.80	130.80	133.40	133.60	133.72	129.77	133.50	130.21	132.21	129.80	130.47	133.42	135.75
01:00:00h	142.87	152.69	141.01	147.34	135.60	137.04	134.99	142.62	133.26	140.88	138.52	138.44	135.95	125.85	131.48	131.23	133.74	133.99	134.05	130.09	134.00	130.51	132.49	130.07	131.77	133.68	135.97
02:00:00h	143.49	153.33	141.70	147.84	136.07	137.58	135.45	143.04	133.73	141.44	138.97	139.07	136.51	126.30	131.94	131.79	134.28	134.44	134.55	130.61	134.56	131.02	133.08	130.58	131.36	134.21	136.51
03:00:00h	143.86	153.76	142.10	148.08	136.25	137.84	135.66	143.24	133.97	141.89	139.47	139.35	136.87	126.67	132.30	132.00	134.59	134.77	134.94	131.01	134.94	131.39	133.48	130.93	131.74	134.54	136.87
04:00:00h	144.36	154.23	142.58	148.38	136.52	138.18	135.97	143.54	134.29	142.15	139.70	139.75	137.22	126.97	132.58	132.25	134.89	135.03	135.26	131.30	135.25	131.70	133.80	131.26	132.08	134.85	137.14
05:00:00h	144.65	154.59	142.90	148.55	136.68	138.36	136.14	143.73	134.45	142.40	139.80	140.00	137.50	127.10	132.80	132.40	135.10	135.20	135.53	131.55	135.58	132.01	134.14	131.50	132.39	135.12	137.41
06:00:00h	144.86	154.84	143.11	148.60	136.71	138.42	136.15	143.76	134.50	142.62	140.06	140.23	137.74	127.42	133.02	132.63	135.35	135.51	135.74	131.72	135.76	132.19	134.32	131.67	132.56	135.28	137.58
07:00:00h	145.21	155.20	143.48	148.82	136.92	138.64	136.41	144.01	134.76	142.78	140.27	140.46	137.92	127.57	133.22	132.84	135.56	135.62	135.95	131.89	136.00	132.39	134.48	131.90	132.77	135.52	137.71
08:00:00h	145.44	155.46	143.70	148.93	136.93	138.77	136.48	144.12	134.87	143.01	140.47	140.68	138.16	127.79	133.42	133.00	135.00	135.80	136.14	132.01	136.22	132.56	134.74	132.08	132.98	135.69	138.01
09:00:00h	145.66	155.72	143.94	149.02	137.11	138.86	136.55	144.24	134.97	143.23	140.66	140.89	138.37	127.94	133.61	133.14	135.92	135.97	136.32	132.23	136.43	132.74	134.99	132.26	133.24	135.86	138.10
10:00:00h	145.88	155.96	144.15	149.10	137.19	138.95	136.63	144.31	135.05	143.34	140.82	141.08	138.53	128.11	133.83	133.26	136.02	136.12	136.45	132.33	136.52	132.83	134.99	132.29	133.35	135.93	138.22
24h	147.72	158.09	146.09	149.62	137.60	139.51	137.20	145.08	135.75	144.83	142.25	142.72	140.00	129.43	135.16	134.56	137.45	137.45	137.74	133.51	137.91	133.86	136.14	133.34	134.45	137.05	139.28
48h	150.02	160.48	148.38	150.43	138.23	140.21	137.73	145.80	136.36	145.91	143.43	143.98	140.95	130.37	136.09	135.62	138.57	138.44	138.69	134.30	138.88	134.73	136.95	134.05	135.25	138.01	140.06
72h	151.20	161.70	149.40	150.90	138.60	140.60	138.10	146.30	136.70	146.54	144.11	144.71	141.50	130.91	136.53	136.17	139.16	139.03	139.12	134.65	139.32	135.03	137.31	134.38	135.61	138.39	140.40
96h	151.65	162.11	149.71	151.16	138.85	140.87	138.32	146.58	136.97	146.84	144.46	145.25	141.67	131.10	136.79	136.43	139.41	139.28	139.37	134.85	139.52	135.25	137.49	134.57	135.83	138.63	140.62

Figura B 1 – Absorção de água ao longo do tempo – 48h00 e cura em Ca(OH)<sub>2</sub>





## APÊNDICE C - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela C 1 - Resultados resistência à compressão de referência aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
REF	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: -					
	Teor: -					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	98.55	98.19	98.44	98.79	97.02	97.84
H2 (mm)	98.84	98.08	98.6	98.97	97.01	97.9
Hmed. (mm)	98.695	98.135	98.52	98.88	97.015	97.87
D1 (mm)	49.74	50.2	50.07	50.39	50.18	50.13
D2 (mm)	49.92	50.2	49.54	50.16	50.19	50.27
Dmed. (mm)	49.83	50.20	49.81	50.28	50.19	50.20
Área (mm <sup>2</sup> )	1950.17	1979.23	1948.21	1985.15	1978.05	1979.23
Carga (kN)	67.84*	79.41	79.03	80.05	75.22	87.28*
Tensão (MPa)	0.00	40.12	40.57	40.32	38.03	0.00
Resistência Média	39.76					
Desvio Relativo Máx:	2.03					

Tabela C 2 - Resultados resistência à compressão de 20% de MC aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
MC	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: Metacaulim					
	Teor: 20%					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	99.31	100.03	100.01	99.69	100.27	100.17
H2 (mm)	99.32	100.01	100.02	99.73	100.33	100.18
Hmed. (mm)	99.32	100.02	100.02	99.71	100.30	100.18
D1 (mm)	49.93	50.13	50.13	50.05	50.21	49.42
D2 (mm)	50.18	50.14	50.34	50.26	50.17	49.72
Dmed. (mm)	50.055	50.135	50.235	50.155	50.19	49.57
Área (mm <sup>2</sup> )	1967.82	1974.11	1982.00	1975.69	1978.45	1929.87
Carga (kN)	93.62*	80.48	84.62	83.7	86.2	81.37
Tensão (MPa)	0.00	40.77	42.69	42.36	43.57	42.16
Resistência Média:	42.31					
Desvio Relativo Máx:	2.97					

Tabela C 3 - Resultados resistência à compressão de 30% de MC aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
<b>MC</b>	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia natural					
	Adição: Metacaulim					
	Teor: 30%					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	100.29	100	99.25	100.15	100.07	100.78
H2 (mm)	100.06	99.9	99.21	100.06	100.57	100.71
Hmed. (mm)	100.18	99.95	99.23	100.11	100.32	100.75
D1 (mm)	50.06	49.62	50	50.23	50.08	49.92
D2 (mm)	49.8	49.67	50.33	50.29	50.01	50.04
Dmed. (mm)	49.93	49.65	50.17	50.26	50.05	49.98
Área (mm <sup>2</sup> )	1958.00	1935.71	1976.48	1983.97	1967.03	1961.92
Carga (kN)	86.28	84.46	80.95	89.85	84.33	84.43
Tensão (MPa)	44.07	43.63	40.96	45.29	42.87	43.03
Resistência Média:			43.31			
Desvio Relativo Máx:			4.57			

Tabela C 4 - Resultados resistência à compressão de 20% de RCV aos 48h de cura

ABNT NBR 7215: 2014						
<b>RCV</b>	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: Residuo da ceramica					
	Teor: 20%					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	100.54	99.79	100.18	99.55	100.12	99.59
H2 (mm)	100.59	99.77	100.2	99.91	100.09	99.64
Hmed. (mm)	100.57	99.78	100.19	99.73	100.11	99.62
D1 (mm)	50.08	50.17	50.03	49.78	49.31	50
D2 (mm)	50.13	50.02	50.08	50.41	49.78	50.31
Dmed. (mm)	50.11	50.10	50.06	50.10	49.55	50.16
Área (mm <sup>2</sup> )	1971.75	1970.96	1967.82	1970.96	1927.92	1975.69
Carga (kN)	74	59.53*	74.57	68.81	57.41*	54.82*
Tensão (MPa)	37.53	0.00	37.89	34.91	0.00	0.00
Resistência Média:			36.78			
Desvio Relativo Máx:			3.03			

Tabela C 5 - Resultados resistência à compressão de 30% de RCV aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
<b>RCV</b>	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: Residuo da ceramica					
	Teor: 30%					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	100.19	100.43	100.38	99.91	100.18	100.42
H2 (mm)	100.17	100.33	100.35	100	100.2	100.24
Hmed. (mm)	100.18	100.38	100.365	99.955	100.19	100.33
D1 (mm)	50.16	49.36	50.19	51.07	50.03	49.87
D2 (mm)	50.1	49.56	49.91	50.21	50.08	50.1
Dmed. (mm)	50.13	49.46	50.05	50.64	50.06	49.99
Área (mm <sup>2</sup> )	1973.72	1921.31	1967.42	2014.08	1967.82	1962.32
Carga (kN)	73.08	70.7	74.01	69.79*	78.97	66.29*
Tensão (MPa)	37.03	36.80	37.62	0.00	40.13	0.00
Resistência Média:			37.89			
Desvio Relativo Máx:			5.90			

Tabela C 6 - Resultados resistência à compressão de 10MC + 10RCV aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
<b>10M+10R</b>	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: Metacaulim e residuo da ceramica					
	Teor: 10%MC e 10%RCV					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	100.3	99.69	100.84	99.57	100.37	99.34
H2 (mm)	100.28	99.78	100.74	99.47	100.38	99.46
Hmed. (mm)	100.29	99.74	100.79	99.52	100.38	99.40
D1 (mm)	49.96	50.07	49.88	50.1	50.13	50.07
D2 (mm)	49.87	50.08	49.87	49.99	50.23	49.92
Dmed. (mm)	49.92	50.08	49.88	50.05	50.18	50.00
Área (mm <sup>2</sup> )	1956.83	1969.39	1953.69	1967.03	1977.66	1963.10
Carga (kN)	74.98	70.31*	79.7	69.02*	80.45	82.81
Tensão (MPa)	38.32	0.00	40.79	0.00	40.68	42.18
Resistência Média:			40.49			
Desvio Relativo Máx:			4.17			



Tabela C 7 - Resultados resistência à compressão de 20MC + 10RCV aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
<b>20M+10R</b>	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: Metacaulim e residuo da ceramica					
	Teor: 20%MC e 10%RCV					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	99.52	99.02	100.42	100	100.51	100.64
H2 (mm)	99.52	99.04	100.59	100.09	100.58	100.44
Hmed. (mm)	99.52	99.03	100.51	100.05	100.55	100.54
D1 (mm)	50.01	49.76	49.42	50.29	50.09	49.94
D2 (mm)	49.91	49.88	49.52	50.04	49.83	50.17
Dmed. (mm)	49.96	49.82	49.47	50.165	49.96	50.055
Área (mm <sup>2</sup> )	1960.36	1949.38	1922.09	1976.48	1960.36	1967.82
Carga (kN)	84.13	70.69*	69.57*	83.93	78.99	81.02
Tensão (MPa)	42.92	0.00	0.00	42.46	40.29	41.17
Resistência Média:			41.71			
Desvio Relativo Máx:			2.89			

Tabela C 8 - Resultados resistência à compressão de 10MC + 20RCV aos 48h de cura

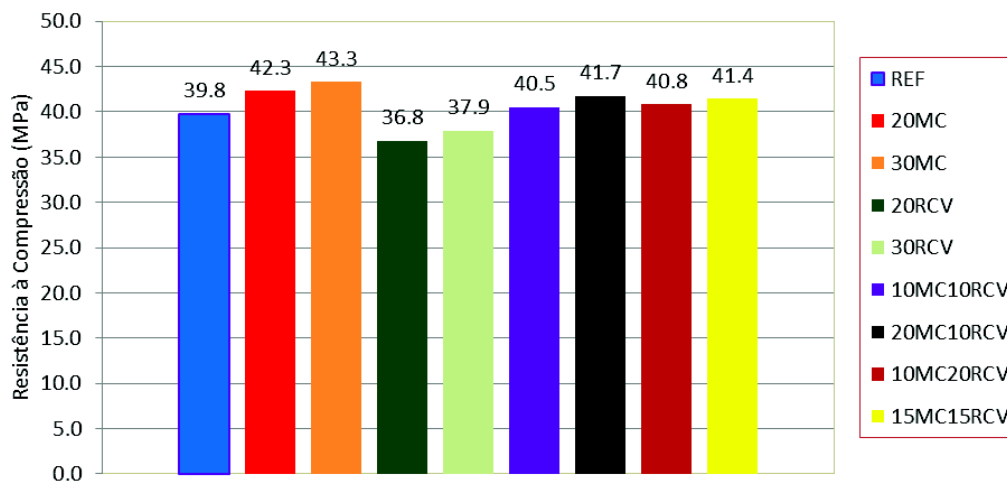
Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
<b>10M+20R</b>	Cimento: CPV-ARI					
	Agregado: areia de britagem					
	Adição: Metacaulim e residuo da ceramica					
	Teor: 10%MC e 20%RCV					
	Aditivo: -					
	Idade: 48h antes de imersão					
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	99.89	100.48	100.25	100.71	100.16	100.47
H2 (mm)	99.88	100.5	100.18	100.71	100.2	100.51
Hmed. (mm)	99.89	100.49	100.22	100.71	100.18	100.49
D1 (mm)	49.67	50.24	50.05	48.68	49.8	49.78
D2 (mm)	49.44	49.75	50.1	49.73	49.99	49.58
Dmed. (mm)	49.56	50.00	50.08	49.21	49.90	49.68
Área (mm <sup>2</sup> )	1928.70	1963.10	1969.39	1901.55	1955.26	1938.44
Carga (kN)	59.33*	59.03*	67.3*	79.83	80.16	76.46
Tensão (MPa)	0.00	0.00	0.00	41.98	41.00	39.44
Resistência Média:			40.81			

Tabela C 9 - Resultados resistência à compressão de 15MC + 15RCV aos 48h de cura

Determinação da resistência a compressão						
ABNT NBR 7215: 2014						
<b>15M+15R</b>		Cimento: CPV-ARI				
		Agregado: areia de britagem				
		Adição: Metacaulim e resíduo da cerâmica				
		Teor: 10%MC e 20%RCV				
		Aditivo: -				
		Idade: 48h antes de imersão				
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
H1 (mm)	100.58	100.25	101.4	99.69	101.7	99.97
H2 (mm)	100.57	100.27	101.3	99.79	101.75	99.94
Hmed. (mm)	100.58	100.26	101.35	99.74	101.73	99.96
D1 (mm)	50.24	50.25	49.77	50.16	42.92	49.82
D2 (mm)	49.43	50.03	49.83	50.03	49.85	50.01
Dmed. (mm)	49.84	50.14	49.80	50.10	46.39	49.92
Área (mm <sup>2</sup> )	1950.56	1974.51	1947.82	1970.96	1689.84	1956.83
Carga (kN)	73.32	85.62	64.46*	64.02*	73.27	68.81*
Tensão (MPa)	37.59	43.36	0.00	0.00	43.36	0.00
Resistência Média:	41.44					
Desvio Relativo Máx:	4.64					

\*-representa valores de resistência não utilizados no cálculo

Figura C 1 - Resistência média à compressão aos 2 dias de cura





## APÊNDICE D - RESULTADOS DE ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Tabela D 1 - Resultados do índice de atividade pozolânica para Referência aos 28 dias

Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias				
ABNT NBR 5752: 2014				
<b>REF</b>	Cimento: CPV-ARI			
	Agregado: areia natural			
	Adição: -			
	Teor: -			
	Aditivo:-			
	Consistência: 199			
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4
H1 (mm)	99.83	97.25	98.96	99.50
H2 (mm)	99.79	97.14	98.86	99.42
Hmed. (mm)	99.81	97.20	98.91	99.46
D1 (mm)	49.97	49.85	50.02	49.47
D2 (mm)	49.96	49.65	50.11	49.80
Dmed. (mm)	49.97	49.75	50.07	49.64
Área (mm <sup>2</sup> )	1960.75	1943.91	1968.60	1934.93
Carga (kN)	80.59	77.36	75.03	67.19*
Tensão (MPa)	41.10	39.80	38.11	
Resistência Média:		39.67		
Desvio Relativo Máx:		3.61		

Tabela D 2 - Resultados do índice de atividade pozolânica para MC aos 28 dias

Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias				
ABNT NBR 5752: 2014				
<b>MC</b>	Cimento: CPV-ARI			
	Agregado: areia natural			
	Adição: Metacaulim			
	Teor: 25%			
	Aditivo: 1.40g			
	Consistência: 196			
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4
H1 (mm)	98.26	100.38	98.9	99.35
H2 (mm)	98.51	100.38	98.99	99.34
Hmed. (mm)	98.39	100.38	98.95	99.35
D1 (mm)	50.12	50.00	50.02	49.97
D2 (mm)	50.05	49.99	50.01	50.11
Dmed. (mm)	50.04	50.00	50.02	50.04
Área (mm <sup>2</sup> )	1966.64	1963.10	1964.67	1966.64
Carga (kN)	82	82.74	79.77	94.62*
Tensão (MPa)	41.70	42.15	40.60	
Resistência Média:		41.48		
Desvio Relativo Máx:		1.61		
I cimento (%):		104.57		

Tabela D 3 - Resultados do índice de atividade pozolânica para RCV aos 28 dias

Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias				
ABNT NBR 5752: 2014				
<b>RCV</b>	Cimento: CPV-ARI			
	Agregado: areia natural			
	Adição: Resíduo da cerâmica vermelha			
	Teor: 25%			
	Aditivo: 0.55g			
	Consistência: 190			
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4
H1 (mm)	98.88	98.16	98.90	99.35
H2 (mm)	98.82	98.13	98.59	99.34
Hmed. (mm)	98.85	98.15	98.75	99.35
D1 (mm)	50.00	49.96	50.02	49.97
D2 (mm)	50.70	50.09	50.01	50.11
Dmed. (mm)	50.35	50.025	50.015	50.04
Área (mm <sup>2</sup> )	1991.08	1965.46	1964.67	1966.64
Carga (kN)	86.9	84.39	80.21	70.24*
Tensão (MPa)	43.64	42.94	40.83	
Resistência Média:		42.47		
Desvio Relativo Máx:		2.77		
I cimento (%):		107.05		

Tabela D 4 - Resultados do índice de atividade pozolânica para MC e RCV aos 28 dias

Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias				
ABNT NBR 5752: 2014				
<b>MC+RCV</b>	Cimento: CPV-ARI			
	Agregado: areia natural			
	Adição:			
	Teor: 12,5% + 12,5%			
	Aditivo: 0.80g			
	Consistência: 193			
H (mm)/CPs	CP1	CP2	CP3	CP4
H1 (mm)	100.06	99.4	99.51	100.33
H2 (mm)	100.01	99.4	99.61	100.49
Hmed. (mm)	100.035	99.4	99.56	100.41
D1 (mm)	49.97	50.02	49.94	49.8
D2 (mm)	50.09	49.94	50.04	50.18
Dmed. (mm)	50.03	49.98	49.99	49.99
Área (mm <sup>2</sup> )	1965.85	1961.92	1962.71	1962.71
Carga (kN)	87.17	86.62	85.15	66.76*
Tensão (MPa)	44.34	44.15	43.38	
Resistência Média:		43.96		
Desvio Relativo Máx:		0.87		
I cimento (%):		110.81		

## APÊNDICE E - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela E 1 – ANOVA para expansão média aos 15 e 30 dias de ensaio

Efeitos	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepção	0.343408	1	0.343408	7013.635	0.000000
Aglom.	0.123690	8	0.015461	315.774	0.000000
cura	0.035643	1	0.035643	727.958	0.000000
Aglom. X cura	0.005114	8	0.000639	13.056	0.000000

F-variabilidade entre grupos; MS-media dos quadrados; SS-soma dos quadrados; P-valor de significância.

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 2 – ANOVA para resistência à compressão entre 28 dias de cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e 28 dias em imersão na solução de NaOH

Efeitos	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepção	159039.7	1	159039.7	20333.31	0.000000
Aglom.	504.7	8	63.1	8.07	0.000000
cura	3508.0	1	3508.0	448.50	0.000000
Aglom. X cura	41.6	8	5.2	0.66	0.720147

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 3 – ANOVA (Grupo Tukey) para resistência à compressão entre 28 dias de cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e 28 dias em imersão na solução de NaOH

Grupo Tukey				Mistura	Cura	fc médias
a				2	30	57.97856
a				8	30	57.10542
a				7	30	56.82968
a	b			0	30	55.53801
a	b			4	30	54.57324
a	b			6	30	54.27212
a	b	c		5	30	53.62603
a	b	c		3	30	51.70958
	b	c		1	30	49.54564
		c	d	2	28	46.20824
			d	5	28	42.44383
			d	7	28	41.55418
			d	8	28	41.33909
			d	6	28	40.43731
			d	4	28	40.10472
			d	0	28	40.02538
				e	3	36.64424
				e	1	35.39080

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 4 – ANOVA para resultados de absorção total de água entre 28 dias de cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e 28 dias em imersão na solução de NaOH

Efeitos	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepção	2250.407	1	2250.407	6321.466	0.000000
Aglom.	81.097	8	10.137	28.476	0.000000
cura	112.205	1	112.205	315.187	0.000000
Aglom. X cura	37.872	8	4.734	13.298	0.000000

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 5– ANOVA - taxa de absorção entre 28 dias de cura em Ca(OH)<sub>2</sub> e 28 dias em imersão na solução de NaOH

Efeitos	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepção	16.57166	1	16.57166	2661.792	0.000000
Aglom.	0.92476	8	0.11559	18.567	0.000000
cura	0.00117	1	0.00117	0.188	0.666896
Aglom. X cura	0.00708	8	0.00088	0.142	0.996538

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 6 – Análise de variância (valor-p) - porosidade total entre 28 dias de cura em  $\text{Ca(OH)}_2$  e 28 dias em imersão na solução de NaOH

Efeitos	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepção	8974.935	1	8974.935	2115.840	0.000000
Aglom.	267.163	8	33.395	7.873	0.000005
cura	427.953	1	427.953	100.890	0.000000
Aglom. X cura	152.376	8	19.047	4.490	0.000757

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 7– Análise de variância (valor-p) - porosidade capilar 28 dias de cura em  $\text{Ca(OH)}_2$  e 28 dias em imersão na solução de NaOH

Efeitos	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepção	1720.002	1	1720.002	550.0915	0.000000
Aglom.	154.152	8	19.269	6.1626	0.000052
cura	0.230	1	0.230	0.0735	0.787910
Aglom. X cura	0.400	8	0.050	0.0160	0.999999

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela E 8 – ANOVA (Grupo Tukey) - absorção total (a), porosidade total (b), taxa de absorção (c) e porosidade capilar (d) entre 28 dias de cura em  $\text{Ca(OH)}_2$  e 28 dias em imersão na solução de NaOH

(a)						(b)					
6	30	3.49667	****			4	30	7.35424	****		
4	30	3.60667	****			7	30	8.06856	****	****	
3	30	4.03000	****			8	30	8.25808	****	****	
5	30	4.58667	****	****		3	30	8.35473	****	****	
8	30	4.74000	****	****		5	30	9.40619	****	****	****
7	30	4.82000	****	****		6	30	9.76124	****	****	****
1	30	4.99333	****	****	****	1	30	9.85209	****	****	****
7	28	6.29333		****	****	2	30	13.06233	****	****	****
6	28	6.34333		****	****	7	28	13.15265	****	****	****
2	30	6.79000			****	6	28	13.82682		****	****
0	28	7.05667			****	0	28	13.85615		****	****
8	28	7.31000			****	8	28	13.93133		****	****
3	28	7.47333			****	3	28	14.73289		****	****
4	28	7.48667			****	4	28	14.97024		****	****
5	28	7.98333			****	5	28	15.77665			****
0	30	8.06333			****	0	30	16.57383			****
1	28	9.84000			****	1	28	18.94731			****
2	28	11.28667			****	2	28	22.16986			****

(c)						(d)					
7	28	0.473887	****			0	28	3.860155	****		
0	30	0.474848	****			7	30	3.894426	****	****	
7	30	0.476222	****			7	28	3.954964	****	****	
3	28	0.477561	****			5	30	4.001352	****	****	
6	28	0.482526	****			0	30	4.024160	****	****	
3	30	0.487410	****			5	28	4.067493	****	****	
0	28	0.490592	****			6	28	4.966239	****	****	
5	30	0.493190	****			4	28	5.045467	****	****	
5	28	0.501307	****			4	30	5.109033	****	****	
4	28	0.507588	****			3	28	5.259818	****	****	
4	30	0.518151	****			6	30	5.389639	****	****	
1	28	0.538997	****			3	30	5.637137	****	****	
1	30	0.543060	****			1	28	6.755738	****	****	
6	30	0.552354	****			1	30	6.922602	****	****	
8	28	0.556310	****			8	28	6.988773	****	****	
8	30	0.564919	****			8	30	7.154513	****	****	
2	28	0.915022			****	2	30	9.247848	****	****	
2	30	0.917512			****	2	28	9.308102			****

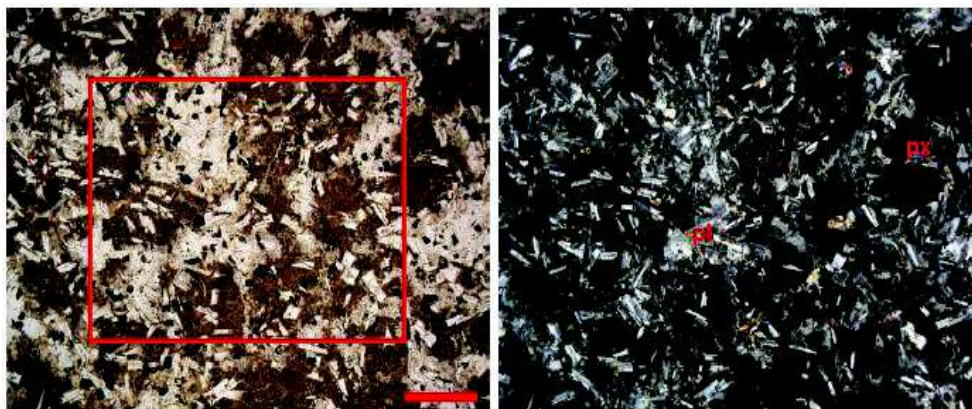
## APÊNDICE F-ANÁLISE PETROGRÁFICA

Figura F 1 - Aspecto macroscópico. Aumento de 6x e escala gráfica de 1 mm.



Fonte: TCC Patrícia Guillante

Figura F 2 - Fotomicrografias. (a) técnica de LN, com aumento de 25X, escala gráfica de 1 mm. (b) técnica de LP, com aumento de 25X, escala gráfica de 1 mm.



Fonte: Guillante

Tabela F 1 - Composição mineralógica do agregado, através da análise petrográfica.

Mineralogia	%
Plagioclásio	67
Quartzo	15
Clinopiroxênio	15
Opacos	3
Apatita	tr

tr= traços (minerais em proporções menores que 1%).

Fonte: Guillante