

INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO MÁSSICA  $\text{CaO/SiO}_2$  NAS  
PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ARGAMASSAS À BASE DE  
CINZA VOLANTE ÁLCALI-ATIVADA COM CAL VIRGEM

**NATHALIA TOFFOLI PANDINI**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ  
ABRIL DE 2019



INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO MÁSSICA  $\text{CaO/SiO}_2$  NAS  
PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ARGAMASSAS À BASE DE  
CINZA VOLANTE ÁLCALI-ATIVADA COM CAL VIRGEM

**NATHALIA TOFFOLI PANDINI**

“Dissertação apresentada ao PPGEC -  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Estadual do Norte  
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das  
exigências para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ

ABRIL DE 2019

INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO MÁSSICA  $\text{CaO/SiO}_2$  NAS  
PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ARGAMASSAS À BASE DE  
CINZA VOLANTE ÁLCALI-ATIVADA COM CAL VIRGEM

**NATHALIA TOFFOLI PANDINI**

“Dissertação apresentada ao PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovada em 26 de abril de 2019.

Comissão examinadora:

---

Prof. Afonso Rangel Garcez de Azevedo, D.Sc. – TER – UFF.

---

Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva, D.Sc. – LAMAV – UENF.

---

Prof. Jonas Alexandre, D.Sc. - LECIV – UENF.

---

Prof. Dylmar Penteado Dias, D.Sc. - LECIV - UENF.

Orientador

## **DEDICATÓRIA**

Dedico essa dissertação a todos os meus professores e professoras, desde a pré-escola até a pós-graduação. Sem a gradual construção do conhecimento, nada disso seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Dulce e Miguel, por tornarem essa trajetória possível.

Ao meu orientador, Dylmar, pela paciência e por me mostrar o caminho ao longo da pesquisa.

Ao João Victor, por me incentivar e tornar a caminhada mais suave.

À Capes, pelo incentivo financeiro.

Às empresas Carbomil e PozoFly, que gentilmente fizeram a doação da cal virgem e da cinza volante, respectivamente, utilizadas nessa pesquisa.

Aos técnicos de laboratório Rômulo e Gabriel, à doutoranda Kelly, ao Markssuel, ao Giovanni e aos professores Eduardo (LAMAV), Guilherme e Gustavo pela disponibilidade em ajudar na realização de alguns ensaios durante a pesquisa.

Ao professor Jonas Alexandre, que num momento turbulento durante o mestrado, me estendeu a mão e me ajudou a continuar com essa pesquisa.

Aos amigos e companheiros de pesquisa que sempre me ampararam nos momentos de dúvida.

Muito obrigada!

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1. <i>Considerações iniciais</i>	18
1.2. <i>Objetivos</i>	19
1.2.1. <i>Geral</i>	19
1.2.2. <i>Específicos</i>	19
1.3. <i>Justificativas</i>	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
2.1. <i>Materiais álcali-ativados e geopoliméricos</i>	21
2.2. <i>Ativação alcalina e geopolimerização</i>	21
2.3. <i>Precursores</i>	26
2.4. <i>Ativadores alcalinos</i>	26
2.5. <i>Trabalhos relacionados ao presente estudo</i>	27
<b>3. MATERIAIS</b>	<b>33</b>
3.1. <i>Precursor</i>	33
3.2. <i>Ativador</i>	33
3.3. <i>Agregado miúdo</i>	34
3.4. <i>Água</i>	34
<b>4. MÉTODOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>35</b>
4.1. <i>Caracterização química do precursor e do ativador</i>	35
4.2. <i>Densidade</i>	37
4.3. <i>Dosagem</i>	37
4.4. <i>Sequência de mistura</i>	38
4.4.1. <i>Sequência de mistura 1</i>	38
4.4.2. <i>Sequência de mistura 2</i>	39
4.4.3. <i>Sequência de mistura 3</i>	39
4.4.4. <i>Sequência de mistura 4</i>	39

4.5.	<i>Determinação da dosagem ótima</i>	40
4.5.1.	Ganho de resistência mecânica ao longo do tempo	43
4.6.	<i>Avaliação da viabilidade tecnológica da argamassa de maior resistência à compressão</i>	44
4.6.1.	Determinação da densidade de massa no estado fresco	45
4.6.2.	Determinação da retenção de água	47
4.6.3.	Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido	49
4.6.4.	Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade	51
4.6.5.	Determinação da resistência potencial de aderência à tração	54
4.6.6.	Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão	57
4.6.6.1.	Tração na flexão	57
4.6.6.2.	Compressão	59
4.6.7.	Comparação com argamassas comerciais	62
4.7.	<i>Caracterização das argamassas</i>	63
4.7.1.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	63
4.7.2.	Difração de raios X (DRX)	78
4.7.3.	Termogravimetria e sua diferencial (TG e DTG)	81
4.7.4.	Porosimetria por intrusão de mercúrio	86
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>88</b>
5.1.	<i>Conclusões</i>	88
5.2.	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	90
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>91</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo estrutural do C-A-S-H (MACIOSKI, 2017).	22
Figura 2: Classificação dos cimentos, de acordo com sua composição (PROVIS e VAN DEVENTER, 2014).	24
Figura 3: Modelo tridimensional da estrutura do cimento geopolimérico N-A-S-H (PACHECO-TORGAL <i>et al.</i> , 2014).	25
Figura 4: Argamassadeira utilizada para a produção das argamassas.	38
Figura 5: Corpo de prova na fôrma cilíndrica (diâmetro = 50 mm e altura = 100 mm).	41
Figura 6: Pratos metálicos com revestimento elastomérico utilizados nas extremidades dos corpos de prova cilíndricos.	41
Figura 7: Corpo de prova cilíndrico posicionado na prensa.	42
Figura 8: Resultados do ensaio de compressão das argamassas aos 14 e 28 dias.	43
Figura 9: Ganho de resistência mecânica da argamassa ao longo dos dias.	44
Figura 10: Recipiente para determinação da densidade de massa no estado fresco.	45
Figura 11: Funil de Buchner modificado acoplado à bomba de vácuo durante ensaio para determinação da retenção de água.	48
Figura 12: Corpos de prova prismáticos de dimensões 40 mm × 40 mm × 160 mm.	50
Figura 13: Corpos de prova durante ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.	53

Figura 14: Base de argamassa sobre substrato de concreto para ensaio de aderência à tração. _____	55
Figura 15: Pastilhas coladas sobre a base de argamassa para ensaio de aderência à tração. _____	55
Figura 16: Ensaio de aderência à tração. _____	56
Figura 17: Corpo de prova no início do ensaio de determinação de resistência à tração na flexão. _____	58
Figura 18: Corpo de prova após a ruptura no ensaio de determinação de resistência à tração na flexão. _____	58
Figura 19: Corpo de prova no início do ensaio de compressão. _____	59
Figura 20: Corpo de prova após a ruptura no ensaio de compressão. _____	60
Figura 21: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,25$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	64
Figura 22: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,50$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	64
Figura 23: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	65
Figura 24: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 1,00$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	65
Figura 25: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	66
Figura 26: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 1,50$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	66

Figura 27: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	67
Figura 28: Micrografias da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . <b>a)</b> Aumento de 700x. <b>b)</b> Aumento de 5000x. _____	67
Figura 29: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . <b>Ponto 1:</b> C-A-S-H (silicato de cálcio e alumínio hidratado). <b>Ponto 2:</b> C-S-H (silicato de cálcio hidratado). _____	68
Figura 30: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 29. _____	69
Figura 31: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 29. _____	69
Figura 32: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . Ponto 1: Geopolímero Ca-PSS (polisiloxosialato de cálcio). _____	70
Figura 33: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 32. _____	71
Figura 34: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . <b>Ponto 1:</b> portlandita (hidróxido de cálcio – CH), com pequena presença de $\text{SiO}_2$ na superfície da face. <b>Ponto 2:</b> portlandita (hidróxido de cálcio – CH). _____	71
Figura 35: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 34. _____	72
Figura 36: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 34. _____	72
Figura 37: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . <b>Ponto 1 e Ponto 2:</b> polisiloxosialato de potássio e cálcio (K,Ca-PSS). _____	73

Figura 38: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 37.	73
Figura 39: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 37.	74
Figura 40: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . <b>Ponto 1:</b> M-C-A-S-H (silicato de cálcio, alumínio e magnésio hidratado). <b>Ponto 2:</b> C-S-H (silicato de cálcio hidratado).	75
Figura 41: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 40.	75
Figura 42: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 40.	76
Figura 43: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . <b>Ponto 1:</b> $\text{CaCO}_3$ (carbonato de cálcio).	76
Figura 44: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 43.	77
Figura 45: Micrografia da argamassa álcali-ativada com $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . <b>Ponto 1:</b> agregado miúdo (areia – $\text{SiO}_2$ ).	77
Figura 46: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 45.	78
Figura 47: Difractogramas de raios X de amostras das oito dosagens de argamassa álcali-ativada. Os valores na lateral esquerda referem-se à relação $\text{CaO/SiO}_2$ .	80
Figura 48: Comparação da linha de base dos difractogramas das argamassas de $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ e $2,00$ .	81

Figura 49: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,25$ .  
\_\_\_\_\_ 82

Figura 50: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,50$ .  
\_\_\_\_\_ 82

Figura 51: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ .  
\_\_\_\_\_ 83

Figura 52: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,00$ .  
\_\_\_\_\_ 83

Figura 53: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$ .  
\_\_\_\_\_ 84

Figura 54: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,50$ .  
\_\_\_\_\_ 84

Figura 55: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ .  
\_\_\_\_\_ 85

Figura 56: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ .  
\_\_\_\_\_ 85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produtos primários e secundários da hidratação do cimento Portland e das reações de álcali-ativação (PACHECO-TORGAL <i>et al.</i> , 2014).	26
Tabela 2: Resultados da eflorescência de raios X para a cinza volante.	36
Tabela 3: Resultados da eflorescência de raios X para a cal virgem.	36
Tabela 4: Dosagem das argamassas e respectivas quantidades de água definidas por <i>flow table</i> .	37
Tabela 5: Resultado e classificação da densidade de massa aparente no estado fresco, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).	46
Tabela 6: Resultado e Classificação da retenção de água, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).	49
Tabela 7: Resultado e classificação da densidade de massa aparente no estado endurecido, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).	51
Tabela 8: Classificação e resultado do coeficiente de capilaridade e resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.	54
Tabela 9: Classificação e resultado da resistência potencial à tração.	56
Tabela 10: Resultado e classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, segundo a NBR 13281 (ABNT,2005).	60
Tabela 11: Comparação da classificação entre argamassas comerciais da linha Votomassa e a argamassa à base de cinza volante álcali-ativada com cal virgem.	62
Tabela 12: Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio.	86

## RESUMO

A elevada emissão de CO<sub>2</sub> causada pela produção do cimento Portland tem motivado inúmeras pesquisas em materiais alternativos. Um desses materiais é o cimento geopolimérico. Esse material é composto por um precursor silicoaluminoso e um ativador alcalino. Essa mistura tem como produto final um material aglomerante. Assim, o presente trabalho teve por objetivo a investigação da influência da relação mássica CaO/SiO<sub>2</sub> nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas à base de cinza volante álcali-ativada com cal virgem, bem como a verificação da viabilidade tecnológica da argamassa de maior resistência à compressão. A dosagem das argamassas levou em consideração a quantidade de CaO da cal virgem e de SiO<sub>2</sub> da cinza volante. Foram confeccionadas oito argamassas, variando-se a proporção CaO/SiO<sub>2</sub> de 0,25 a 2,00 a cada 0,25. Fixou-se a proporção de areia em relação ao somatório ativador e precursor em 3:1. A quantidade de água de cada dosagem foi determinada fixando-se a consistência padrão por meio do ensaio *flow table*. Os resultados obtidos mostraram que o aumento da relação CaO/SiO<sub>2</sub> foi acompanhado por um aumento significativo da quantidade de água, devido ao processo de hidratação da cal virgem, que provoca grande liberação de calor e, conseqüentemente, elevada evaporação. Verificou-se também que a cinza volante agiu como plastificante da mistura. As dosagens que resultaram nas argamassas de maior e menor resistência à compressão foram, respectivamente, as de CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,75 e 2,00, que atingiram 17,9 e 3,8 MPa aos 28 dias. Os resultados da avaliação tecnológica foram satisfatórios, evidenciando que os valores obtidos podem ser comparados aos de argamassas comerciais. Por fim, utilizou-se as técnicas analíticas MEV, DRX, TG/DTG e porosimetria por intrusão de mercúrio nas oito argamassas, a fim de encontrar diferenças morfológicas, químicas e físicas que justificassem as elevadas diferenças no comportamento mecânico. As micrografias, juntamente com EDS, mostraram a formação de C-S-H, C-A-S-H e CH, entre outros compostos, em todas as argamassas. Os resultados do DRX mostraram maior presença de CH nas argamassas de maior CaO/SiO<sub>2</sub>, justificando as menores resistências mecânicas atingidas por essas argamassas, além da presença de CaCO<sub>3</sub> em todas as argamassas, indicando que todas sofreram carbonatação independentemente da relação CaO/SiO<sub>2</sub>. Os resultados de TG/DTG indicaram a presença de água livre e confirmaram as fases C-S-H, CH e CaCO<sub>3</sub> nas argamassas. A porosimetria por

intrusão de mercúrio mostrou significativa diferença de porosidade entre as argamassas de maior e menor resistência, 4,6 e 15,4%, respectivamente, indicando que a diferença de resistência mecânica também é justificada por esse parâmetro.



## ABSTRACT

The high CO<sub>2</sub> emission caused by Portland cement production has motivated a great deal of research into alternative materials. One of such material is geopolymer cement. This material is composed by silicoaluminous precursor and alkaline activator. This mixture produces a binder material. The objective of the present work was to investigate the influence of the CaO/SiO<sub>2</sub> mass ratio on the physical, chemical and mechanical properties of alkali-activated fly ash mortars with lime, as well as the verification of technological viability of the mortar with higher compressive strength. The dosage of mortars took into account the amount of CaO in the lime and SiO<sub>2</sub> in the fly ash. Eight mortars were made, varying the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio from 0.25 to 2.00 per 0.25. The ratio of sand to the activator + precursor was set at 3:1. The amount of water of each dosage was determined by setting the standard consistency by means of flow table test. The results showed that the increase in the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio was accompanied by a significant increase in the amount of water due to the hydration process of lime, which causes great heat release and consequently high evaporation. The fly ash was also found to act as a plasticizer for the mixtures. The dosages that resulted in the mortars with higher and lower compressive strength were, respectively, CaO/SiO<sub>2</sub> = 0.75 and 2.00, which reached 17.9 and 3.8 MPa at 28 days. The results of technological evaluation were satisfactory, evidencing that the values obtained can be compared to commercial mortars. Finally, the analytical techniques SEM, XRD, TG/DTG and mercury intrusion porosimetry were used in the eight mortars, in order to find morphological, chemical and physical differences that justified the high differences in the mechanical behavior. The micrographs, together with EDS, showed the formation of C-S-H, C-A-S-H and CH, among other compounds, in all mortars. The results of XRD showed higher presence of CH in the mortars of higher CaO/SiO<sub>2</sub>, justifying the lower mechanical strength of them, besides the presence of CaCO<sub>3</sub> in all the mortars, indicating that all of them underwent carbonation regardless of CaO/SiO<sub>2</sub> ratio. The TG/DTG results indicated the presence of free water and confirmed the C-S-H, CH and CaCO<sub>3</sub> phases in the mortars. Mercury intrusion porosimetry showed significant porosity difference between the higher and lower strength mortars, 4.6 and 15.4%, respectively, indicating that the mechanical strength difference is also justified by this parameter.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações iniciais

Quando se fala em materiais de construção, logo vem à cabeça o cimento Portland; e não é à toa, pois o cimento Portland é, segundo Calaes (2005), o segundo material mais utilizado pelo homem, ficando atrás somente da água. Apesar da larga utilização desse material, a produção do cimento Portland demanda altas quantidades de energia e libera grandes volumes de dióxido de carbono na atmosfera. Estima-se que, para cada tonelada de cimento produzida, uma tonelada de CO<sub>2</sub> seja liberada para a atmosfera (AITCIN e MINDESS, 2011).

Tendo em vista as mudanças climáticas e o processo de adequação do ser humano a novas tecnologias, energias e materiais mais sustentáveis, um novo método de produção de materiais cimentícios vem sendo estudado desde meados do século XX. Esse método é a chamada ativação alcalina, que consiste em solubilizar a matéria-prima do novo cimento com um composto alcalino, como hidróxidos e/ou silicatos. Matérias-primas ou compostos alcalinos ricos em cálcio produzem materiais cimentantes, cujo principal composto é o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), assim como no cimento convencional. Materiais ricos em sílica e alumina formam um aluminossilicato tridimensional amorfo quando álcali-ativados (LANGARO, 2016).

Diferentemente do cimento Portland, os cimentos álcali-ativados não necessitam de calcinação, o que reduz significativamente a emissão de CO<sub>2</sub> durante a sua produção (LANGARO, 2016). Ressalta-se que o uso de silicatos como ativadores em cimentos alcalinos além de elevar significativamente o custo de sua produção, torna-o um material poluente, devido à elevada emissão de CO<sub>2</sub> na produção desse ativador. Sendo assim, o futuro das pesquisas com cimentos alcalinos, com o objetivo de diminuir o impacto ambiental causado pela produção de materiais de construção, deve basear-se em ativadores que não sejam silicatos (RANGEL, 2017).

Os cimentos álcali-ativados, como já dito, necessitam de uma matéria-prima e de um ativador alcalino, que são chamados na linguagem técnica de, respectivamente, precursor e ativador. Quimicamente, os precursores devem conter sílica ou sílica e alumina para que as mesmas sejam solubilizadas e tornadas reativas (ativadas) pelo ativador e, assim, formarem os produtos que darão as características

aglomerantes ao material. Os principais precursores usados na produção de cimentos álcali-ativados são, segundo Murta (2008): cinza volante, cinza da casca do arroz, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, resíduo de tijolo moído, sílica ativa e metacaulim. Nota-se que a grande maioria deles é conhecida como pozolanas, justamente pela quantidade de sílica amorfa. Os ativadores são compostos alcalinos capazes de ativar a sílica do precursor, podendo ou não fazer parte do produto final da reação. São exemplos de ativadores alcalinos: hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, silicato de sódio, silicato de potássio, hidróxido de cálcio (cal hidratada) e óxido de cálcio (cal virgem), entre outros.

O presente trabalho utilizou como precursor e ativador, respectivamente, cinza volante e cal virgem. A cinza volante é subproduto da produção de energia em termelétricas pela queima de carvão mineral e leva esse nome por ser coletado no topo das chaminés da indústria. Sua composição química é interessante para uso na ativação alcalina, pois contém grandes quantidades de sílica amorfa e alumina. O ativador alcalino foi a cal virgem (CaO), produto de baixíssimo custo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Geral**

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar a influência da relação mássica CaO/SiO<sub>2</sub> nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas à base de cinza volante álcali-ativada com cal virgem, bem como a verificação da viabilidade da fabricação dessa argamassa, que deve atingir desempenho mecânico e trabalhabilidade satisfatórios para aplicação na construção civil, além de uma possível patente do produto.

### **1.2.2. Específicos**

- Caracterizar as matérias-primas: cal virgem e cinza volante;
- determinar a relação ótima entre ativador e precursor;
- determinar a sequência ótima de mistura dos materiais;
- avaliar parâmetros relevantes para argamassas, tais como:
  - resistência à compressão axial;

- densidade de massa aparente no estado endurecido;
- resistência à tração na flexão;
- absorção de água;
- densidade de massa aparente no estado fresco;
- retenção de água;
- resistência potencial de aderência à tração;
- utilizar técnicas analíticas (DRX, MEV, TG/DTG e porosimetria por intrusão de mercúrio) para caracterizar as argamassas.

### 1.3. Justificativas

Devido à grande importância atribuída ao meio ambiente, diferentes pesquisas em várias áreas do conhecimento tendem a desenvolver técnicas e materiais mais sustentáveis que possam reduzir o consumo de recursos naturais, a emissão de gases nocivos à atmosfera, uso de combustíveis fósseis, uso de materiais tóxicos, viabilizar a reciclagem e reuso de materiais *etc.* Seguindo essa linha, o presente trabalho visa à produção de argamassas via ativação alcalina da cinza volante - que é um subproduto da produção de energia pela queima de carvão mineral - por cal virgem, produto de baixíssimo custo comercial. Segundo Duxson *et. al.* (2009), quando se compara a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, a produção dos cimentos álcali-ativados têm emissão 80% menor do que a do cimento Portland. Assim sendo, este estudo se baseia no desenvolvimento de um material de propriedades mecânicas similares ou superiores às de materiais baseados em cimento Portland, que pode substituí-lo com custo menor de fabricação e maior sustentabilidade.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Materiais álcali-ativados e geopoliméricos**

Embora o estudo de materiais álcali-ativados venha sendo feito há vários anos, há ainda a confusão, tanto no meio acadêmico quanto no meio comercial, no que diz respeito à nomenclatura dos materiais. Nomes como “polímeros minerais”, “polímeros inorgânicos”, “materiais de cinzas alcalinas”, “zeocerâmicos”, “zeocimentos”, entre outros, nomeiam materiais muito similares e tornam a busca por trabalhos e referências muito mais difícil por uma simples questão de nomenclatura da palavra-chave. A fim de tornar os conceitos mais claros e melhorar a busca dos termos na literatura, o relatório do comitê técnico da RILEM (TC 224-AAM, 2014) definiu os termos “materiais álcali-ativados” e “geopolímeros”.

O termo “materiais álcali-ativados” é a classificação mais ampla e engloba essencialmente qualquer sistema ligante que derive da reação entre um metal alcalino ou metal alcalino terroso e um precursor sólido, que pode ser um silicato cálcico ou materiais ricos em aluminossilicatos, como escórias de alto-forno e algumas pozolanas. A fonte alcalina pode incluir hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos ou óxidos – essencialmente qualquer substância solúvel que forneça cátions, aumente o pH da mistura e acelere a dissolução do precursor (RILEM TC 224-AAM, 2014).

Os “geopolímeros” usualmente citados como um termo muito abrangente são, na verdade, um subconjunto dos materiais álcali-ativados, em que a fase ligante é composta quase que exclusivamente de aluminossilicatos com baixo teor de cálcio nos componentes da reação, formando, assim, uma rede pseudo-zeolítica - redes formadas por aluminossilicatos hidratados; uma estrutura de arranjo tridimensional com ligações cruzadas, irregular e de baixa mobilidade, como nos polímeros minerais (Pacheco-Torgal *et al.*, 2014), ao invés da cadeia característica dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Nos geopolímeros os ativadores são geralmente hidróxidos ou silicatos alcalinos e os precursores mais utilizados são a cinza volante e argilas calcinadas (RILEM TC 224-AAM, 2014).

### **2.2. Ativação alcalina e geopolimerização**

Segundo Palomo *et al.* (1999), a ativação alcalina é um processo químico que permite transformar materiais silicosos ou silicoaluminosos com estruturas totalmente ou parcialmente amorfas, como as pozolanas, em materiais cimentantes. De acordo com Pacheco-Torgal *et al.* (2014), os cimentos alcalinos podem ser divididos em duas categorias, segundo a natureza química dos seus componentes, sendo elas: *high calcium* (alto cálcio) e *low calcium* (baixo cálcio).

A categoria *high calcium* engloba cimentos alcalinos cujos componentes têm alto teor de cálcio e silício e podem conter ou não aluminatos. Nesse sistema os precursores são submetidos a uma alcalinidade moderada e o principal produto da reação é o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) ou C-A-S-H (silicoaluminato de cálcio hidratado) quando houver alumina, produto semelhante ao obtido na hidratação do cimento Portland.

Segundo Macioski (2017), durante a ativação alcalina, o alumínio substitui átomos de silício com arranjo tetraédrico (SiQ) e permite a formação de cadeias longas, com ligações esporádicas do tipo Si-O-Al e estruturas bidimensionais do tipo  $\text{SiQ}^3(1\text{Al})$ . Sob estas condições, o tradicional C-S-H se torna uma estrutura do tipo C-A-S-H, como mostra a Figura 1.

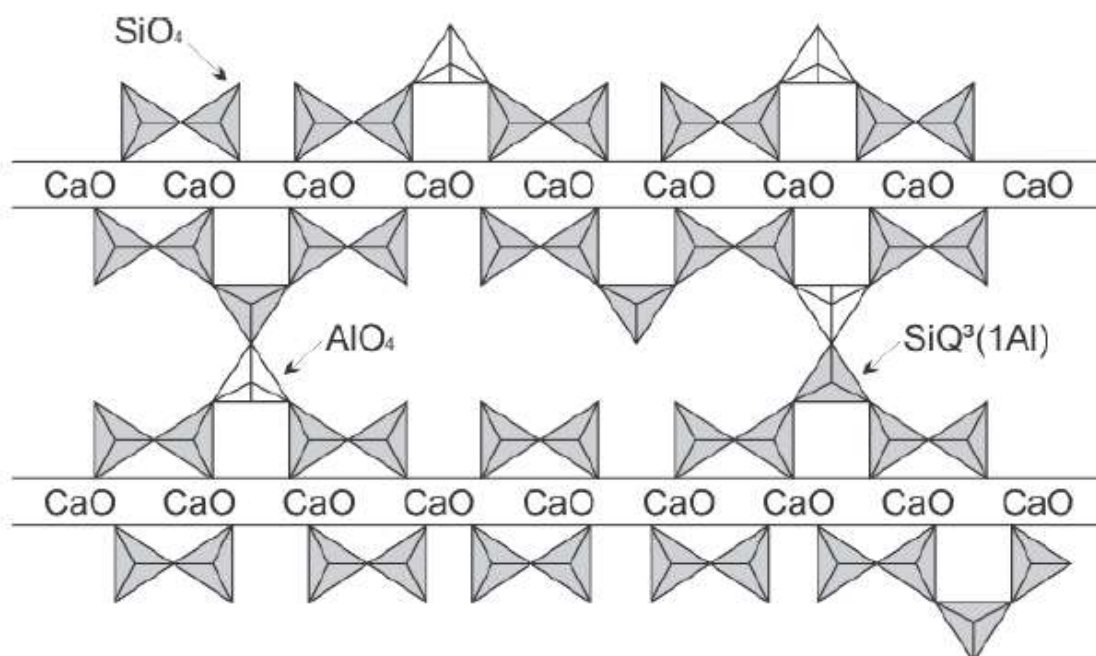


Figura 1: Modelo estrutural do C-A-S-H (MACIOSKI, 2017).

Na categoria *low calcium* os elementos constituintes possuem principalmente silicatos e aluminatos e baixo teor de CaO, como o metacaulim e a cinza volante. Nesse sistema os precursores necessitam de um ambiente altamente alcalino para serem solubilizados e formarem o principal produto da reação, o N-A-S-H (aluminossilicato de sódio hidratado), uma estrutura considerada zeolítica. Sem um consenso consolidado, alguns pesquisadores consideram esse sistema de álcali-ativação com baixo cálcio uma geopolimerização.

O termo geopolímero e, conseqüentemente, a geopolimerização, surgiu em 1979 com o pesquisador francês Davidovits para descrever uma reação inorgânica que gera produtos ligantes com formação semelhante a polímeros. Para Davidovits (1988), produtos das reações de álcali-ativação que não apresentam estrutura coordenada tetraédrica com silício e pelo menos duas ligações com o alumínio, formando uma estrutura zeolítica, não são classificados como geopolímeros. Para ele a estrutura geopolimérica deve apresentar coordenações do tipo  $\text{SiQ}^4(2\text{Al})$  e  $\text{SiQ}^4(3\text{Al})$  (LI *et al.*, 2010). Davidovits afirma também que os produtos de cimentos álcali-ativados N-A-S-H não devem ser considerados geopolímeros.

Por esse motivo, Davidovits critica alguns trabalhos que são referências atuais na área de cimentos álcali-ativados, como os de Provis e Van Deventer (2009), do comitê *RILEM Report* (PROVIS, 2014; VAN DEVENTER, 2014) e de Pacheco-Torgal *et al.* (2014).

Apesar de Davidovits ter sido pioneiro e seus trabalhos terem grande relevância no meio acadêmico, pesquisadores que detêm a maior parte das publicações dos últimos cinco anos, como Provis, Van Deventer, Pacheco-Torgal e Palomo, entre outros, consideram sim que o N-A-S-H, produto gerado na álcali-ativação de compostos de baixo cálcio, é formador de geopolímeros. Para eles, a formação de geopolímeros se dá quando o teor de cálcio é baixo e o teor de alumínio e de ativadores alcalinos é alto. Assim sendo, os conceitos apresentados neste trabalho estão de acordo com as publicações mais recentes. A Figura 2 mostra a classificação de cimentos de acordo com a composição, sendo M o metal alcalino do ativador.

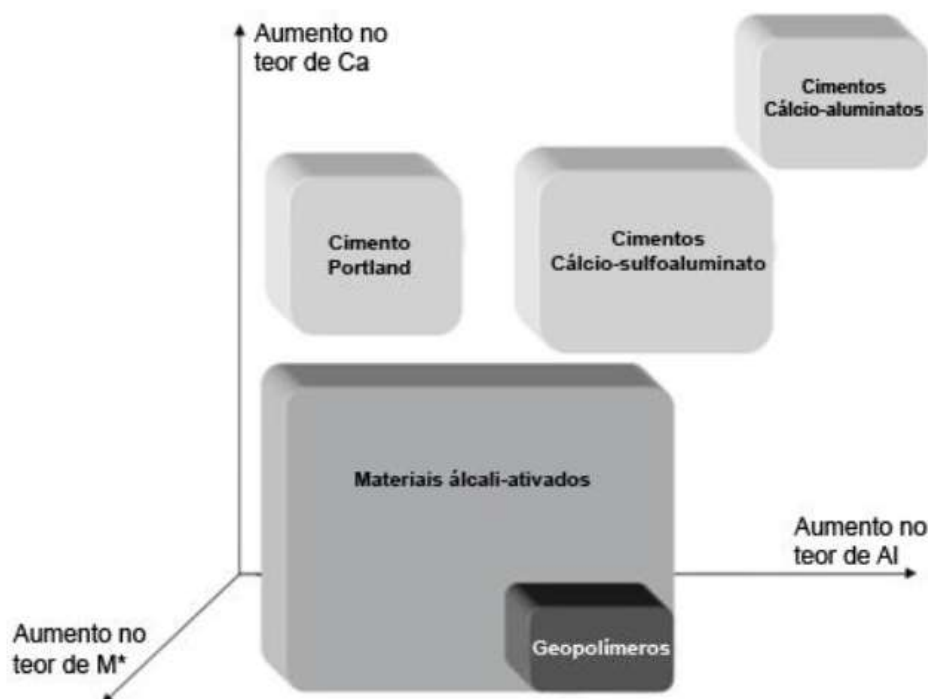


Figura 2: Classificação dos cimentos, de acordo com sua composição (PROVIS e VAN DEVENTER, 2014).

Em 1994, Glukhovsky propôs um modelo que explica os mecanismos da ativação alcalina de materiais de baixo cálcio, ou seja, geopolímeros. Ele dividiu essa reação de geopolimerização em três etapas, sendo elas: destruição-coagulação, condensação-coagulação e cristalização por condensação.

A primeira etapa, **destruição-coagulação**, é quando ocorre a dissolução em meio altamente alcalino dos aluminossilicatos. As ligações Si-O-Si, Al-O-Si e Al-O-Al são rompidas e ocorre a redistribuição eletrônica em torno dos átomos de silício, causada pela ação da hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). A chamada hidroxilação do silício forma compostos intermediários decompostos em sílica-hidroxila  $[\text{Si}(\text{OH})_4]$  e oligômeros  $[\text{OSi}(\text{OH})^3]$ . Os cátions alcalinos provenientes do ativador equilibram a carga negativa, enquanto as hidroxilas agem nas ligações Al-O-Si formando compostos como  $\text{Al}(\text{OH})^4$ .

A segunda etapa, **condensação-coagulação**, é catalisada pelas hidroxilas dissociadas e ocorre quando as espécies iônicas formadas na dissolução se acumulam novamente e formam uma estrutura coagulada; é a chamada policondensação. As ligações Si-O-Si, que se romperam na primeira fase e formaram a sílica-hidroxila, agora se condensam novamente e formam uma nova ligação Si-O-



Si. Os produtos gerados pela polimerização do ácido silícico começam a se acumular em todas as direções e os aluminatos participam da polimerização substituindo os tetraedros de silício. Nessa fase o metal alcalino proveniente do ativador também participa da reação, atuando como componente da geopolimerização.

Na terceira etapa, **cristalização por condensação**, a presença de partículas sólidas que não reagiram nas etapas anteriores favorecem a saturação das ligações e a precipitação dos produtos finais da polimerização. A composição destes depende diretamente da composição química dos precursores e ativadores e das condições de cura.

Desta maneira, o resultado dessa reação em três etapas é uma matriz amorfa com características aglomerantes, cujo principal componente é a rede N-A-S-H, estrutura tipicamente polimérica com ligações fortes e estrutura complexa (hipotético precursor da zeólita). A Figura 3 mostra um modelo tridimensional do produto da reação de geopolimerização.

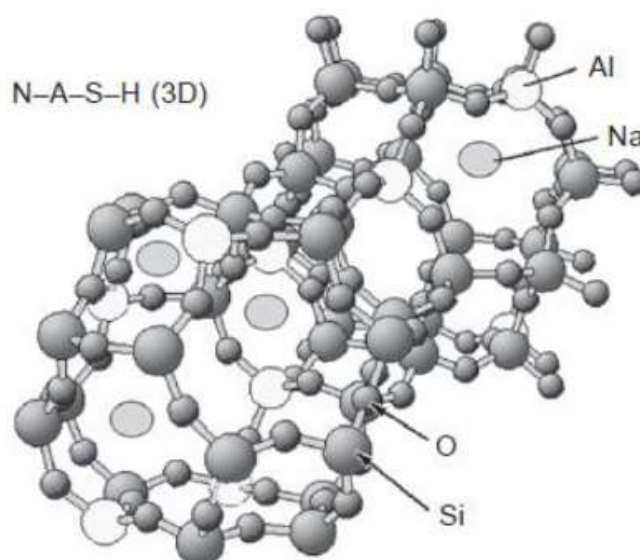


Figura 3: Modelo tridimensional da estrutura do cimento geopolimérico N-A-S-H (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014).

A Tabela 1 mostra a comparação entre os produtos formados na hidratação do cimento Portland e os produtos das reações de álcali-ativação e geopolimerização.

Tabela 1: Produtos primários e secundários da hidratação do cimento Portland e das reações de álcali-ativação (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014).

Tipo de ligante	Cimento Portland	Cimento álcali-ativado	
		(Na,K) <sub>2</sub> O-CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	(Na,K) <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O
Primário	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H
Produto de reação	Portlandita [Ca(OH) <sub>2</sub> ] Monossulfato [C <sub>4</sub> A $\bar{S}$ H <sub>12</sub> ] Etringita [C <sub>3</sub> A $\bar{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub> ]	Hidrotalcita [Mg <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>16</sub> ·4H <sub>2</sub> O] C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub> CASH <sub>8</sub> C <sub>4</sub> AcH <sub>11</sub> C <sub>8</sub> Ac <sub>2</sub> H <sub>24</sub>	Zeólitas: hydroxysodalita, zeólita P, Nachabazita, zeólita Y, faujasita

C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N = Na<sub>2</sub>O, K = K<sub>2</sub>O, H = H<sub>2</sub>O, c = CO<sub>2</sub>,  $\bar{S}$  = SO<sub>3</sub>

### 2.3. Precursores

Teoricamente, os precursores numa ativação alcalina podem ser qualquer material com alto teor de silício ou silício e alumínio para fornecerem os elementos químicos necessários para a formação das estruturas aglomerantes. Além da composição química, a morfologia dos compostos também é importante. É necessário conhecer o grau de amorfismo (reatividade) da sílica, sendo obviamente os materiais com maior teor de sílica amorfa os preferenciais (ROCHA, 2017).

Diversos materiais se enquadram na categoria de precursores, como a escória de alto-forno, a cinza volante, o metacaulim, a sílica ativa, as pozolanas como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, a cinza da casca do arroz e resíduos industriais, entre outros. Porém, na literatura, destacam-se a escória de alto-forno, a cinza volante e o metacaulim, materiais presentes na grande maioria dos trabalhos feitos na área da ativação alcalina e geopolímeros (DUXSON *et al.*, 2007).

### 2.4. Ativadores alcalinos

De acordo com Murta (2008), os ativadores alcalinos são os materiais responsáveis pela dissolução da sílica por meio das hidroxilas. Somente por meio deles a sílica atinge condições de reação e forma os produtos silicoaluminosos e/ou o C-S-H, a depender da concentração e composição química, tanto do ativador quanto do precursor.

Segundo Glukhovsky (1994), os ativadores alcalinos podem ser aluminatos ( $M_2O:nAl_2O_3$ ), aluminossilicatos ( $M_2O:Al_2O_3:(2-6)SiO_2$ ), hidróxidos ( $MOH, M(OH)_2$ ), sais de ácidos fortes ( $M_2SO_4$ ), sais de ácidos fracos ( $M_2CO_3, M_2SO_3, M_3PO_4, MF$ ), silicatos ( $M_2O.nSiO_2$ ), óxidos alcalinos ( $MO$ ), sendo M um íon metal alcalino do tipo:  $K^+, Na^+, Li^+$  ou  $Ca^{2+}$ . Os ativadores alcalinos podem ainda ser uma combinação destes compostos.

Segundo DAVIDOVITS (1999), os ativadores mais utilizados são a combinação de hidróxido de sódio ( $NaOH$ ) ou hidróxido de potássio ( $KOH$ ) com silicato de sódio ( $nSiO_2Na_2O$ ) ou de potássio ( $nSiO_2K_2O$ ).

## 2.5. Trabalhos relacionados ao presente estudo

Granizo *et al.* (2002) estudaram os efeitos do hidróxido de cálcio nos produtos da ativação alcalina de metacaulim por hidróxido de sódio a 5M e a 12M. Foram feitos dois tipos de amostras: apenas com metacaulim e com metacaulim e cal hidratada na proporção de 1:1. Os resultados mostraram que nas amostras de metacaulim ativadas pelo  $NaOH$  a 12M houve formação de uma rede inorgânica de produtos, causada pela grande quantidade de hidroxilas livres na fase líquida, acelerando a reação. Essa mesma mistura ativada pelo  $NaOH$  a 5M não apresentou rigidez; apenas 20% do metacaulim havia sido ativado após 24h, o que mostra que a concentração de 5M não foi suficiente para a reação de geopolimerização somente com metacaulim. Nas amostras de metacaulim e cal hidratada houve a formação de produtos cimentantes com o ativador a 5M, mostrando a eficiência da cal hidratada na formação de C-S-H, mesmo quando o gel geopolimérico não é formado. Já na concentração de 12M os produtos foram o gel geopolimérico e C-S-H, com 20% da sílica mobilizada neste. Os pesquisadores notaram ainda que em ambas as pastas a rede geopolimérica possuía a mesma composição química ( $Si_2:Al_2:Na_2:H_4:O_{10}$ ).

Murta (2008) estudou a dosagem de argamassas álcali-ativadas feitas com metacaulim e resíduo de tijolo moído com soluções de cal virgem e cal hidratada. O estudo mostrou que, em relação à resistência mecânica, as álcali-ativadas com cal virgem apresentaram vantagem de 12,4 MPa em relação às com cal hidratada. Esse resultado mostra que, devido a maior temperatura e maior pH atingidos na solução de cal virgem, a sílica presente no precursor teve maior solubilidade e, conseqüentemente, maior reatividade, produzindo maior quantidade de produtos

cimentantes. Para as argamassas ativadas com cal hidratada, a melhor relação ativador/precursor foi de 1,5, enquanto as argamassas ativadas com cal virgem apresentaram melhor resultado quando a relação foi de 0,75. Esses valores mostram claramente a maior reatividade da cal virgem que, com metade da quantidade de ativador, produziu argamassas de maior resistência mecânica.

Weerdt *et al.* (2011) estudou a interação da cinza volante com a cal virgem em argamassas à base de cimento Portland com diferentes níveis de substituição, tanto de cal virgem quanto de cinza volante. A principal conclusão foi a confirmação da interação da cinza volante com a cal virgem. Em comparação com a argamassa de controle (100% cimento Portland), observou-se decréscimo na resistência à flexão e à compressão nas argamassas de cimento Portland com 5% de substituição por cal virgem, enquanto que nas argamassas com os mesmos 5% de cal virgem substituindo uma mistura de 70% cimento Portland e 30% cinza volante não houve decréscimo na resistência aos 28, 90 e 140 dias, confirmando a viabilidade das substituições. Resultados de TG e DRX confirmaram que a presença da cal virgem no sistema leva a um aumento no volume de produtos hidratados, com subsequente diminuição da porosidade e aumento da resistência mecânica. A cinza volante por sua vez auxilia quimicamente as reações com a cal virgem.

Wang *et al.* (2016) estudaram as propriedades de geopolímeros à base de escória de aciaria álcali-ativada para uma mistura com razão constante e igual a 1,0 de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ . Os geopolímeros foram preparados com relações líquido/sólido (L/S) iguais a 0,35, 0,40 e 0,45. As soluções ativadoras tinham diferentes concentrações, de 4, 6 e 8%. A cura foi feita de duas maneiras diferentes: ao ar livre e outra com imersão de água e cal. Os pesquisadores concluíram que, quando a relação L/S e a concentração do ativador aumentam, aumenta também a trabalhabilidade do geopolímero. A relação L/S aumentada dilui a concentração do ativador alcalino, o que afeta a estrutura final dos produtos formados, produzindo pequenos vazios, o que afeta negativamente a resistência à compressão. Concluiu-se também que, aumentando a concentração do ativador, aumenta também o pH da solução, solubilizando mais rapidamente o precursor (escória), causando, assim, a formação de produtos mais compactos e, conseqüentemente, elevando a resistência à compressão do produto final. Por outro lado, com o aumento da concentração do ativador, aumentou-se também a retração das amostras. Em relação aos tipos de cura, concluiu-se que as amostras curadas na água e cal tiveram maior polimerização

devido à incorporação de um álcali adicional e, ainda, apresentaram melhores propriedades mecânicas e menor retração quando comparadas às amostras curadas ao ar livre.

Mydraboina *et al.* (2017) determinaram o índice pozolânico, bem como a quantidade de cal virgem necessária em argamassas de cimento Portland com até 80% de substituição por cinza volante de baixo cálcio, a fim de minimizar o problema do lento ganho de resistência em argamassas desse tipo. Concluíram que o índice pozolânico foi diretamente proporcional à finura da cinza volante e que a quantidade necessária de cal virgem no sistema foi diretamente proporcional ao índice pozolânico, ou seja, diretamente proporcional à reatividade da cinza. A argamassa com 20% de cimento Portland e 80% de cinza volante requereu 31% de cal para reagir completamente. Além disso, concluiu-se que, com cura adequada, concretos e argamassas com grande volume de substituição por cinza volante podem ser produzidos sem comprometer a resistência mecânica, desde que contenham as quantidades necessárias de cal virgem.

Amin *et al.* (2017) estudaram a dosagem de  $\text{Ca(OH)}_2$ , NaOH e água na fabricação de tijolos geopoliméricos, utilizando resíduos cerâmicos calcinados. A menor absorção de água e maior densidade nos tijolos foi observada com 0,5% de NaOH. À medida que o tempo e a temperatura de cura aumentaram, a densidade dos tijolos diminuiu, enquanto a absorção de água aumentou. Observou-se também que o aumento do tempo de cura teve efeito benéfico na resistência à compressão, enquanto o aumento na temperatura de cura tendeu a diminuir essa resistência. A dosagem que resultou na resistência à compressão máxima aos 28 dias foi com 10%  $\text{Ca(OH)}_2$ , 1% NaOH e 38% de água, atingindo 9,0 MPa, o que está acima dos requisitos mínimos para tijolos de construção. Observou-se que a variação do  $\text{Ca(OH)}_2$  pouco alterou a resistência mecânica devido à elevada ionização do NaOH em solução. É dele que provém a maior parte das hidroxilas requeridas para a geopolimerização. Por isso, devido à maior ionização do NaOH comparada à do  $\text{Ca(OH)}_2$ , o efeito da variação da soda cáustica no grau de geopolimerização e no ganho de resistência mecânica é mais significativo. Foi possível relacionar diretamente a resistência aos 28 dias com o aumento do grau de geopolimerização e a diminuição da porosidade. Ainda naquele estudo foi avaliado o custo da produção desse tijolo, que se revelou 30% mais barato do que os tijolos convencionais feitos com argila.

González-García *et al.* (2017) estudaram a mistura de feldspatos pozolânicos naturais (albita e anortita), calcita e quartzo. Os geopolímeros foram alcalinizados com silicato de sódio na proporção volumétrica de 0,6 ativador/pozolana e foram curados a 40°C. O estudo concluiu, por meio de imagens microscópicas, que pozolanas naturais que contêm albita e anortita formam geopolímeros. A reação de geopolimerização acontece até os 50 minutos, com um pico aos 3-5 minutos. O feldspato e a calcita mudam seus graus de cristalinidade durante a cura. O estudo mostrou que a cura a 40°C promoveu a policondensação aos 7 dias e que o aumento da temperatura de cura induz o aumento da velocidade da evaporação aquosa e da nucleação e cristalização do feldspato e da calcita. Uma microestrutura mais densa com melhores propriedades mecânicas se formou em idades mais avançadas (28 dias) e com temperaturas de cura mais altas, chegando a 13,2 MPa. Concluiu-se ainda que geopolímeros pozolânicos, como os utilizados naquele estudo, têm resistência mecânica menor quando comparados aos geopolímeros à base de cinza volante, escória de alto-forno e metacaulim, devido à menor quantidade de constituintes amorfos e à menor relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Gomaa *et al.* (2017) estudaram as propriedades no estado fresco e a resistência à compressão aos 7 dias de argamassas de cinza volante álcali-ativadas com elevado teor de cálcio. Foram utilizados ativadores em quatro diferentes proporções: silicato de sódio/hidróxido de sódio (SS/HS) iguais a 0,5, 1,0, 1,5 e 2,5. Foram usados dois regimes de cura, no forno a 70°C (24 horas) e à temperatura ambiente a aproximadamente 23°C. A proporção de água/cinza volante (A/CV) variou de 0,35 a 0,45 e a proporção solução alcalina/cinza volante (SA/CV) variou de 0,25 a 0,30. Os resultados mostraram que o aumento da relação (A/CV) levou a um aumento no tempo de pega e melhora na trabalhabilidade e ainda mostrou maior quantidade de C-S-H quando a A/CV aumentou de 0,35 para 0,375 com SA/CV igual a 0,25, e de 0,40 para 0,45 com SA/CV igual a 0,30, indicando que a água adicional foi usada na formação de produtos cimentantes. Para relações A/CV e SS/HS constantes, o aumento da relação SA/CV diminuiu o tempo de pega e a trabalhabilidade e aumentou a resistência à compressão, devido à maior concentração de álcalis, que aumentou a solubilidade da sílica e da alumina. O tipo de cura se mostrou significativo na resistência à compressão. Para as amostras curadas a temperatura ambiente, a maior resistência foi de 20,8 MPa com A/CV = 0,45, SA/CV = 0,30 e SS/HS = 1,0. Já para

as amostras curadas ao forno, a maior resistência à compressão foi de 41,1 MPa com  $A/CV = 0,375$ ,  $SA/CV = 0,25$  e  $SS/HS = 1,0$ .

Rangel (2017) estudou a viabilidade de argamassas geopoliméricas feitas a partir de metacaulim ativado por KOH e por NaOH, separadamente. Concluiu que apesar da trabalhabilidade melhorar com o aumento da relação ativador/precursor, para ambos os ativadores, a diminuição dessa relação favorece o ganho de resistência à compressão até um limite mínimo em que não há ativador suficiente para balancear a carga elétrica dos aluminatos e elevar o pH da solução a ponto de solubilizar os silicatos e aluminatos do precursor. O valor limite máximo da relação ativador/precursor viável à confecção da argamassa foi de 0,5. A diminuição da relação água/sólidos resulta em maiores resistências à compressão até um limite no qual a ausência de água não atrapalha a trabalhabilidade e não permite que a mistura e a moldagem sejam feitas de forma eficaz. Os resultados acerca da molaridade dos ativadores mostraram melhores resultados de resistência mecânica associados a molaridades mais elevadas. No entanto, o excesso de ativador causou problemas como exsudação e eflorescência. Desta forma, para aliar elevadas molaridades com baixa relação ativador/precursor e garantir o melhor desempenho mecânico é necessário diminuir, simultaneamente, as relações ativador/precursor e água/sólidos, ou seja, aumentar a concentração do ativador, diminuindo o volume da solução aquosa. Comparando-se os dois ativadores, dentro de intervalos favoráveis dos parâmetros composicionais, as argamassas feitas com NaOH obtiveram resistência mecânica muito superior às ativadas com KOH. Por outro lado, as argamassas ativadas com KOH apresentaram trabalhabilidade superior e ausência de exsudação e eflorescência, que estavam presentes nas composições ativadas por NaOH.

Alves (2018) determinou as propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas à base de metacaulim ativado por NaOH, KOH e NaOH + KOH. 20 composições iniciais foram avaliadas quanto à trabalhabilidade, eflorescência e resistência à compressão, variando-se a relação ativador/precursor e a composição da solução ativadora. Concluiu-se que o aumento da quantidade de KOH na solução ativadora alcalina melhorou a trabalhabilidade das argamassas, enquanto que a eflorescência cresceu com o aumento da quantidade de NaOH. Assim, o uso de soluções mistas de NaOH + KOH mostrou que é possível aliar as propriedades de cada ativador, diminuindo a resistência mecânica com KOH, mas melhorando a trabalhabilidade e reduzindo a eflorescência com NaOH. A relação ativador/precursor

igual a 0,35 teve as melhores resistências mecânicas e a melhor dosagem foi NK 1:0,105:0,245:1:0,35 (precursor : ativador (1)/precursor : ativador (2)/precursor : agregado miúdo/precursor : água/sólidos), que obteve quase a totalidade da sua resistência mecânica aos 7 dias.

Nota-se que pesquisas envolvendo cimentos álcali-ativados e geopolímeros são ainda muito recentes e que não há ainda na literatura pesquisas utilizando unicamente cinza volante ativada por cal virgem.

Os resultados dos estudos da revisão são de grande importância para os cálculos de dosagem do ativador e precursor e para a interpretação de resultados, mesmo que se utilize diferentes materiais, já que estabelecem parâmetros e abordam conceitos químicos similares aos necessários no decorrer do presente trabalho.



### **3. MATERIAIS**

Os materiais utilizados na confecção das argamassas álcali-ativadas foram: cinza volante (precursor), cal virgem (ativador), areia e água.

#### **3.1. Precursor**

Como precursor do cimento álcali-ativado foi utilizada cinza volante fornecida pela empresa PozoFly. Segundo a norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 2012), define-se cinza volante como resíduo resultante da queima de carvão mineral pulverizado ou granulado. Atualmente a cinza volante é o resíduo industrial mais produzido no mundo, em torno de 500 milhões de toneladas anualmente. Essa grande produção advém da produção de energia elétrica principalmente de países como China, Índia, Estados Unidos, Rússia, Alemanha, África do Sul e Reino Unido (METHA e MONTEIRO, 2008).

A queima do carvão mineral origina dois resíduos diferentes: a cinza volante ou cinza leve e a cinza pesada ou cinza de grelha. A cinza volante recebe esse nome por ser coletada nos gases de exaustão da caldeira da termoelétrica; e a cinza pesada é coletada no piso da câmara de combustão. A diferença entre as duas é grande. A cinza volante possui granulometria mais fina e processo de resfriamento mais rápido, enquanto a cinza pesada possui granulometria próxima de uma areia grossa e resfriamento mais lento. Quimicamente, a cinza volante é mais interessante, por possuir composição mineralógica predominantemente vítrea, com 60 a 85% de sílica amorfa (reativa), enquanto a cinza pesada possui composição predominantemente cristalina, inviabilizando sua reatividade (ISAIA, 2007).

Como já dito, para que um material seja precursor de um cimento álcali-ativado é necessário que seja um material silicoso e/ou silicoaluminoso, para que a sílica e a alumina reajam com o ativador e formem os produtos aglomerantes esperados, característica compatível com a cinza volante.

#### **3.2. Ativador**

O ativador usado na pesquisa foi uma cal virgem fornecida pela empresa Carbomil. O óxido de cálcio (CaO), mais conhecido como cal virgem, é o produto

resultante da queima de rochas calcárias. Segundo Murta (2008), as principais características da cal virgem são: elevada pureza, baixa perda ao fogo e elevada reatividade.

### **3.3. Agregado miúdo**

A areia utilizada nas argamassas foi a Areia Normal Brasileira do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) nas frações granulométricas: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100) em proporções iguais.

### **3.4. Água**

A água utilizada foi proveniente da rede de distribuição da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ, tratada pela empresa Águas do Paraíba.

## 4. MÉTODOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O procedimento experimental se iniciou pela caracterização química dos materiais potencialmente reagentes (precursor e ativador alcalino), ensaio necessário para a posterior determinação da dosagem das argamassas. Foi feito também ensaio de densidade dos materiais para determinar a quantidade de argamassa que seria produzida para o volume correto dos corpos de prova a serem utilizados. Com essas informações, foram feitas oito dosagens diferentes, variando-se a relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2$ , e para a determinação da quantidade de água em cada dosagem foi realizado teste de consistência (*flow table test*). Após a dosagem definida, foram moldados os corpos de prova das argamassas seguindo quatro diferentes sequências de mistura dos materiais, a fim de determinar a sequência de mistura ótima mediante ensaio de resistência à compressão aos 14 dias.

Depois de determinadas as dosagens e a sequência de mistura ótima dos materiais, moldou-se então corpos de prova das oito dosagens para ensaio de resistência à compressão axial, aos 14 e 28 dias, com a finalidade de determinar a argamassa de melhor desempenho mecânico (dosagem ótima). Após esses ensaios e determinação da dosagem ótima, fez-se um acompanhamento da resistência mecânica ao longo dos dias de cura dessa argamassa por meio de ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral (*Brazilian test*) nas idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Em seguida, realizou-se a avaliação da viabilidade técnica e classificação dessa argamassa por meio dos ensaios prescritos pela NBR 13281 (ABNT, 2005). Por fim, foram utilizadas técnicas analíticas como MEV, DRX, TG/DTG e porosimetria por intrusão de mercúrio em todas as oito argamassas, a fim de encontrar diferenças morfológicas, químicas e físicas que justificassem as diferenças no comportamento mecânico das argamassas.

A sequência de ensaios e procedimentos citados, bem como seus resultados serão mostrados detalhadamente ao longo dos itens deste capítulo.

### 4.1. Caracterização química do precursor e do ativador

O primeiro procedimento do programa experimental foi a determinação da constituição química das matérias-primas, determinando as quantidades de  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$  presentes, respectivamente, no ativador e no precursor. Tal determinação foi

necessária visto que a dosagem das argamassas, descrita no item 4.3, depende diretamente das quantidades desses compostos no precursor e no ativador alcalino. A caracterização química da cinza volante e da cal virgem foi feita por meio de fluorescência de raios X no equipamento da marca Shimadzu, modelo EDX-700, do Laboratório de Engenharia Civil da UENF (LECIV). As Tabela 2 e 3 mostram os resultados dos ensaios.

Tabela 2: Resultados da fluorescência de raios X para a cinza volante.

<b>Óxido</b>	<b>Porcentagem</b>
SiO <sub>2</sub>	56,156
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,310
K <sub>2</sub> O	4,981
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,073
CaO	2,308
SO <sub>3</sub>	1,712
TiO <sub>2</sub>	1,261
ZrO <sub>2</sub>	0,047
MnO	0,047
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,043
ZnO	0,035
SrO	0,014
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,012

Tabela 3: Resultados da fluorescência de raios X para a cal virgem.

<b>Óxido</b>	<b>Porcentagem</b>
CaO	98,671
SiO <sub>2</sub>	1,030
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,145
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,044
Au <sub>2</sub> O	0,044
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,041
SrO	0,025

## 4.2. Densidade

A densidade aparente seca mínima (índice de vazios máximo) e a máxima (índice de vazios mínimo) foram determinadas de acordo com as respectivas normas, MB-3388 (ABNT, 1991) e MB-3324 (ABNT, 1990).

## 4.3. Dosagem

A dosagem das argamassas foi feita variando-se a relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2$  de 0,25 a 2,0 a cada 0,25. Ressalta-se que a dosagem levou em conta a quantidade total de  $\text{SiO}_2$  do precursor e a quantidade total de  $\text{CaO}$  do ativador, determinada pela fluorescência de raios X citada no item 4.1.

A relação sólidos:areia foi fixada em 1:3. Por sólidos deve-se entender a soma do ativador com o precursor. Com as quantidades de sólidos e de areia definidas, foram feitos ensaios *flow table*, visando atingir a consistência padrão das argamassas, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016), para então definir a quantidade de água de cada dosagem. A sequência de mistura dos materiais constituintes da argamassa seguiu o procedimento estabelecido na referida norma para argamassa à base de cimento e cal virgem, substituindo-se o cimento Portland pela cinza volante.

Os resultados dos ensaios de *flow table* e as respectivas dosagens são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Dosagem das argamassas e respectivas quantidades de água definidas por *flow table*.

$\text{CaO/SiO}_2$	Cinza Volante CV (g)	Areia A (g)	Cal Virgem CVI (g)	Água (g)	Proporções (CV : A : CVI : água/sólidos)
0,25	278,6	835,7	33,4	195,0	1 : 3 : 0,12 : 0,70
0,50	273,7	821,1	71,2	210,0	1 : 3 : 0,26 : 0,77
0,75	268,8	806,5	108,9	235,0	1 : 3 : 0,41 : 0,87
1,00	265,1	795,3	145,8	305,0	1 : 3 : 0,55 : 1,15

1,25	260,4	781,2	182,3	365,0	1 : 3 : 0,70 : 1,40
1,50	256,0	767,9	216,3	425,0	1 : 3 : 0,85 : 1,66
1,75	251,7	755,1	249,2	495,0	1 : 3 : 0,99 : 1,97
2,00	247,4	742,3	282,1	560,0	1 : 3 : 1,14 : 2,26

#### 4.4. Sequência de mistura

Por ser um material inédito, a ordem de mistura dessa argamassa não é normatizada. Por isso, a fim de determinar a ordem ótima de mistura dos materiais constituintes, foram moldadas argamassas seguindo diferentes sequências de mistura. A argamassadeira utilizada foi da marca Solotest, apresentada na Figura 4. A dosagem escolhida para o teste de mistura foi a de relação mássica CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 0,75, por ter sido a dosagem ótima encontrada por Murta (2008) quando produziu argamassas à base de metacaulim álcali-ativado com cal virgem.



Figura 4: Argamassadeira utilizada para a produção das argamassas.

##### 4.4.1. Sequência de mistura 1

- I. Na argamassadeira, misturou-se a cinza volante, a cal virgem e a areia até que fosse obtido um material homogêneo;
- II. adicionou-se a água e foi feita a mistura durante 4 minutos na velocidade 1.

#### **4.4.2. Sequência de mistura 2**

- I. Na argamassadeira, misturou-se a cal virgem com a água durante 4 minutos na velocidade 1;
- II. acrescentou-se a cinza volante e misturou-se por mais 4 minutos;
- III. por fim acrescentou-se a areia.

Devido à alta temperatura atingida pela mistura da água com a cal (reação da extinção da cal virgem – altamente exotérmica), houve elevada evaporação de água antes que os outros constituintes da argamassa fossem adicionados. Por isso, essa ordem de mistura resultou numa argamassa cuja trabalhabilidade foi muito inferior à atingida no teste *flow table* (item 4.3), impossibilitando a moldagem de corpos de prova. Foi, portanto, descartada esta sequência de mistura.

#### **4.4.3. Sequência de mistura 3**

- I. Na argamassadeira, misturou-se a cinza volante e a cal virgem na velocidade 1 até que fosse atingido um material homogêneo;
- II. adicionou-se a água e misturou-se por 4 minutos;
- III. por fim acrescentou-se a areia e misturou-se por mais 4 minutos na mesma velocidade.

#### **4.4.4. Sequência de mistura 4**

- I. Na argamassadeira, misturou-se a areia, a cal virgem e a água durante 4 minutos na velocidade 1;
- II. por fim acrescentou-se a cinza volante e misturou-se por mais 4 minutos na mesma velocidade.

Para cada sequência de mistura foram moldados 3 corpos de prova em fôrmas cilíndricas, de diâmetro igual a 50 mm e altura igual a 100 mm – com exceção da sequência de mistura 2. Os mesmos foram curados por 14 dias em temperatura ambiente de laboratório e passaram pelo ensaio de compressão. A resistência média

das argamassas de cada sequência de mistura e os respectivos desvios-padrão foram:

- sequência de mistura 1

$$f_{ck} = 10,7 \text{ MPa e desvio-padrão} = 0,31 \text{ MPa};$$

- sequência de mistura 3

$$f_{ck} = 10,7 \text{ MPa e desvio-padrão} = 0,18 \text{ MPa};$$

- sequência de mistura 4

$$f_{ck} = 12,9 \text{ MPa e desvio-padrão} = 0,21 \text{ MPa}.$$

A sequência de mistura ótima foi a 4. A partir deste resultado, todas as argamassas moldadas ao longo do programa experimental seguiram essa sequência de mistura.

#### **4.5. Determinação da dosagem ótima**

Com a finalidade de determinar a dosagem ótima em relação ao comportamento mecânico, foi realizado ensaio de compressão, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando a prensa da marca Instron, modelo 5582 do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF. As oito dosagens foram ensaiadas nas idades de 14 e 28 dias.

As argamassas foram preparadas utilizando a argamassadeira já apresentada na Figura 4 e moldadas em fôrmas cilíndricas de diâmetro igual a 50 mm e altura igual a 100 mm, como mostra a Figura 5 - dimensões de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). As mesmas foram curadas em temperatura ambiente de laboratório e a desmoldagem foi feita após 48 horas.

Para a realização do ensaio de compressão, de maneira que fosse assegurada que a distribuição de carga na área de contato com os pratos da prensa fosse satisfatória, foram utilizados pratos metálicos com revestimento elastomérico confinado (Figura 6). Este método de tratamento superficial em corpos de prova é regulamentado pela ASTM C 1231 (2000). A Figura 7 mostra o corpo de prova posicionado na prensa para o ensaio de compressão.





Figura 5: Corpo de prova na fôrma cilíndrica (diâmetro = 50 mm e altura = 100 mm).



Figura 6: Pratos metálicos com revestimento elastomérico utilizados nas extremidades dos corpos de prova cilíndricos.



Figura 7: Corpo de prova cilíndrico posicionado na prensa.

A resistência à compressão axial foi calculada por meio da seguinte equação:

$$R_c = \frac{F}{\pi \times r^2} \quad (1)$$

onde,

$R_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F$  é a força aplicada pela prensa, em N;

$r$  é o raio do corpo de prova, em mm.

Os resultados dos ensaios de compressão axial, mostrados na Figura 8, indicam que a dosagem ótima, ou seja, a de melhor desempenho mecânico, foi a argamassa de relação mássica CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 0,75, que atingiu 15,5 e 17,9 MPa, respectivamente, aos 14 e 28 dias. Essa relação ótima está de acordo com a literatura, sendo a mesma relação encontrada por Murta (2008), que atingiu resistência à compressão de 19,5 MPa aos 28 dias para argamassa à base de metacaulim alcali-ativado com cal virgem.

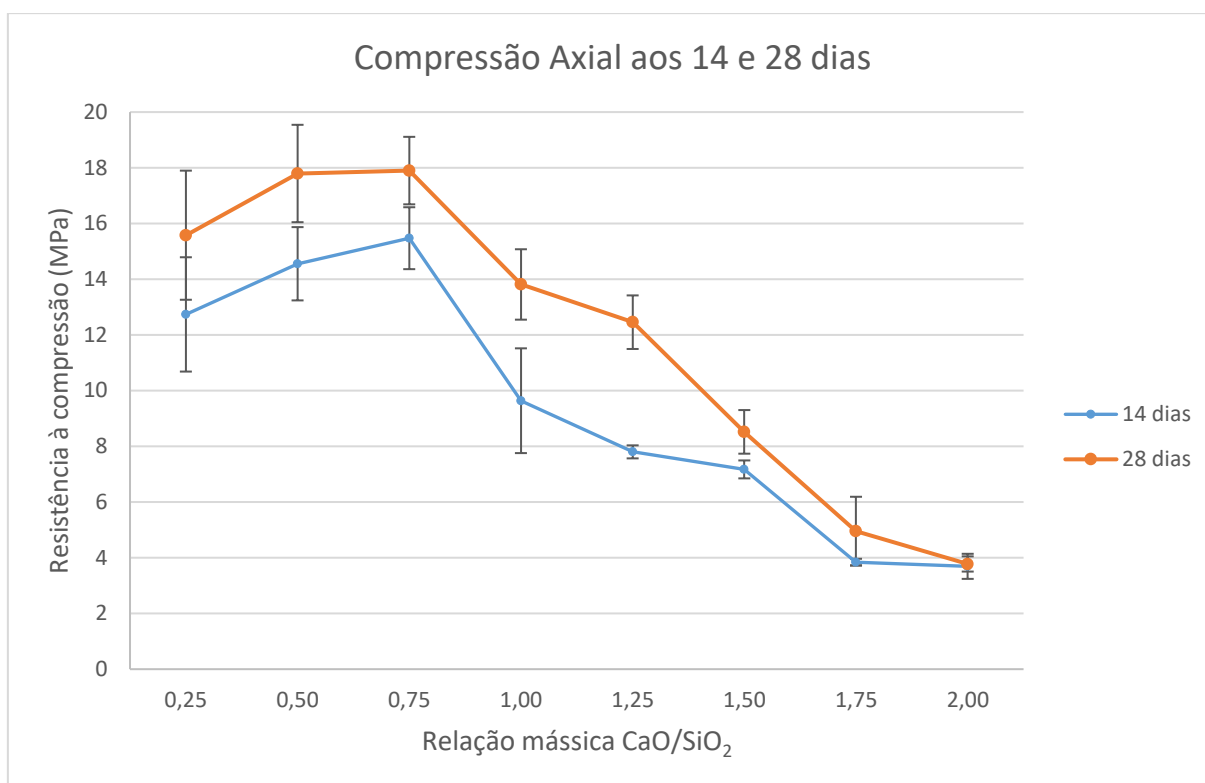


Figura 8: Resultados do ensaio de compressão das argamassas aos 14 e 28 dias.

#### 4.5.1. Ganho de resistência mecânica ao longo do tempo

De posse da dosagem de maior resistência mecânica, um detalhamento do ganho de resistência ao longo dos dias fez-se necessário. Para isso, foram realizados ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral (*Brazilian test*) em corpos de prova cilíndricos (Figura 5) nas idades de 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 60 dias.

A resistência à compressão foi determinada pela Equação 1. A resistência à tração por compressão diametral foi determinada a partir da seguinte equação:

$$R_t = \frac{F}{\pi \times r \times h} \quad (2)$$

onde,

$R_t$  é a resistência à tração, em MPa;

$F$  é a força aplicada pela prensa, em N;

$r$  é o raio da base do corpo de prova, em mm;

$h$  é a altura do corpo de prova, em mm.

O aumento da resistência mecânica ao longo dos dias é mostrado na Figura 9:

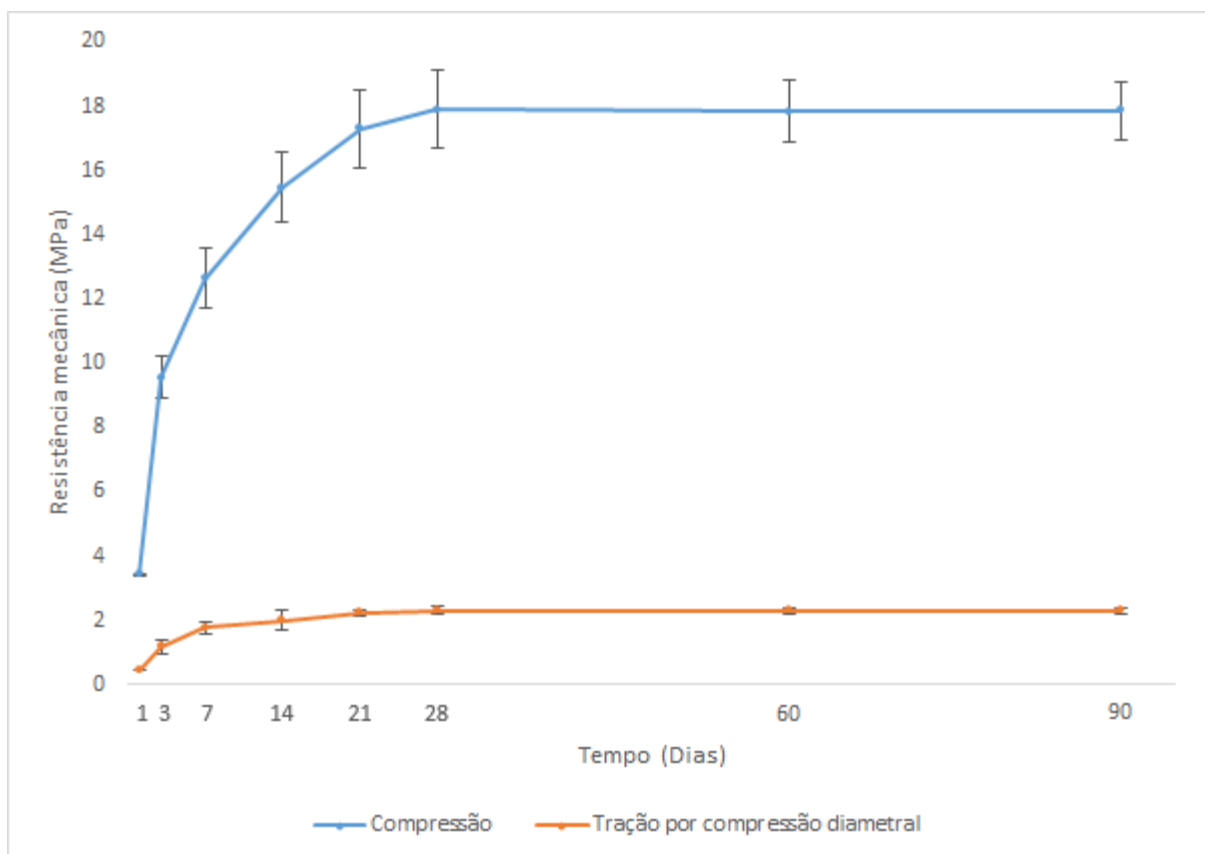


Figura 9: Ganho de resistência mecânica da argamassa ao longo dos dias.

Nota-se um rápido aumento de resistência à compressão nos primeiros 3 dias, atingindo 53,4% da resistência aos 28 dias, seguido por um aumento uniforme até os 21 dias, quando se atinge 96,7% da resistência aos 28 dias. Do dia 21 ao 28 é o período em que se observa menor aumento de resistência. A ausência de ganho de resistência até os 90 dias indica que a resistência máxima é obtida por volta dos 28 dias.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, há aumento significativo de resistência nos primeiros 14 dias, seguido de pequeno aumento até os 28 dias. Assim como ocorreu na resistência à compressão, as resistências aos 60 e 90 dias foram praticamente as mesmas que aos 28, indicando que a máxima resistência é obtida por volta dos 28 dias.

#### 4.6. Avaliação da viabilidade tecnológica da argamassa de maior resistência à compressão

Para que uma possível viabilidade comercial fosse atingida com este estudo, a argamassa de melhor desempenho mecânico, a de relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ , passou pelos ensaios prescritos na NBR 13281 (ABNT, 2005), que avaliam a viabilidade tecnológica e classificam as argamassas utilizadas no assentamento e revestimento de paredes e tetos.

#### **4.6.1. Determinação da densidade de massa no estado fresco**

O ensaio para determinação da densidade de massa no estado fresco é normatizado pela NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio utilizou-se um recipiente metálico da marca Solotest de volume igual a  $400 \text{ cm}^3$ . Confirmou-se o volume do recipiente por meio da seguinte equação:

$$V_r = \frac{M_t - M_r}{\rho_a} \quad (3)$$

onde,

$V_r$  é o volume do recipiente, em  $\text{cm}^3$ ;

$M_t$  é a massa do recipiente totalmente cheio de água, em g;

$M_r$  é a massa do recipiente vazio, em g;

$\rho_a$  é a densidade da água destilada, igual a  $1,0 \text{ g/cm}^3$ .



Figura 10: Recipiente para determinação da densidade de massa no estado fresco.

Depois de confirmado o volume do recipiente ( $400 \text{ cm}^3$ ), a argamassa fresca foi adicionada ao mesmo em 3 camadas de altura aproximadamente iguais, aplicando-

se 20 golpes, com a espátula na posição vertical, em cada camada. Efetuou-se 3 golpes na mesa de adensamento (*flow table*), rasou-se o recipiente com régua metálica e aferiu-se a massa do conjunto. A densidade de massa no estado fresco foi então calculada por meio da equação a seguir:

$$d = \frac{M_c - M_r}{V_r} \times 1000 \quad (4)$$

onde,

$d$  é a densidade de massa no estado fresco, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$M_c$  é a massa do recipiente com a argamassa, em g;

$M_r$  é a massa do recipiente vazio, em g;

$V_r$  é o volume do recipiente, em  $\text{cm}^3$ .

O resultado e a classificação das argamassas, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado e classificação da densidade de massa aparente no estado fresco, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

<b>A (<math>\text{kg/m}^3</math>) obtida</b>	<b>CLASSE</b>	<b>A (<math>\text{kg/m}^3</math>) NBR 13281 (ABNT, 2005)</b>
2076	D1	$\leq 1400$
	D2	1200 a 1600
	D3	1400 a 1800
	D4	1600 a 2000
	D5	1800 a 2200
	D6	$> 2000$

De acordo com a Tabela 5, a argamassa ensaiada se enquadra na classificação D6. Tal classificação caracteriza uma argamassa de elevada densidade de massa no estado fresco, o que indica um adequado empacotamento dos grãos (ALVES, 2018). Essa característica é muito positiva no que tange à resistência mecânica, visto que um adequado empacotamento dos grãos leva a um baixo índice de vazios.

Esse resultado é superior ao encontrado por Murta (2008), o qual foi  $1910 \text{ kg/m}^3$  para argamassa de metacaulim álcali-ativado com cal virgem com relação mássica

$\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . Isso indica que a cinza volante resulta em melhor resultado de densidade de massa comparado ao metacaulim.

#### **4.6.2. Determinação da retenção de água**

O ensaio de determinação da retenção de água é normatizado pela NBR 13277 (ABNT, 2005). O mesmo é realizado com a argamassa em seu estado fresco e resume-se em aferir a quantidade de água subtraída da argamassa, contida em um funil de filtragem, ao ser submetida à sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo à baixa pressão.

Para a realização do ensaio foi utilizado um funil de Buchner modificado, acoplado a uma bomba de vácuo, como mostra a Figura 11. O prato que compõe o equipamento possui 20 mm de espessura, simulando a espessura de revestimentos em argamassa para paredes e tetos.

A execução do ensaio foi iniciada com a colocação do prato do equipamento sobre o funil e sobre este um disco de papel filtro umedecido com água. A bomba de vácuo foi acionada por 90 segundos, a fim de retirar-se o excesso de água no papel filtro. Foi então aferida a massa do conjunto prato e papel filtro. Em seguida, preencheu-se o prato com a argamassa fresca, e para adensá-la foram aplicados, com um soquete padrão, 16 golpes ao longo do perímetro e 21 golpes na parte central da amostra, totalizando 37 golpes. O prato foi rasado com uma régua metálica e aferiu-se a massa do conjunto prato, papel filtro e argamassa. Acionou-se a bomba de vácuo com pressão de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e, por fim, aferiu-se novamente a massa do conjunto prato, papel filtro e argamassa.



Figura 11: Funil de Buchner modificado acoplado à bomba de vácuo durante ensaio para determinação da retenção de água.

O cálculo da retenção de água foi feito por meio das seguintes Equações:

$$R_a = \left[ 1 - \frac{m_0 - m_{15}}{AF(m_0 - m_v)} \right] \times 100 \quad (5)$$

$$AF = \frac{m_a}{m + m_a} \quad (6)$$

onde,

$R_a$  é a retenção de água, em %;

$m_0$  é a massa inicial do conjunto prato, papel filtro e argamassa, em g;

$m_{15}$  é a massa do conjunto prato, papel filtro e argamassa após a sucção, em g;

$m_v$  é a massa do conjunto prato e papel filtro, em g;

$AF$  é a relação água/argamassa fresca;

$m_a$  é a massa de água da argamassa, em g;

$m$  é a soma das massas dos componentes anidros da argamassa, em g.

A Tabela 6 mostra o resultado do ensaio de retenção de água, bem como a classificação da argamassa segundo a norma.



Tabela 6: Resultado e Classificação da retenção de água, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

R <sub>a</sub> (%) obtida	CLASSE	R <sub>a</sub> (%) NBR 13281 (ABNT, 2005)
97	U1	≤ 78
	U2	72 a 85
	U3	80 a 90
	U4	86 a 94
	U5	86 a 94
	U6	95 a 100

De acordo com a Tabela 6, a argamassa ensaiada se enquadra na classe U6, indicando elevada retenção de água, característica que favorece o uso da argamassa. Quando uma argamassa tem baixa retenção, a perda de água para o substrato pode ser muito rápida, prejudicando sua utilização. Um bom exemplo é no assentamento de blocos, em que a argamassa pode ressecar caso perca água muito rapidamente e, com isso, a adequada disposição dos blocos das próximas fiadas pode ser comprometida, prejudicando o nivelamento e o prumo da parede. Além disso, baixa retenção de água pela argamassa, ou seja, rápida dessecação, reduz a trabalhabilidade, dificultando a aplicação e regularização da argamassa (ALVES, 2018).

Murta (2008), com sua argamassa à base de metacaulim álcali-ativado com cal virgem com relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  obteve um valor de retenção de água de 95%, resultado ligeiramente menor que o do presente estudo, mas que ainda se enquadra na classe mais alta, U6. Esses resultados indicam que a presença da cal virgem como ativador favorece a retenção de água pela argamassa.

#### **4.6.3. Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**

O ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido é prescrito pela NBR 13280 (ABNT, 2005). Foram fabricados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm (altura, largura, comprimento), conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Os mesmos são mostrados na

Figura 12. Foram aferidos com um paquímetro a altura (h), a largura (l) e o comprimento (c), e com uma balança a massa (m) dos corpos de prova. A densidade de massa aparente no estado endurecido foi então calculada por meio da equação a seguir:

$$\rho_{ap} = 1000 \times \frac{m}{h \times l \times c} \quad (7)$$

onde,

$\rho_{ap}$  é a densidade de massa aparente no estado endurecido de cada corpo de prova, em kg/m<sup>3</sup>;

m é a massa de cada corpo de prova, em g;

$h \times l \times c$  corresponde ao volume de cada corpo de prova, em cm<sup>3</sup>.

A densidade de massa aparente média foi calculada a partir da média das densidades de massa aparente de cada corpo de prova.



Figura 12: Corpos de prova prismáticos de dimensões 40 mm × 40 mm × 160 mm.

A Tabela 7 mostra o resultado do ensaio e a classificação das argamassas de acordo com a densidade de massa aparente, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 7: Resultado e classificação da densidade de massa aparente no estado endurecido, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> ) obtido	CLASSE	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> ) NBR 13281 (ABNT,
2012	M1	≤ 1200
	M2	1000 a 1400
	M3	1200 a 1600
	M4	1400 a 1800
	M5	1600 a 2000
	M6	> 1800

De acordo com a Tabela 7, a argamassa ensaiada se enquadra na classe M6, de alta densidade de massa aparente no estado endurecido. Rangel (2017) obteve duas argamassas também de alta densidade no estado endurecido, ambas à base de metacaulim, uma álcali-ativada por NaOH, de classe M6, e outra álcali-ativada por KOH, de classe M5.

Ressalta-se que a diferença entre a densidade de massa no estado fresco e no estado endurecido se dá principalmente pela evaporação de parte da água na secagem da peça durante a cura. A redução da densidade de massa no estado endurecido em relação à densidade no estado fresco para a argamassa ensaiada foi de 3,1%. De acordo com Costa (2016), argamassas à base de cimento Portland curadas à temperatura ambiente têm redução variando de 3 a 11%. Portanto, a argamassa ensaiada apresentou baixa redução da densidade de massa no estado endurecido em relação à densidade no estado fresco, porém dentro dos limites de argamassas convencionais.

#### **4.6.4. Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**

O ensaio de absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade são prescritos pela NBR 15259 (ABNT, 2005). Foram fabricados três corpos de prova

prismáticos com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm (altura, largura, comprimento), conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Os corpos de prova foram lixados com lixa grossa e limpos com pincel. Em seguida, a massa inicial ( $m_0$ ) de cada corpo de prova foi determinada. Os corpos de prova foram colocados em um recipiente com uma das faces quadradas voltada para baixo; adicionou-se água ao recipiente até o nível de  $5 \pm 1$  mm acima da face em contato com a água; tomou-se o cuidado de, ao se adicionar a água ao recipiente, nenhuma outra face dos corpos de prova fosse molhada. A Figura 13 mostra a configuração do ensaio. O nível de água foi mantido constante durante o ensaio. Determinou-se a massa de cada corpo de prova aos 10 minutos ( $m_{10}$ ) e aos 90 minutos ( $m_{90}$ ). Cada corpo de prova foi previamente seco com pano úmido antes de cada pesagem.

A determinação da absorção de água por capilaridade foi determinada a partir da seguinte equação:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (8)$$

onde,

$A_t$  é a absorção de água por capilaridade no tempo  $t$ , em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ;

$m_0$  é a massa inicial de cada corpo de prova, em g;

$m_t$  é a massa de cada corpo de prova aferida no tempo  $t$ , em g;

16 é a área da face do corpo de prova em contato com a água, em  $\text{cm}^2$ .



Figura 13: Corpos de prova durante ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

O coeficiente de capilaridade ( $C$ ), de acordo com a NBR 13259 (ABNT, 2005), é, por aproximação, igual ao valor médio das diferenças de massa de cada corpo de prova aos 10 e aos 90 min. Então, a partir da Equação 9 foi calculado o coeficiente de capilaridade.

$$C_n = m_{90} - m_{10} \quad (9)$$

onde,

$C_n$  é o coeficiente de capilaridade do corpo de prova  $n$ , em  $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ;

$m_{90}$  é a massa de cada corpo de prova aferida aos 90 minutos de ensaio, em g;

$m_{10}$  é a massa de cada corpo de prova aferida aos 10 minutos de ensaio, em g.

O coeficiente de capilaridade médio foi calculado a partir da média simples dos coeficientes de capilaridade de cada corpo de prova.

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos nos ensaios de absorção por capilaridade e a classificação das argamassas de acordo com esses parâmetros, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 8: Classificação e resultado do coeficiente de capilaridade e resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.

<b>A<sub>t</sub> (g/cm<sup>2</sup>) obtido</b>	<b>C (g/dm<sup>2</sup>·min<sup>1/2</sup>) obtido</b>	<b>CLASSE</b>	<b>C (g/dm<sup>2</sup>·min<sup>1/2</sup>) NBR 13281 (ABNT, 2005)</b>
A10 = 0,08 A90 = 0,46	6,1	C1	≤ 1,5
		C2	1,0 a 2,5
		C3	2,0 a 4,0
		C4	3,0 a 7,0
		C5	5,0 a 12,0
		C6	> 10,0

Segundo Marvila *et al.* (2017) a absorção por capilaridade é um dos principais mecanismos de transporte e entrada de agentes agressivos nos poros das argamassas e, por isso, apresenta grande importância para a durabilidade das mesmas. Esse ensaio é utilizado como forma de estimar a maior ou menor suscetibilidade de novos materiais frente à degradação. Assim, de acordo com a classificação mostrada na Tabela 8, a argamassa ensaiada é da Classe C4, resultado similar ao encontrado por Rangel (2017) com uma argamassa à base de metacaulim álcali-ativado por KOH. Essa classificação indica uma argamassa de média permeabilidade, característica razoável para argamassas de revestimento.

#### **4.6.5. Determinação da resistência potencial de aderência à tração**

O ensaio de determinação da resistência potencial à tração é normatizado pela NBR 15258 (ABNT, 2005). Tal ensaio objetiva determinar a tensão suportada pelo revestimento, simulado por pastilhas metálicas, quando submetido a um esforço perpendicular de tração com taxa de carregamento constante. Além disso, a norma estabelece parâmetros para avaliar o tipo de ruptura do corpo de prova.

Para a realização do ensaio foi confeccionado um substrato padrão atendendo aos requisitos da NBR 14082 (ABNT, 2004). Primeiro, um substrato de concreto foi colocado na posição horizontal sobre uma base plana e firme. Foi passado um pincel

seco para que fosse retirado qualquer resquício de pó do substrato, de modo que a aderência da argamassa ao concreto não fosse comprometida. Utilizou-se um gabarito de madeira com profundidade de  $18 \pm 2$  mm para auxiliar no assentamento da argamassa. Adicionou-se então a argamassa sobre toda a superfície do substrato pressionando-a para reduzir os vazios entre a argamassa e o concreto de substrato. Por fim, rasou-se a superfície com régua metálica. O substrato-padrão é apresentado na Figura 14. O conjunto permaneceu na posição horizontal e em condições ambientais de laboratório até o ensaio.



Figura 14: Base de argamassa sobre substrato de concreto para ensaio de aderência à tração.

Aos 24 dias, com serra-copo diamantada de 50 mm de diâmetro, foram feitos 10 cortes de 1 mm de profundidade na argamassa e dentro das delimitações dos cortes foram coladas 10 pastilhas metálicas de 50 mm de diâmetro com resina epóxi. A Figura 15 mostra as pastilhas coladas na argamassa.



Figura 15: Pastilhas coladas sobre a base de argamassa para ensaio de aderência à tração.



Aos 28 dias o ensaio foi realizado utilizando-se um equipamento da marca Solotest, que aplicou um esforço perpendicular de tração (Figura 16).



Figura 16: Ensaio de aderência à tração.

O cálculo de resistência potencial à tração foi feito por meio da seguinte equação:

$$R = \frac{P}{A} \quad (10)$$

onde,

R é a resistência potencial à tração, em MPa;

P é a carga de ruptura, em N;

A é a área da pastilha metálica, em mm<sup>2</sup>.

O resultado do ensaio de resistência potencial à tração é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Classificação e resultado da resistência potencial à tração.

<b>R<sub>i</sub> (MPa) obtida</b>	<b>CLASSE</b>	<b>R<sub>i</sub> (MPa) NBR 13281 (ABNT, 2005)</b>
0,29	A1	< 0,20
	A2	≥ 0,20
	A3	≥ 0,30



Segundo Rangel (2017), dentre todos os parâmetros avaliados nas prescrições da NBR 13281 (ABNT, 2005), a resistência potencial à tração é o mais relacionado à aplicação de argamassas para revestimento, sendo uma medida direta da capacidade de uma argamassa permanecer aderida a um substrato sob a ação de um esforço de tração. De acordo com a Tabela 9, a argamassa obteve classificação A2, intermediária. A argamassa à base de metacaulim álcali-ativado com KOH de Rangel (2017) também obteve a classificação A2. Assim como no estudo de Rangel (2017), todos os corpos de prova romperam na argamassa e não no substrato, demonstrando boa aderência da argamassa ao substrato de concreto, característica importante para assentamento de revestimentos. Com isso, observa-se que a argamassa pode ser utilizada para esse fim.

#### **4.6.6. Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**

Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão são normatizados pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

Foram confeccionados 3 corpos de prova prismáticos para cada idade, com dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm, conforme a referida norma. Os ensaios foram realizados com os corpos de prova aos 28 dias utilizando uma prensa da marca Instron, modelo 5582 do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF.

##### 4.6.6.1. Tração na flexão

Para o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão, o corpo de prova foi posicionado no dispositivo de apoio, como mostra a Figura 17, e então aplicou-se uma velocidade de carregamento de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura (Figura 18).



Figura 17: Corpo de prova no início do ensaio de determinação de resistência à tração na flexão.



Figura 18: Corpo de prova após a ruptura no ensaio de determinação de resistência à tração na flexão.

Com os resultados da carga de ruptura de cada um dos três corpos de prova, utilizou-se a Equação 11 para determinar a resistência à tração na flexão.

$$R_f = \frac{1,5 \times F \times L}{40^3} \quad (11)$$

onde,

$R_f$  é a resistência à tração do corpo de prova, em MPa;

$F$  é a força aplicada pelo equipamento, em N;

L é a distância ente os apoios, em mm.

O resultado de resistência à tração na flexão é mostrado na Tabela 10.

#### 4.6.6.2. Compressão

Para a determinação da resistência à compressão foram utilizadas as metades dos corpos de prova do ensaio de flexão. Portanto, seis corpos de prova. O corpo de prova com dimensões de 80 mm (aproximadamente) × 40 mm × 40 mm (altura, largura e comprimento) foi posicionado entre dois suportes metálicos, como mostra a Figura 19, e então aplicou-se uma velocidade de carregamento de  $500 \pm 50$  N/s até a ruptura (Figura 20).



Figura 19: Corpo de prova no início do ensaio de compressão.

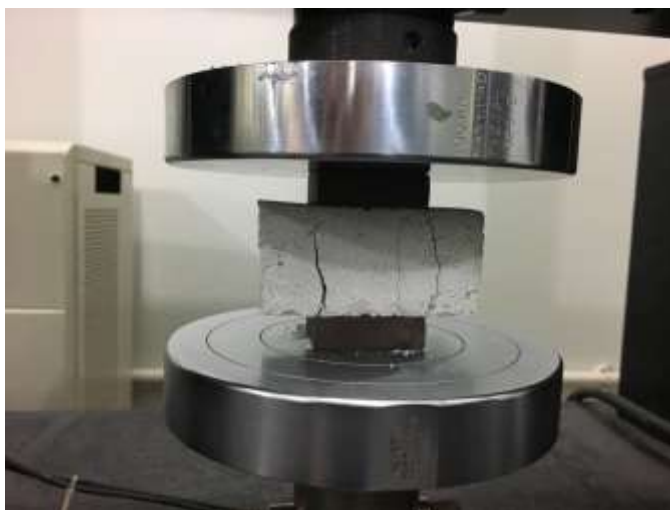


Figura 20: Corpo de prova após a ruptura no ensaio de compressão.

Com os resultados da carga de ruptura de cada um dos três corpos de prova, utilizou-se a Equação 12 para determinar a resistência à compressão.

$$R_c = \frac{F}{1600} \quad (12)$$

onde,

$R_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F$  é a força aplicada pelo equipamento, em N;

1600 é a área da seção quadrada considerada no dispositivo de carga (40 mm x 40 mm), em mm<sup>2</sup>.

Os resultados de resistência à tração na flexão e à compressão são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultado e classificação das argamassas em função da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, segundo a NBR 13281 (ABNT,2005).

TRAÇÃO NA FLEXÃO			COMPRESSÃO		
$R_f$ (MPa)	CLASSE	$R_f$ (MPa) NBR 13281	$R_c$ (MPa)	CLASSE	$R_c$ (MPa) NBR 13281
3,5	R1	≤ 1,5	16,8	P1	≤ 2,0
	R2	1,0 a 2,0		P2	1,5 a 3,0
	R3	1,5 a 2,7		P3	2,5 a 4,5
	R4	2,0 a 3,5		P4	4,0 a 6,5

	R5	2,7 a 4,5		P5	5,5 a 9,0
	R6	> 3,5		P6	> 8,0

De acordo com a Tabela 10, a argamassa ensaiada é classificada como R5 e P6, para resistências à tração na flexão e compressão, respectivamente. A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas, porém não associa os valores de resistência a argamassas para fins específicos. De acordo com Alves (2018), para argamassas de revestimento de paredes e tetos a resistência à compressão ou à tração não são características determinantes. Já a trabalhabilidade e a aderência são parâmetros mais importantes. Entretanto, no caso de assentamento de blocos, principalmente em alvenaria estrutural, há a necessidade, segundo Ramalho e Corrêa (2003), da resistência à compressão da argamassa não ser menor do que 30% da resistência dos blocos, de modo a não comprometer a resistência final do sistema construtivo. Portanto, a argamassa ensaiada seria bem empregada em assentamento de blocos estruturais da classe A, cuja resistência mínima é de 8,0 MPa (NBR 6136 – ABNT, 2016). Logo, é possível utilizar a argamassa álcali-ativada do presente estudo para assentamentos de blocos estruturais de até 56 MPa, quando a resistência da argamassa corresponde a 30% da resistência do bloco.

Murta (2008) obteve 19,5 MPa aos 28 dias para argamassa à base de metacaulim álcali-ativado com cal virgem com relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2$  também igual a 0,75, indicando que o uso de metacaulim como precursor resulta em maior resistência à compressão. Tanto a argamassa de Murta (2008) quanto a do presente estudo superam significativamente a exigência da norma.

Em relação à resistência à tração, o resultado obtido nesse estudo foi de 3,5 MPa, correspondente a 20,7% do valor de resistência à compressão, enquanto que no estudo de Murta essa relação foi de 11,2%. Segundo Rangel (2017), para argamassas de cimento Portland, essa relação é em torno de 10%. Nota-se que a argamassa de cinza volante álcali-ativada com cal virgem atingiu mais que o dobro desse valor, resultado bem maior inclusive que o de Murta (2008), indicando que o uso da cinza volante como precursor resulta em elevada resistência à tração.

#### 4.6.7. Comparação com argamassas comerciais

A Tabela 11 mostra a comparação da argamassa do presente estudo com algumas argamassas da marca Votorantim comercializadas para diversos fins.

Tabela 11: Comparação da classificação entre argamassas comerciais da linha Votomassa e a argamassa à base de cinza volante álcali-ativada com cal virgem.

Requisito/argamassa	Votomassa Assentamento de vedação e encunhamento	Votomassa Múltiplo-uso	Votomassa Assentamento estrutural 5,0 MPa	Votomassa Assentamento estrutural 7,0 MPa	CaO/SiO <sub>2</sub> = 0,75
Densidade de massa aparente no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	D4 (1600 a 2000)	D4 (1600 a 2000)	D5 (1880 a 2100)	D5 (1880 a 2100)	D6 (2076)
Retenção de água (%)	U3 (80 a 90)	U3 (80 a 90)	U2 (82 a 88)	U2 (73 a 84)	U6 (97)
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	M4 (1400 a 1800)	M4 (1400 a 1800)	M5 (1650 a 1950)	M5 (1650 a 1950)	M6 (2012)
Coefficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	C5 (5,0 a 12,0)	C5 (5,0 a 12,0)	C5 (6,0 a 11,0)	C4 (4,0 a 6,0)	C4 (6,1)
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	-	A3 ≥ 0,30	-	-	A2 (0,29)
Resistência à tração na flexão (MPa)	R2 (1,0 a 2,0)	R3 (1,5 a 2,7)	R3 (1,7 a 2,5)	R5 (2,9 a 4,3)	R5 (3,5)
Resistência à compressão (MPa)	P3 (2,5 a 4,5)	P4 (4,0 a 6,5)	P4 (5,0 a 6,0)	P6 (10,0 a 12,0)	P6 (16,8)

Nota-se que a argamassa à base de cinza volante álcali-ativada com cal virgem atingiu resultados satisfatórios e, em relação a alguns parâmetros, até superiores às argamassas comerciais apresentadas. A argamassa estudada se assemelha mais com a argamassa para assentamento estrutural 7,0 MPa; ainda assim ultrapassando-

a significativamente em relação à resistência à compressão. Seria possível abdicar de parte dessa resistência alterando-se a relação  $\text{CaO/SiO}_2$  ou aumentando-se a quantidade de agregado miúdo da argamassa, tendo por base os resultados de resistência à compressão do estudo das dosagens desse trabalho. Nesse caso, todos os ensaios requisitados pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005) teriam que ser feitos para a dosagem em questão, visto que a única dosagem que passou pelos ensaios foi a de relação  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  e relação agregado miúdo/sólidos (cinza volante + cal virgem) igual a 3:1.

#### **4.7. Caracterização das argamassas**

A fim de justificar a diferença de resistência obtida nos ensaios mecânicos, as 8 argamassas foram submetidas às seguintes técnicas analíticas: microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X, termogravimetria e porosimetria por intrusão de mercúrio.

##### ***4.7.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS)***

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica analítica que possibilita o estudo morfológico das argamassas, por imagem. Já a espectroscopia por energia dispersiva permite definir quimicamente qual composto está sendo observado na imagem. As técnicas foram utilizadas com a finalidade de observar diferenças na porosidade das argamassas e identificar os produtos formados.

O equipamento utilizado foi da marca Shimadzu modelo SSX-550 do Laboratório de Materiais Avançados da UENF (LAMAV). As amostras de argamassa foram analisadas aos 28 dias de idade. As imagens das Figura 21 a 28 mostram as micrografias das oito argamassas com aumentos de 700x e 5000x.

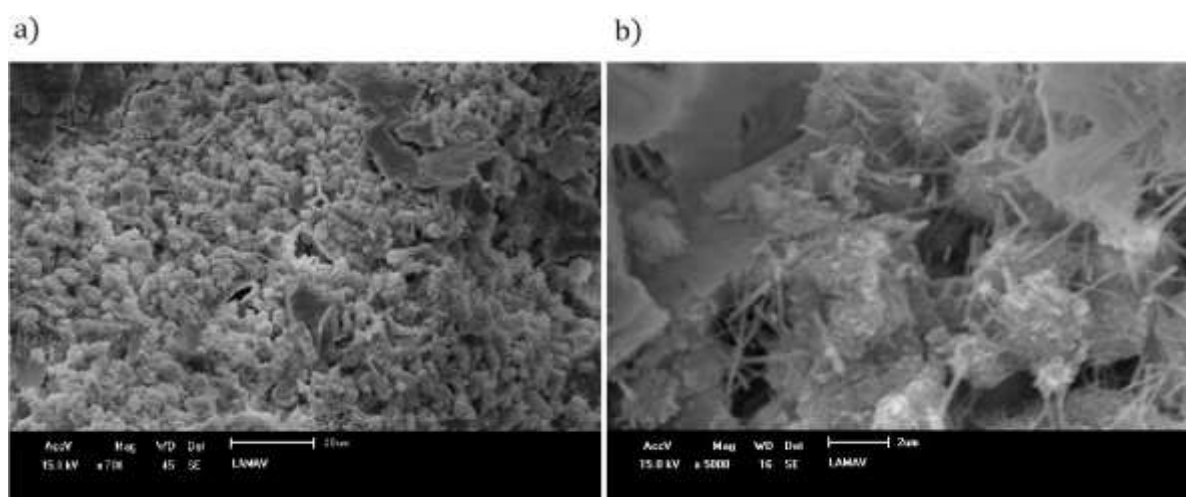


Figura 21: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,25$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

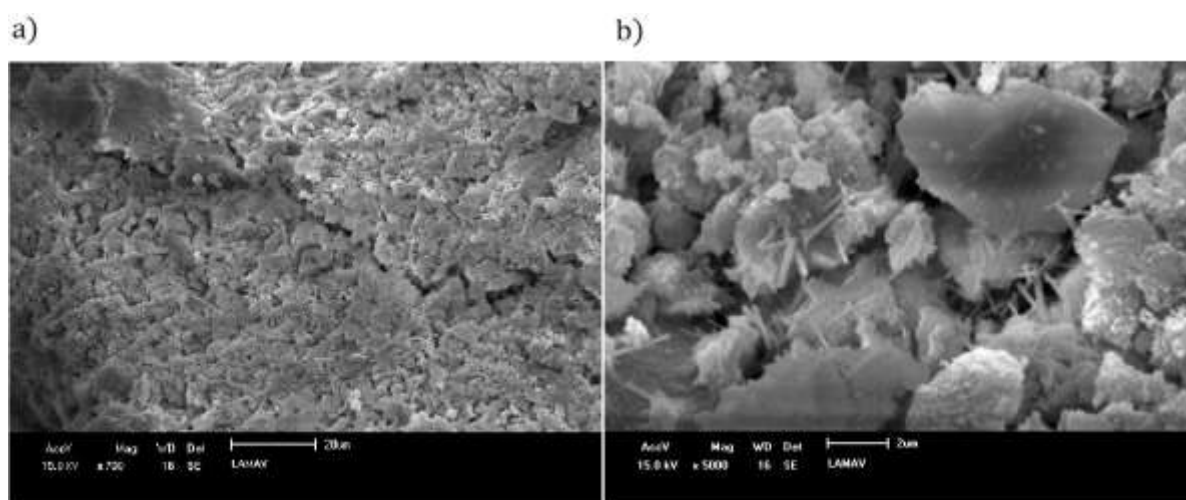


Figura 22: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,50$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.



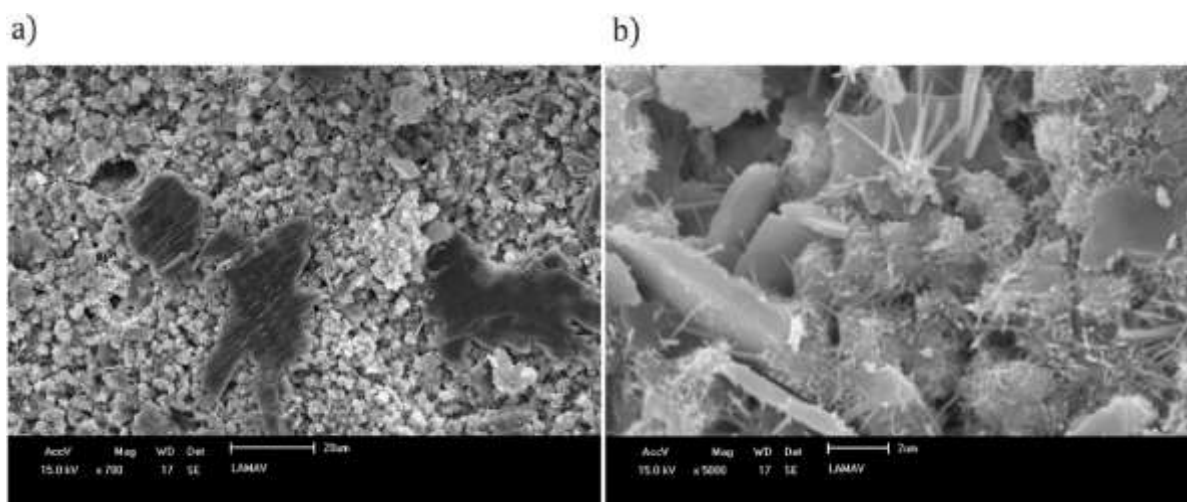


Figura 23: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

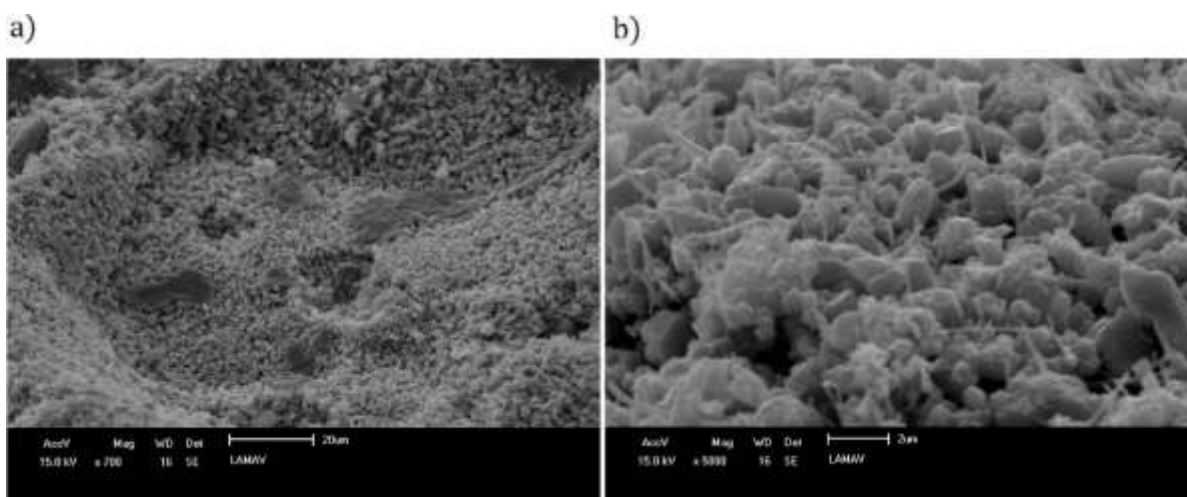


Figura 24: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,00$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

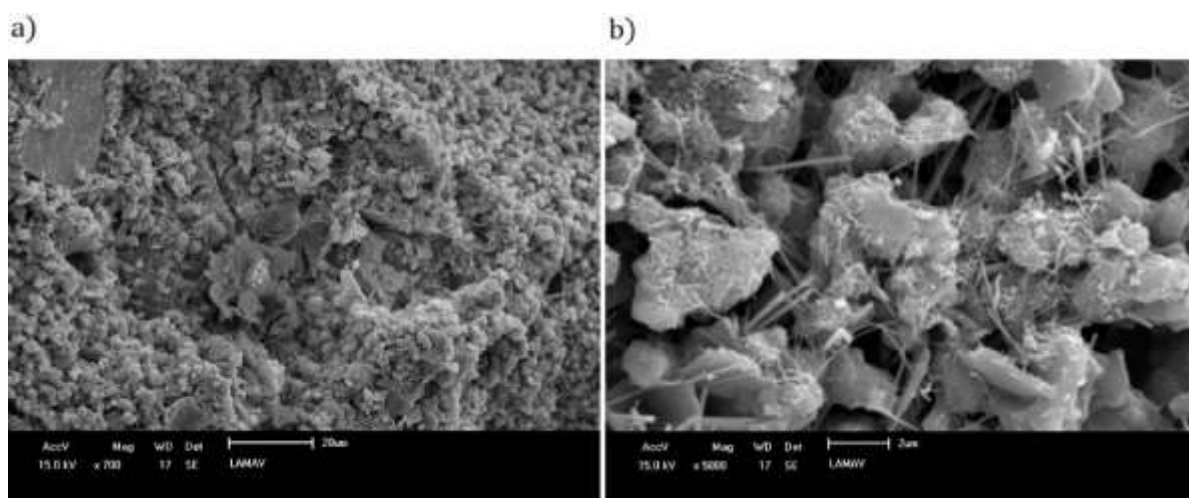


Figura 25: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

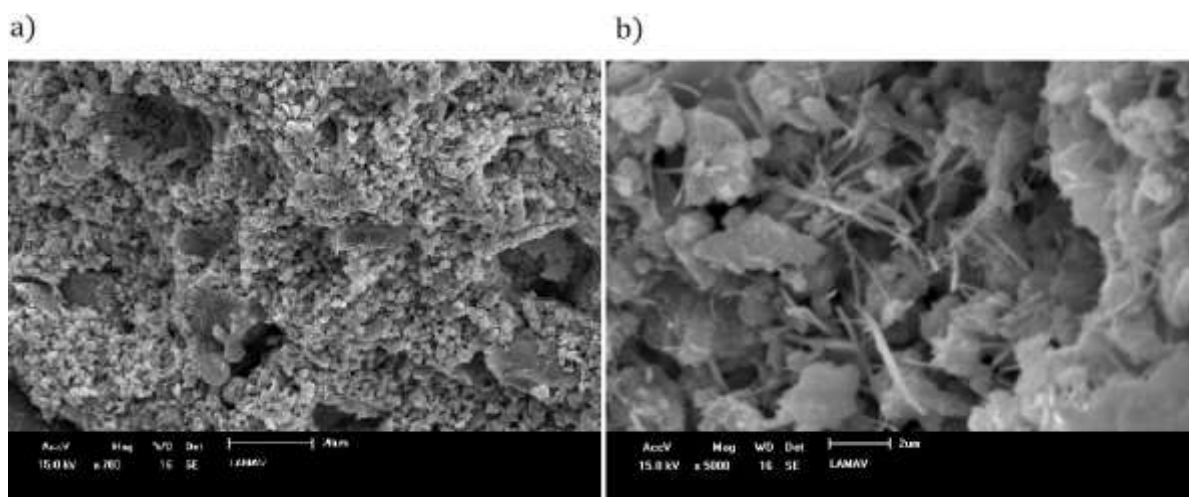


Figura 26: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,50$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

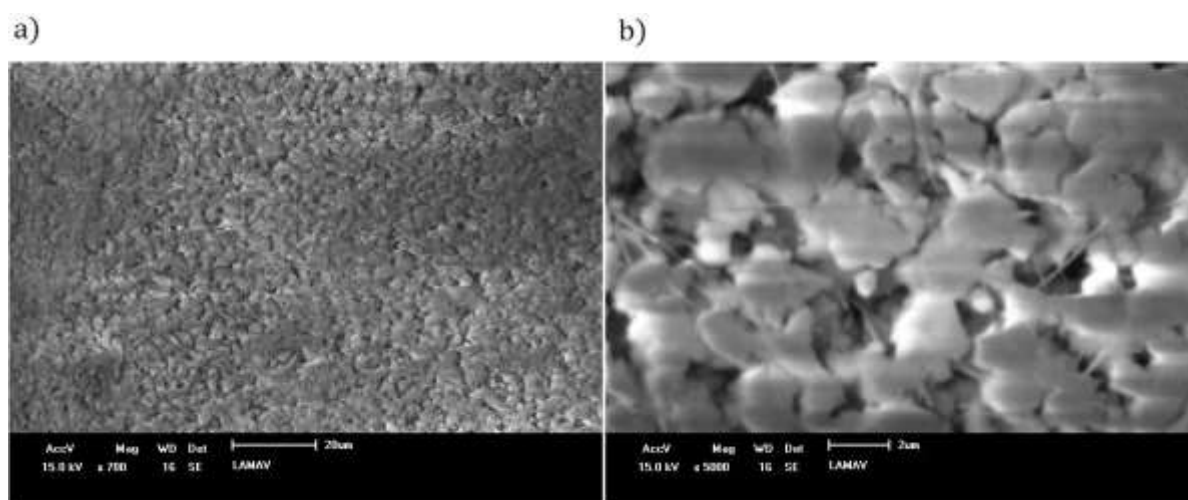


Figura 27: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

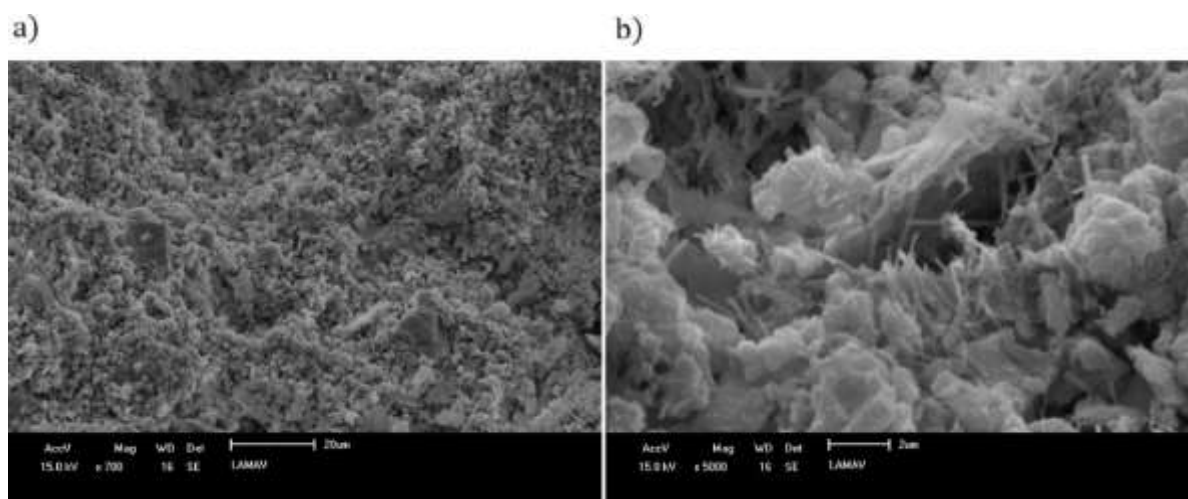


Figura 28: Micrografias da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . **a)** Aumento de 700x. **b)** Aumento de 5000x.

De acordo com esta técnica, não foi possível observar diferenças significativas na porosidade das argamassas que justificasse as diferenças de resistência mecânica entre elas. Observou-se, porém, compostos de formato acicular maiores e em maior quantidade nas argamassas de menor relação  $\text{CaO/SiO}_2$ , principalmente na  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ , e a diminuição do tamanho e da quantidade desses compostos com o aumento da relação  $\text{CaO/SiO}_2$ . Levantou-se a suspeita de que os compostos de formato acicular fossem silicato de cálcio hidratado (C-S-H), provável produto da hidratação dos componentes presentes no ativador e no precursor ( $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$ ), e que fornece resistência mecânica ao material.

Para que se confirmasse a suspeita e se observasse com mais detalhes estas fases, foram feitas imagens mais detalhadas e espectroscopia por energia dispersiva das argamassas com relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  e  $2,00$ , respectivamente, argamassas com maior e menor resistência mecânica.

As imagens das Figura 29 a 39 mostram as micrografias e os respectivos resultados das espectroscopias da argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . Nelas foi possível confirmar a suspeita da formação do C-S-H, que se apresentou na forma acicular (Figura 29 e 31). No ponto onde foi feito o EDS, o C-S-H apresenta-se num aglomerado de compostos que se repete em grande parte da imagem, indicando que houve grande formação de C-S-H. Tal composto é o principal fornecedor de resistência mecânica do produto final. Observou-se também a formação de C-A-S-H (Figura 29 e 30) e de geopolímero polisiloxosialato de cálcio (Figura 32 e 33) e polisiloxosialato de potássio e cálcio (Figura 37 a 39), compostos que também fornecem resistência mecânica à argamassa. Observou-se também a formação de Portlandita - CH (Figura 34 a 36), composto de baixa resistência mecânica.

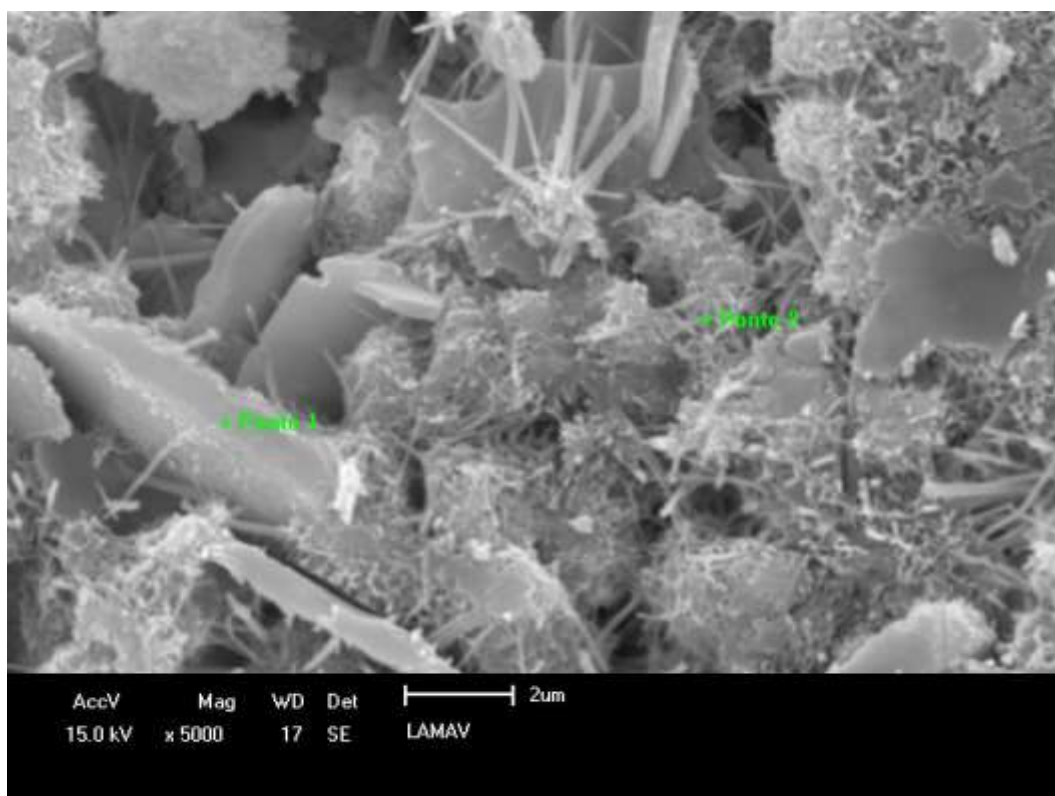


Figura 29: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . **Ponto 1:** C-A-S-H (silicato de cálcio e alumínio hidratado). **Ponto 2:** C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

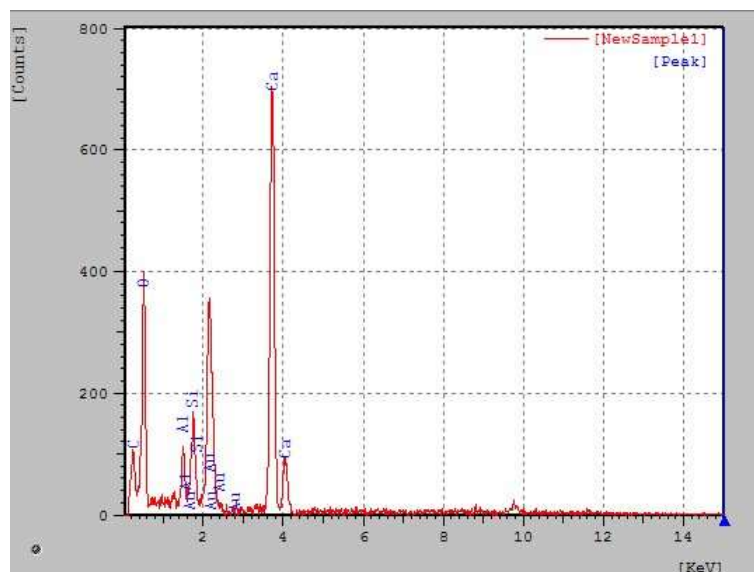


Figura 30: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 29.

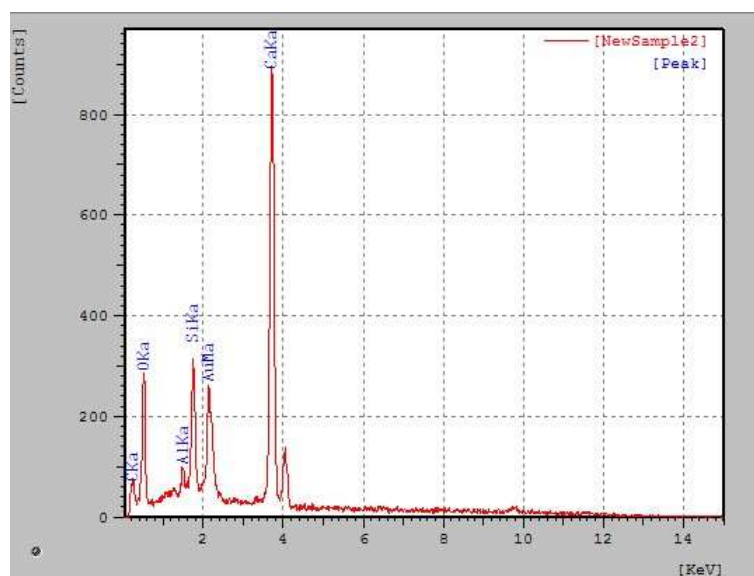


Figura 31: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 29.

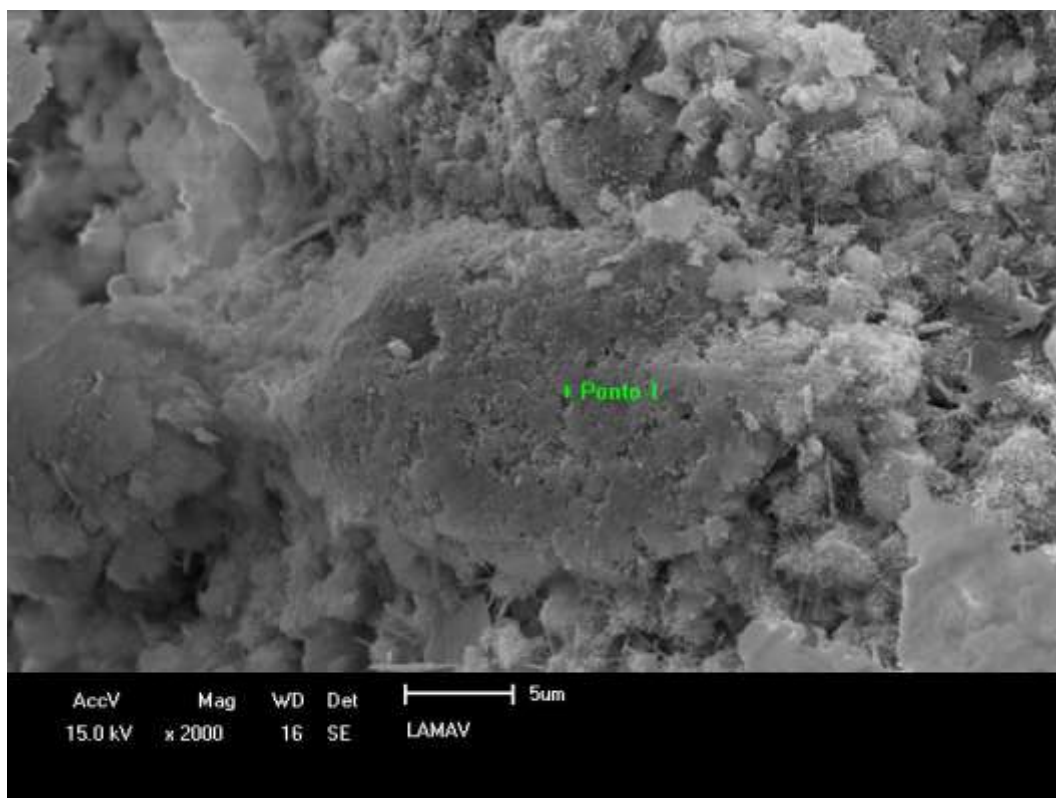


Figura 32: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . Ponto 1: Geopolímero Ca-PSS (polisiloxosialato de cálcio).



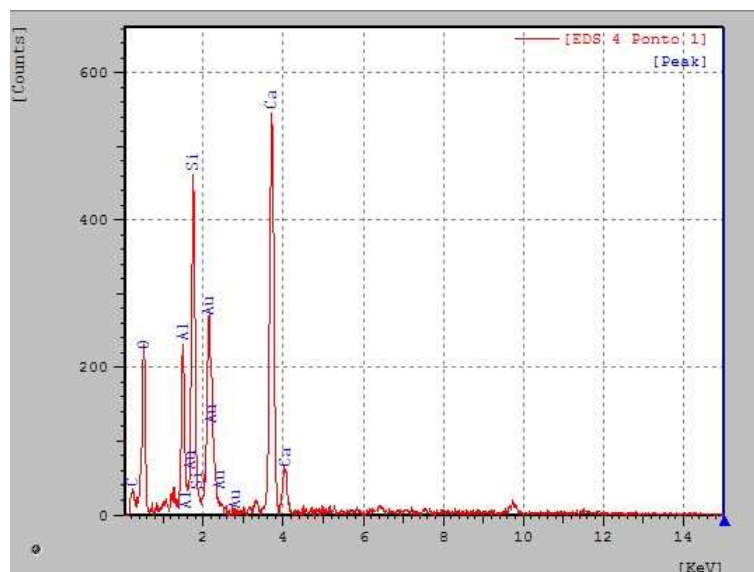


Figura 33: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 32.

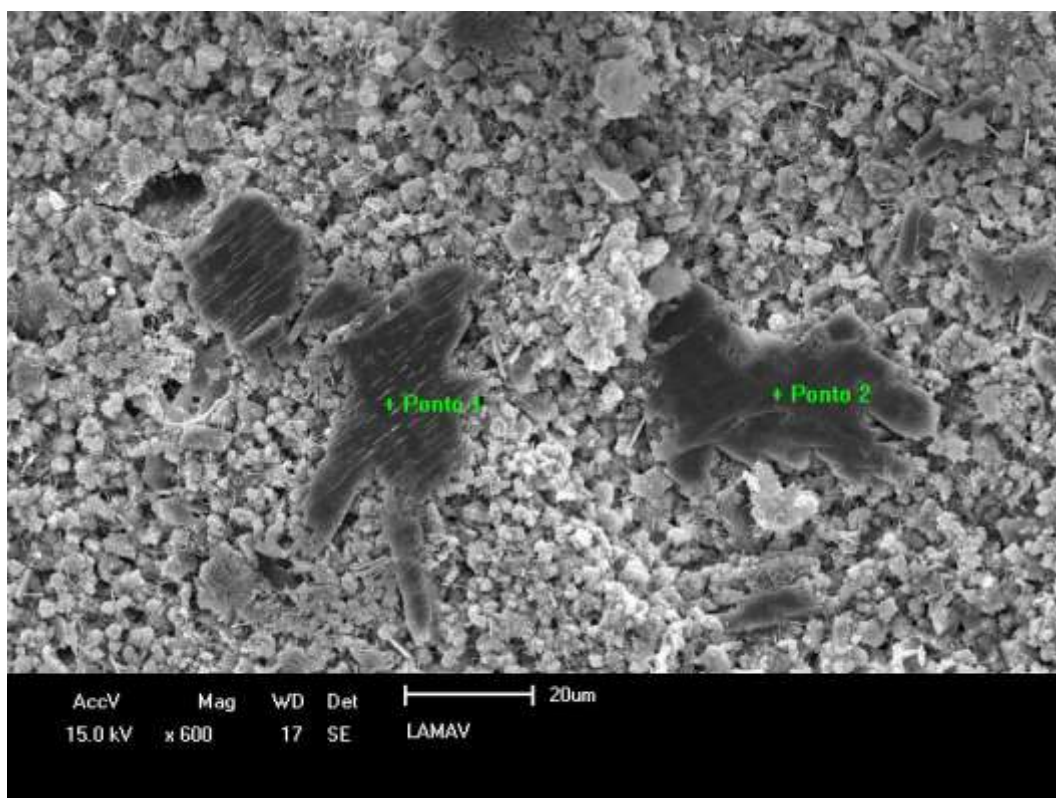


Figura 34: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . **Ponto 1:** portlandita (hidróxido de cálcio – CH), com pequena presença de  $\text{SiO}_2$  na superfície da face.

**Ponto 2:** portlandita (hidróxido de cálcio – CH).

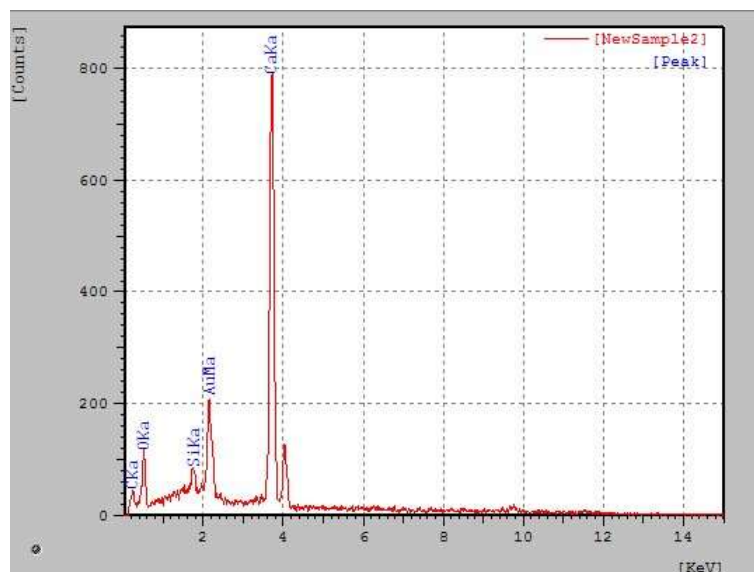


Figura 35: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 34.

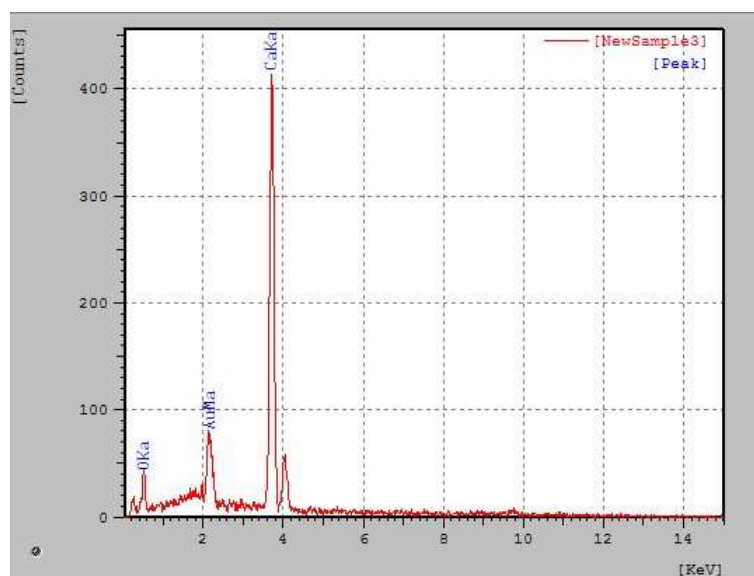


Figura 36: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 34.



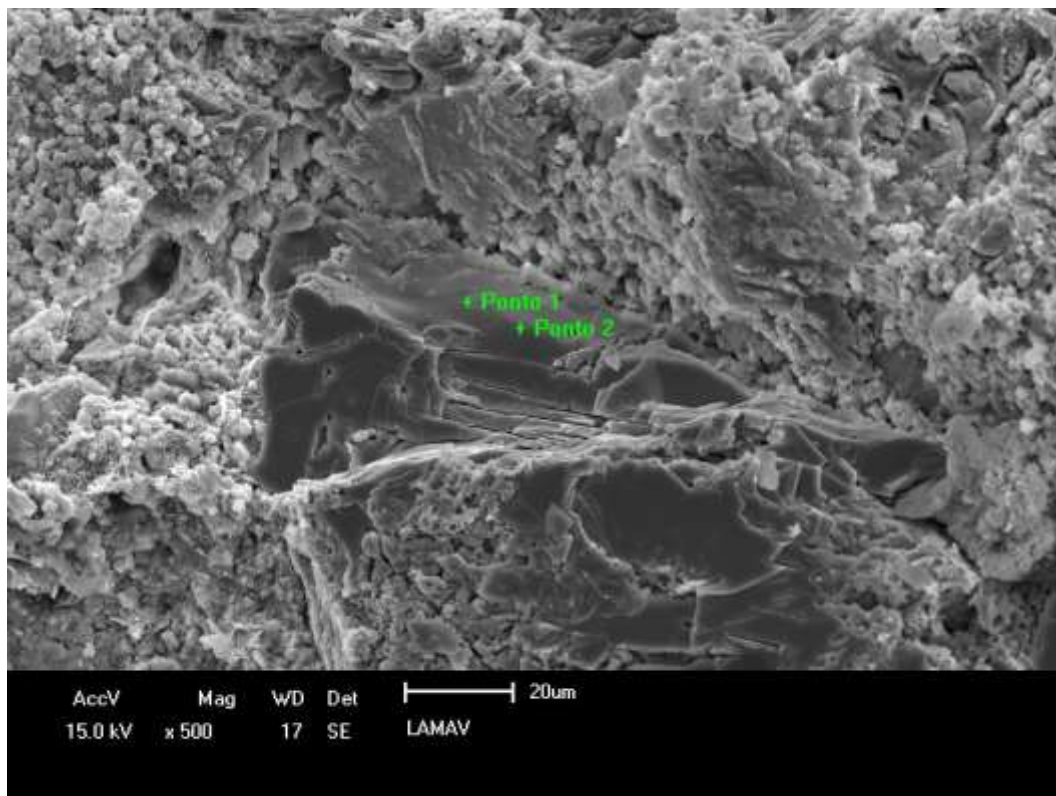


Figura 37: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ . **Ponto 1** e **Ponto 2**: polisiloxosialato de potássio e cálcio (K,Ca-PSS).

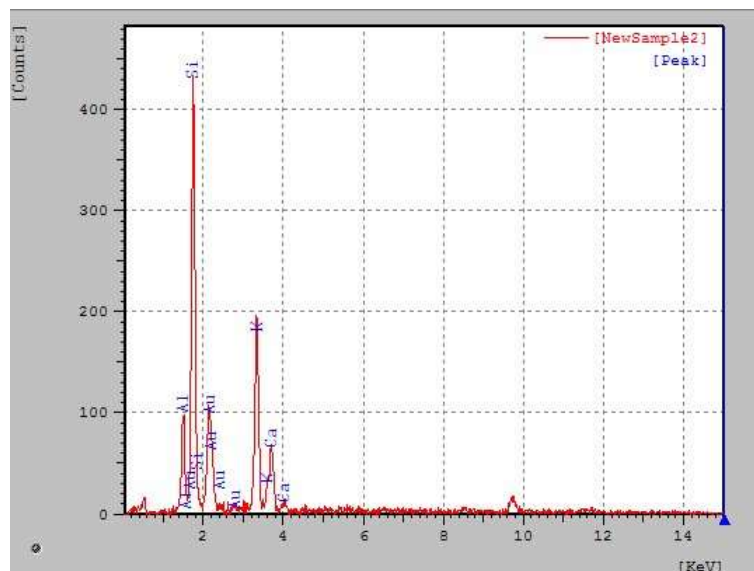


Figura 38: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 37.

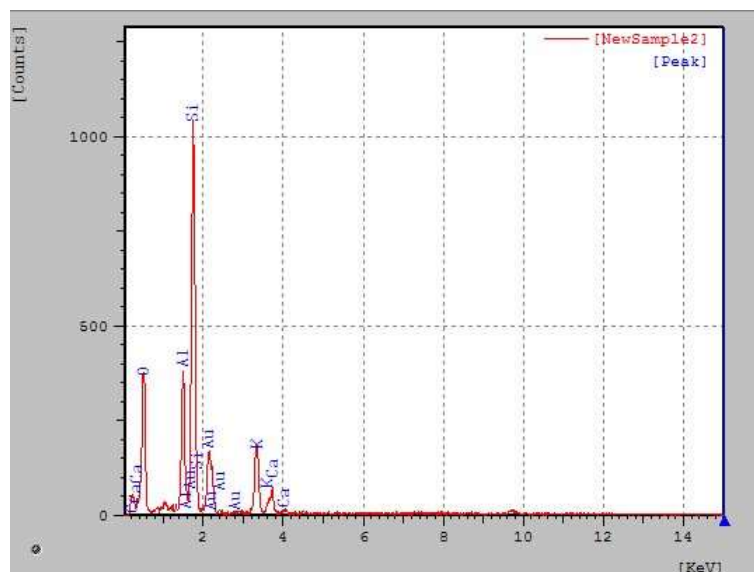


Figura 39: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 37.

As imagens das Figura 40 a 46 mostram as micrografias e os respectivos resultados das espectroscopias da argamassa com relação mássica  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . Analisando as imagens é possível observar que o que se esperava que fosse C-S-H devido ao formato acicular, na verdade é M-C-A-S-H (silicato de cálcio, alumínio e magnésio hidratado), com o magnésio substituindo pequena parcela de cálcio, composto que não oferece grande resistência mecânica ao material. O C-S-H observado no ponto 2 da Figura 40, não se desenvolveu tanto quanto o C-S-H da argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  (Figura 29), pois apresentou-se em menor tamanho e praticamente não foi possível observar agulhas nessa aproximação.

As Figura 43 e 45 mostram, respectivamente, carbonato de cálcio e areia (agregado miúdo), ambos presentes também na argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  (item 4.7.2), mas que não foram observados nas micrografias. Para que a análise das argamassas fosse mais completa, utilizou-se as técnicas analíticas descritas nos itens 4.7.2 a 4.7.4.

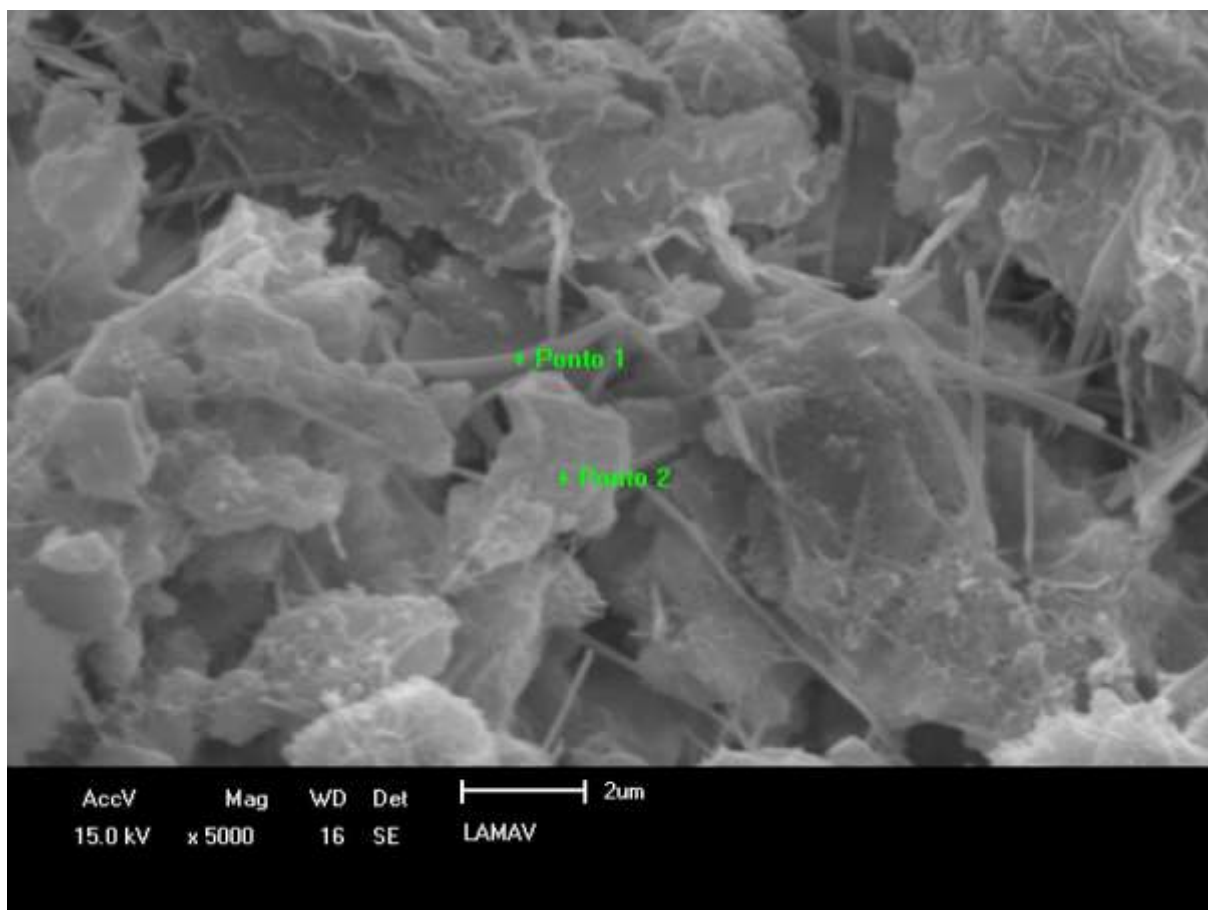


Figura 40: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . **Ponto1:** M-C-A-S-H (silicato de cálcio, alumínio e magnésio hidratado). **Ponto 2:** C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

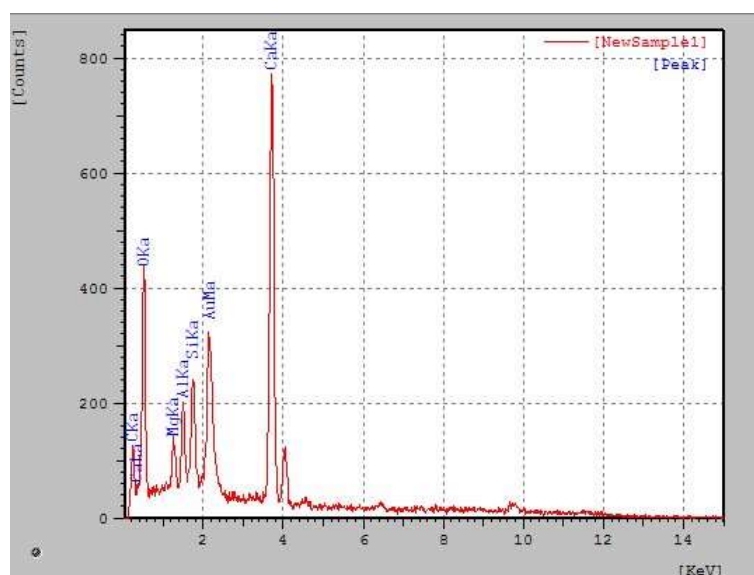


Figura 41: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 40.

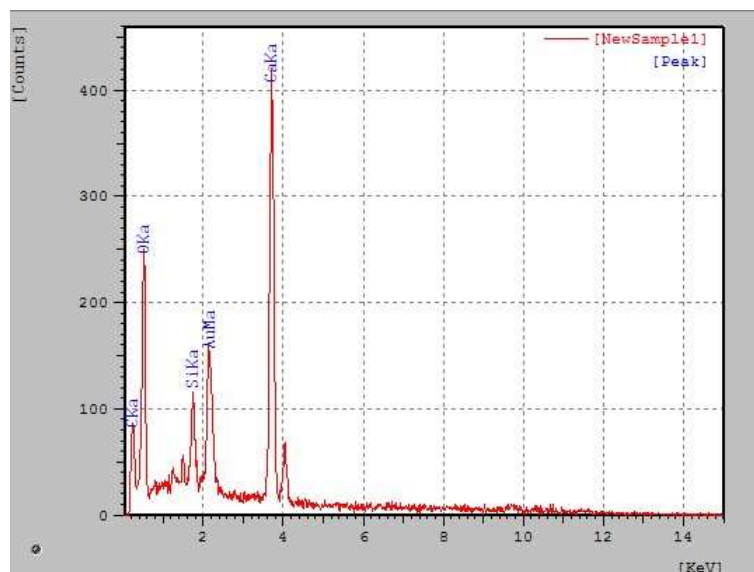


Figura 42: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 2 da Figura 40.

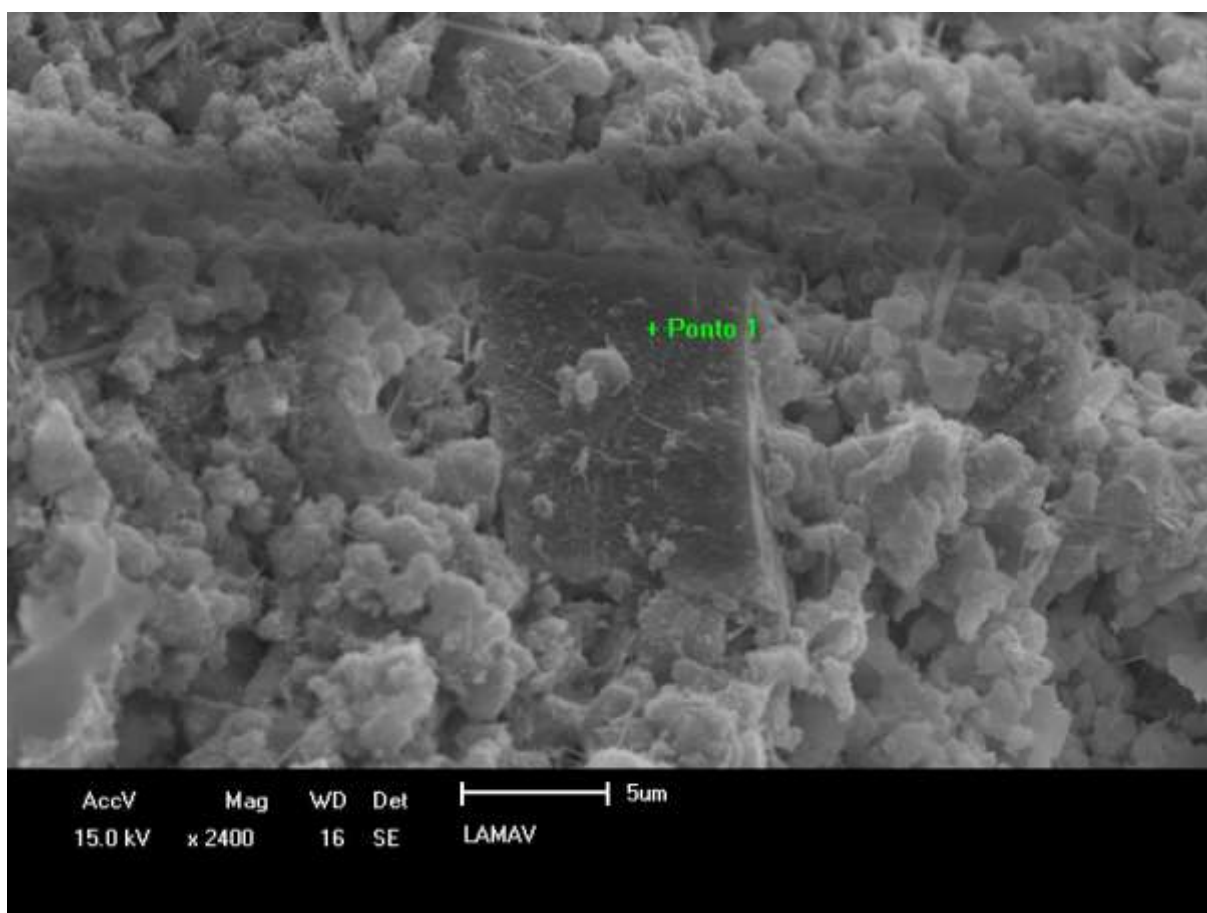


Figura 43: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . **Ponto 1:**  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio).

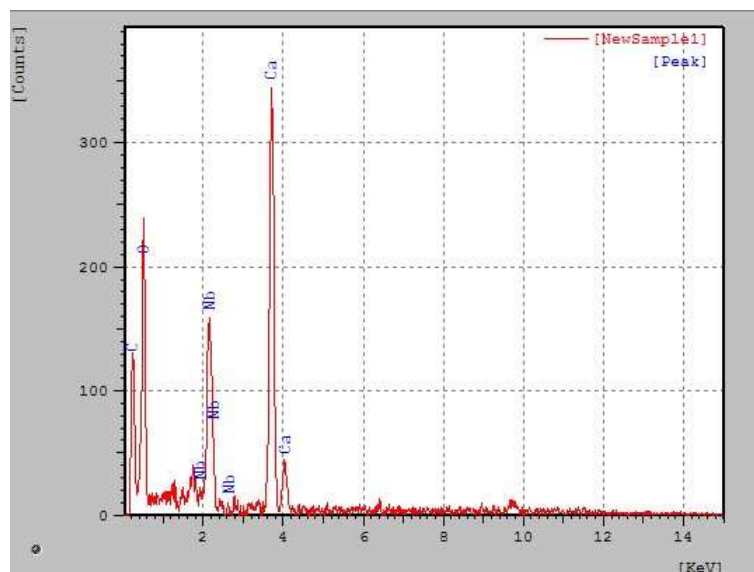


Figura 44: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 43.

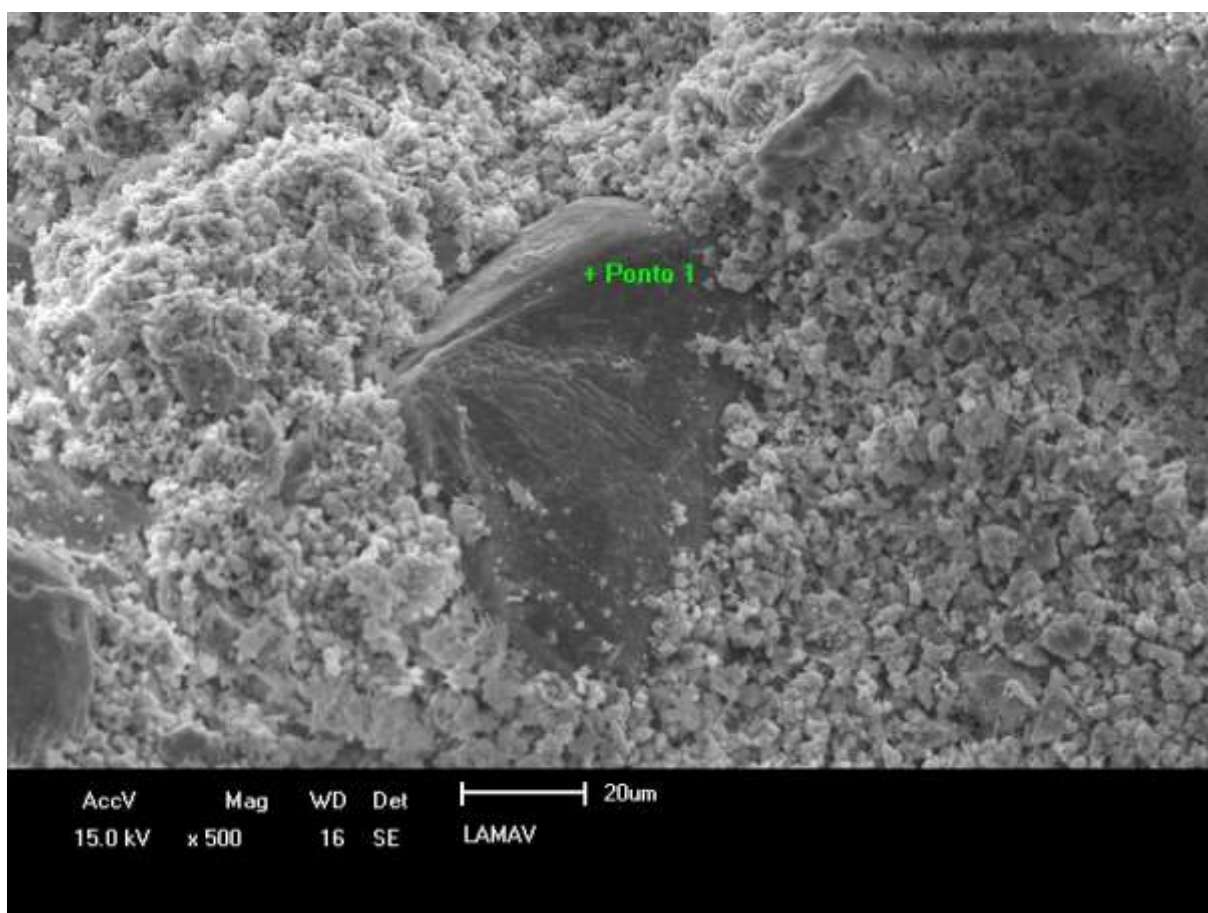


Figura 45: Micrografia da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . **Ponto 1:** agregado miúdo (areia –  $\text{SiO}_2$ ).



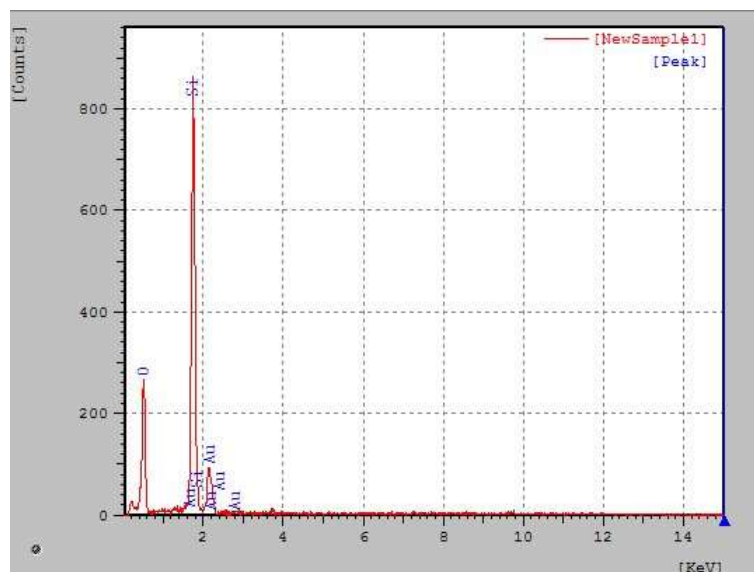


Figura 46: Espectroscopia por energia dispersiva referente ao ponto 1 da Figura 45.

#### 4.7.2. Difração de raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X destina-se à identificação das fases cristalinas do material. As amostras foram ensaiadas aos 35 dias de cura em ambiente de laboratório. O difratômetro utilizado foi o MiniFlex600 e o programa de análise foi o PDXL2, ambos da Rigaku. O equipamento manteve-se operando a 40 kV e 30 mA e as varreduras foram realizadas com velocidade angular de  $0,02^\circ$  por segundo e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg ( $2\theta$ ) de  $8^\circ$  e  $70^\circ$ .

A Figura 47 mostra os resultados da difração de raios X de amostras das 8 argamassas. Nota-se que todas apresentaram as mesmas fases cristalinas, portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$  cristalino), representadas no difratograma, respectivamente, por CH, C e Q.

A diferença entre os produtos cristalinos presentes nas argamassas fica evidente quando se compara a quantidade, representada pela altura (intensidade) do pico de portlandita. Observa-se aumento significativo da quantidade de CH com o aumento da relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ . Sabendo-se que este é um composto que não oferece resistência mecânica ao produto final, entende-se, então, porque as argamassas de maior relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  apresentaram pior desempenho nos ensaios de resistência mecânica.

Nota-se também diminuição da quantidade de quartzo com o aumento da relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ . Ciente de que esse quartzo é proveniente principalmente do agregado miúdo - areia - esse fato é facilmente justificado pela dosagem, descrita no

item 4.3, em que se observa diminuição da quantidade de areia com o aumento da relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ .

Em relação à calcita (carbonato de cálcio), nota-se que todas as amostras apresentaram quantidade significativa desse composto, indicando que as argamassas álcali-ativadas sofreram carbonatação, independentemente da relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ .

A Figura 48 mostra os difratogramas das argamassas com  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  igual a 0,75 e 2,00, respectivamente, a com maior e menor resistência mecânica. Nota-se um halo difuso nos difratogramas entre  $26^\circ$  e  $36^\circ$  ( $2\theta$ ), evidenciado pela linha de base em vermelho, o qual caracteriza o C-S-H, que não apresenta estrutura cristalina bem definida, ou seja, se apresenta com uma saliência da linha de base (FILHO *et al.*, 2017). Comparando-se os dois difratogramas observa-se maior protuberância da saliência na linha de base na argamassa com  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,75$  em relação à argamassa com  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 2,00$ , indicando maior presença de C-S-H e, conseqüentemente, maior resistência mecânica.

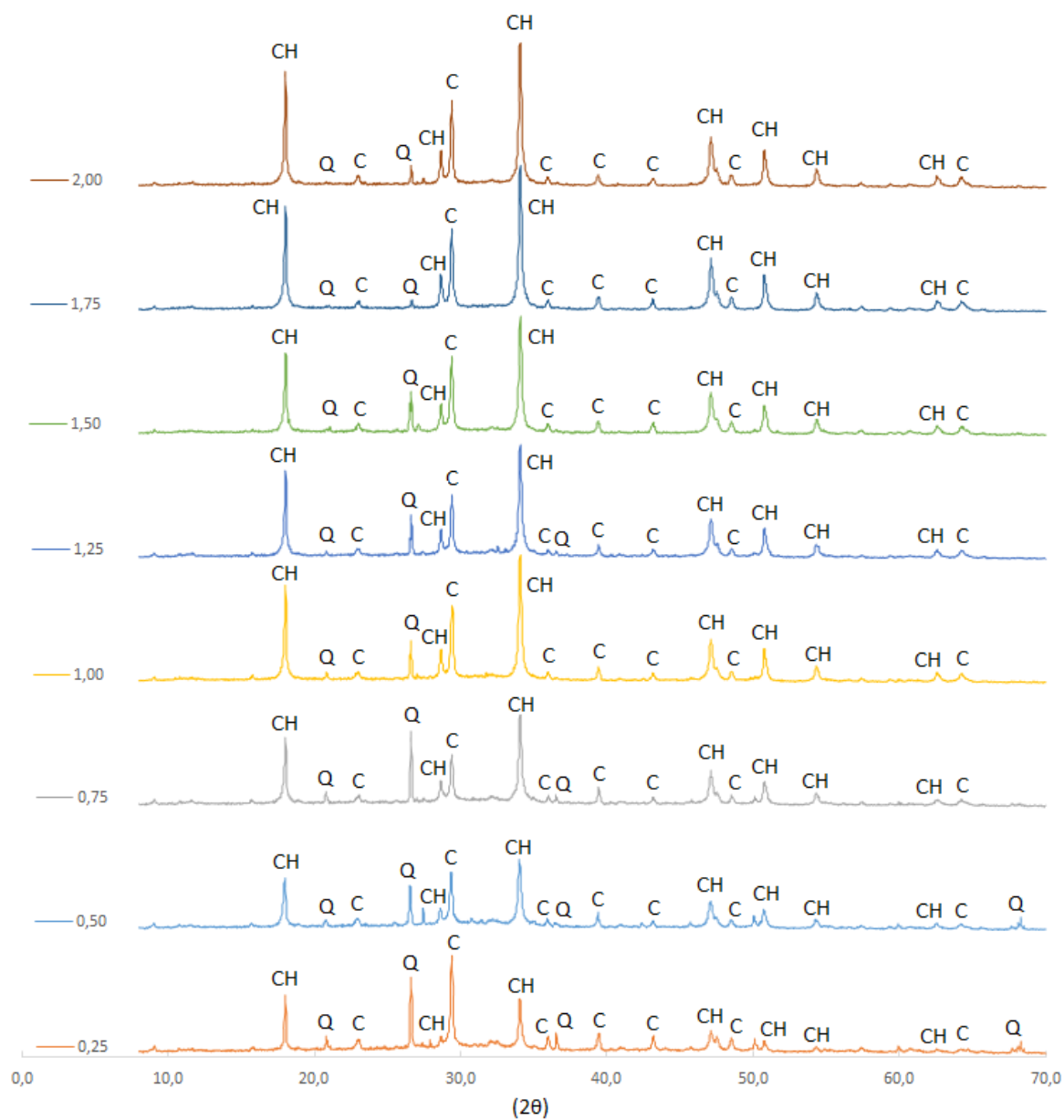


Figura 47: Difractogramas de raios X de amostras das oito dosagens de argamassa álcali-ativada. Os valores na lateral esquerda referem-se à relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ .



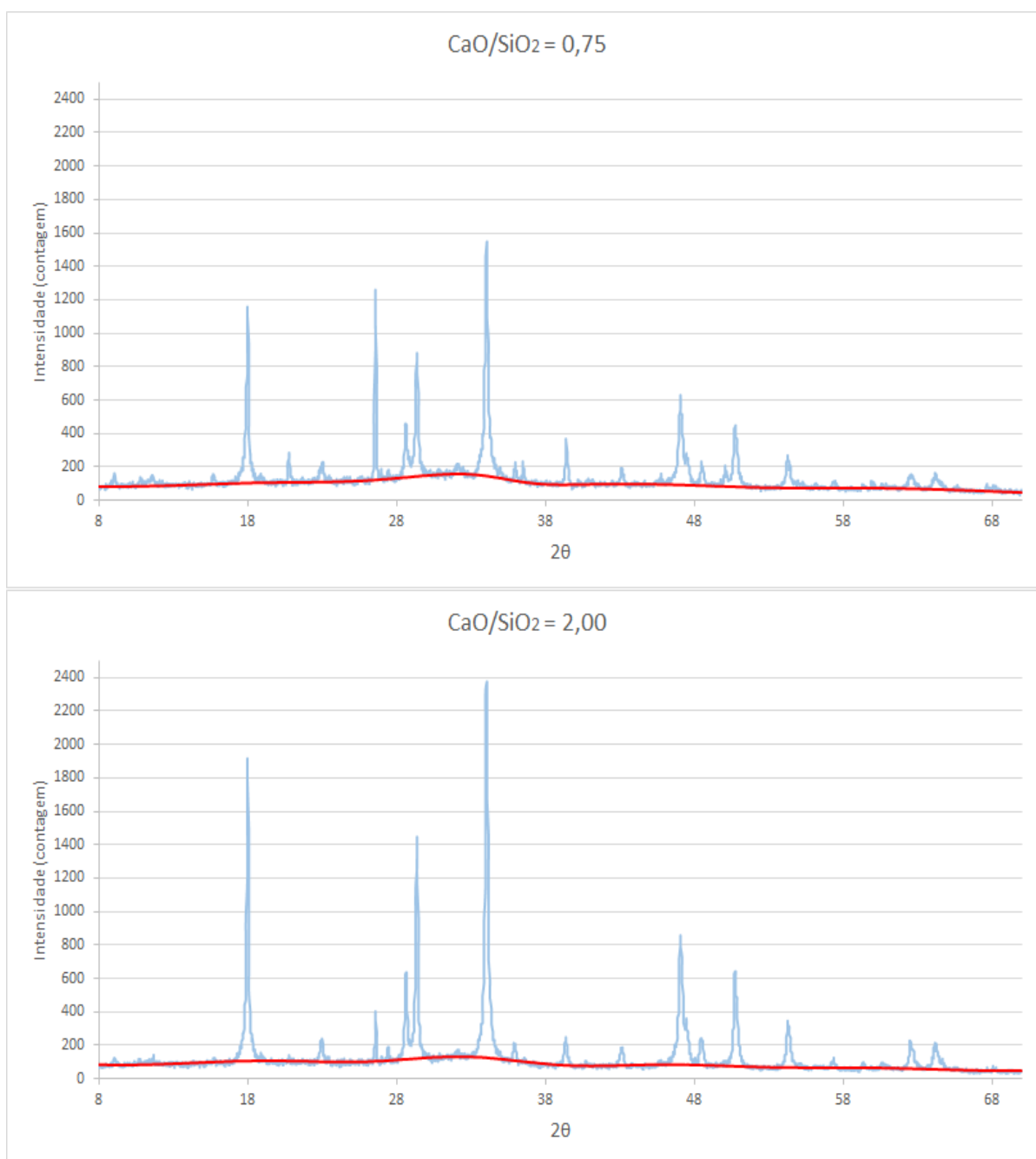


Figura 48: Comparação da linha de base dos difratogramas das argamassas de  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  e  $2,00$ .

#### 4.7.3. Termogravimetria e sua diferencial (TG e DTG)

A termogravimetria (TG), juntamente com a sua diferencial (DTG), é um ensaio de análise térmica em que se determina a variação da massa da amostra em função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a um aumento controlado e pré-determinado de temperatura. Esse ensaio permite identificar fases amorfas das argamassas, complementando os resultados do DRX. O ensaio foi

realizado no equipamento TGA Q5000 da TA Instruments, do Laboratório de Materiais Avançados da UENF (LAMAV). Amostras das 8 argamassas com 40 dias foram aquecidas até a temperatura de 900°C a taxa de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio. As curvas termogravimétricas (TG) e suas diferenciais (DTG) são mostradas nas Figura 49 a 56.

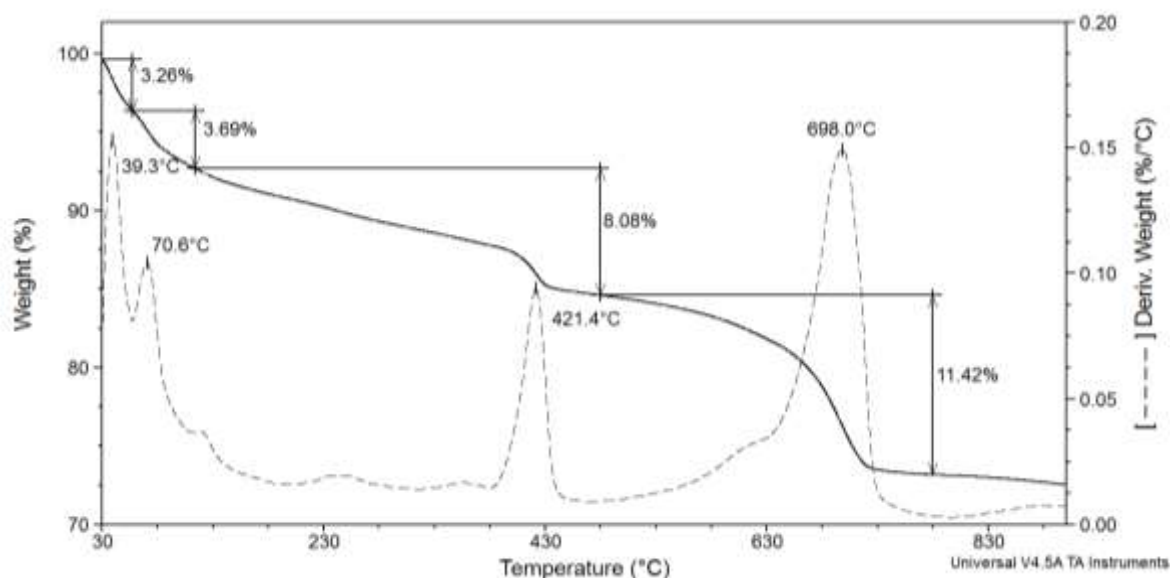


Figura 49: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,25$ .

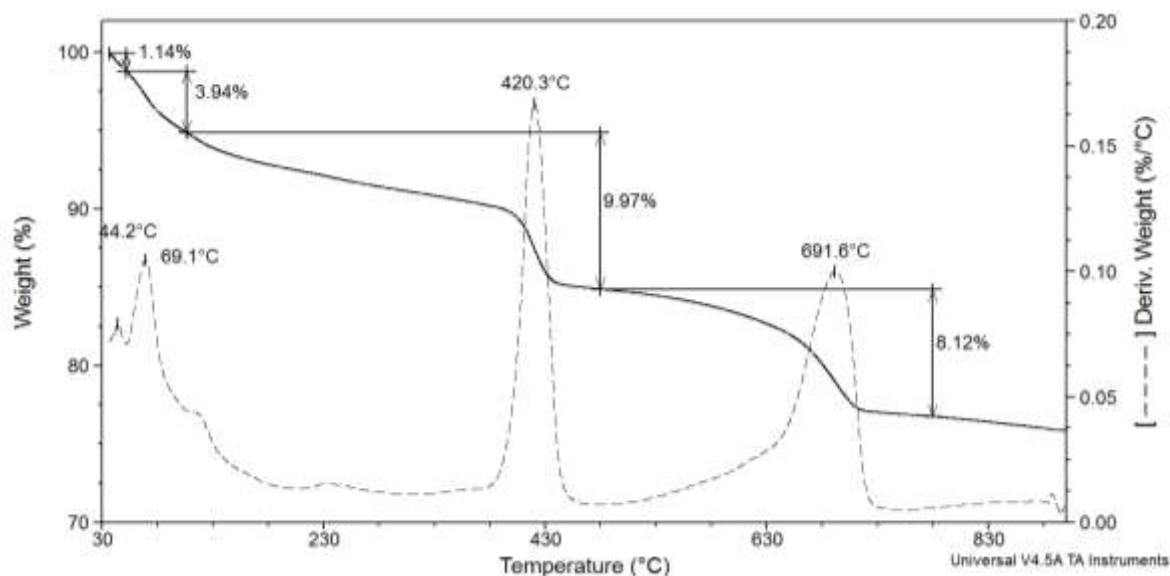


Figura 50: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,50$ .

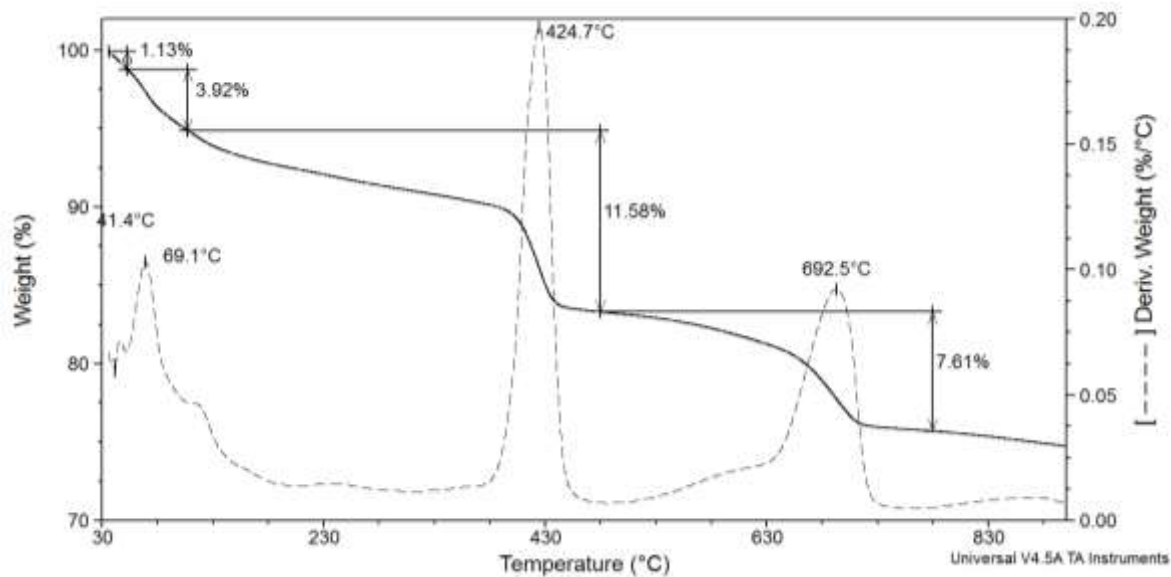


Figura 51: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ .

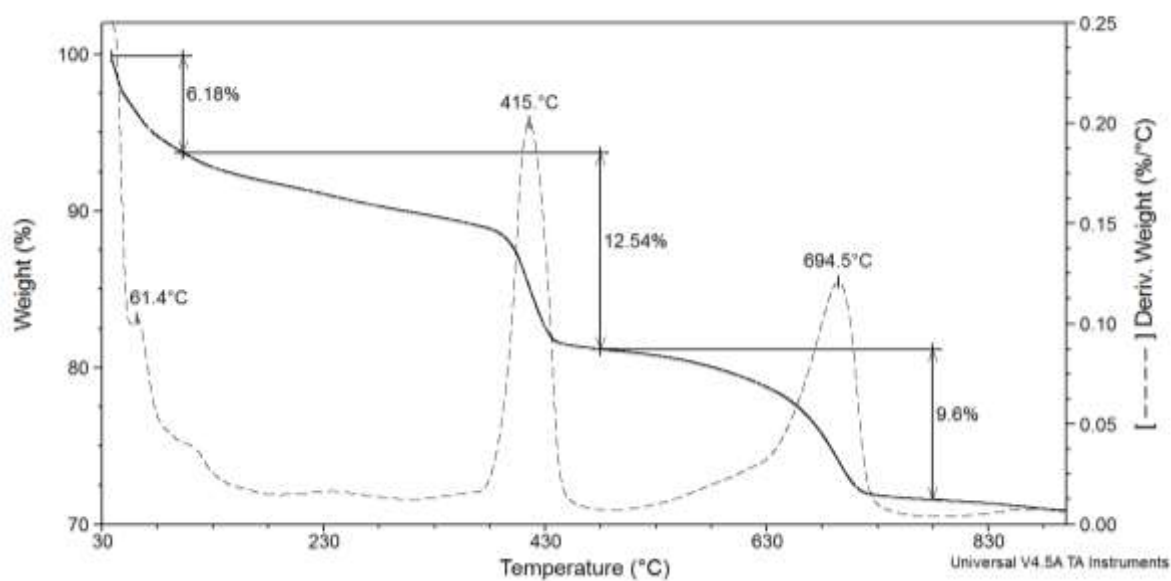


Figura 52: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,00$ .

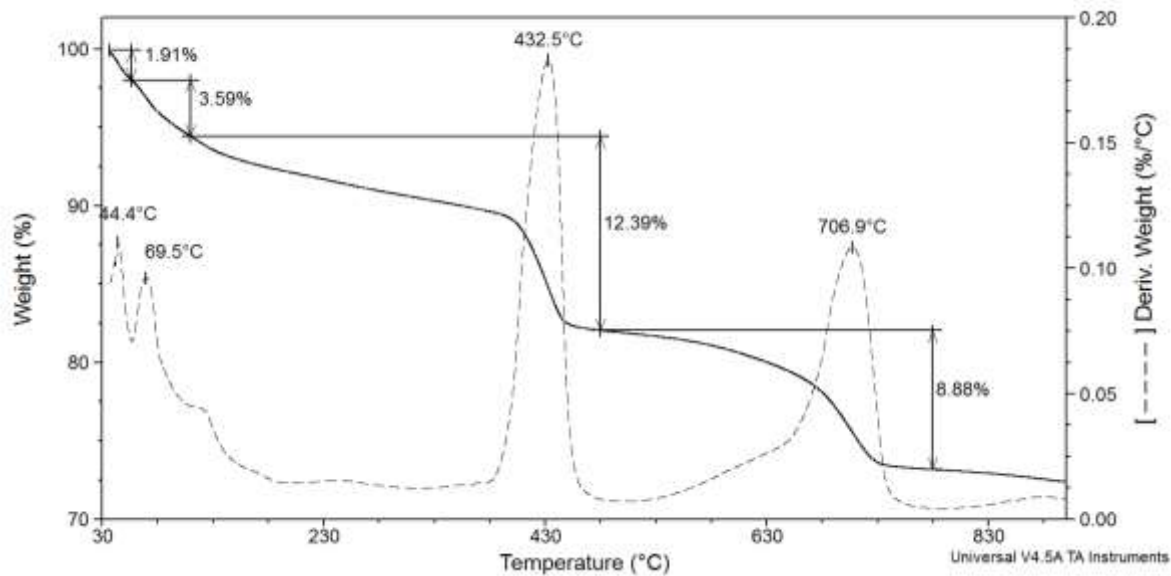


Figura 53: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$ .

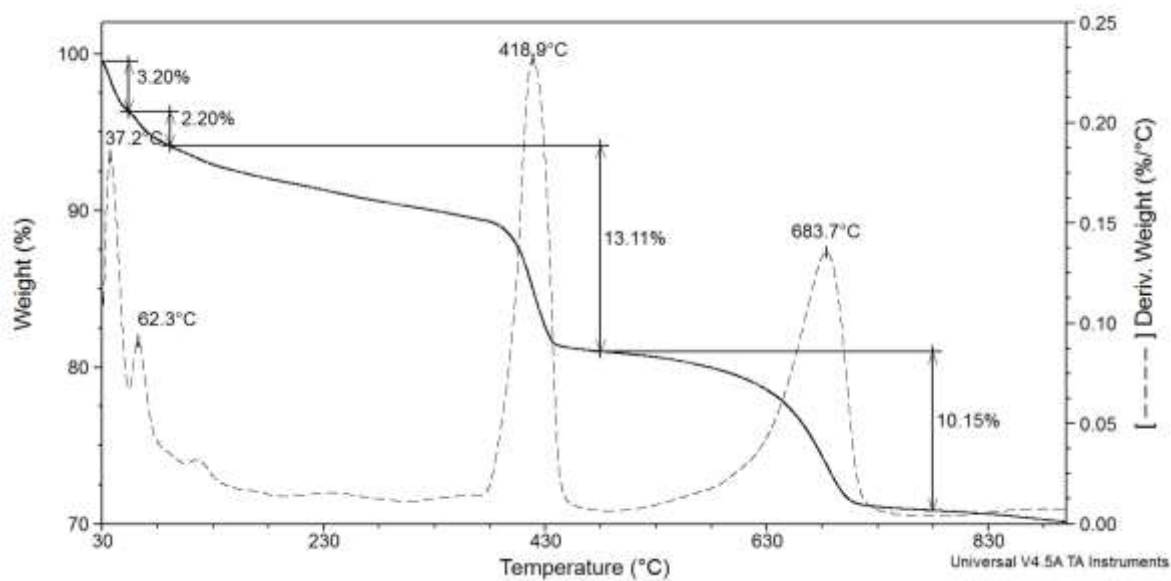


Figura 54: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,50$ .

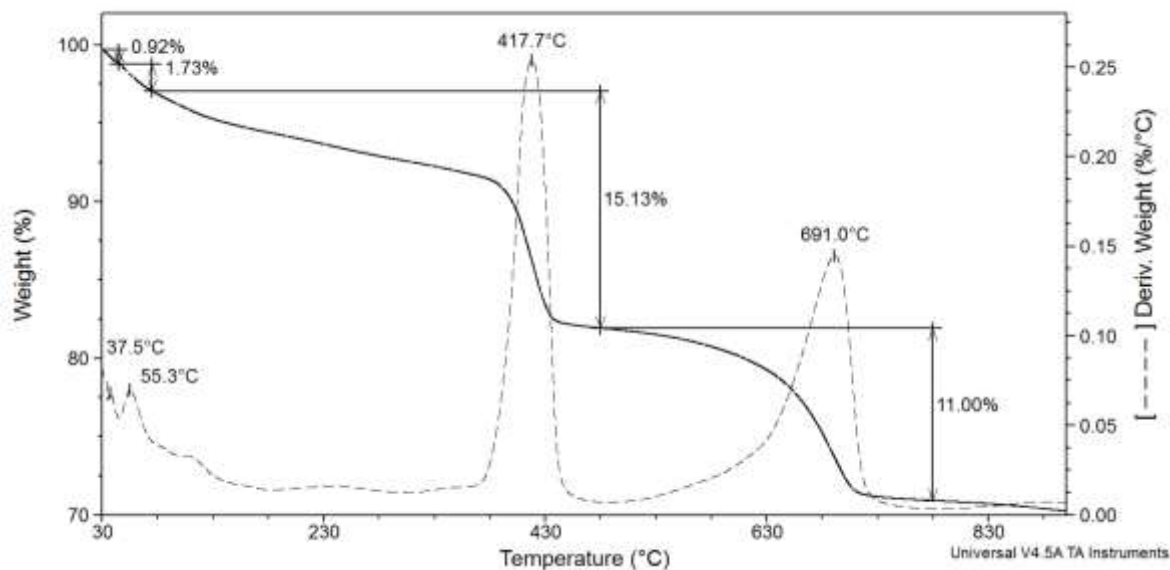


Figura 55: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,75$ .

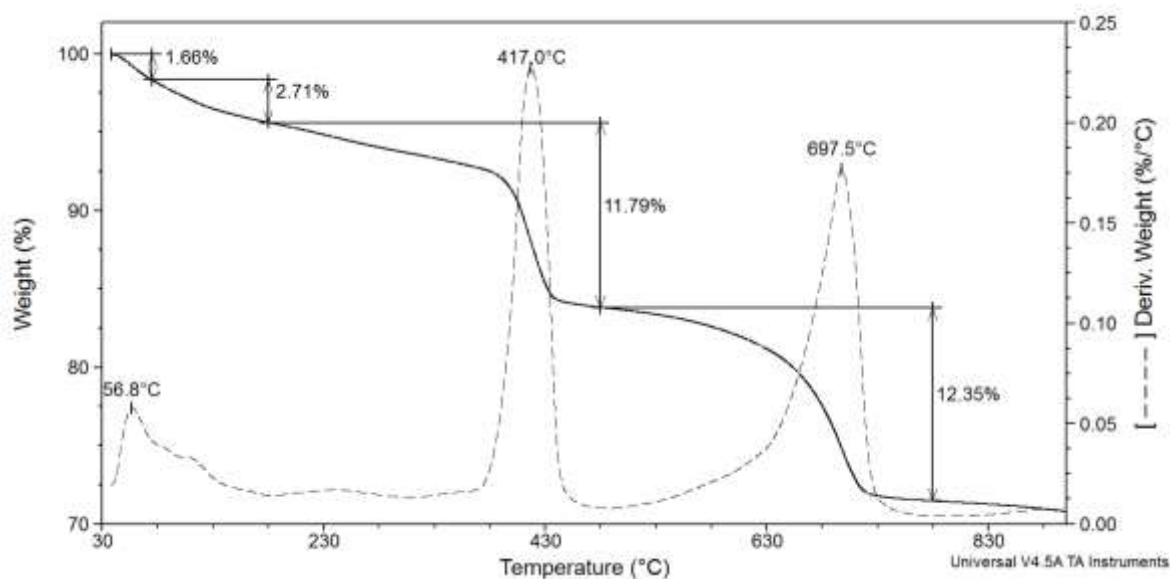


Figura 56: Curvas de TG e DTG da argamassa álcali-ativada com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ .

As curvas indicam 2 picos endotérmicos com temperaturas de até 70°C, aproximadamente, ambos atribuídos à evaporação de água livre, água presente nos poros da argamassa, já que as amostras não foram secas em estufa antes dos ensaios. O terceiro pico, que aparece discretamente nas amostras, em torno dos 120°C, deve-se ao C-S-H que, segundo Ramachandran (2002), tem sua identificação em efeitos endotérmicos abaixo dos 200°C. Sales (2012) e Weerdt *et al.* (2011) também obtiveram resultados de TG indicando a formação de C-S-H por volta dessa temperatura. O quarto pico é atribuído à desidroxilação da portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow$

CaO + H<sub>2</sub>O), variando de 415 a 432,5°C. E o último pico, com temperatura variando de 683,7 a 706,9°C atribui-se à decomposição da calcita (CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>), confirmando o resultado de DRX de que as amostras sofreram carbonatação.

#### 4.7.4. Porosimetria por intrusão de mercúrio

A Porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica que permite analisar parâmetros relacionados com a porosidade interligada do material, tais como: porcentagem volumétrica de poros, distribuição de tamanhos de poros e diâmetro médio destes. Esses parâmetros são importantes para a caracterização física das argamassas, de modo a justificar a diferença de resistência mecânica entre elas. Para isso, o ensaio de porosimetria foi realizado nas amostras das argamassas com CaO/SiO<sub>2</sub> igual a 0,75 e 2,00, a com maior e menor resistência mecânica, respectivamente, e por serem, portanto, as argamassas com as maiores diferenças nas características analisadas por este ensaio.

O equipamento utilizado para a análise foi o AutoPore IV 9500 da Micromeritics e a pressão do ensaio variou de 0,10 a 60000 psi. As amostras foram analisadas aos 80 dias. Os resultados da porosimetria são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio.

CaO/SiO <sub>2</sub>	0,75	2,00
Porosidade (%)	4,62	15,36
Área total de poros (m <sup>2</sup> /g)	0,61	1,55
Diâmetro médio dos poros (µm)	0,42	0,55
Permeabilidade (mD)	0,04	0,19

Nota-se que a argamassa com CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,75 apresentou menor porosidade e permeabilidade, menor área total e menor diâmetro médio de poros em relação à argamassa com CaO/SiO<sub>2</sub> = 2,00. A porosidade e a permeabilidade estão diretamente ligadas à resistência mecânica e durabilidade do material, respectivamente, visto que argamassas que apresentam elevada porosidade possuem baixa resistência mecânica e potencial decréscimo na durabilidade (SAHU *et al.*, 2004).

Com esse resultado é possível afirmar que a diferença de resistência mecânica apresentada pelas argamassas é resultado, além de outras características já

apresentadas, da diferença significativa de porosidade - a argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  obteve 4,6% de porosidade, enquanto a argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$  obteve 15,4%.

Quarcioni *et al.* (2009) fizeram uma estimativa da porosidade de argamassas de cimento Portland e cal pelo método de cálculo de volumes, a fim de relacionar a porosidade de argamassas mistas com propriedades no estado endurecido. Ao relacionar a porosidade com a resistência mecânica, observou-se claramente o decréscimo de resistência mecânica com o aumento da porosidade, como ocorreu no presente estudo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusões

A partir dos resultados obtidos no programa experimental foi possível concluir:

- a composição química da cinza volante indica que este subproduto da queima do carvão mineral em termelétricas é adequado para a confecção de argamassas álcali-ativadas;
- a cal virgem (ativador) possui quantidade adequada de CaO capaz de solubilizar a cinza volante (precursor) e, conseqüentemente, produzir compostos aglomerantes;
- o aumento da relação mássica CaO/SiO<sub>2</sub> (aumento da proporção de cal virgem no sistema) provoca aumento da demanda de água para se atingir a consistência padrão;
- o aumento da quantidade de cinza volante age como plastificante no sistema, melhorando a trabalhabilidade das argamassas;
- a seqüência de mistura que resultou na argamassa de maior resistência mecânica aos 14 dias foi: areia, cal virgem e água misturadas por 4 minutos e, por fim, cinza volante incorporada e misturada por mais 4 minutos;
- a argamassa que obteve maior resistência à compressão foi a de relação mássica CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,75;
- o acompanhamento do ganho de resistência mecânica ao longo dos dias da argamassa com CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,75 revelou rápido aumento de resistência à compressão e à tração nos primeiros 3 dias. O resultado aos 60 dias indicou que a argamassa atingiu a mesma resistência que aos 28, evidenciando que a resistência máxima da argamassa é atingida por volta dos 28 dias;
- os resultados dos ensaios para avaliação da viabilidade tecnológica das argamassas, prescritos pela NBR 13281 (ABNT, 2005), foram satisfatórios e, em relação a alguns parâmetros, até superiores a argamassas comerciais, evidenciando a viabilidade da produção dessa argamassa álcali-ativada;



- as micrografias, juntamente com o EDS, das argamassas aos 28 dias mostraram maior formação de C-S-H na argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  do que na  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ . Esse composto é o principal responsável pela resistência mecânica nas argamassas. Além disso, na argamassa de  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  observou-se a formação de C-A-S-H e dos geopolímeros polisiloxosialato de cálcio e polisiloxosialato de potássio e cálcio, compostos que também fornecem resistência mecânica à argamassa;
- na argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$  houve formação de M-C-A-S-H, composto que não oferece grande resistência mecânica ao produto final;
- tanto na argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  quanto na com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$  observou-se formação de portlandita, composto que possui baixa resistência mecânica;
- os difratogramas de raios X das oito argamassas indicaram que as argamassas de maior relação  $\text{CaO/SiO}_2$  produziram maior quantidade de portlandita em relação às argamassas de menor relação  $\text{CaO/SiO}_2$ . Esse resultado está em conformidade com os resultados de resistência mecânica, visto que a portlandita oferece baixa resistência às argamassas;
- comparando-se os difratogramas de raios X das argamassas com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  e  $2,00$  observa-se que o halo difuso que caracteriza a presença de C-S-H (composto amorfo) aparece ligeiramente maior na argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$ , indicando maior presença do composto;
- os difratogramas de raios X mostraram a presença de calcita em todas as argamassas, indicando que o material sofreu carbonatação;
- as análises termogravimétricas indicaram a presença de água livre, C-S-H, CH (portlandita) e  $\text{CaCO}_3$  (calcita) em todas as argamassas, mas não indicaram diferenças quantitativas significativas para justificar a diferença de resistência mecânica entre elas;
- a porosimetria por intrusão de mercúrio indicou que a argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,75$  obteve parâmetros como porosidade, área total de poros, diâmetro médio dos poros e permeabilidade significativamente inferiores aos da argamassa com  $\text{CaO/SiO}_2 = 2,00$ , evidenciando a diferença física que levou às argamassas a terem, respectivamente, a maior e a menor resistência mecânica.

Por fim, conclui-se que a cinza volante álcali-ativada por cal virgem resulta em um material com características cimentantes satisfatórias, podendo, portanto, ser usado como argamassas de múltiplo-uso e no assentamento estrutural.

## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

A fim de compreender melhor os materiais à base de cinza volante álcali-ativada por cal virgem, sugere-se para trabalhos futuros:

- estudar os parâmetros prescritos pela NBR 13281 (ABNT, 2005) para as outras 7 dosagens, a fim de avaliar a viabilidade da produção destas que obtiveram menor resistência mecânica, mas que poderão se enquadrar nas classificações da norma;
- estudar outros parâmetros como retração, calor de hidratação, fluência e durabilidade, a fim de avaliar a viabilidade do uso comercial desse material;
- empregar a cinza volante álcali-ativada com cal virgem na confecção de concretos e estudar o comportamento estrutural e a mecânica da fratura destes.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1231/C: *Standard practice for use of unbounded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders*. Novo México, 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água: NBR 13277 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido: NBR 13280 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade: NBR 15259 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração: NBR 15258 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos: NBR 13281 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos: NBR 6136 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) – Materiais Pozolânicos – Requisitos: NBR 12653, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991) – Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos: MB 3388, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990) – Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos: MB 3324, Rio de Janeiro.

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

ALVES, A. (2018) - Determinação Das Propriedades Físicas, Químicas E Mecânicas de Argamassas à Base de Metacaulim Ativado por NaOH, KOH E NaOH + KOH. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF.

AMIN, S., EL-SHERBINY, S., EL-MAGD, A., BELAL, A., ABADIR, M. (2017) - *Fabrication of geopolymers bricks using ceramic dust waste. Construction and Building Materials*, v. 157, p. 610-620.

CALAES, G. D. (2005) - Bases para a conciliação da produção de agregados com o desenvolvimento urbano sustentável. In: Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil. Gestão de Negócios. Rio de Janeiro, RJ.

COSTA, P. G. S. F. S. (2016) Análise de argamassas geopoliméricas expostas a temperaturas elevadas em edifícios industriais, 2014. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Minho, Portugal - Universidade do Minho – p. 128.

DAVIDOVITS, J. (1994) - *Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine*, p. 19.

DUXSON, P., VAN DEVENTER, J. (2009) - *Commercialization of geopolymers for construction – opportunities and obstacles. In Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications, ISBN, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, Reino Unido*, p. 379-400.

GOMAA, E., SARGON, S., KASHOSI, C., ELGAWADY, M. (2017) - *Fresh properties and compressive strength of high calcium activated fly ash mortar. Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, v. 29, p. 356-364.

GARCÍA, D., TÉLLES-JURADO, L., ÁLVAREZ, F.; RAMÍREZ, H. (2017) - *Structural study of geopolymers obtained from alkali-activated natural pozzolana feldspars, Ceramics International*, v.43, p. 2606-2613.

GRANIZO, M., ALONSO, S., BLANCO-VARELA, M., PALOMO, A. (2002) - *Alkaline activation of metakaolin: Effect of calcium hydroxide in the products of reaction. Journal of the American Ceramic Society*, v. 85, p. 225-231.

ISAIA, G. C. (2007) - *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, v. 2.

FILHO, J., GOBBI, A., PEREIRA, E., TANAKA, R., MEDEIROS, M. (2017) - *Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG)*. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3.

DE WEERDT, K., KJELLEN, K., SELLEVOLD, E., JUSTNES, H. (2011) - *Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 30-38.

LANGARO, E. A. (2016) - Cimento Álcali Ativado a Partir Da Valorização da Escória de Alto Forno a Carvão Vegetal. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Curitiba, PR - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná - UTFPR.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. (2010) - *A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 1341-1349.

MARVILA, M.; ALEXANDRE, J.; Rangel, A. A. G.; ZANELATO, E.; MONTEIRO, S. N.; DELAQUA, G.; AMARAL, L. (2017) - Estudo da Capilaridade para Argamassas de Múltiplo Uso. Anais do Congresso Anual da ABM, v. 72, n. 1.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. (2008) - Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON.

MURTA, F. L. (2008) - Produção de Argamassas a Partir da Ativação Alcalina de Metacaulim e de Resíduo de Tijolo Moído por Cales Virgem e Hidratada. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF.

MYADRABOINA, H., SETUNGE, S., PATNAIKUNI, I. (2017) - *Pozzolanic Index and lime requirement of low calcium fly ashes in high volume fly ash mortar. Construction and Building Materials*, v. 131, p. 690-695.

PACHECO-TORGAL, F., LABRINCHA, J., LEONELLI, C., PALOMO, A. (2014) - *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Woodhead Ped. Cambridge: Elsevier Ltd.*

PALOMO, A., GRUTZECK, M., BLANCO, M. (1999) - *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 8, p. 1323-1329.

MACIOSKI, G. (2017) - Estudo da álcali-ativação de pó de blocos cerâmicos com cal hidratada. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Curitiba, PR - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná - UTFPR.

PROVIS, J., VAN DEVENTER, J. (2014) - *Alkali - Activated Materials State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages): Bagnaux, France.*

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural, 2003. 1.ed. São Paulo.

RANGEL, G. P. (2017) - Estudo da Viabilidade Tecnológica de Argamassas Ativadas por NaOH ou KOH. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

ROCHA, T. S. (2017) - Efeito Da Temperatura Em Resina Geopolimérica Com Diferentes Cargas Minerais (Areia, Wollastonita E Escória De Fluxo De Soldagem). Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

SAHU, S., BADGER, S., THAULOW, N., LEE, R. (2004) - *Determination of water-cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. Cement & Concrete Composites*, v. 26, p. 987-992.

SALES, C. (2012) - Produção e caracterização de cinza de capim elefante com vistas à sua aplicação como pozolana. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

QUARCIONI, V., CHOTOLI, F., ÂNGULO, S., GUILGE, M., CAVANI, G., CASTRO, A., CINCOTTO, M. (2009) - Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal

pelo método de cálculo de volumes. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, RS. v. 9, n. 4, p. 175-187.

WANG, W-C, WANG, H-Y, TSAI, H-C. (2016) - *Study on engineering properties of alkali-activated ladle furnace slag geopolymer*. *Construction and Building Materials*, v. 123, p.800-805.