

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
ENGENHARIA CIVIL

Fabiane Matos Gonçalves

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO À BASE DE CINZA  
VOLANTE, SOLUÇÃO ATIVADORA DE HIDRÓXIDO DE  
POTÁSSIO E ADITIVO DISPERSANTE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Florianópolis  
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gonçalves, Fabiane Matos

Desenvolvimento de geopolímero à base de cinza volante,  
solução ativadora de hidróxido de potássio e aditivo  
dispersante / Fabiane Matos Gonçalves ; orientador,  
Wellington Longuini Repette - Florianópolis, SC, 2015.  
91 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Geopolímero. 3. Cinza volante.  
4. Hidróxido de potássio. 5. Aditivo dispersante. I.  
Longuini Repette, Wellington . II. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. III. Título.

**FABIANE MATOS GONÇALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO À BASE DE CINZA  
VOLANTE, SOLUÇÃO ATIVADORA DE HIDRÓXIDO DE  
POTÁSSIO E ADITIVO DISPERSANTE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 07 de Dezembro de 2015.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso PPGEC UFSC

---

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Luis Alberto Gomez, Dr.  
Moderador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Fernando Pelisser, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Adriano Michael Bernardin, Dr.  
Universidade do Extremo Sul Catarinense



Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos e ao meu companheiro, pela paciência, compreensão e apoio em diversas situações.



## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC – UFSC), pela oportunidade de cursar este mestrado.

Ao Prof. Dr. Wellington Loguini Repette, orientador, incentivador e exemplo profissional. Obrigada por ter depositado confiança a mim.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado concedida.

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Prof. Dr. Philippe Gleize, pelo apoio à pesquisa.

Aos professores membros da banca, Prof. Dr. Luis Alberto (moderador), Prof. Dr. Philippe, Prof. Dr. Fernando, Prof. Dr. Adriano, por aceitarem o convite para participar e contribuir ao trabalho.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC – UFSC), e a seus técnicos: Luíz, Renato e Roque, pelo suporte durante uma parcela do programa experimental. Ao Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC – UFSC), juntamente ao químico Nilton, por cooperar em grande parte do programa experimental.

Aos queridos que Deus colocou em minha vida: Nágilla, Carol, Leili, Thai, May, Paula, Pojucan, Fred, Leonardo, Vanessa, Flávia e Ana, parceiros, seres de espiritualidade ímpar, amigos/família Floripa.

A amiga Carol, por todo o incentivo e partilha de sua aprendizagem (que não é pouca); a amiga Vanessa, pela força e disposição em dividir conhecimentos; ao amigo bolsista Lurian, por ter ajudado diretamente no desenvolvimento do programa experimental; e ao amigo Lucas, pelo grande auxílio na universidade.

Em especial aos meus amores incomensuráveis, pai José e mãe Edith, inspirações para o meu EU, responsáveis por meus princípios e educação, contribuintes diretos para meus objetivos de vida, inclusive a sede pelo conhecimento.

Aos meus irmãos Fabrício e Fábio que são grandes amigos, literalmente minhas alegrias, geradores de dois grandes amores, Ana Fabrini e Enzo Felipe, crianças de luz e paz.

Aos familiares e amigos, que mesmo longe se fizeram presentes.

Ao meu companheiro Sérgio Neto, pela paciência, compreensão e apoio em diversos momentos. Gratidão por todo o incentivo e por você tornar minha vida ainda mais radiante.

Aos meus sogros, Sérgio e Socorro, pela grande força e incentivo.

A Deus dedico o meu maior agradecimento, porque é minha fortaleza, meu tudo. Nele confio piamente, com muita força e fé, por tudo que já vivi e por ter me possibilitado chegar até aqui.



O homem é do tamanho do seu sonho.  
Fernando Pessoa



## RESUMO

O geopolímero é um produto originado da polimerização inorgânica de material rico em óxido de alumínio e silício em solução alcalina. E ainda, pode-se acrescentar aditivos químicos em busca do controle de água de mistura. A microestrutura e as propriedades química, física e mecânica variam em função dos materiais precursores, do proporcionamento dos constituintes e das condições de cura. Nesta perspectiva, esta dissertação retrata um estudo do comportamento de pastas geopoliméricas à base de cinza volante, hidróxido de potássio e aditivo dispersante. Variaram-se a concentração molar da solução ativadora hidróxido de potássio (8M e 12M), a proporção mássica entre a solução ativadora hidróxido de potássio e a cinza volante (0,55; 0,60), e a base química dos aditivos dispersantes, policarboxilato de sódio (0,2, 0,8 e 1,2%) e lignosulfonato de sódio (0,2, 0,8 e 1,2%). Em função da utilização dos aditivos foram avaliados dois parâmetros: a trabalhabilidade, por meio do *mini-slump* e, a resistência mecânica, através de determinações de resistência à flexão e à compressão, nas idades de 1 e 28 dias. Foram moldados corpos de prova prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm, submetidos à temperatura de cura de 65°. Constatou-se que, quanto maior o teor de aditivo utilizado, melhor se apresentou a trabalhabilidade e que, com o passar do tempo os maiores espalhamentos foram registrados para as pastas com o emprego do aditivo lignosulfonato. A respeito dos ensaios mecânicos os resultados não foram satisfatórios, uma vez que, os aditivos lignosulfonato e policarboxilato não alteraram significativamente o desenvolvimento da resistência mecânica.

**Palavras-chave:** geopolímero, cinza volante, hidróxido de potássio, aditivo dispersante, lignosulfonato de sódio, policarboxilato de sódio.



## ABSTRACT

Geopolymer is a product originated from inorganic polymerization of a material rich in aluminum and silicon oxides in an alkaline solution. Along with, it is possible to add chemical additives to control the water in the mixture. The microstructure and the chemical, physical and mechanical properties vary according to: the precursor materials, the constituents' proportion and the curing conditions. On this perspective, this dissertation describes a study of the geopolymer paste's behavior, based on fly ash, potassium hydroxide and dispersant additive. It was possible to observe that some components varied, such as: the molar concentration of the activator solution potassium hydroxide (8M e 12M), the weight ratio between the activator solution of potassium hydroxide and the fly ash (0,55; 0,60), and the chemical base of the dispersant additives, sodium polycarboxylate (0,2, 0,8 e 1,2%) and sodium lignosulfonate (0,2, 0,8 e 1,2%). By relating the additives use, two parameters were evaluated: the workability, by means of the mini-slump and the mechanical resistance, through the determinations of the flexural and the compression strengths, at ages of 1 to 28 days. Were shaped prismatic concrete specimen of 4cm x 4cm x 16cm, tested under a curing temperature of 65°C. It was determined that the more additive was used, the workability was better and along time the biggest spreading was registered for the pastes using the lignosulfonate additive. Regarding the mechanical tests, the results were not satisfactory, once the lignosulfonate and polycarboxylate additives didn't change significantly the mechanical resistance's development.

**Keywords:** geopolymer, fly ash, potassium hydroxide, dispersant additive, sodium lignosulfonate, sodium polycarboxylate.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do geopolímero.....	26
Figura 2 – Mecanismo de reação da geopolimerização.....	32
Figura 3 – Ação eletrostática dos aditivos plastificante e superplastificante (exceto o policarboxilato).....	35
Figura 4 – Ação estérica do aditivo superplastificante policarboxilato.	36
Figura 5 – Diagrama da etapa 1 do programa experimental.....	40
Figura 6 – Moinho de bolas AMEF, modelo AMBI 480 X 400. ....	42
Figura 7 – Distribuição da porcentagem passante da cinza volante bruta (CV b) e cinza volante moída (CV m). Valores em massa.....	43
Figura 8 – Difratoograma de raio X da cinza volante contendo três principais fases. ....	44
Figura 9 – Agitador mecânico TEDEMIX, modelo ML-03.....	48
Figura 10 – Molde prismático com a placa de vidro. ....	49
Figura 11 – Molde do <i>mini-slump</i> . ....	50
Figura 12 – Ensaio de resistência à flexão. ....	51
Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão. ....	51
Figura 14 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, nas idades de “0”, 30 e 60 minutos. ....	53
Figura 15 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, nas idades de “0”, 30 e 60 minutos. ....	54
Figura 16 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, nas idades de “0”, 30 e 60 minutos.....	54
Figura 17 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, na idade de “0” minuto.....	55
Figura 18 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, na idade de 30 minutos.....	56
Figura 19 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, na idade de 60 minutos.....	56
Figura 20 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, na idade de “0” minuto.....	57
Figura 21 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, na idade de 30 minutos.....	57
Figura 22 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, na idade de 60 minutos.....	58
Figura 23 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, na idade de “0” minuto.....	58
Figura 24 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, na idade de 30 minutos.....	59

Figura 25 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, na idade de 60 minutos.....	59
Figura 26 – Resistência à flexão referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo.....	62
Figura 27 – Resistência à compressão referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo.....	62
Figura 28 – Resistência à flexão referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo.....	64
Figura 29 – Resistência à compressão referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo.....	64
Figura 30 – Resistência à flexão do traço 8MS0,55, com influência do tipo e teor de aditivo. ....	65
Figura 31 – Resistência à flexão do traço 8MS0,60, com influência do tipo e teor de aditivo. ....	66
Figura 32 – Resistência à flexão do traço 12MS0,60, com influência do tipo e teor de aditivo. ....	66
Figura 33 – Resistência à compressão do traço 8MS0,55, com influência do tipo e teor de aditivo.....	67
Figura 34 – Resistência à compressão do traço 8MS0,60, com influência do tipo e teor de aditivo.....	67
Figura 35 – Resistência à compressão do traço 12MS0,60, com influência do tipo e teor de aditivo.....	68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos que utilizam o hidróxido de potássio como solução ativadora.....	31
Tabela 2 – Características físicas da cinza volante bruta (CV b) utilizada, comparada com outros estudos que utilizaram cinza volante.....	41
Tabela 3 – Características químicas do hidróxido de potássio. Valores em massa.....	44
Tabela 4 – Características físicas dos aditivos dispersantes.....	45
Tabela 5 – Dosagem e relações mássicas dos materiais constituintes....	47
Tabela 6 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 8MS0,55, referente à influência do tipo e teor de aditivo.....	81
Tabela 7 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 8MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo.....	81
Tabela 8 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 12MS0,55, referente à influência do tipo e teor de aditivo.....	82
Tabela 9 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 12MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo.....	82
Tabela 10 – Dados de ensaio dos traços de 8MS0,55, referente à influência do tipo e teor de aditivo nas resistências à flexão e à compressão.....	83
Tabela 11 – Dados de ensaio dos traços de 8MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo nas resistências à flexão e à compressão.....	84
Tabela 12 – Dados de ensaio dos traços de 12MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo nas resistências à flexão e à compressão.....	85
Tabela 13 – Resumo da análise estatística referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.....	87
Tabela 14 – Resumo da análise estatística referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.....	88
Tabela 15 – Resumo da análise estatística referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.....	89
Tabela 16 – Resumo da análise estatística referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.....	90
Tabela 17 – Resumo da análise estatística referente aos traços, com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.....	91
Tabela 18 – Resumo da análise estatística referente aos traços, com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.....	91



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABICLOR: Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados  
AG: água  
Al: alumínio  
 $Al_2O_3$ : alumina  
ASTM: *American Society for Testing Materials*  
BNDS: Banco Nacional do Desenvolvimento  
BS: *British Standard*  
CaO: cal  
CO<sub>2</sub>: gás carbônico, dióxido de carbono  
CV: cinza volante  
 $d_{as}$ : massa específica  
EN: Europäische Norm  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: hematita  
h: horas  
H<sub>2</sub>O: água  
HP: solução ativadora expressa em molaridade, hidróxido de potássio  
I: idade de ensaio  
IFA: *Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung*  
KOH: hidróxido de potássio ou potassa cáustica  
LS: lignosulfonato  
M: massa molecular, concentração molar e cátion alcalino  
N: naftaleno  
NANOTEC: Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil  
O: oxigênio  
PC: policarboxilato de sódio  
pH: potencial hidrogênico, indica acidez, neutralidade ou alcalinidade  
PS: polissialato  
PSDS: polissialatodissiloxo  
PSS: polissialatossiloxo  
S: relação solução ativadora por cinza volante  
SA/CV: relação solução ativadora e cinza volante  
Si: silício  
SiO<sub>2</sub>: sílica  
SNIC: Sindicato Nacional de Indústria do Concreto  
SP: silicato de potássio  
SS: silicato de sódio

T: temperatura

TC: tipo de cura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	OBJETIVOS.....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1	GEOPOLÍMEROS .....	25
2.2	CLASSIFICAÇÃO.....	25
2.3	APLICAÇÕES GERAIS .....	26
2.4	PRECURSORES GEOPOLIMÉRICOS .....	27
<b>2.4.1</b>	<b>Cinza volante.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Ativador alcalino .....</b>	<b>28</b>
2.4.2.1	Hidróxido de Potássio .....	29
2.4.2.2	Uso de hidróxido de potássio como ativador na produção de geopolímeros .....	30
2.5	MECANISMO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	32
2.6	ADITIVOS DISPERSANTES .....	34
<b>2.6.1</b>	<b>Modo de ação .....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Influência de aditivos dispersantes nas propriedades dos geopolímeros .....</b>	<b>36</b>
2.7	SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA .....	37
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
3.1	MATERIAIS .....	41
<b>3.1.1</b>	<b>Cinza volante.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Hidróxido de potássio.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Aditivos dispersantes.....</b>	<b>45</b>
3.2	PREPARO DAS MISTURAS .....	45
<b>3.2.1</b>	<b>Proporcionamento das misturas.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Amassamento .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Cura térmica .....</b>	<b>49</b>
3.3	MÉTODOS DE ENSAIO .....	49
<b>3.3.1</b>	<b>Ensaio no estado fresco .....</b>	<b>49</b>
3.3.1.1	Miniabatimento.....	49
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio no estado endurecido .....</b>	<b>50</b>
3.3.2.1	Resistência à flexão .....	50
3.3.2.2	Resistência à compressão.....	51
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
4.1	PRIMEIRA ETAPA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	53
4.2	SEGUNDA ETAPA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>

5.1	QUANTO AO ESPALHAMENTO (TRABALHABILIDADE)	71
5.2	QUANTO ÀS RESISTÊNCIAS À FLEXÃO E À COMPRES-	72
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE 1.....</b>		<b>81</b>
<b>APÊNDICE 2.....</b>		<b>83</b>
<b>APÊNDICE 3.....</b>		<b>87</b>
<b>APÊNDICE 4.....</b>		<b>89</b>
<b>APÊNDICE 5.....</b>		<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é considerado um material importante na construção civil, bastante utilizado mundialmente. Em 2013, de acordo com o relatório anual emitido pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento a produção mundial resultou em 3,7 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável pela produção de 71 milhões de toneladas (SNIC, 2014).

A produção de uma tonelada de cimento Portland produz em torno de uma tonelada de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), o que destaca este material como um grande emissor de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera em razão da queima do calcário e da argila para obtenção do clínquer, o composto principal para a produção do cimento (HARDJITO; TSEN, 2008; BONDAR, *et al.*, 2011).

A preocupação com o meio ambiente é cada vez maior e, uma das formas de evitar um grande impacto ambiental é controlando a emissão de gases poluentes, como  $\text{CO}_2$ . Desta forma, para minimizar tal emissão se faz necessária busca de alternativas sustentáveis para produção de materiais de construção.

Um material que se sobressai sendo menos prejudicial ecologicamente é o geopolímero (DAVIDOVITS, 2002). É resultante do processo da polimerização de materiais com fontes de aluminossilicatos, que podem ser de origem mineral (metacaulim, entre outros) ou resíduos industriais (cinzas volantes, escória de alto forno, entre outros), em solução alcalina (hidróxido de potássio, hidróxido de sódio e silicatos solúveis na maioria dos casos) (HARDJITO; TSEN, 2008).

A cinza volante é um resíduo industrial que tem ganhado destaque como material de partida na produção do geopolímero (MADEJSKA, *et al.*, 2011). Existem vários trabalhos que relatam o uso de cinza volante e o meio alcalino de hidróxido de sódio, e poucos com o uso do hidróxido de potássio. Entretanto, alguns autores abordam que o ativador à base de sódio em mesma proporção ao ativador à base de potássio pode apresentar menores valores de desempenho mecânico.

No processo da geopolimerização o material de partida é misturado em solução alcalina. Esta solução é gerada a partir do ativador alcalino, que pelo fato de se apresentar em forma sólida, é necessário que ocorra a dissolução do mesmo em água, que servirá como artifício para a reação química. Vale-se ressaltar que a água serve apenas como um meio, não atuando na fomação dos produtos responsáveis pelo enrijecimento da matriz geopolimérica, o que torna relevante o controle de sua quantidade (HARDJITO; RANGAN, 2005).

Isto posto, há um interesse no uso de aditivos químicos dispersantes que além de proporcionarem vantagens tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, que incluem a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade, por sua vez, podem reduzir a quantidade de água e promover maior fluidez do material ou conservar a quantidade de água, melhorando a trabalhabilidade da mistura.

Esta dissertação é uma contribuição aos estudos a respeito de geopolímeros, com o intuito de consolidar um grupo de pesquisa a cerca do tema no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

## 1.1 OBJETIVOS

Desenvolvimento de um geopolímero à base de cinza volante, hidróxido de potássio e aditivo dispersante.

Para objetivos específicos pode-se citar:

- Avaliar a trabalhabilidade da pasta geopolimérica fresca em função da influência de base química e teores dos aditivos dispersantes.
- Acompanhar o desempenho mecânico das pastas geopoliméricas.



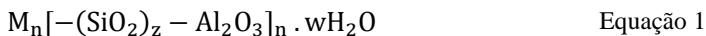
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados os relatos encontrados na literatura sobre geopolímero. Inicialmente será abordada a conceituação, classificação e possibilidades de aplicações gerais, e em seguida, apresentam-se: os materiais precursores, focando na cinza volante; o ativador alcalino, direcionado ao hidróxido de potássio; o mecanismo de geopolimerização e por fim os aditivos dispersantes.

### 2.1 GEOPOLÍMEROS

Geopolímeros são aluminossilicatos tridimensionais obtidos pela policondensação inorgânica, chamada de geopolimerização (DAVIDOVITS, 1991; BONDAR, *et al.*, 2011).

São materiais parecidos aos zeólitos, porém apresentam microestrutura amorfa (XU; VAN DEVENTER, 2000) e podem ser representados pela fórmula empírica (DAVIDOVITS, 1991), na Equação 1:



Onde:

M: é um cátion alcalino;

n: é o grau de polimerização;

z: vale 1, 2 ou 3;

w: é o número de moléculas de água.

O termo “geopolímero” foi patenteado pelo pesquisador francês Joseph Davidovits, por volta dos anos de 1970 (SWANEPOEL; STRYDOM, 2002; KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007), sendo tratado como uma adaptação moderna de processos utilizados em construções antigas, em termos de ligantes estruturais (TORRALBA, GOMES, & JALALI, 2008).

Em estudo sobre as pirâmides do Egito, surgiu a hipótese de terem sido erguidas por ligantes originados pelo homem e não pelo uso de pedras naturais (TORRALBA, GOMES; JALALI, 2008).

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO

Os geopolímeros são classificados conforme a relação de silício-alumínio (Si/Al), resultando em reações de dissolução e

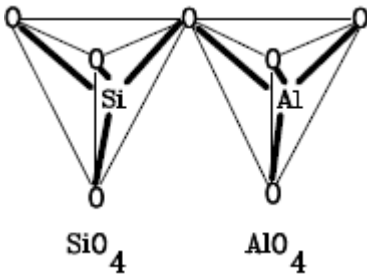
geopolimerização, formando grupos distintos (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, DAVIDOVICS; DAVIDOVITS, 1994), denominados e abreviados como:

- polissialato (PS):  $M_n(\text{Si-O-Al-O})$ , com relação Si/Al = 1;
- polissialatossiloxo (PSS):  $M_n(\text{Al-O-Si-O-Si-O})$ , com relação Si/Al = 2;
- polissialatodissiloxo (PSDS):  $M_n(\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O})$ , com relação Si/Al = 3.

O termo “sialato” foi sugerido para abreviar silício-oxo-aluminato (Si-O-Al-O).

A rede sialato é composta por tetraedros Si e Al, ligados pela alternância do compartilhamento de átomos de oxigênio, conforme mostra a Figura 1 (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, 1994; DAVIDOVICS; DAVIDOVITS, 1994; KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007).

Figura 1 – Estrutura do geopolímero.



Fonte: Davidovits (1991).

### 2.3 APLICAÇÕES GERAIS

A aplicação do geopolímero torna-se dependente da função de composição química do material de partida e do ativador alcalino utilizado (PINTO, 2006).

É um produto interessante, uma vez que, pode substituir os tradicionais materiais na construção civil (XU; VAN DEVENTER, 2002), pelo fato de proporcionar vantagem considerável na redução de gás do efeito estufa (DUXSON, *et al.*, 2007)..

Por apresentar boas propriedades mecânicas quanto a durabilidade, bom desempenho de resistência ao fogo DAVIDOVITS, 1991; KONG, SANJAYAN; SAGOE-CRENTSIL, 2007; MADEJSKA,

*et al.*, 2011), estabilização de resíduos tóxicos ou radioativos (DAVIDOVITS, 1991; XU; VAN DEVENTER, 2002; CIOFFI, MAFFUCCI; SANTORO, 2003; MADEJSKA, *et al.*, 2011), entre outros, sobretudo em materiais de alta tecnologia (CIOFFI, MAFFUCCI; SANTORO, 2003), destaca o empenho para novas pesquisas.

## 2.4 PRECURSORES GEOPOLIMÉRICOS

Os precursores desempenham papel importante na formação do geopolímero. Podendo ser como fonte de silício e alumínio: o caulim, (DAVIDOVITS, 1976), o metacaulim (XU; VAN DEVENTER, 2000; KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007), a cinza volante (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, PALOMO, CRIADO, 2006; KOMLJENOVÍĆ; BAŠČAREVIĆ; BRADIĆ, 2010), a escória de alto-forno (HARDJITO; RANGAN, 2005) e diversos minerais naturais (XU; VAN DEVENTER, 2000). A estes se adiciona o ativador alcalino (DAVIDOVITS, 1991).

O metacaulim, a cinza volante e a escória de alto forno destacam-se entre os materiais de partida (HARDJITO; RANGAN, 2005; DUXSON, *et al.*, 2007; REPETTE, 2010).

Em alguns estudos o metacaulim é preferido por melhor desempenhar o processo da dissolução em meio alcalino, tendo maior facilidade em controlar a relação Si/Al, porém possui alto custo. Deste modo, a cinza volante torna-se preferível, pelo fato de desempenhar resultados satisfatórios em materiais geopoliméricos (DUXSON, *et al.*, 2007), por possuir baixo custo (HARDJITO; RANGAN, 2005) e também por apresentar facilidade de obtenção por tratar-se de resíduo industrial (MADEJSKA, *et al.*, 2011). Já, a escória de alto-forno apresenta um bom desempenho na geopolimerização, porém há complexidade quanto a sua obtenção.

Assim, torna-se interessante a aplicação da cinza volante em geopolímeros.

### 2.4.1 Cinza volante

A cinza volante é um material fino separado do gás de combustão da queima do carvão mineral pulverizado de uma termoelétrica. Basicamente, apresenta composição química de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ) (TAYLOR, 1997).

Em geral, por ser fonte de aluminossilicato é considerada como um bom material de partida para a geopolimerização, principalmente

quando em sua composição apresentar maiores teores de sílica, alumina, hematita (MINÁř, *et al.*, 2011), os quais reagem com o ativador alcalino (HARDJITO; RANGAN, 2005). Desta forma, é importante que o teor de cal seja em menor quantidade, uma vez que, em quantias elevadas influencia negativamente no produto final (VAN JAARSVELD, VAN DEVENTER; LUKEY, 2003; HARDJITO; RANGAN, 2005).

A respeito dos quatro óxidos, o mais relevante é a sílica, pois em teores elevados resultará em melhores resistências mecânicas ao geopolímer (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003).

Fernández-Jiménez e Palomo (2003), ao abordarem sobre bons desempenhos mecânicos do geopolímero, indicam teores ideais dos materiais constituintes da cinza volante: teor de carbono ( $\text{CO}_2$ ) menor que 5%, teor de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) inferior a 10%, teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) entre 40% a 50%; e 80% a 90% das partículas devem ter dimensões menores que 45  $\mu\text{m}$ .

De acordo com Hardjito e Hangan (2005), as partículas da cinza volante apersentam formato esférico com diâmetro de 1  $\mu\text{m}$  até 150  $\mu\text{m}$ . Quanto menores as partículas de cinza, maior será sua reatividade. Isto posto, maior potencial de dissolução e formação dos produtos.

Tais composições e características da cinza volante são variáveis em função da composição e grau de pulverização do carvão, da qualidade e tipo de equipamento da combustão, bem como do modo de coleta da cinza (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003; HARDJITO; RANGAN, 2005).

#### 2.4.2 Ativador alcalino

A ativação alcalina é a reação que hidrolisa a superfície das partículas de fonte de aluminossilicato, composta por um metal alcalino ou alcalino-terroso (DAVIDOVITS, 1991). Sua classificação é apresentada a seguir, sendo M o tipo de metal (PUERTAS, 1995):

- Hidróxidos:  $\text{MOH}$ ,  $\text{M}(\text{OH})_2$ ;
- Sais de ácidos fracos:  $\text{M}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{M}_2\text{S}$ ,  $\text{M}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{MF}$ ;
- Sais de ácidos fortes:  $\text{M}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- Sais de silicatos:  $\text{M}_2 \cdot n\text{Si O}_2$ ;

O teor destes produtos pode influenciar significativamente no desenvolvimento da resistência mecânica (XU; VAN DEVENTER, 2000), havendo evidência de uma dosagem ótima (PALOMO, GRUTZECK; BLANCO, 1999; MADEJSKA, *et al.*, 2011).

Os hidróxidos são os mais utilizados, os quais com seus íons hidroxila em contato com a água quebram as ligações de Si-O-Si, Si-O-Al e Al-O-Al existentes na fase vítrea da cinza volante, formando os grupos de Si-OH e Al-OH que, em seguida, condensam formando o gel (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, PALOMO; CRIADO, 2006).

Dentre estes os que mais se destacam são os hidróxidos de potássio e de sódio. O primeiro é o mais alcalino e, por possuir um maior tamanho do átomo de 1,33 Å, apresenta baixa taxa de dissolução, ao contrário do segundo, cujo diâmetro é de 0,97 Å ((VAN JAARVELD; VAN DEVENTER, 1999).

Segundo o estudo de Phair e Van Deventer (2002) o grau de dissolução não necessariamente se correlaciona beneficemente com as propriedades físicas e mecânicas, mas sim o fenômeno da ionização (VAN JAARVELD; VAN DEVENTER, 1999; PHAIR; VAN DEVENTER, 2002), no qual o maior tamanho do átomo apresenta maior potencial de reação, desenvolvendo matrizes mais resistentes (VAN JAARVELD; VAN DEVENTER, 1999; XU; VAN DEVENTER, 2000; BONDAR, *et al.*, 2011).

A maioria dos estudos que analisaram a cinza volante como material de partida utilizaram o ativador alcalino à base de sódio (HARDJITO; TSEN, 2008). Apesar disso, Weerd (2011), ressalta tais desvantagens: perda drástica de solubilidade com baixas temperaturas, precipitando-se, e mesmo em concentrações equivalentes ao hidróxido de potássio, tende a apresentar maior viscosidade.

De fato, observaram-se limitações de informações disponíveis sobre as propriedades dos geopolímeros com o uso do ativador alcalino à base de potássio. Isso motiva o estudo desse material.

#### 2.4.2.1 Hidróxido de Potássio

O hidróxido de potássio ou potassa cáustica (KOH) é um subproduto, obtido através da passagem de uma corrente elétrica de alta intensidade, também denominada eletrólise, através da solução da salmoura de cloreto de potássio (BNDES, 2009; ABICLOR, 2013).

Paralelamente ao fabrico do hidróxido de potássio também há produção do hidrogênio (H<sub>2</sub>), ambos tidos como elementos altamente reativos (ABICLOR, 2013). Meios tecnológicos foram desenvolvidos para separá-los e, conseqüentemente, mantê-los desta forma. Sendo assim, três processos foram desenvolvidos: diafragma, membrana e mercúrio, diferenciados pelo consumo de energia e pela pureza do produto final (BNDES, 2009; ABICLOR, 2013).

Na forma mais comum, o hidróxido de potássio é uma substância sólida, de cor branca, higroscópica, não combustível, muito solúvel em água, com massa molar de 56,11 g/mol e ponto de ebulição de 1320°C. À temperatura de 20°C, apresenta massa específica de 2,04 g/cm<sup>3</sup> e coeficiente de solubilidade igual a 1.130 g/L. O pH é igual a 14 quando em concentração de 56 g/L (IFA, 2010).

É um material bastante corrosivo e perigoso à saúde humana, devendo-se ter o maior cuidado em seu manuseio. Já, sua emissão para a atmosfera não é preocupante pelo fato de ser rapidamente neutralizado pelo dióxido de carbono presente na mesma (EUROCHLOR, 2013).

Apresenta diversas funções e diferentes usos, sendo bastante empregado em processos industriais, como a fabricação de fertilizantes, carbonato de potássio (ou outros sais de potássio), produtos químicos orgânicos, detergentes e pilhas alcalinas. Ainda, tem possibilidade de ser inserido a materiais em pequeno volume, tais como produtos de limpeza de drenagem, removedores de tinta e desengordurantes (EUROCHLOR, 2013).

#### 2.4.2.2 Uso de hidróxido de potássio como ativador na produção de geopolímeros

Na literatura, alguns estudos que utilizam o hidróxido de potássio como solução ativadora, restrito à cinza volante, retratam determinados parâmetros, conforme a Tabela 1, na qual se especifica a taxa de resistência à compressão obtida, de acordo com a divulgação do autor, bem como o uso ou não de silicato, a temperatura de cura e a idade dos corpos de prova.

Tabela 1 – Estudos que utilizam o hidróxido de potássio como solução ativadora.

AUTOR (ANO)	HP (M)	TS	TC (°C)	I	RC (MPa)	Resumo
Palomo, Grutzeck e Blanco (1999)	18	-	65 85	24 horas	3,9 e 8,7 para 65°C 23,3 e 27,3 para 85°C	Quanto maior a relação solução ativadora/cinza volante e a temperatura de cura, maior será a resistência mecânica.
Hardjito e Tsen (2008)	6, 8, 10, 12 e 14	SP	60	1 dia 7 dias 28 dias	18-66 29-71 31-71	Aumento da concentração molar causa ganho significativo na resistência à compressão.
Komljenović, Baščarević e Bradić (2010)	-	-	55	7 dias	2,46	A resistência mecânica aumenta com o aumento da concentração molar.
Madejska <i>et al.</i> (2011)	10 e 16	-	60	8 dias	22 17	O aumento da concentração molar reduz a resistência à compressão.

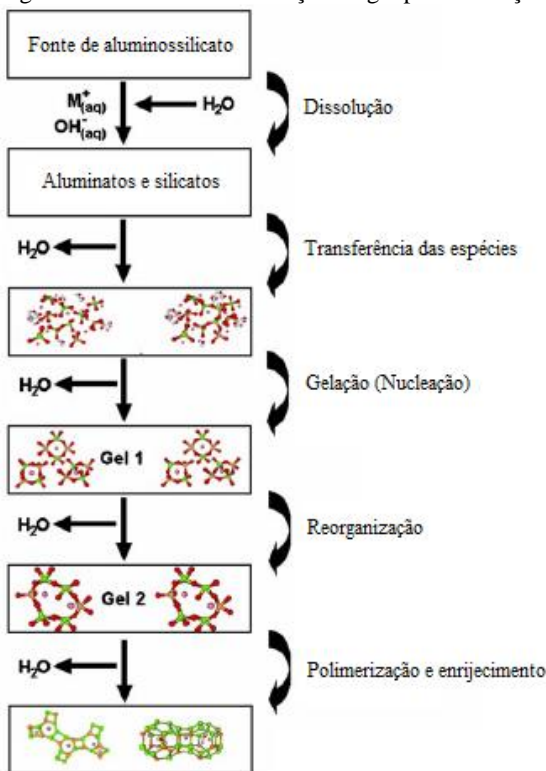
Legenda: HP (hidróxido de potássio); M (molaridade); TS (tipo de silicato), SP (silicato de potássio); TC (temperatura de cura); I (idade), RC (resistência à compressão).

De modo geral, estudos geopoliméricos a partir de cinza volante com ativação alcalina de hidróxido de potássio são pouco difundidos na literatura. Por isto, torna-se interessante estudar misturas geopoliméricas à base desses materiais.

## 2.5 MECANISMO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO

A geopolimerização é um processo exotérmico (DAVIDOVITS, 1991) que necessita de meio alcalino para ocorrer a dissolução da fonte de aluminossilicato (VAN JAARSVELD, VAN DEVENTER; LORENZEN, 1996; DUXSON, *et al.*, 2007), conforme o modelo conceitual apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Mecanismo de reação da geopolimerização.



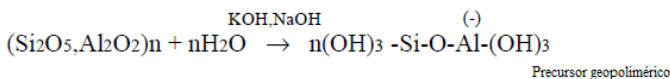
Fonte: Adaptado de Duxson, *et al.* (2007).

A dissolução dos produtos reativos forma um gel na reação, fase gelação (SWANEPOEL; STRYDOM, 2002; DUXSON, *et al.*, 2007; KHALE; CHAUDHARY, 2007). Logo, o sistema continua a se reorganizar, aumentando a conexão da rede gel, originando uma rede de aluminossilicatos tridimensionais, que compõem a fase enrijecida (DUXSON, *et al.*, 2007).

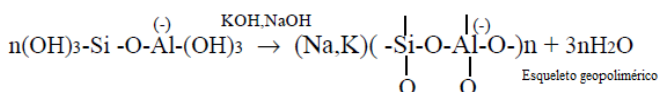


Caso pretenda-se acelerar a dissolução incorporam-se silicatos solúveis (VAN JAARVELD, VAN DEVENTER; LORENZEN, 1996; KHALE; CHAUDHARY, 2007).

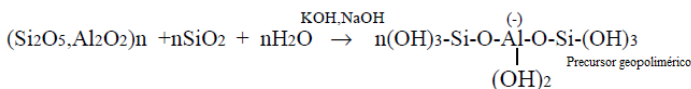
A síntese deste fenômeno é ilustrada nas Equações 2 e 3 (polissialato), Equações 4 e 5 (polissialatossiloxo) (DAVIDOVITS, 1991), onde possivelmente qualquer material de Si-Al pode tornar-se materiais de geopolimerização (DAVIDOVITS, 1991; VAN JAARVELD, VAN DEVENTER; LORENZEN, 1996; XU; VAN DEVENTER, 2000).



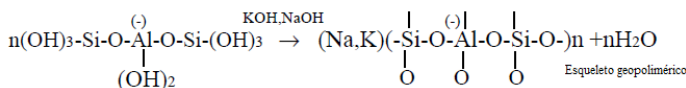
Equação 2



Equação 3



Equação 4



Equação 5

Observa-se que durante a reação química da geopolimerização a água atua como meio de transporte para que o ativador alcalino possa atingir todas as regiões de sólido (HARDJITO; RANGAN, 2005).

No trabalho de Santa (2012), são abordados alguns estudos que tratam sobre os efeitos positivos e negativos da água na geopolimerização. Caso seja utilizada em pequena quantidade, a dissolução dos aluminatos e silicatos será mais rápida, favorecendo o grau de polimerização do sistema. Se, a quantidade de água for muito pequena, partes do sistema não receberão o ativador alcalino, ocasionando efeito prejudicial, diminuindo o grau de polimerização e

enfraquecendo o sistema, resultando em poros após o endurecimento da mistura (PANIAS; GIANOPOULOU, 2006).

Em contrapartida, havendo quantidade elevada de água, o efeito também é negativo. Sendo assim, a água leva à formação de cristais maiores, o que diminui a superfície das partículas e, conseqüentemente, reduz a resistência mecânica do material (OLIVIA, SARKER; NIKRAZ, 2008).

Percebe-se relevância no controle da quantidade de água na geopolimerização com intuito de beneficiar a mistura do material, logo, desperta-se o interesse para o emprego de aditivos químicos dispersantes.

## 2.6 ADITIVOS DISPERSANTES

Os aditivos químicos nos dias atuais são parte integrante de misturas cimentícias pelo fato de proporcionarem vantagens às propriedades nos estados fresco e endurecido (HARTMANN, *et al.*, 2011).

Os aditivos dispersantes sobressaem-se em função de proporcionarem melhoria na trabalhabilidade, minimizando o atrito interno devido à dispersão das partículas sólidas presentes na mistura, fenômeno conhecido como defloculação, dependente do tipo de aditivo utilizado (MARTIN, 2005; HARTMANN, *et al.*, 2011).

Estes podem ser de baixo desempenho conhecidos como plastificantes, apresentando redução de água da mistura entre 8-10% (utilizando cimento Portland), tendo como principal fonte à base de lignosulfonato. E de alto desempenho, sendo os superplastificantes, com redução de água de mistura em até 30% (utilizando cimento Portland), com principais bases químicas de formaldeído naftaleno sulfonado, formaldeído melamina sulfonado e policarboxilato (RAMACHANDRAN, *et al.*, 1998).

Os aditivos baseados em lignosulfonatos (LS) costumam proporcionar uma boa manutenção de trabalhabilidade, porém podem incorporar ar à mistura e causar retardamento de pega do cimento. Aditivos à base de condensados de naftaleno sulfonado (NS) apresentam boa ação com grande parte dos cimentos, sendo que podem retardar a pega a altas dosagens; geralmente incorporam pouco ar à mistura. Os Aditivos baseados em condensados de formaldeído melamina (MS) tendem a retardar a pega do cimento pelo fato de conter melamina em sua composição; em geral, não incorporam ar à mistura. Os aditivos à base de policarboxilato são os mais utilizados em material à base de

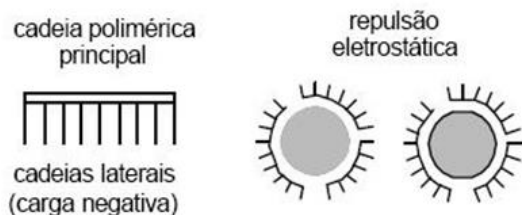
cimento Portland, justamente por minimizar a viscosidade, promover maior fluidez, ou mesmo, mantê-la por mais tempo (MARTIN, 2005; REPETTE, 2005).

### 2.6.1 Modo de ação

O modo de ação do efeito dispersante gera bastante discussão. A maioria dos autores concorda que os aditivos plastificante e superplastificante, exceto o policarboxilato, apresentam ação de dispersão por repulsão eletrostática (Figura 3), a qual é tida a partir do momento que o aditivo se adsorve na superfície das partículas sólidas, gerando um carregamento negativo, causando a defloculação, e ainda, podendo causar alguma incorporação de ar (RAMACHANDRAN, *et al.*, 1998).

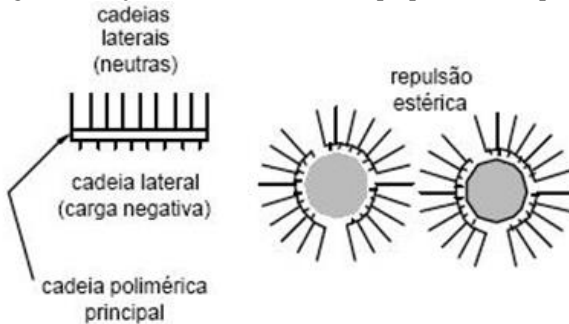
Entretanto, os policarboxilatos podem atuar tanto com força eletrostática quanto por forças estéricas (Figura 4), nas quais o polímero adsorvido forma uma “barreira física” evitando a aproximação das partículas umas das outras, devido às longas cadeias poliméricas (COLLEPARDI, 1998; RAMACHANDRAN, *et al.*, 1998).

Figura 3 – Ação eletrostática dos aditivos plastificante e superplastificante (exceto o policarboxilato).



Fonte: Hartmann *et al.* (2011).

Figura 4 – Ação estérica do aditivo superplastificante policarboxilato.



Fonte: Hartmann *et al.* (2011).

### 2.6.2 Influência de aditivos dispersantes nas propriedades dos geopolímeros

Existem dúvidas quanto ao modo de ação dos aditivos dispersantes ser o mesmo para o cimento Portland e para os geopolímeros. Desta forma, há interesse em estudar a influência destes aditivos nas propriedades dos geopolímeros.

De acordo com Hardjito, Wee e Fu Ee (2011), em estudo de argamassa, apontaram cinco relações de solução ativadora de hidróxido de potássio e cinza volante (SA/CV), sendo: (I) SA/CV = 0,325 (referência), (II) SA/CV = 0,429, (III) SA/CV = 0,518, (IV) SA/CV = 0,597 e (V) SA/CV = 0,709, com a utilização do silicato de potássio, nas idades de 7 e 28 dias. A pasta de referência apresentou-se mais rígida, melhorando significativamente a trabalhabilidade com o incremento do teor de hidróxido de potássio e também com a utilização do aditivo superplastificante policarboxilato. Quanto à resistência à compressão, o melhor desempenho foi para (IV) SA/CV = 0,597, com o efeito mais significativo do aditivo em 1% aos 28 dias (61 MPa), seguido pela redução progressiva da resistência acima desta proporção.

Kong e Sanjayan (2010) estudaram o efeito de dois aditivos superplastificantes, um à base de naftaleno sulfonado (NS), e outro, à base de policarboxilato (PC), em concretos geopoliméricos à base de cinza volante ativada com hidróxido de potássio e silicato de sódio. Os autores relataram que não houve melhora significativa na trabalhabilidade, porém o aditivo policarboxilato apresentou menos efeito deletério quando comparado com o aditivo NS. Utilizaram teor de 1,19% do aditivo NS em relação à massa de cinza volante, havendo uma

maior perda de resistência à compressão (54%), sendo o valor de 55,1 MPa com 3 dias de idade, enquanto que para amostras utilizando teor de 3,3% do aditivo PC, a perda de resistência à compressão foi de 21,8%, sendo o valor de 32,5 MPa com 3 dias de idade.

Nota-se que é pouco propagado na literatura o uso de aditivos dispersantes com ativação alcalina de hidróxido de potássio. Basicamente, é possível encontrar com a utilização do aditivo policarboxilato. Ao tratar-se dos demais aditivos dispersantes quase nada existe, principalmente quanto ao lignosulfonato e condensados de melamina, pois constatou-se apenas seu uso em estudos que desenvolveram misturas com ativação alcalina de hidróxido de sódio.

## 2.7 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA

Conforme apresentado neste trabalho, os geopolímeros podem ser considerados como materiais alternativos na construção civil. Contudo, ainda não se consolidou como substituto do cimento Portland, provavelmente pelo fato de apresentar limitação de informações sobre aspectos de manuseio com segurança, de trabalhabilidade, de reologia ao se tratar do estado fresco, e resistência mecânica e durabilidade ao se tratar do estado endurecido. Por esses motivos, pesquisadores se motivam a estudar o comportamento do geopolímero e suas propriedades.

Percebeu-se que qualquer material composto principalmente por óxidos de alumínio e de silício submetidos a um meio alcalino podem ser considerados como material de partida para o geopolímero. Deste modo, o presente estudo optou pelos materiais descritos a seguir:

- Material de partida: cinza volante, tida como um resíduo industrial.
- Solução ativadora (ativador alcalino): hidróxido de potássio, que apesar de apresentar um maior custo, quando comparado ao hidróxido de sódio, apresenta na bibliografia influências positivas nas propriedades mecânicas do geopolímero.

De acordo com os autores Hardjito e Tsen (2008) e Komljenović, Bašcarević e Bradić (2010), o aumento da concentração molar do ativador alcalino causa ganho significativo na resistência mecânica. No entanto, Madejska et. Al. (2011), afirmam que o aumento da concentração molar do ativador alcalino gera perda significativa na resistência mecânica. Basicamente, tudo dependerá da existência de um

teor ótimo, atrelado aos materiais utilizados, às dosagens consideradas e, até mesmo, às condições de cura.

Pode ser utilizado aditivo químico dispersante superplastificante, capaz de melhorar ou manter a trabalhabilidade no estado fresco da mistura e até possibilitar efeito positivo no seu estado endurecido. Porém, deve-se atentar aos teores e às suas bases químicas. Adotaram-se para o estudo os aditivos dispersantes policarboxilato e lignosulfonato, o primeiro por ser o mais utilizado e o segundo por não ser encontrado na literatura. Os dois com o propósito de verificar a influência nas propriedades dos geopolímeros: espalhamento no estado fresco através do ensaio de miniabatimento, e resistências à flexão e à compressão.

Ainda é possível empregar silicato solúvel à base de potássio e/ou sódio, acelerando o potencial de reação, em função da maior liberação de sílica para a policondensação. Porém, por necessidade de limitar o trabalho com o intuito de contribuir aos estudos do tema geopolímero, optou-se por não aplicar nenhum tipo de silicato solúvel.

No que diz respeito à cura térmica, a temperatura pode ser de até 85°C, considerando um tempo de uso comum entre 2 e 24 horas, podendo chegar a até 120 horas, possibilitando o desmolde das amostras, mantendo-as em cura ambiente até a idade dos ensaios. Para este trabalho, a temperatura de cura foi fixada em 65°C.

Isto posto, buscou-se desenvolver o estudo experimental em geopolímeros à base de cinza volante, hidróxido de potássio e aditivos dispersantes.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais e procedimentos que foram utilizados no desenvolvimento do programa experimental.

Visando uma possível composição de um trabalho futuro (estudo comparativo), a metodologia foi matinda, bem como alguns materiais e parâmetros, conforme o trabalho de Cesari (2015), a qual adotou os mesmos parâmetros e as mesmas matérias primas (cinza volante e hidróxido de sódio) relatadas e utilizadas no trabalho de Livi (2013). Cesari (2015) acrescentou ao estudo o uso de aditivos dispersantes, fazendo uma avaliação do estado fresco e endurecido das misturas geopoliméricas.

Neste trabalho, a composição do geopolímero foi baseada em cinza volante como fonte de aluminossilicato e o hidróxido de potássio como ativador alcalino, mais água e aditivos dispersantes.

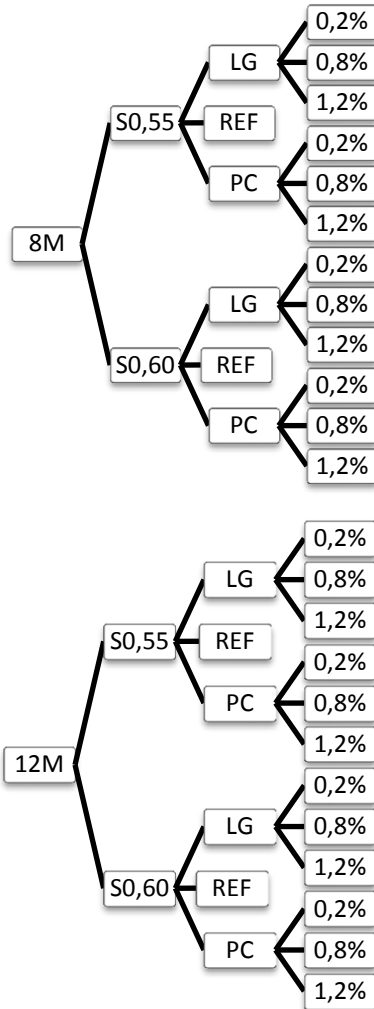
Existiram duas etapas neste estudo, no primeiro momento a trabalhabilidade foi avaliada pelo método de miniabatimento, conhecido por *mini-slump*, e no segundo momento acompanhou-se o desenvolvimento mecânico, por meio da determinação da resistência à flexão e à compressão.

Na primeira etapa foram confeccionadas pastas geopoliméricas, compostas por:

- Relação de hidróxido de potássio e água destilada: 8M e 12M;
- Relação mássica de solução ativadora e cinza volante (S): 0,55 e 0,60;
- Aditivos dispersantes: Lignosulfonato (LS) e Policarboxilato (PC);
- Teor de aditivo em relação à massa de cinza volante: 0,2%, 0,8% e 1,2%.

Baseado nos referidos dados, totalizaram-se 28 traços referentes às pastas geopoliméricas, representados na Figura 5. Na primeira coluna do diagrama estão descritas as concentrações molares da solução ativadora (8M e 12M). Na segunda coluna, as relações mássicas entre solução ativadora/cinza volante (S0,55 e S0,60). Na terceira coluna, a presença ou não de aditivo dispersante e seu tipo (LS, PC e REF – mistura de referência sem aditivo). E, na última coluna, os teores de aditivo em relação à massa de cinza volante (0,2, 0,8 e 1,2%).

Figura 5 – Diagrama da etapa 1 do programa experimental.



Desta forma, de posse dos traços executados foi possível a obtenção do espalhamento de cada pasta geopolimérica, através do ensaio de miniabatimento, conforme o tipo e teor de aditivo. As pastas foram avaliadas no momento após a mistura (espalhamento inicial) e nas idades de 30 e 60 minutos para verificação da manutenção de abatimento.



Na segunda etapa do programa experimental, foram moldados 6 corpos de prova prismáticos para as misturas que apresentaram o maior espalhamento para cada tipo de aditivo, no tempo “0 minuto”(espalhamento inicial – idade em que os corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência foram moldados).

A cura foi realizada em estufa microprocessada, à temperatura de 65°C. Esta escolha foi baseada no estudo de Livi (2013), que se verificou em misturas com concentrações molares de 8 M e 12 M resultados de resistência mecânica equivalentes para as temperaturas de 65°C e 85°C.

No estado endurecido, os corpos de prova foram submetidos à resistência à flexão e à resistência à compressão, nas idades de 1 e 28 dias.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Cinza volante

Como material de partida foi utilizada a cinza volante, disponibilizada pela Empresa Tractebel Energia, sendo um material oriundo da Central Termoelétrica Jorge Lacerda, Capivari de Baixo, SC.

A distribuição granulométrica da cinza volante apresentava um diâmetro médio (D50) de 68,97  $\mu\text{m}$ . Na Tabela 2, é apresentada uma comparação entre a cinza volante bruta (CV b) utilizada com outras pesquisas desenvolvidas que utilizaram a cinza volante.

Tabela 2 – Características físicas da cinza volante bruta (CV b) utilizada, comparada com outros estudos que utilizaram cinza volante.

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>DIÂMETRO (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Cinza Volante bruta (CV b)	90 % < 197,5 50% < 68,97
Férrandez-Jiménez e Palomo (2006)	90% < 45,00 50% < 10,00
Hardjito e Rangan (2005)	80% < 46,67

Através da comparação percebeu-se considerável diferença entre os diâmetros das partículas da cinza volante bruta (CV b) utilizada e as demais. Portanto, optou-se por moer a cinza volante bruta em moinhos de bolas AMEF, modelo AMBI 480 X 400 (Figura 6), com rotação de 39 rpm, com 120 bolas de aço de 29,7 mm de diâmetro e 1310 g de

massa cada, juntamente a 150 bolas de 19,2 mm e 360 g. A moagem foi realizada em lotes de 6kg de cinza volante, sem adição de agente químico de moagem. Cada lote foi moído em cinco ciclos de 90 minutos cada.

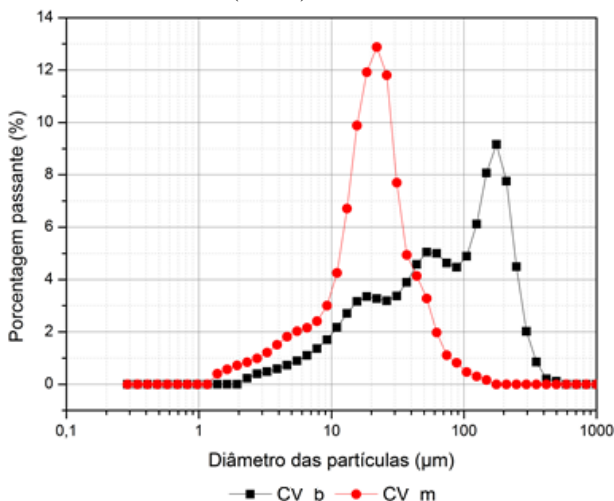
Figura 6 – Moinho de bolas AMEF, modelo AMBI 480 X 400.



Após a realização da moagem, a distribuição granulométrica da cinza volante moída (CV m) apresentou um diâmetro médio das partículas (D50) de 20,00  $\mu\text{m}$ , conseqüentemente, um maior teor de partículas finas em comparação à cinza volante bruta (CV b), com o D50 = 68,97  $\mu\text{m}$ . Deste modo, as partículas com valor do D50 = 20,00  $\mu\text{m}$  da cinza volante moída se aproximaram da informação fornecida por Fernández-Jiménez e Palomo (2006).

Para obtenção da distribuição granulométrica, utilizou-se granulometria a *laser*, via seca, em equipamento da marca Microtrac, modelo S3500. Na Figura 7, comparam-se as distribuições das porcentagens passantes da cinza volante bruta e cinza volante moída.

Figura 7 – Distribuição da porcentagem passante da cinza volante bruta (CV b) e cinza volante moída (CV m). Valores em massa.

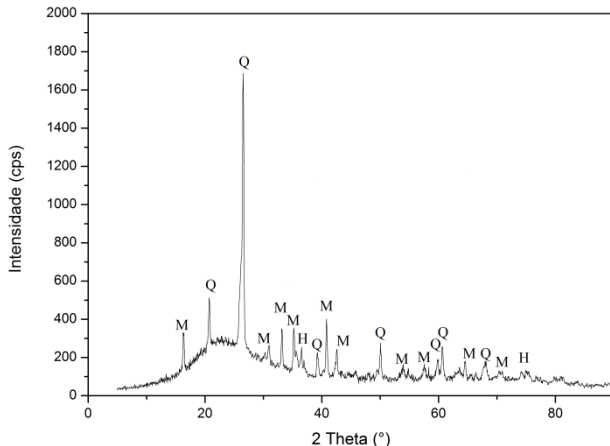


A massa específica da cinza volante moída (CV m), igual a  $2,36 \text{ g/cm}^3$ , foi obtida através do ensaio de picnometria, conforme descrito na ABNT NBR 6508:1984.

Através do ensaio de difratometria de raio X foram identificadas três fases principais encontradas na cinza volante moída (CV m) (Figura 8). Tais fases são: quartzo (Q), mulita (M) e hematita (H).

O difratograma foi obtido por meio do difratômetro miniflex II, marca Rigaku, com o uso de ânodo de cobre, corrente de 15 mA, tensão de 30kV no intervalo de  $5^\circ$  a  $90^\circ$ , com taxa de varredura de  $3^\circ$  por minuto. O programa de análise foi o PANalytical X'Pert Higer Score, tendo como banco de dados PDF<sub>2</sub>, da ICSS (International Centre for Diffraction Data).

Figura 8 – Difratoograma de raio X da cinza volante contendo três principais fases.



Legenda: quartzo (Q), mulita (M) e hematita (H).

### 3.1.2 Hidróxido de potássio

O hidróxido de potássio foi utilizado como o ativador alcalino, fornecido em forma de lentilhas pela Empresa LAFAN Química Fina Ltda. Na Tabela 3, encontram-se suas características fornecidas pela empresa fabricante.

Tabela 3 – Características químicas do hidróxido de potássio. Valores em massa.

COMPOSTO	LIMITE	RESULTADOS
Teor (KOH)	Mín. 85 %	87,88 %
Carbonato de Potássio (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Máx. 2,0 %	< 0,52 %
Sódio (Na)	Máx. 0,3 %	< 0,3 %
Cloreto (Cl)	Máx. 200 ppm	< 200 ppm
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Máx. 50 ppm	< 50 ppm
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	Máx. 10 ppm	< 10 ppm
Alumínio (Al)	Máx. 5 ppm	ND ppm
Ferro (Fe)	Máx. 10 ppm	< 10 ppm
Metais pesados (como Pb)	Máx. 10 ppm	< 10 ppm
Cálcio (Ca)	Máx. 10 ppm	ND
Níquel (Ni)	Máx. 4 ppm	ND
Arsênico (As)	Máx. 1 ppm	ND

Legenda: ND (não determinado). Fonte: LAFAN (2013).

### 3.1.3 Aditivos dispersantes

Dois aditivos químicos dispersantes foram utilizados, um de base de policarboxilato de sódio (PC) e outro de base de lignosulfonato de sódio (LS).

Estes aditivos foram fornecidos pela Empresa Grace Construction Products. São denominados comercialmente como ADVA™ Cast 585 (policarboxilato) e MIRA™ RT 118 (lignosulfonato). Suas principais características, disponibilizadas pela Empresa, estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características físicas dos aditivos dispersantes.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>ADVA™ CAST 585</b>	<b>MIRA™ RT 118</b>
Classificação (ABNT NBR 11768:2011)	Superplastificante SP II	Redutor de água/Plastificante PR
Aspecto	Líquido	Líquido
Cor	Amarelo claro a âmbar	Marrom escuro
Massa específica	1,060 g/cm <sup>3</sup>	1,185 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	34 %	42 %

Fonte: Grace (2014).

## 3.2 PREPARO DAS MISTURAS

### 3.2.1 Proporcionamento das misturas

Baseando-se no proporcionamento de misturas apresentado por Livi (2013), a relação mássica entre solução ativadora/cinza volante (S) é expressa pela Equação 6, onde  $m_{SA}$  é a massa de solução ativadora (g) e  $m_{CV}$  a massa de cinza volante (g).

$$S = \frac{m_{SA}}{m_{CV}} \quad \text{Equação 6}$$

A partir de então, foi possível determinar o volume de pasta ( $V_{pasta}$ ) para cada um dos valores de S (0,55 e 0,60) através da Equação 7, onde  $d_{SA}$  é a massa específica da solução ativadora (g/cm<sup>3</sup>) e  $d_{CV}$  a massa específica da cinza volante (g/cm<sup>3</sup>).

$$V_{pasta} = \frac{m_{CV}}{d_{CV}} + \frac{m_{SA}}{d_{SA}} \quad \text{Equação 7}$$

O volume de material confeccionado de cada mistura para a primeira etapa foi de 140 cm<sup>3</sup>, referente ao mini-slump e mais um volume de 30%, considerado como perda de material. Quanto à segunda etapa, foram confeccionados 995,89 cm<sup>3</sup> de material, correspondentes a um conjunto de fôrmas prismáticas, contendo 3 prismas de 4 cm x 4cm x 16 cm, com um volume extra de 30% em caso de perdas.

Desta forma, a massa de solução ativadora corrigida ( $m'_{SA}$ , g) para produzir tais volumes foi obtida por meio da Equação 8, onde  $V_{etapa}$  é o volume por etapa.

$$m'_{SA} = \frac{V_{etapa} \cdot m_{SA}}{V} \quad \text{Equação 8}$$

Quanto à massa de cinza volante ( $m'_{CV}$ , g), foi determinada através da Equação 9.

$$m'_{CV} = \frac{m_{SA}}{S} \quad \text{Equação 9}$$

A massa de hidróxido de potássio ( $m_{HS}$ , g) foi calculada pela Equação 10, sendo  $\tau$  a massa do soluto em relação à solução – teor de sólidos, e através da Equação 11 a massa de água ( $m_{AG}$ , g).

$$m_{HP} = m_{SA} \cdot \tau \quad \text{Equação 10}$$

$$\text{onde, } \tau = \frac{[\text{KOH}] \cdot M}{d_{SA}}$$

$$m_{AG} = m_{SA} - m_{HP} \quad \text{Equação 11}$$

Embasados nessa metodologia de cálculo apresentada, verifica-se Na Tabela 5 a dosagem dos materiais e relações mássicas entre os constituintes. É interessante ressaltar, que as misturas de 12MS0,55 possuíram baixa trabalhabilidade, o que impediu a realização da moldagem dos corpos de prova. Assim, justificam-se seus valores tabelados em relação às demais misturas.

Tabela 5 – Dosagem e relações mássicas dos materiais constituintes.

MISTURA	m'CV (g)	m'SA (g)	mHP (g)	mAG (g)	CV/ HP	CV/ AG	HP/ AG
8M S0,55	1200,18	660,1	268,8	439,36	4,46	2,73	0,61
8M S0,60	1147,87	688,72	280	517,02	4,10	2,22	0,54
12M S0,55	239,06	131,48	67,2	72,8	3,56	3,28	0,92
12M S0,60	1202,39	583,73	403,2	432,24	2,98	2,78	0,93

### 3.2.2 Amassamento

As soluções de cada concentração molar e água destilada foram realizadas em béquer. A reação do hidróxido de potássio com a água é altamente exotérmica. Por esta razão, esperou-se que a solução atingisse uma temperatura de  $22^{\circ} \pm 2^{\circ}$ , permitindo assim o seu manuseio, para que pudesse ser transferida para um balão volumétrico, onde se realizou o ajuste de volume e homogeneização.

A quantidade de soluto de hidróxido de potássio foi determinada através da Equação 12, onde  $[\text{KOH}]$  é a concentração molar (M ou mol/L),  $m$  a massa de soluto (g),  $M$  a massa molecular (56,11 g/mol) e  $V$  o volume do balão volumétrico (mL).

$$[\text{KOH}] = \frac{m}{M \cdot V} \quad \text{Equação 12}$$

As soluções foram pesadas para cálculo da massa específica ( $d_{\text{SA}}$ ,  $\text{g/cm}^3$ ), a partir da relação entre a massa e o volume da solução.

À solução ativadora foi incorporada a cinza volante e o amassamento foi realizado em agitador mecânico da marca TEDEMIX, modelo ML-03 (Figura 9), com frequência de agitação de 25 Hz, potência de 0,75 HP e haste do tipo *cawles*.

Figura 9 – Agitador mecânico TEDEMIX, modelo ML-03.



A mistura ocorreu durante 5 minutos, sendo que nos primeiros 2 minutos fez-se uma pausa (no máximo de 1 minuto), para se retirar o acúmulo de material na parede do equipamento e se adicionar o aditivo.

Após a mistura, obteve-se a pasta geopolimérica, destinada ao ensaio de trabalhabilidade, conforme o item **3.3.1.1 Miniabatimento**.

Desta forma, foi possível a moldagem dos corpos de prova a partir das pastas que apresentaram maior espalhamento, quando comparadas com a pasta de referência.

### **3.2.3 Moldagem dos corpos de prova**

A pasta foi vertida em um conjunto de moldes prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, os quais foram revestidos com filme de plástico de PVC, facilitando o desmolde do material, o que evitou possíveis danos que poderiam interferir nos resultados dos ensaios. Foram vedadas com massa de modelar as “mini aberturas” das paredes do molde com a base, evitando um possível vazamento das misturas. Moldaram-se 3 corpos de prova para cada idade (1 e 28 dias).

Posteriormente à moldagem, uma placa de vidro envolta em plástico foi sobreposta aos prismas, visando diminuir a evaporação da água da mistura (Figura 10).



Figura 10 – Molde prismático com a placa de vidro.



### 3.2.4 Cura térmica

Baseado em estudos de Livi (2013), realizou-se a cura térmica por um período de 22 horas, por meio de estufa microprocessada, tendo circulação forçada de ar a 65°C. Após este período, a estufa foi desligada e os corpos de prova foram resfriados naturalmente ainda no interior da estufa, até completar o período de 24h. Assim sendo, os moldes contendo os corpos de prova foram retirados da estufa e a desmoldagem foi realizada.

## 3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

### 3.3.1 Ensaio no estado fresco

Através do miniabatimento foi determinada a trabalhabilidade das misturas. Este método foi descrito por Kantro (1980), sendo bastante parecido com o ensaio de abatimento do concreto.

#### 3.3.1.1 Miniabatimento

Para tal ensaio, se utilizou um *mini-slump* (Figura 11), sendo um molde cilíndrico com interior de cone invertido, com menor diâmetro de 2,5 mm, maior diâmetro 41,7 mm e altura de 60,7 mm. Tendo como vantagem o uso de pequena quantidade de material, o que possibilitou a análise de uma possível exsudação e segregação.

Figura 11 – Molde do *mini-slump*.



Para a realização deste ensaio houve o preenchimento de pasta até o completo preenchimento do tronco-cônico. Posteriormente, o molde foi removido na direção vertical, promovendo o espalhamento do material. Ao fim do espalhamento, com o auxílio de um paquímetro, foram medidos três diâmetros, os quais resultaram em um valor médio que representou a mistura ensaiada.

Objetivando a determinação da manutenção de abatimento, houve repetição do ensaio a cada 30 minutos no período total de 1 hora, com a temperatura ambiente de  $22^{\circ} \pm 2^{\circ}$ . Em busca de homogeneidade do material houve remistura manual com auxílio de uma espátula, nas idades de 30 e 60 minutos.

### 3.3.2 Ensaio no estado endurecido

Os ensaios abordados a seguir foram realizados conforme a norma Europeia BS EN 196-1:2005 - *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*.

#### 3.3.2.1 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão, Figura 12, foi realizado em uma prensa de marca INSTRON, modelo 5569, com taxa de carregamento de  $50 \pm 10$  N/s. A tensão de ruptura foi calculada pela Equação 13, onde  $R_f$  é o valor de resistência à flexão (MPa),  $F_f$  a carga de ruptura na flexão (N),  $l$  a distância entre os apoios (mm),  $b$  a base (mm) e  $h$  a altura da seção transversal (mm).

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot h^2} \quad \text{Equação 13}$$

Figura 12 – Ensaio de resistência à flexão.



### 3.3.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão, Figura 13, foi realizado a partir das duas metades de prisma, resultantes do ensaio de resistência à flexão. Ambas as peças foram ensaiadas numa prensa da marca INSTRON, modelo 5569, com taxa de carregamento de  $2400 \pm 200$  N/s.

Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão.



Nas faces superior e inferior, foram posicionadas chapas de aço de seção quadrada (40 mm x 40 mm) para promover a distribuição da carga em uma seção homogênea e constante.

A tensão foi calculada através da Equação 14, onde  $R_c$  é a resistência à compressão (MPa),  $F_c$  a carga de ruptura à compressão (N) e 1600 a área de aplicação de carga (40 mm x 40 mm).

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Equação 14

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os itens a seguir apresentam as análises dos dados da primeira e segunda etapa do programa experimental, bem como suas implicações para se atingir os objetivos definidos.

### 4.1 PRIMEIRA ETAPA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os resultados do ensaio de miniabatimento foram agrupados por traço, e em seguida, foram avaliados para cada composição de pasta. Tais resultados são apresentados em forma de gráfico e discutidos na sequência.

Vale ressaltar que não foram feitos os gráficos referentes às misturas de traço 12MS0,55, pois as mesmas apresentaram baixa trabalhabilidade, o que impossibilitou o manuseio de material para o ensaio de miniabatimento.

Os valores de todos os pontos das figuras pertinentes a esta etapa encontram-se no APÊNDICE 1, descritos nas Tabelas 6 a 9.

Primeiramente, são apresentados os gráficos realizados com base nos resultados de espalhamento e manutenção de abatimento no decorrer do tempo, representados nas Figuras 14 a 16.

Figura 14 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, nas idades de “0”, 30 e 60 minutos.

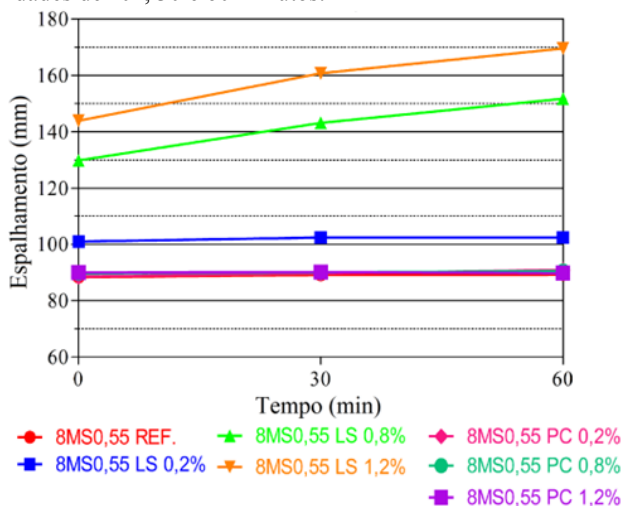


Figura 15 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, nas idades de “0”, 30 e 60 minutos.

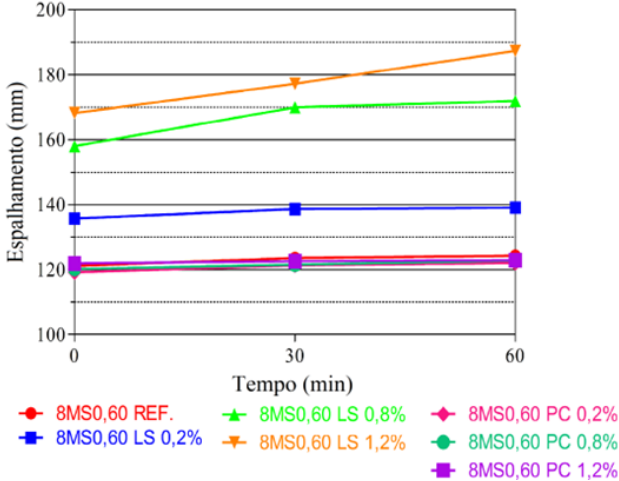
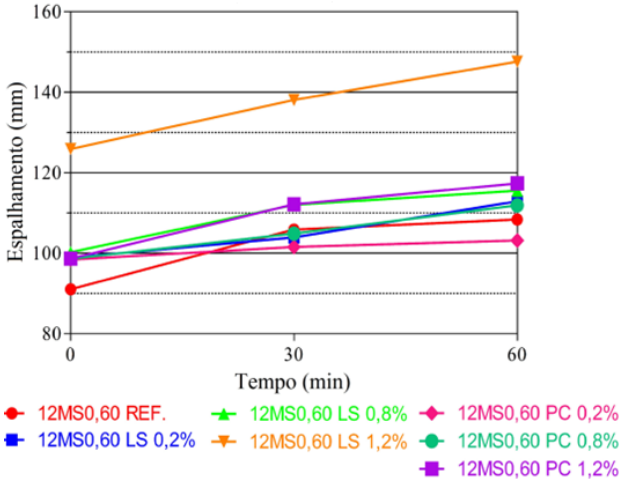


Figura 16 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, nas idades de “0”, 30 e 60 minutos.



Constata-se nos gráficos plotados que as pastas sem aditivo, isto é, as pastas de referência (REF), têm um comportamento de fluidez constante, tendo manutenção de abatimento no tempo de 60 minutos, com leve crescimento de espalhamento ao decorrer dos minutos. Nas pastas que contêm o aditivo LS, a tendência do espalhamento se

mostrou crescente com o passar do tempo, em todas as misturas e com todos os teores testados. Já as pastas contendo aditivo PC, em alguns casos o espalhamento se manteve constante, e em outros, se mostrou com leve crescimento.

Não foi possível a realização de comparação de tendências, uma vez que, não se encontrou trabalhos acadêmicos que retratem a avaliação da manutenção de abatimento.

Em busca de uma análise mais específica do comportamento dos aditivos e seus teores, são apresentados gráficos de espalhamento agrupados nas idades de “0”, 30 e 60 minutos, representados nas Figuras 17 a 25.

Figura 17 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, na idade de “0” minuto.

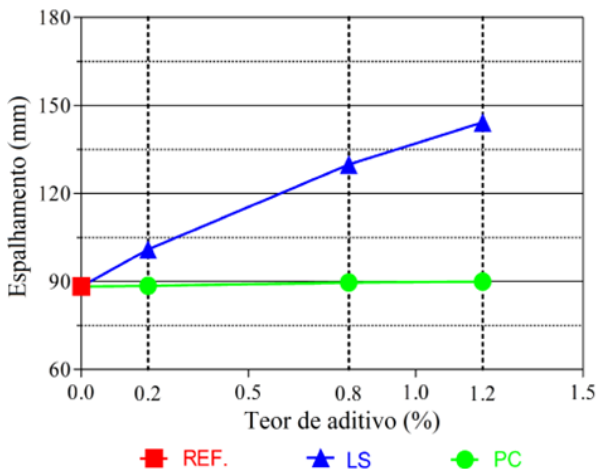


Figura 18 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, na idade de 30 minutos.

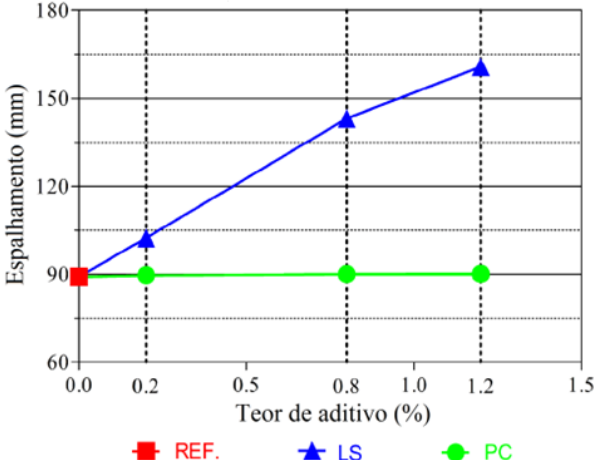


Figura 19 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,55, na idade de 60 minutos.

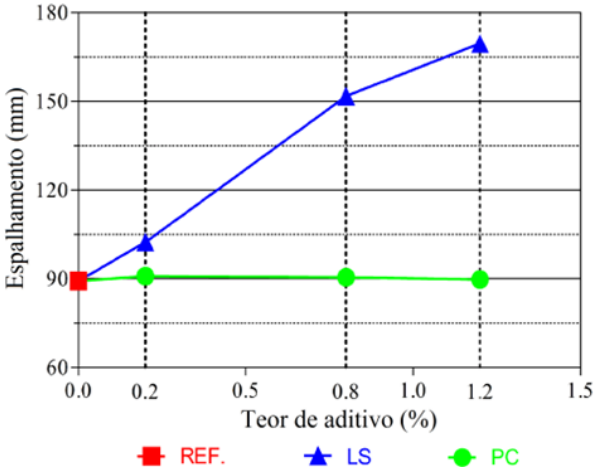




Figura 20 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, na idade de “0” minuto.

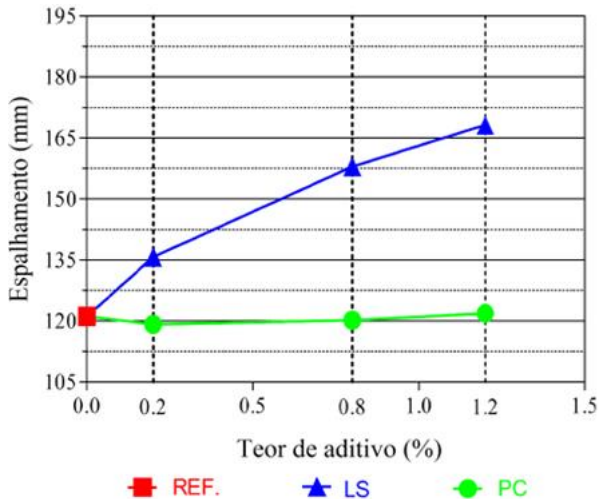


Figura 21 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, na idade de 30 minutos.

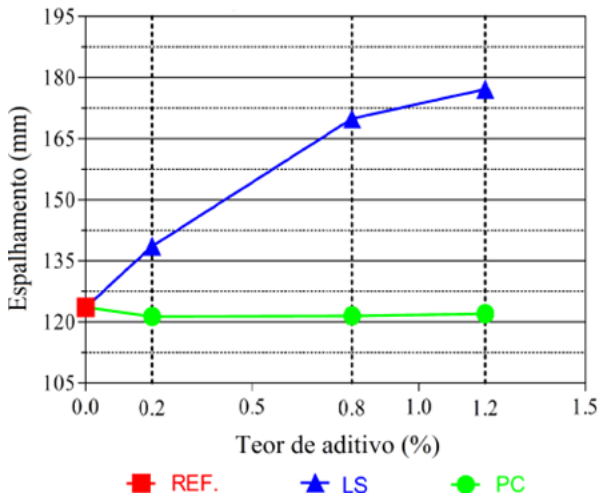


Figura 22 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 8MS0,60, na idade de 60 minutos.

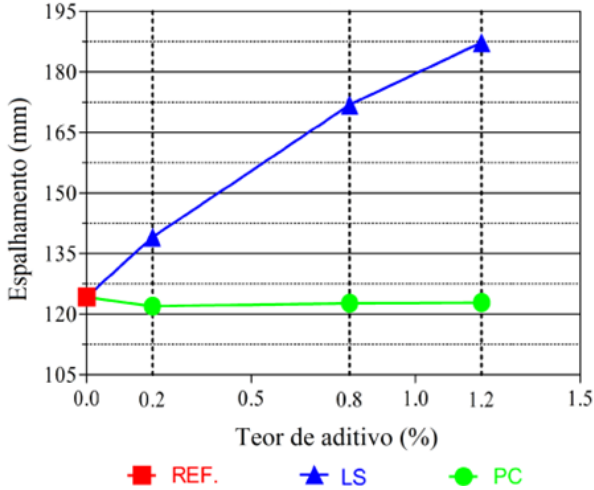


Figura 23 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, na idade de “0” minuto.

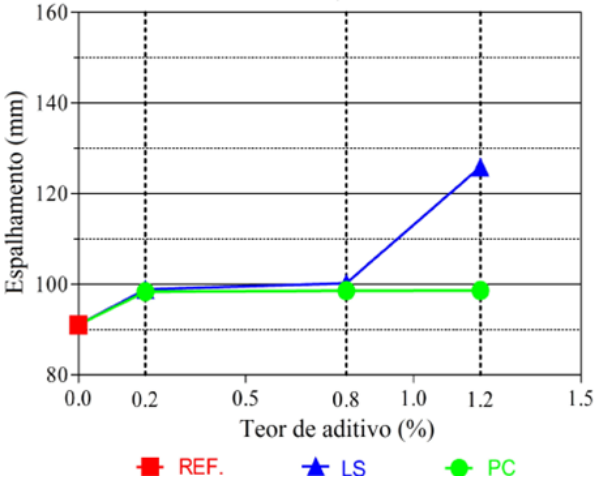


Figura 24 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, na idade de 30 minutos.

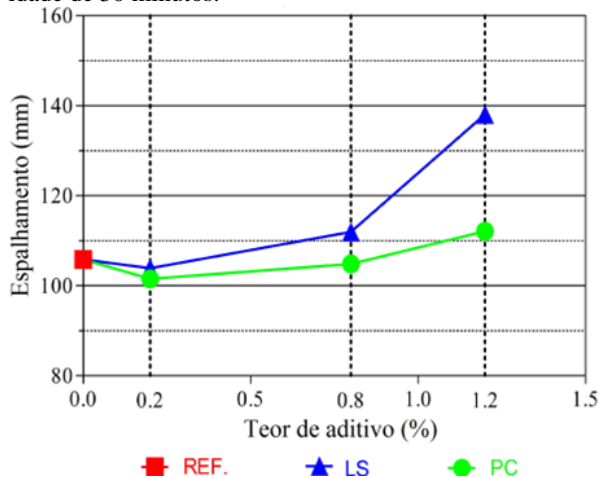
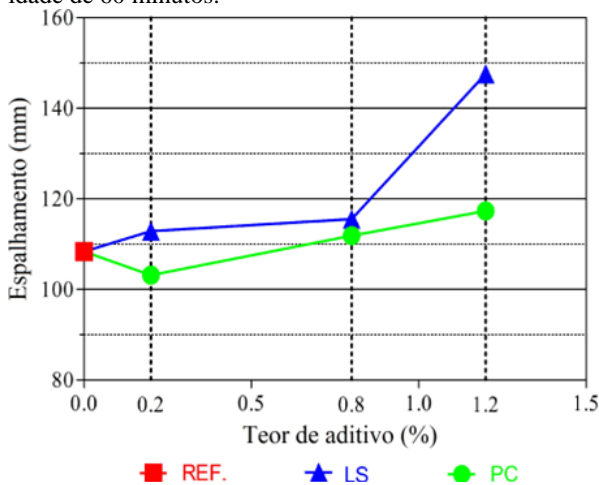


Figura 25 – Espalhamento das pastas geopoliméricas de traço 12MS0,60, na idade de 60 minutos.



Ao analisar os gráficos, de modo geral, pode-se determinar algumas relações entre o espalhamento e as variáveis, como: diminuição do espalhamento das pastas com o aumento da concentração molar de 8M para 12M; crescimento do espalhamento das pastas com o aumento da relação solução ativadora/cinza volante de S0,55 para S0,60; e as pastas confeccionadas com o aditivo LS exibem comportamento de

maior fluidez, ou seja, maior trabalhabilidade do que as pastas produzidas com o aditivo PC.

No que diz respeito às relações entre a concentração molar (M), a relação solução ativadora/cinza volante (S) e o espalhamento das pastas, tem-se concordância com o estudo de Livi (2013), que justifica essas duas observações pela quantidade de água presente nas misturas. A autora aborda da seguinte forma: quanto à concentração molar – uma mistura com 8M têm menos soluto e mais solvente (água) do que misturas com molaridade 12M. Por isso, as misturas com concentração 8M apresentam um melhor comportamento de trabalhabilidade. Quanto à relação solução ativadora/cinza volante – acontece de maneira inversa, uma mistura com a relação de S0,60 existe mais solução do que misturas com relações S0,50 e S0,55, conseqüentemente, maior quantidade de água na mistura.

Tais afirmações entre a quantidade de água nas misturas e o espalhamento são constadas nas pastas de traço 8MS0,55 e 8MS0,60, comparadas com as pastas 12M0,55 e 12MS0,60. As pastas com concentração molar 8M exibem valores de espalhamentos superiores do que as pastas com molaridade 12M. Todas as pastas contendo concentração molar 12M, possuem menor fluidez, sendo mais consistentes que as demais pastas. No caso das pastas de traço 12MS0,55, apresentaram baixa trabalhabilidade, o que impediu a verificação do espalhamento, mesmo com todos os tipos e teores de aditivos testados. Assim retrata a relação entre a concentração molar e a relação solução ativadora/cinza volante, e o espalhamento das misturas. Ainda nota-se, que ambos os aditivos não foram eficientes em fluidificar as pastas com molaridade 12M.

Ao tratar sobre o comportamento dos aditivos, esperava-se que o aditivo à base de policarboxilato desempenhasse bom espalhamento nas pastas, visto que, ele conta com os dois modos de ação (repulsão eletrostática e a repulsão estérica) para dispersar as partículas.

Kong e Sanjayan (2010) em estudo sobre o efeito de aditivos à base de naftaleno sulfonado e policarboxilato, chegaram à conclusão de que o uso destes dois tipos de aditivo não traz benefícios às misturas testadas, porém, de forma bastante pronunciada, o aditivo policarboxilato apresentou melhor trabalhabilidade do que o aditivo NS. Em contrapartida, Hardjito, Wee e Fu Ee (2011) obtiveram melhores resultados com atuação do aditivo PC, com efeito significativo no teor 1% em relação à massa de cinza volante.

No presente trabalho, em alguns casos, as pastas com o aditivo PC, apresentaram comportamento crescente de espalhamento, em

outros, decrescente. Em alguns casos o espalhamento teve uma pequena queda inicial com posterior aumento e em outros, se manteve constante.

Observa-se que o aditivo LS melhorou o espalhamento das pastas em relação à referência (REF) em quase todas as misturas, com exceção da pasta 12M0,60 LS 0,2%, na idade de 30 minutos (verificação da manutenção de abatimento).

Diante destas informações, percebe-se que a trabalhabilidade não é uma característica distinta às pastas. Desta forma, com base nos dados explorados graficamente, definiu-se como melhores resultados as pastas que apresentaram o maior espalhamento para cada tipo de aditivo, na idade de “0” minuto (espalhamento inicial). São elas: pastas de traço 8MS0,55, 8M0,60 e 12MS0,60, com o teor de 1,2%, tanto para o aditivo LS quanto para o aditivo PC.

## 4.2 SEGUNDA ETAPA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Definidas no item 4.1, são descritas as pastas que apresentaram o maior espalhamento para cada tipo de aditivo:

- 8MS0,55 LS 1,2%;
- 8MS0,55 PC 1,2%;
- 8MS0,60 LS 1,2%;
- 8MS0,60 PC 1,2%;
- 12MS0,60 LS 1,2%;
- 12MS0,60 PC 1,2%.

De posse destas pastas, realizou-se a análise estatística dos resultados de resistência à flexão e à compressão, nas idades de 1 e 28 dias. Estes resultados foram agrupados e avaliados pelos fatores: concentração molar (M), relação solução ativadora/cinza volante (S), traços e idade.

O programa utilizado para a análise estatística foi o software Graph Pad Prism 5, onde se utiliza a análise de variância a 2 critérios (2way ANOVA), considerando valores de significância de 5% ( $P < 0,05$ ) ou 1% ( $P < 0,01$ ).

Todos os resultados estão apresentados em gráficos, com médias e desvios padrão utilizando um número total de três e seis amostras para os ensaios de resistência à flexão e à compressão, respectivamente. Vale lembrar que todos os dados de ensaios estão contidos nas Tabelas 10 a 12, do APÊNDICE 2.

Na sequência, são apresentados os gráficos confeccionados a partir dos resultados de resistência à flexão e à compressão, agrupados por concentração molar (M), representados nas Figuras 26 e 27.

Ressalta-se que no APÊNDICE 3, as Tabelas 13 e 14, contêm os resultados da análise estatística de forma resumida.

Figura 26 – Resistência à flexão referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo.

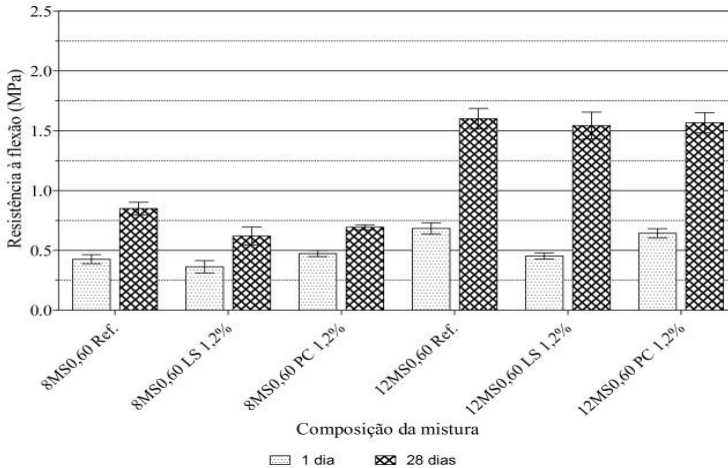
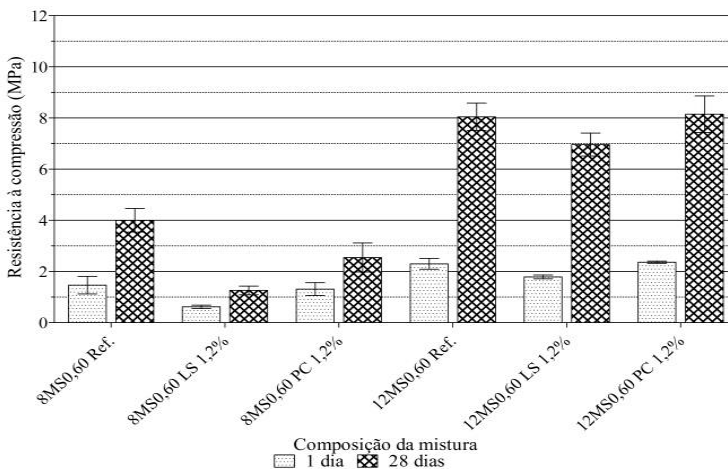


Figura 27 – Resistência à compressão referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo.



Considerando os resultados representados nos gráficos e com embasamento nos resultados da análise estatística, tem-se para as pastas, com 1 dia de idade, acréscimo significativo na resistência à flexão, com excessão do cruzamento entre as pastas contendo 1,2% do aditivo LS. Aos 28 dias de idade, todas as pastas apresentaram crescimento significativo de resistência com o aumento da concentração molar. Quanto à resistência à compressão, para as idades de 1 e 28 dias, todas as misturas foram influenciadas significativamente de forma positiva, isto é, com o aumento da concentração molar as resistências das misturas tiveram um ganho significativo em todos os cruzamentos.

No trabalho de Hardjito e Tsen (2008) e Komljenović, Baščarević e Bradić (2010), os autores identificaram um potencial de crescimento da resistência mecânica devido ao aumento de concentração molar.

No presente estudo, verificou-se um aumento progressivo nas resistências à flexão e à compressão com o aumento da concentração molar de 8M para 12M. Porém, nenhum valor de mistura foi constatado significativamente superior ( $P < 0,01$ ) à mistura de referência (REF).

Na sequência, são apresentados os gráficos confeccionados a partir dos resultados de resistência à flexão e à compressão, agrupados por relação solução ativadora/cinza volante (S), representados nas Figuras 28 e 29.

Nas Tabelas 15 e 16 contêm os resultados da análise estatística de forma resumida, representadas no APÊNDICE 4.

Figura 28 – Resistência à flexão referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo.

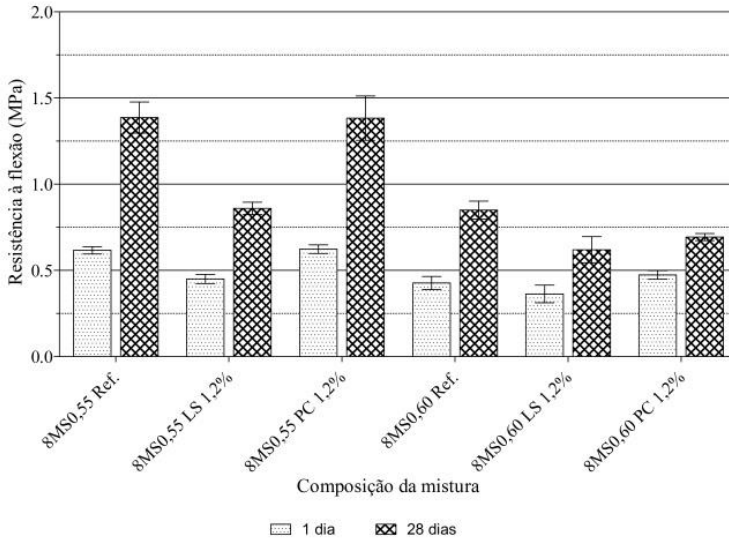
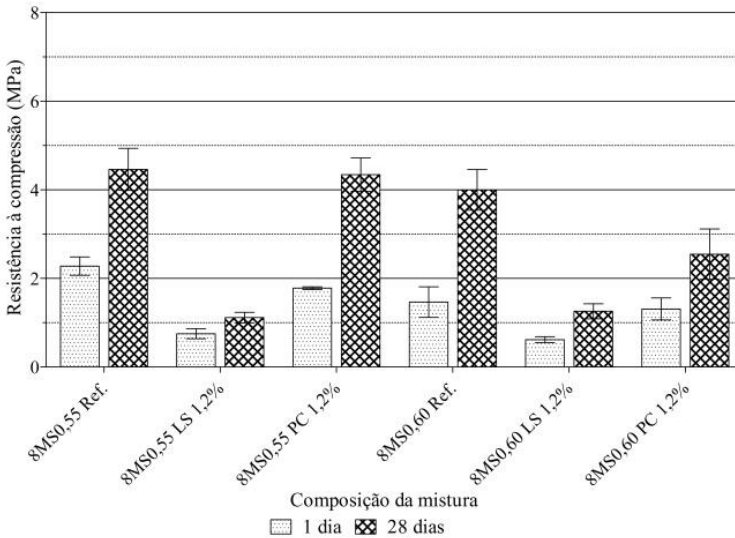


Figura 29 – Resistência à compressão referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo.





Através dos gráficos plotados e com base nos resultados da análise estatística, observa-se a tendência à redução das resistências à flexão e à compressão, com o aumento da relação S. Efetuando o cruzamento entre os traços a análise estatística da resistência à flexão manifestou diferença significativa a todas as misturas, com exceção do cruzamento entre as misturas contendo 1,2% de LS, com 1 dia de idade. Para a resistência à compressão, o comportamento foi bastante variado, sendo considerada diferença significativa em 2 cruzamentos com 1 dia e 2 cruzamentos com 28 dias.

Os autores Grutzeck e Blanco (1999), relataram que quanto maior a relação S, maior seria a resistência mecânica.

Em contrapartida, nesta dissertação, tratando-se do aumento de relação solução ativadora por cinza volante de S0,55 para S0,60, houve um decréscimo significativo ( $P < 0,01$ ) nas misturas quanto aos resultados de resistência em relação às suas misturas de referência.

Na sequência, são apresentados os gráficos confeccionados a partir dos resultados de resistência à flexão e à compressão, agrupados por traço, representados nas Figuras 30 a 35.

Vale ressaltar que no APÊNDICE 5, as Tabelas 17 e 18, contêm os resultados da análise estatística de forma resumida.

Figura 30 – Resistência à flexão do traço 8MS0,55, com a influência do tipo e teor de aditivo.

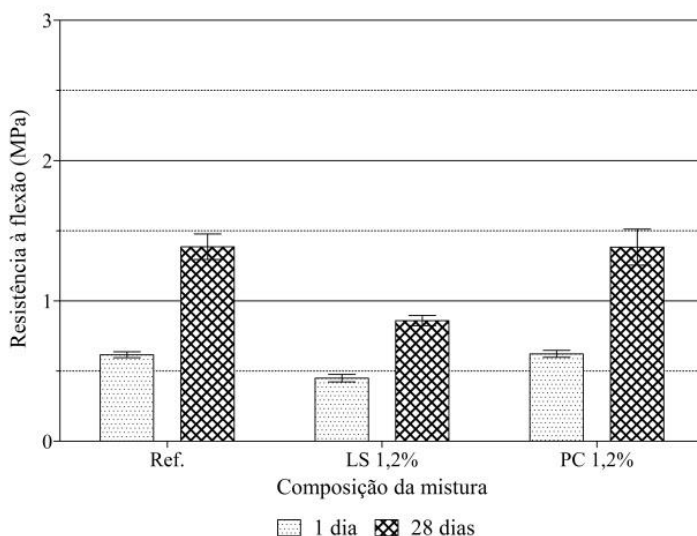


Figura 31 – Resistência à flexão do traço 8MS0,60, com a influência do tipo e teor de aditivo.

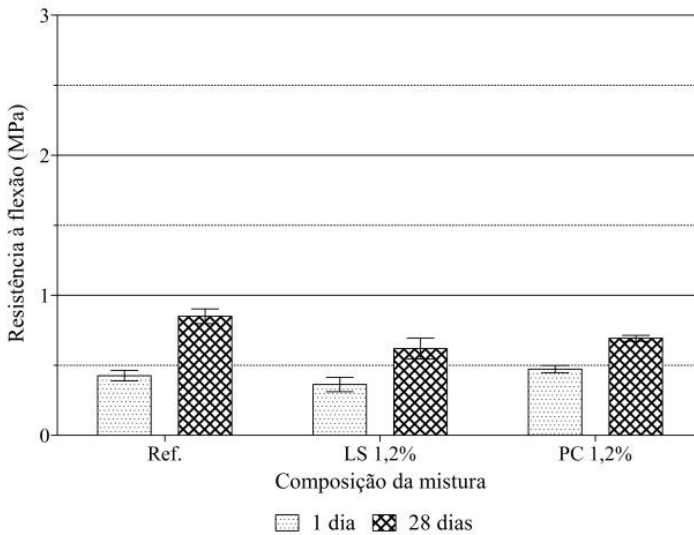


Figura 32 – Resistência à flexão do traço 12MS0,60, com a influência do tipo e teor de aditivo.

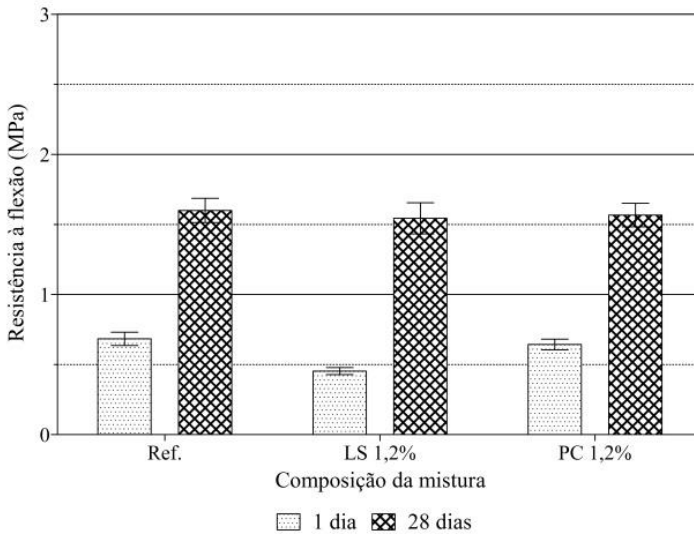


Figura 33 – Resistência à compressão do traço 8MS0,55, com a influência do tipo e teor de aditivo.

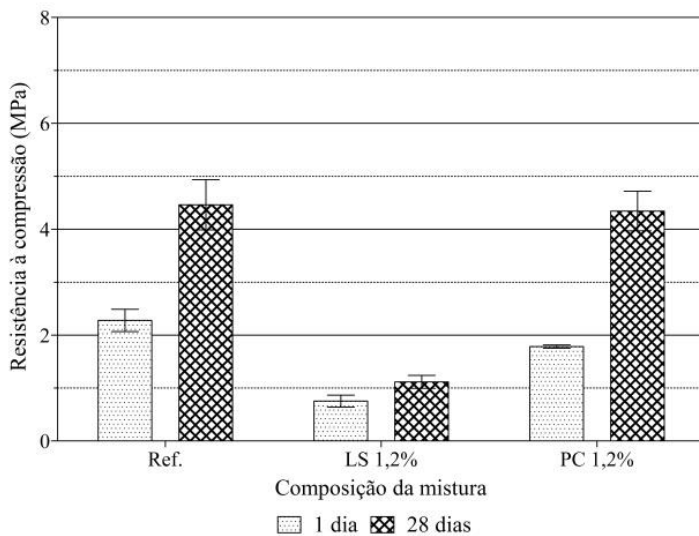


Figura 34 – Resistência à compressão do traço 8MS0,60, com a influência do tipo e teor de aditivo.

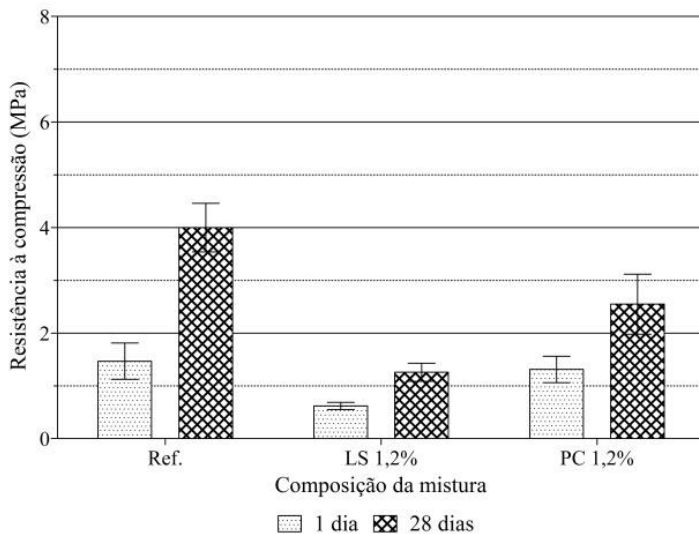
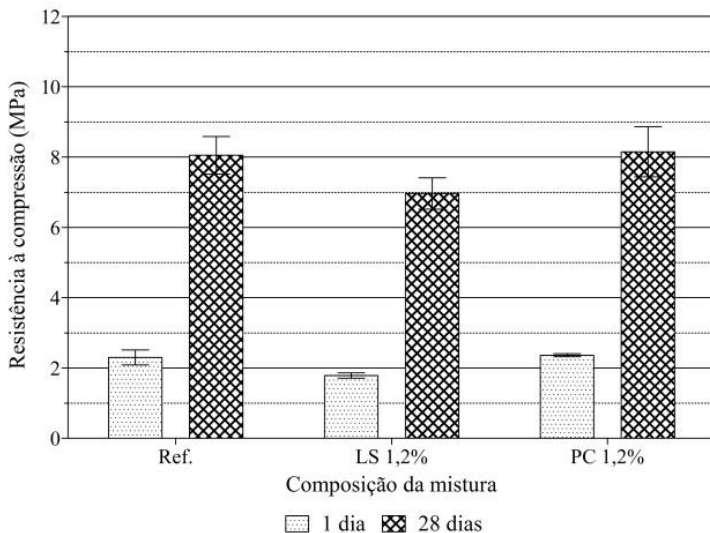


Figura 35 – Resistência à compressão do traço 12MS0,60, com a influência do tipo e teor de aditivo.



De acordo com os resultados apresentados, é possível conferir o desempenho da resistência mecânica, nas idades de 1 e 28 dias, e se existe influência do uso dos aditivos em relação à mistura de referência (Ref).

Os valores de resistência à flexão foram significativamente baixos nas idades de 1 e 28 dias, porém as misturas apresentaram, em sua maioria, valores semelhantes de resistência em relação à mistura de Ref. Neste caso, foram registradas para 1 dia as misturas de 8MS0,55 PC 1,2%, 8MS0,60 de ambos os aditivos com seus respectivos teores e 12MS0,60 PC 1,2%. Já para os 28 dias, foram registradas as misturas de 8MS0,55 PC 1,2% e 12MS0,60 de ambos os aditivos com seus respectivos teores. Os resultados de resistência destas misturas podem ser comprovados pelos gráficos e pela análise estatística como estatisticamente equivalentes em relação à mistura de Ref.

Tratando-se do caso onde houve a maior redução da resistência à flexão, a mistura que se destacou para 1 dia foi 12MS0,60 LS 1,2%, onde houve uma redução de 33,82% na resistência que passou de 0,68 MPa para 0,45 MPa, e a mistura que se destacou para 28 dias foi 8MS0,55 LS 1,2%, onde existiu uma redução de 38,40% na resistência que passou de 0,85 MPa para 0,62 MPa.

Não foi possível a realização de comparação de tendências, visto que, não se encontrou trabalhos acadêmicos referentes à resistência à flexão. Deste modo, considera-se que os aditivos utilizados nas misturas não influenciaram na resistência à flexão com 1 e 28 dias.

Quanto à resistência à compressão, os resultados também foram considerados significativamente baixos nas idades de 1 e 28 dias, quando comparando todas as misturas confeccionadas com aditivo às suas misturas de Ref. Exceto a única mistura que registrou ganho de resistência foi 12MS0,60 PC 1,2%. Esta mistura expressou um ganho de 0,36 MPa com 1 dia e 0,10 MPa com 28 dias em relação à mistura de Ref. No entanto, conforme a análise estatística, os valores foram apontados como estatisticamente equivalentes à mistura de Ref.

A respeito dos casos onde houve redução da resistência à compressão com o uso de aditivo, a mistura que apresentou maior redução foi 8MS0,55 LS 1,2%, onde houve uma redução de 67,10% na resistência que passou de 2,28 MPa para 0,75 MPa com 1 dia, e, uma redução de 67,10%, que passou de 4,46 MPa para 1,11 MPa com 28 dias.

Hardjito, Wee e Fu Ee (2011), obtiveram ganho na resistência à compressão com a utilização do aditivo à base de policarboxilato (PC), em argamassa geopolimérica com hidróxido de potássio e silicato de potássio, tendo o efeito mais significativo do aditivo com 1% em relação à massa de cinza volante com 28 dias de idades, atingindo resistência de 61 MPa. Acima desta proporção houve um decréscimo nos valores de resistência.

Já Kong e Sanjayan (2010) verificaram influência negativa com a utilização de dois aditivos, um à base de policarboxilato (PC) e o outro à base de naftaleno sulfonado (NS) em concretos geopoliméricos de cinza volante, com hidróxido de potássio combinado com silicato de sódio. Aos 3 dias de idade, a mistura contendo 3,3% do aditivo PC em relação à massa de cinza volante registrou resistência à compressão de 32,5Mpa, ao mesmo tempo em que, a mistura contendo 1,19% do aditivo NS expressou valor de resistência de 55,1MPa.

Nesta dissertação, de modo geral, nenhum dos aditivos com seus respectivos teores utilizados melhorou significativamente a resistência à compressão.



## 5 CONCLUSÃO

No decorrer do trabalho foi possível desenvolver o geopolímero à base de cinza volante, hidróxido de potássio e aditivo dispersante, o que facilitou extrair principais observações em função dos resultados obtidos.

### 5.1 QUANTO AO ESPALHAMENTO (TRABALHABILIDADE)

Foi possível o estudo da trabalhabilidade através da medida do espalhamento do *minislump* para todas as pastas, com exceção das pastas de traço 12MS0,55, pelo fato de apresentarem elevada consistência, impossibilitando a realização do ensaio de miniabatimento.

Constatou-se quanto ao comportamento do espalhamento das pastas, que as misturas de referência apresentaram um comportamento de fluidez constante no decorrer de 60 minutos, e em alguns casos um leve crescimento no espalhamento nesse período de tempo. Para as pastas contendo o aditivo lignosulfonato (LS), ao longo dos 60 minutos, o espalhamento se mostrou crescente. E, as pastas contendo o aditivo policarboxilato (PC), durante os 60 minutos, exibiram em alguns casos comportamento de espalhamento constante, e em outros, um pequeno aumento.

Notou-se uma tendência tanto ao crescimento quanto a diminuição do espalhamento. O crescimento do espalhamento ocorreu com o aumento da relação solução ativadora/cinza volante (S), e a diminuição sucedeu com o aumento da concentração molar (M). Tais relações se justificam pela quantidade de água contida nas pastas, sendo em maior quantidade em traços com relação S maior e em traços com molaridade (M) menor.

Em relação à influência do tipo e teor do aditivo utilizado, não foi possível verificar uma tendência do comportamento de espalhamento das pastas com o aditivo PC, pois com o aumento do teor, em alguns casos apresentaram comportamento crescente de espalhamento, e em outros, decrescente; e, em alguns casos uma pequena queda inicial de espalhamento com posterior aumento, e em outros, manteve-se constante. Quanto às pastas com o aditivo LS, a partir do aumento de teor, a tendência do comportamento foi de aumento no espalhamento.

Baseado a isso se constata que, não é adequada à utilização do aditivo PC nas pastas confeccionadas e testadas, em consequência de não desempenhar boa fluidez, e, ainda, não apresentar uma tendência de

comportamento. Ao contrário do aditivo LS, o qual apresenta uma tendência de comportamento bem definida.

## 5.2 QUANTO ÀS RESISTÊNCIAS À FLEXÃO E À COMPRESSÃO

Tratando-se das resistências mecânicas, foi possível o acompanhamento das mesmas nas idades de 1 e 28 dias.

Quanto à influência da concentração molar (M), observou-se uma tendência ao crescimento das resistências à flexão e à compressão com o aumento da molaridade M.

A respeito da influência da relação solução ativadora/cinza volante (S), verificou-se uma redução significativa tanto para a resistência à flexão quanto para a resistência à compressão das misturas, devido o aumento da relação S.

Referente à atuação dos aditivos, os resultados de resistência à flexão foram significativamente baixos nas idades de 1 e 28 dias. Apesar disso, pode-se dizer que houveram resultados de misturas, com o uso do aditivo policarboxilato (PC), semelhantes estatisticamente à suas misturas de referência (Ref). Quanto à resistência à compressão, os resultados também foram tidos como significativamente baixos, para ambas as idades, tendo apenas como exceção uma mistura com o emprego do aditivo PC, que apresentou um ganho na resistência. Entretanto, não foram resultados apontados como diferentes estatisticamente à mistura de Ref.

Ressalta-se que o aditivo PC comparado com o aditivo lignosulfonato (LS) apresenta um efeito menos prejudicial à resistência mecânica.

Em síntese, os resultados não foram satisfatórios no quesito desempenho mecânico. Isto indica que os aditivos dispersantes lignosulfonato de sódio e policarboxilato de sódio não alteraram significativamente no desenvolvimento da resistência mecânica.

## 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros relacionados ao tema, sugere-se:

- Desenvolver o mesmo programa experimental com adição de silicato de solúvel como ativador, buscando-se maiores valores e o crescimento mais rápido das resistências à flexão e à compressão.



- Em relação ao estudo no estado fresco do programa experimental, poderiam ser acrescentados ensaios complementares de reologia, com intuito de obter dados mais precisos a respeito do comportamento do material.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICLOR. Tecnologias de produção, 15 Jan. 2013. Disponível em: <<http://www.abiclor.com.br/a-industria-no-brasil/tecnologias/>>. Acesso em 24 jul. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. p. 8.

BNDES. O setor de soda-cloro no Brasil e no mundo, 2009. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Setor/Complexo\\_Petroquimico/200903\\_08.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Complexo_Petroquimico/200903_08.html)>. Acesso em: 10 jul. 2015.

BONDAR, D. et al. Engineering Properties of Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete. **American Concrete Institute Structural Journal**, v. 5, 2011. p. 64-72.

BRITISH STANDARDS. **EN 196: Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength**. [S.l.], 2005.

CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2015.

CIOFFI, R.; MAFFUCCI, L.; SANTORO, L. Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 40, 2003. p. 27–38.

COLLEPARDI, M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, 1998. p. 103-112.

DAVIDOVITS, J. **Solid-phase synthesis of a mineral blockpolymer by low temperature polycondensation of aluminosilicate polymers: Na-poly(sialate) or Na-PS and characteristics**. IUPAC Symposium on

Long-Term Properties of Polymers and Polymeric Materials. Estocolmo: [s.n.]. 1976. 14 f.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, 1991. p. 1633-1656.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymers cements**. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev: [s.n.]. 1994. p. 131-149.

DAVIDOVITS, J. **Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications**. Proceedings of Geopolymer 2002 Conference. Melbourne, Austrália: Geopolymer Institute. 2002. 9 f.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M.; DAVIDOVITS, N. **Process for obtaining a geopolymeric alumino-silicate and products thus obtained**. 5.342.595, 30 Aug. 1994.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, 2007. p. 2917–2933.

EUROCHLOR. Potassium hydroxide, CAS 1310-58-3, EC 215-181-3, Fev. 2013. Disponível em: <<http://www.eurochlor.org/download-centre/gps-documents.aspx>>. Acesso em 28 jul. 2015.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M. Activación alcalina de cenizas volantes. Estudio comparativo entre activadores sódicos y potásicos. **Materiales de Construcción**, Madri, v. 56, 2006. p. 51-65.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, p. 2259-2265, 2003.

GRACE BRASIL LTDA. **Aditivos para Concreto**. São Paulo, p. 2 f. 2013.

HARDJITO, D.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low - calcium fly ash - based geopolymer concrete**. Research Report GC 1. Perth: Faculty of Engineering Curtin University of Technology. 2005. p. 103.

HARDJITO, D.; TSEN, M. Z. **Strength and thermal and stability of fly ash-base geopolymer mortar**. The 3rd International Conference-ACF/VCA. Ho Chi Minh: [s.n.]. 2008. p. 144-150.

HARDJITO, D.; WEE, V. J. S.; FU EE, T. **The use of fly ash and bottom ash in geopolymer mortar**. Seminar Nasional Zeolit VII. Surabaya: [s.n.]. 2011.

HARTMANN, C. et al. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011. Cap. 10, p. 347-380.

INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (IFA). GESTIS Substance database - Potassium hydroxide, 2010. Disponível em: <[http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_en/001420.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/001420.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)>. Acesso em: 29 jul. 2015.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement and concrete aggregates**, v. 2, 1980. p. 95-108.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, 2007. p. 729–746.

KOMLJENOVÍČ, M.; BAŠČAREVIĆ, Z.; BRADIĆ, V. Mech and microstruct properties of alkali-activated fly ash geopolymers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, 2010. p. 35–42.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, 2007. p. 261–1277.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, 2010. p. 334–339.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G.; SAGOE-CRENTSIL, K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly

ash after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 37, 2007. p. 1583–1589.

LAFAN QUÍMICA FINA LTDA. **Laudo de Análise**. São Paulo, p. 1 f. 2013.

LIVI, C. N. **Contribuição ao desenvolvimento de geopolímeros à base de cinza volante**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.

MADEJSKA, L. et al. Properties of geopolymer binder obtained from fly ash. **Technical Transactions. Chemistry**, v. 8, 2011. p. 113-118.

MARTIN, J. F. M. Aditivos para Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2005. Cap. 13, p. 381-406.

MINÁř, L. et al. Alkali-activated materials on base of fly ash and its utilization in transport industry. **Current Science**, Pardubice, v. 6, p. 117-130, Mai. 2011.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete**. Conference on Constitution and Building Technol International, 2008.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes - A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, 1999. p. 1323–1329.

PANIAS, D.; GIANNOPOULOU, I. P. Development of inorganic polymeric materials based on fired coal fly ash. **Acta Metallurgica Slovaca**, v. 12, 2006. p. 321 – 327.

PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. **Int. J. Miner. Process.** v. 66, 2002. p. 121 – 143.

PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, p. 92. 2006.

PUERTAS, F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro. **Materiales de Construcción**, v. 45, 1995. p. 35 – 64.

RAMACHANDRAN, V. S. et al. **Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete**. Ottawa, Ontario, Canada: CANMET, 1998. 404 p.

REPETTE, W. L. Concreto de Última Geração: Presente e Futuro. In: ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2005. p. 1509-1550.

REPETTE, W. L. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e engenharia dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2010. Cap. 26, p. 825-862.

SANTA, R.A.A.B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Números Relatório Anual, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2014.gif> >. Acesso em 15 jul. 2015.

SWANEPOEL, J. C.; STRYDOM, C. A. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. **Applied Geochemistry**, v. 17, 2002. p. 1143–1148.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2ª. ed. Londres: Thomas Telford, 1997. 459 p.

TORGAL, F. P.; GOMES, J. P. C.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, 2008. p. 1305–1314.

VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 38, 1999. p. 3932-3941.

VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals. Part I Theory and applications. **Minerals Engineering**, v. 10, 1996. p. 659-669.

VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LUKEY, G. C. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. **Materials Letters**, v. 57, 2003. p. 1272-1280.

WEERDT, K. D. **Geopolymers – State of the art**. Trondheim, p. 39. 2011.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, v. 59, 2000. p. 247-266.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymerisation of multiple minerals. **International of Journal Mineral Processing**, v. 15, 2002. p. 1131-1139.



## APÊNDICE 1

Tabela 6 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 8MS0,55, referente à influência do tipo e teor de aditivo.

Traços	Tempo (min)					
	0		30		60	
	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão
<b>8MS0,55 Ref.</b>	88,30	0,56	89,15	0,35	89,18	0,44
<b>8MS0,55 LS 0,2%</b>	100,95	1,14	102,35	0,48	102,38	0,85
<b>8MS0,55 LS 0,8%</b>	129,92	0,10	143,17	0,63	151,77	0,55
<b>8MS0,55 LS 1,2%</b>	143,93	0,71	160,77	0,55	169,55	0,56
<b>8MS0,55 PC 0,2%</b>	88,50	0,17	89,67	0,49	90,85	0,74
<b>8MS0,55 PC 0,8%</b>	89,63	0,50	90,07	0,76	90,47	0,75
<b>8MS0,55 PC 1,2%</b>	89,95	0,05	90,10	0,26	89,73	0,87

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), min (minuto(s)), Ref (referência), LS (lignosulfonato) e PC (policarboxilato).

Tabela 7 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 8MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo.

Traços	Tempo (min)					
	0		30		60	
	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão
<b>8MS0,60 Ref.</b>	121,13	0,54	123,60	1,00	124,28	0,46
<b>8MS0,60 LS 0,2%</b>	135,77	1,07	138,65	0,83	139,07	0,96
<b>8MS0,60 LS 0,8%</b>	158,00	0,30	169,95	0,61	171,88	1,30
<b>8MS0,60 LS 1,2%</b>	168,23	0,80	177,17	0,78	187,32	0,62
<b>8MS0,60 PC 0,2%</b>	119,20	0,70	121,35	0,35	122,00	0,10
<b>8MS0,60 PC 0,8%</b>	120,22	0,59	121,50	0,56	122,75	0,75
<b>8MS0,60 PC 1,2%</b>	121,87	1,26	122,57	0,55	122,90	0,10

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), min (minuto(s)), Ref (referência), LS (lignosulfonato) e PC (policarboxilato).

Tabela 8 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 12MS0,55, referente à influência do tipo e teor de aditivo.

Traços	Tempo (min)					
	0		30		60	
	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão
<b>12MS0,55 Ref.</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD
<b>12MS0,55 LS 0,2%</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD
<b>12MS0,55 LS 0,8%</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD
<b>12MS0,55 LS 1,2%</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD
<b>12MS0,55 PC 0,2%</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD
<b>12MS0,55 PC 0,8%</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD
<b>12MS0,55 PC 1,2%</b>	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), min (minuto(s)), Ref (referência), LS (lignosulfonato), PC (policarboxilato) e SD (sem dado).

Tabela 9 – Dados do ensaio de miniabatimento das misturas 12MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo.

Traços	Tempo (min)					
	0		30		60	
	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão	Média (mm)	Desvio padrão
<b>12MS0,60 Ref.</b>	90,98	1,12	105,83	0,67	108,33	0,76
<b>12MS0,60 LS 0,2%</b>	98,87	1,81	103,87	0,32	112,87	0,92
<b>12MS0,60 LS 0,8%</b>	100,23	0,97	111,97	0,55	115,53	1,50
<b>12MS0,60 LS 1,2%</b>	125,90	0,79	138,10	0,17	147,63	0,45
<b>12MS0,60 PC 0,2%</b>	98,37	0,42	101,55	0,05	103,12	0,83
<b>12MS0,60 PC 0,8%</b>	98,55	0,80	104,83	0,45	112,13	0,17
<b>12MS0,60 PC 1,2%</b>	98,63	0,45	112,13	0,25	117,33	0,25

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), min (minuto(s)), Ref (referência), LS (lignosulfonato) e PC (policarboxilato).

## APÊNDICE 2

Tabela 10 – Dados de ensaio dos traços de 8MS0,55, referente à influência do tipo e teor de aditivo nas resistências à flexão e à compressão.

Traços	Rf (MPa)		Rc (MPa)	
	1 dia	28 dias	1 dia	28 dias
<b>8MS0,55 Ref.</b>	0,64	1,32	2,19	3,93
			1,97	4,11
	0,61	1,49	2,46	4,69
			2,14	4,97
	0,60	1,35	2,49	4,98
2,41			4,09	
<i>Média</i>	<i>0,62</i>	<i>1,39</i>	<i>2,28</i>	<i>4,46</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,02</i>	<i>0,09</i>	<i>0,21</i>	<i>0,47</i>
<b>8MS0,55 LS 1,2%</b>	0,46	0,82	0,71	1,13
			0,62	1,00
	0,47	0,87	0,75	1,31
			0,68	1,19
	0,42	0,89	0,81	1,00
0,94			1,06	
<i>Média</i>	<i>0,45</i>	<i>0,86</i>	<i>0,75</i>	<i>1,11</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,11</i>	<i>0,12</i>
<b>8MS0,55 PC 1,2%</b>	0,65	1,33	1,75	3,96
			1,81	4,49
	0,60	1,29	1,81	4,31
			1,81	4,99
	0,62	1,53	1,75	4,01
1,76			4,30	
<i>Média</i>	<i>0,62</i>	<i>1,38</i>	<i>1,78</i>	<i>4,34</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,02</i>	<i>0,13</i>	<i>0,03</i>	<i>0,37</i>

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), Ref (referência), LS (lignosulfonato), PC (policarboxilato), Rf (resistência à flexão) e Rc (resistência à compressão).

Tabela 11 – Dados de ensaio dos traços de 8MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo nas resistências à flexão e à compressão.

Traços	Rf (MPa)		Rc (MPa)	
	1 dia	28 dias	1 dia	28 dias
<b>8MS0,60 Ref.</b>	0,47	0,82	1,04	4,68
			1,33	4,11
	0,40	0,82	1,82	3,93
			1,26	3,33
	0,41	0,91	1,41	4,22
			1,94	3,72
<i>Média</i>	<i>0,43</i>	<i>0,85</i>	<i>1,47</i>	<i>4,00</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,35</i>	<i>0,46</i>
<b>8MS0,60 LS 1,2%</b>	0,35	0,54	0,60	1,13
			0,56	1,35
	0,42	0,69	0,63	1,19
			0,75	1,56
	0,32	0,63	0,59	1,10
			0,59	1,22
<i>Média</i>	<i>0,36</i>	<i>0,62</i>	<i>0,62</i>	<i>1,26</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,05</i>	<i>0,08</i>	<i>0,07</i>	<i>0,17</i>
<b>8MS0,60 PC 1,2%</b>	0,45	0,71	1,14	2,71
			1,48	3,11
	0,50	0,67	1,07	3,27
			1,08	2,09
	0,47	0,70	1,67	1,88
			1,43	2,23
<i>Média</i>	<i>0,47</i>	<i>0,69</i>	<i>1,31</i>	<i>2,55</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,25</i>	<i>0,57</i>

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), Ref (referência), LS (lignosulfonato), PC (policarboxilato), Rf (resistência à flexão) e Rc (resistência à compressão).

Tabela 12 – Dados de ensaio dos traços de 12MS0,60, referente à influência do tipo e teor de aditivo nas resistências à flexão e à compressão.

Traços	Rf (MPa)		Rc (MPa)	
	1 dia	28 dias	1 dia	28 dias
<b>12MS0,60 Ref.</b>	0,72	1,65	2,10	8,51
			2,48	8,58
	0,63	1,65	2,14	7,94
			2,08	8,41
	0,70	1,50	2,50	7,34
2,50			7,51	
<i>Média</i>	<i>0,68</i>	<i>1,60</i>	<i>2,30</i>	<i>8,05</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,05</i>	<i>0,08</i>	<i>0,21</i>	<i>0,53</i>
<b>12MS0,60 LS 1,2%</b>	0,43	1,46	1,86	6,78
			1,86	6,59
	0,48	1,50	1,68	6,48
			1,71	7,18
	0,45	1,67	1,79	7,04
1,82			7,70	
<i>Média</i>	<i>0,45</i>	<i>1,54</i>	<i>1,79</i>	<i>6,96</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,03</i>	<i>0,11</i>	<i>0,08</i>	<i>0,45</i>
<b>12MS0,60 PC 1,2%</b>	0,67	1,47	2,34	7,13
			2,31	8,75
	0,60	1,62	2,37	8,74
			2,36	8,75
	0,66	1,61	2,35	7,51
2,44			8,01	
<i>Média</i>	<i>0,65</i>	<i>1,57</i>	<i>2,36</i>	<i>8,15</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,04</i>	<i>0,08</i>	<i>0,04</i>	<i>0,71</i>

Legenda: M (molaridade), S (relação mássica entre solução ativadora/cinza volante), Ref (referência), LS (lignosulfonato), PC (policarboxilato), Rf (resistência à flexão) e Rc (resistência à compressão).



### APÊNDICE 3

Tabela 13 – Resumo da análise estatística referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.

TRAÇOS		Idade em dia(s)	Significância	
			P	Resumo
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	12MS0,60 Ref.	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,05	ns
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 LS 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 PC 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,05	ns

Legenda: não significativo (ns), significativo (\*) e muito significativo (\*\*).

Tabela 14 – Resumo da análise estatística referente à concentração molar (M), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.

TRAÇOS		Idade em dia(s)	Significância	
			P	Resumo
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	12MS0,60 Ref.	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	*
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 LS 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 PC 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
12MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	*
		28	< 0,01	**

Legenda: não significativo (ns), significativo (\*) e muito significativo (\*\*).



## APÊNDICE 4

Tabela 15 – Resumo da análise estatística referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.

TRAÇOS		Idade em dia(s)	Significância	
			P	Resumo
8MS0,55 Ref.	8MS0,55 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,55 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	*
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,60 Ref.	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,55 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 Ref.	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns

Legenda: não significativo (ns), significativo (\*) e muito significativo (\*\*).

Tabela 16 – Resumo da análise estatística referente à relação (S), com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.

TRAÇOS		Idade em dia(s)	Significância	
			P	Resumo
8MS0,55 Ref.	8MS0,55 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,05	*
		28	< 0,05	ns
8MS0,55 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,60 Ref.	1	< 0,01	**
		28	< 0,05	*
8MS0,60 Ref.	8MS0,55 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	*
		28	< 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**

Legenda: não significativo (ns), significativo (\*) e muito significativo (\*\*).

## APÊNDICE 5

Tabela 17 – Resumo da análise estatística referente aos traços, com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.

TRAÇOS		Idade em dia(s)	Significância	
			P	Resumo
8MS0,55 Ref.	8MS0,55LS 1,2%	1	< 0,05	*
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,05	ns
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns

Tabela 18 – Resumo da análise estatística referente aos traços, com influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.

TRAÇOS		Idade em dia(s)	Significância	
			P	Resumo
8MS0,55 Ref.	8MS0,55LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,55 Ref.	8MS0,55 PC 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,05	ns
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,01	**
		28	< 0,01	**
8MS0,60 Ref.	8MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 LS 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,01	**
12MS0,60 Ref.	12MS0,60 PC 1,2%	1	< 0,05	ns
		28	< 0,05	ns