

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

EDUARDO ROSA VIANA

AVALIAÇÃO DO USO DE VIDRO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA  
AREIA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

Joinville

2018

EDUARDO ROSA VIANA

AVALIAÇÃO DO USO DE VIDRO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA  
AREIA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Helena Paula Nierwinski

Joinville

2018

EDUARDO ROSA VIANA

AVALIAÇÃO DO USO DE VIDRO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA  
AREIA EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

M.<sup>a</sup>  
Helena Paula Nierwinski  
Universidade Federal de Santa Catarina UFSC- Joinville  
Presidente

---

M.<sup>a</sup>  
Valéria Bennack  
Universidade Federal de Santa Catarina UFSC- Joinville

---

Dr.  
Luciano Senff  
Universidade Federal de Santa Catarina UFSC- Joinville

---

Dra.  
Andréa Holz Pfutzenreuter  
Universidade Federal de Santa Catarina UFSC- Joinville

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir a realização deste trabalho, me encorajando em todos os momentos de minha vida.

À minha mãe, Tania, por toda fé, apoio, amor e por acreditar em meu caráter e potencial.

À minha tia Cleusa, por apostar em mim.

À minha orientadora Helena, por me acolher e me orientar, para que fosse possível a realização deste trabalho.

À minha família, que sempre me incentivou a completar a graduação, pois sempre acreditou na força do estudo e da educação.

Aos amigos que participaram de minha longa jornada dentro da universidade, e que de alguma forma torceram por meu sucesso.

À UFSC-Joinville, por proporcionar uma experiência ímpar na minha vida, e na de muitos jovens, com a oportunidade de conhecer a academia, participando da construção do conhecimento.

## RESUMO

Em sua fabricação, o cimento passa por um processo que resulta na formação de clínquer de dióxido de carbono, sendo este um dos principais gases poluentes, causadores do efeito estufa. Estima-se que para cada tonelada de cimento Portland produzido, outra tonelada de  $CO_2$  também é produzida. Desta forma, vários estudos foram realizados, buscando um ligante alternativo, entre eles os geopolímeros, que são materiais obtidos na reação alcalina de aluminossilicatos. Os geopolímeros destacam-se por apresentar características muito semelhantes ao cimento Portland, e por atingirem altas resistências nas primeiras horas de cura. Os geopolímeros podem ser estudados juntamente com diferentes materiais, tais como os resíduos advindos da construção civil, das indústrias, do agronegócio entre outros, em prol do desenvolvimento. Este trabalho tem por objetivo investigar a alternativa de uso de vidro reciclável na composição de uma geopolimérica. O emprego deste elemento é realizado em substituição parcial à areia contida na matriz geopolimérica, utilizando-se, vidro em pó e em cacos, avaliando-se a viabilidade da inserção em argamassas geopoliméricas, comparando os resultados com uma amostra de referência padrão composta apenas por areia. Para tal, foram elaboradas substituições de areia por pó de vidro com valores de 0; 7,5 e 15%, e por cacos de vidro entre 0, 15 e 30%. Na avaliação, foram realizados ensaios de compressão e tração, determinação das propriedades físicas, por meio do método de imersão de Arquimedes (absorção de água, densidade e porosidade aparente) e ensaio de consistência, a partir do *flow table test*, medindo-se a abertura das argamassas. Como resultado, foram obtidos resultados próximos aos da amostra de referência, em particular o efeito isolado de cada material apresentou melhor desempenho quando comparado com os efeitos das substituições simultaneamente, nos ensaios de tração e compressão. Chegou-se à conclusão que os vidros podem ser adicionados nas matrizes geopoliméricas, a partir de critérios de projeto.

**Palavras-chaves:** Cimento alternativo. Argamassas. Geopolímeros. Sustentabilidade. Vidros.

## ABSTRACT

In its manufacture, the cement goes through a process that results in the formation of clinker of carbon dioxide, being this one of the main pollutants, causing the greenhouse effect. It is estimated that for every ton of Portland cement produced, another ton of  $CO_2$  is also produced. In this way, several studies were carried out, looking for an alternative binder, among them the geopolymers, which are materials obtained in the alkaline reaction of aluminosilicates. The geopolymers are characterized by very similar characteristics to the Portland cement, and because they reach high resistance in the first hours of cure. Geopolymers can be studied together with different materials, such as waste from construction, industry, agribusiness and others, for development. This work aims to investigate the use of recyclable glass in the composition of a geopolymer. The use of this element is performed in partial substitution to the sand contained in the geopolymer matrix, using powdered glass and shards, evaluating the viability of the insertion in geopolymeric mortars, comparing the results with a standard reference sample composed only of sand. For this, sand substitutions were made by glass powder with values of 0; 7.5 and 15%, and glass shards between 0, 15 and 30%. In the evaluation, compression and tensile tests were carried out, determination of the physical properties, using the Archimedes immersion method (water absorption, density and apparent porosity) and consistency test, from the flow table test, opening of the mortars. As a result, results were obtained close to those of the reference sample, in particular the isolated effect of each material presented better performance when compared to the effects of the substitutions simultaneously in the tensile and compression tests. It was concluded that the glasses can be added in the geopolymer matrices, based on design criteria.

**Keywords:** Alternative Cement. Mortars. Geopolymers. Sustainability. Glass.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	14
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>GEOPOLÍMEROS: CONCEITO E APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>14</b>
2.1	CONCEITO.....	15
2.2	APLICAÇÕES DOS GEOPOLIMEROS .....	16
2.3	ELEMENTOS CONSTITUINTES DOS GEOPOLÍMEROS .....	18
<b>2.3.1</b>	<b>Metacaulim .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Ativadores Alcalinos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Areia .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Vidros .....</b>	<b>19</b>
2.4	CONCEITOS FÍSICOS .....	20
<b>2.4.1</b>	<b>Densidade aparente .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Porosidade.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Absorção.....</b>	<b>21</b>
2.5	TRABALHABILIDADE .....	21
2.6	CONCEITOS MECÂNICOS .....	21
<b>2.6.1</b>	<b>Tensão.....</b>	<b>22</b>
2.7	TRABALHOS RELACIONADOS.....	22
<b>3.</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>26</b>
3.1	MATERIAIS .....	26
<b>3.1.1</b>	<b>Areia .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Metacaulim .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Vidros .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Silicato de Sódio <math>Na_2SiO_3</math>.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Hidróxido de Sódio <math>NaOH</math> .....</b>	<b>30</b>
3.2	MÉTODOS.....	31
<b>3.2.1</b>	<b>Moinho de Esferas.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Solução de Hidróxido de Sódio .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Ensaio <i>Flow Table</i> .....</b>	<b>33</b>

<b>3.2.3</b>	<b>Moldagem das Argamassas .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Ensaio de Tração e Compressão .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Índices Físicos .....</b>	<b>37</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
4.1	ENSAIO NO ESTADO FRESCO .....	39
4.1.1	ENSAIO DE CONSISTÊNCIA .....	39
4.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	41
<b>4.2.1</b>	<b>Propriedades Físicas .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Resistência Mecânica .....</b>	<b>46</b>
4.3	RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS.....	49
<b>4.3.1</b>	<b>Absorção de água X Densidade aparente.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Absorção de água X Porosidade aberta .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Densidade aparente X Porosidade aberta.....</b>	<b>51</b>
4.4	ANÁLISES DOS RESULTADOS COMBINADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS E FÍSICOS.....	52
<b>4.4.1</b>	<b>Resistência à Compressão X densidade aparente.....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Compressão X Porosidade.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Resistência à Compressão X Absorção.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Resistência à Tração X Densidade.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.5</b>	<b>Resistência à Tração X Porosidade.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4.6</b>	<b>Resistência à Tração X Absorção .....</b>	<b>59</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Redes poliéricas .....	15
Figura 2 - Aplicações de acordo com a razão Si/Al dos geopolímeros.....	17
Figura 3 - Organograma de atividades. ....	26
Figura 4 - Curva granulométrica da areia.....	27
Figura 5 - Vidro em pó e em cacos utilizados nas matrizes geopoliméricas.....	28
Figura 6 - Hidróxido de Sódio.....	30
Figura 7 - Moinho de esferas.....	31
Figura 8 - Aparelhagem para ensaio de consistência flow table. ....	34
Figura 9 - Aparelhagem para moldagem dos corpos de prova.....	34
Figura 10 - Corpos de prova seccionados. ....	36
Figura 11 - a) Máquina para ensaio de compressão e flexão. b) Tração. c) Compressão. ....	37
Figura 12 - Amostras em imersão. ....	38
Figura 13 - Argamassa confeccionada. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Razão para formulação de Geopolímeros. ....	16
Tabela 2 - Composição do vidro. ....	19
Tabela 3 - Trabalhos complementares realizados na UFSC-Joinville .....	23
Tabela 4 - Composição do metacaulim. ....	28
Tabela 5 - Composição química do silicato de sódio. ....	30
Tabela 6 Características da soda cáustica. ....	30
Tabela 7 - Dosagem da amostra de referência. ....	35
Tabela 8 - Teores de substituição de areia por cacos e pó de vidro. ....	36

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica de vidro em cacos. ....	29
Gráfico 2 - Abertura das argamassas. a) Percentuais de pó. b) Percentuais de cacos. c) Percentuais combinados de pó e cacos.....	40
Gráfico 3 - Absorção de água aos 28 dias. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. ....	43
Gráfico 4 - Densidade aparente. ....	44
Gráfico 5 - Porosidade das argamassas. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. ....	45
Gráfico 6 - Resistência à compressão das formulações ensaiadas. a) Substituição por pó. ....	47
Gráfico 7 - Resistência à tração. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. .	48
Gráfico 8 - Absorção de água X Densidade aparente. a) Substituição por pó. ....	49
Gráfico 9 - Absorção de água X Porosidade aberta. a) Substituição por pó. ....	51
Gráfico 10 - Densidade aparente X Porosidade aberta. a) Substituição por pó. ....	52
Gráfico 11 - Relação da compressão X Densidade. a) Substituição por pó.....	54
Gráfico 12 - Relação da compressão X Porosidade. a) Substituição por pó.....	55
Gráfico 13- Relação da compressão X Absorção. a) Substituição por pó. ....	56
Gráfico 14 - Relação da tração X Densidade. a) Substituição por pó. b) Substituição por caos. c) Efeito combinado para pó e cacos. ....	57
Gráfico 15 - Relação da tração X Porosidade. a) Substituição por pó.....	58
Gráfico 16 - Relação da tração X Absorção. a) Substituição por pó.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de cálcio  
SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício  
Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> – Silicato tricálcio  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono  
K – Potássio  
Ca – Cálcio  
SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício  
AlO<sub>4</sub> – Alumina  
Si – Silício  
Al – Alumínio  
H – Hidrogênio  
O – Oxigênio  
H<sub>2</sub>O – Água  
Na<sub>2</sub>O – Óxido de sódio  
Al<sub>2</sub> – Sulfato de alumínio  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de alumínio  
NaOH – Hidróxido de sódio  
KOH – Hidróxido de potássio  
ABIVIDRO – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro  
SI – Sistema internacional  
Kg – Quilograma  
m<sup>3</sup> - Metro cúbico  
p – Porosidade  
V – Volume total  
V<sub>0</sub> – Volume de vazios  
A – Absorção  
Ma – Massa seca  
Ms – Massa saturada  
σ – Tensão  
ΔF – Força  
ΔA – Área  
NBR – Norma Brasileira  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
g – Gramas  
cm<sup>3</sup> - Centímetro cúbico  
CERMAT – Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos  
mm – Milímetro  
°C – Grau Celsius  
Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – Silicato de sódio  
NaCl – Cloreto de sódio  
Fe – Ferro  
rpm – Rotações por minuto  
l – Litro  
Na - Sódio  
S/L – Sólido/Líquido  
ΔA - Área  
ΔF<sub>z</sub> – Força perpendicular à área

## 1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas a preocupação com as emissões de  $CO_2$ , foi se tornando foco de debates e conferências ao redor do mundo, cujo âmbito prevê a preservação do meio ambiente. Dentre alguns acontecimentos marcantes neste cenário, estão o protocolo de Kyoto e a Eco 92. Uma das grandes preocupações ambientais vincula-se ao uso demasiado do cimento Portland, material amplamente utilizado na construção civil e que auxiliou no desenvolvimento e avanço da sociedade. O aumento em sua produção passou a ser visto como um contribuinte para o efeito estufa.

Em sua fabricação, o cimento passa por um processo chamado de clínquerização, onde busca-se a descarbonização do calcário, a qual acontece a temperaturas de aproximadamente  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , de acordo com a equação:  $3CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow Ca_3SiO_5 + 3CO_2$  (TORGAL e JALALI, 2009, p. 1). O resultado desta reação é o clínquer e o dióxido de carbono, sendo este um dos principais gases poluentes, causadores do efeito estufa. Estima-se que para cada tonelada de cimento Portland produzido, outra tonelada de  $CO_2$  também é produzida (GIELEN, 1997; DAVIDOVITS, 2002; apud TORGAL, 2009 p. 123).

Neste contexto, estudos em busca de um ligante alternativo, menos agressivo ao meio ambiente, começaram a ser desenvolvidos. Pesquisas que iniciaram nas décadas de 1940-50 pelos pesquisadores Glukhovsky e Krivenko, e que seguem até hoje, apontam a substituição do cimento Portland por materiais obtidos na reação alcalina de aluminossilicatos, que são denominados geopolímeros (KRINVENKO, 2008 apud BORGES, 2014). Os geopolímeros destacam-se por apresentar características muito semelhantes ao cimento Portland, e até mesmo o superando em algumas situações, como o fato de atingirem altas resistências nas primeiras horas de cura (DAVIDOVITS, 2002 apud VASSALO, 2013).

Os geopolímeros, são materiais compostos por uma mistura de agregados com elemento fontes de alumínio e sílica formando argamassas e concretos ativados por uma solução básica formada, por exemplo, de hidróxido de sódio + silicato de sódio. A partir da década de 80, um dos maiores expoentes acerca dos geopolímeros é o pesquisador francês Joseph Davidovits, desenvolvendo trabalhos ligados as zeólitas, que são um tipo de mineral que contém em sua composição alumina e sílica.

Como os geopolímeros podem ser constituídos por diferentes materiais, outro tema relativo ao meio ambiente, é a questão da possibilidade de utilização de resíduos advindos da construção civil, das indústrias, do agronegócio e demais polos na composição dos mesmos.

Com o intuito de mitigar os danos causados a natureza, os materiais compósitos tornaram-se uma alternativa frente ao descarte inapropriado de determinados resíduos. Desta maneira, este trabalho tem por objetivo investigar a alternativa de uso de vidro reciclado na composição de uma argamassa geopolimérica. O emprego deste elemento é realizado em substituição parcial à areia contida na matriz geopolimérica, utilizando-se o vidro em pó, assim como em cacos, com o intuito de avaliar a viabilidade da inserção em argamassas geopoliméricas, comparando os resultados com uma amostra de referência padrão composta apenas por areia. Serão elaboradas substituições de areia por pó de vidro com valores de 0; 7,5% e 15%, e por cacos de vidro entre 0; 15% e 30%. Para tal avaliação, serão realizados ensaios de compressão e flexão, determinação das propriedades físicas, por meio do método de imersão de Arquimedes, sendo elas absorção de água, densidade e porosidade aparente, e por fim será realizado o ensaio de consistência, a partir do *flow table test*, medindo-se a abertura das argamassas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1 Objetivo Geral

Avaliar a alternativa de uso de vidro reciclado em substituição parcial à areia contida em argamassas geopoliméricas.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Definir e caracterizar os materiais e as formulações a serem utilizados;
- Produzir nove formulações com percentuais distintos de substituição de areia por vidro (pó e caco) para elaboração de argamassas geopoliméricas;
- Analisar a abertura das argamassas, produzidas a partir das formulações, na mesa de consistência (*Flow Table Test*);
- Analisar as propriedades mecânicas de resistência a compressão e tração dos corpos de prova, aos 28 dias de cura;
- Analisar as propriedades físicas a partir do ensaio de imersão de Arquimedes (absorção de água, porosidade aberta, densidade aparente), aos 28 dias de cura.

## 2. GEOPOLÍMEROS: CONCEITO E APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS

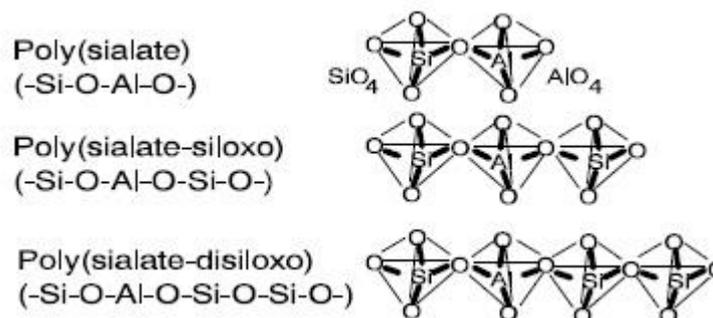
## 2.1 CONCEITO

Geopolímeros são polímeros (em analogia com polímeros orgânicos derivados de petróleo) que são transformados quando submetidos a policondensação e que ganham forma rapidamente a baixas temperaturas. Para além disso, o prefixo “geo” é atribuído devido ao fato desses minerais serem inorgânicos, rígidos, não inflamáveis e estáveis até a temperatura de 1250°C, (DIAS, 2012).

Segundo Davidovits (1994), os cimentos geopoliméricos com alto teor alcalino (K-Ca) são o resultado de uma reação de policondensação inorgânica chamada de geopolimerização. “A geopolimerização é basicamente uma reação de hidratação que se verifica entre alguns dos óxidos que constituem os aluminossilicatos em presença de um meio fortemente alcalino.” (OSÓRIO, 2006, apud DIAS, 2012, p. 11).

Nesta reação são produzidas estruturas zeolíticas tridimensionais, as quais são constituídas por tetraedros de sílica  $[SiO_2]^{4-}$  e alumina  $[AlO_4]^{5-}$ . A representação destes arranjos é dada de acordo com a razão entre os átomos de silício e alumínio, sendo assim classificados como poli(sialato), Si/Al = 1, poli(sialato-siloxo), Si/Al = 2, e poli(sialato-disiloxo), Si/Al = 3, a Figura 1 ilustra estes casos.

Figura 1 - Redes poliéricas



Fonte: Davidovits (1994)

A expressão para representação dos polissialatos é dada pela equação 1:

$$Mn\{-(SiO_2)_z - AlO_2\}_n, wH_2O \quad (1)$$

Onde,  $z$  é 1, 2 ou 3,  $M$  é um íon positivo, como potássio, sódio ou cálcio,  $n$  é o grau de policondensação e  $w$  é o número de moléculas de água.

De acordo com Dias (2012), pode-se determinar a cronologia da geopolimerização da seguinte forma:

- **Fase de destruição:** no início do processo os íons hidroxila  $\text{OH}^-$  provenientes do ativador alcalino dão lugar à destruição das ligações covalentes das espécies em presença;
- **Fase de orientação e transporte:** destruída a estrutura química de partida, forma-se uma mistura de íons que são sujeitos, em face das suas cargas, a processos de orientação e transporte em que a fase líquida assume particular importância;
- **Fase de coagulação/precipitação:** começam a formar-se pequenos núcleos de coagulação que rapidamente evoluem para processos de precipitação massiva de gel, que rapidamente endurece. É nesta última fase que se registram os fenômenos de policondensação, ainda que limitados em extensão e espacialmente desorganizados. Por este motivo, a estrutura final é essencialmente amorfa.

Na composição de uma solução de geopolimerização, algumas razões podem ser seguidas, sendo elas apresentadas na Tabela 1 (DUXSON, 2007. Apud SHWITZKY, 2017).

Tabela 1 - Razão para formulação de Geopolímeros.

Relações Indicadas		
Mínimo		Máximo
0,2	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,48
3,3	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,5
0,8	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2$	1,6
10	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	25

Fonte: Duxson (2007)

## 2.2 APLICAÇÕES DOS GEOPOLIMEROS

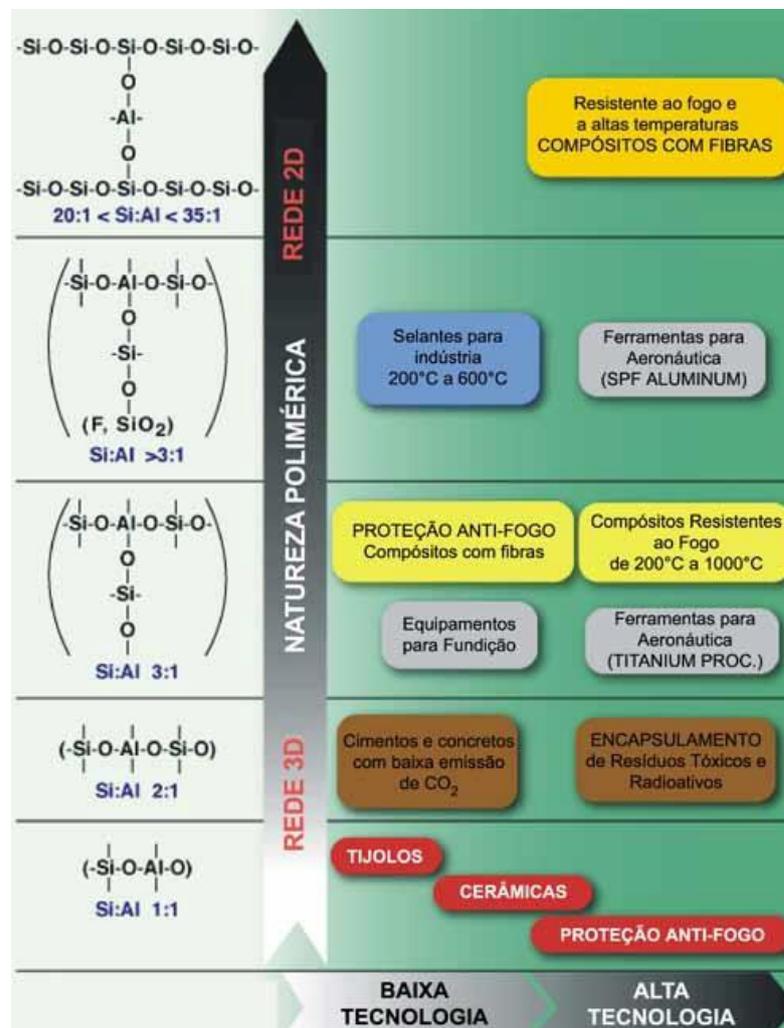
Para Pinto (2006), os ligantes geopoliméricos, abrangem boa parte da indústria, devido as suas características, apresentam altas resistências mecânicas, resistência ao gelo-degelo, excelente comportamento diante ao fogo, podendo ser considerado um material refratário. Basicamente pode apresentar duas linhas de atuação para o uso dos geopolímeros:

1. Materiais de baixo custo, para utilização de grandes quantidades na construção. Podem ser a base de escórias granuladas, cinzas volantes, aluminossilicatos em que a razão atômica  $\text{Si}/\text{Al}$  varie de 1 a 3;

2. Materiais sofisticados, mais caros, com razão atômica (Si/Al) podendo chegar a 35, os quais podem admitir a incorporação de fibras de vários tipos (amianto, carbono, vidro). Para esta linha o material básico é o metacaulim, o qual sofrerá a correção da sílica de acordo com o material inserido na mistura.

No quadro apresentado na Figura 2, (DAVIDOVITS, 1999 apud PINTO, 2006, p. 58), demonstra-se a utilização dos geopolímeros, de acordo com suas razões atômicas, as quais envolvem maior ou menor grau de tecnologia.

Figura 2 - Aplicações de acordo com a razão Si/Al dos geopolímeros.



Fonte: Pinto (2006)

Embora a utilização de concretos e cimentos geopoliméricos ainda se restringe aos países desenvolvidos, têm-se grandes pesquisas dirigidas para o seu desenvolvimento, devido a ampla gama de aplicações para estes materiais. Na Austrália, Canadá e Europa, o concreto geopolimérico é utilizado como dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações,

blocos, refratários, reparação de rodovias, obras de infraestrutura e outros (SONAFRANK, 2010 apud VASSALO, 2013).

## 2.3 ELEMENTOS CONSTITUINTES DOS GEOPOLÍMEROS

### 2.3.1 Metacaulim

O material utilizado como fonte de aluminossilicatos, foi o metacaulim, devido sua composição apresentar como base, sílica e alumina, necessários para a produção de geopolímeros. O metacaulim é obtido a partir da calcinação da caulinita a temperaturas na faixa de 500-600°C. Esta calcinação elimina as moléculas de água que estão ligadas à estrutura em camadas deste material, tornando-o muito mais reativo sob um meio alcalino aquoso, (RAMEZANIANPOUR, 2013 apud DE LIMA, 2016 p. 23).

O metacaulim possui em sua composição elementos essenciais para a produção de geopolímeros, entre eles  $SiO_2$ , cerca de 52% e  $Al_2O_3$  com aproximadamente 40%. Os outros 8% são considerados impurezas, e os elementos que as compõem são quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006, p.8).

### 2.3.2 Ativadores Alcalinos

A ativação alcalina trata-se de uma hidratação de aluminossilicatos, a partir de uma solução básica, no qual um material cimentício suplementar com propriedades pozolânicas deve ser ativado alcalinamente para obtenção do geopolímero, (PINTO, 2004 apud VASSALO, 2013). Como fonte destes materiais utiliza-se comumente soluções altamente alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e/ou silicato de sódio e potássio, (SONGPIRIYAKIJ, 2007 apud COSTA, 2013 p. 96). A concentração do ativador é um ponto importante, pois o excesso de ativador pode formar carbonato de sódio em contato com o ar (KONMITSAS, 2007 apud Maccarrinni, 2015 p. 21). A maioria dos autores trabalham com concentrações de NaOH na faixa de 5-16 mols (OLIVIA, 2008).

### 2.3.3 Areia

A areia, geologicamente, é um sedimento clástico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos, de diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm. Pode ser de origens distintas, como por

exemplo de rios, cavas, britagem, escória, praias e dunas. Classificam-se em faixas granulométricas como fina (0,15 a 0,6 mm), média (0,6 a 2,4 mm) e grossa (2,4 a 4,8 mm), (FALCÃO BAUER, 2013, p.78).

Agregado miúdo originado através de procedimentos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, é chamada de areia natural se resultante de ação de agentes da natureza, de areia artificial quando proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem; e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha, conforme normas específicas (NBR 9935/2011).

### 2.3.4 Vidros

O vidro pode ser definido como o produto amorfo resultante da fusão e posterior solidificação de uma mistura de materiais inorgânicos. As matérias primas mais comuns são sílica, barrilha, calcário e alumina (BARROSO, 2007, p. 104). A tabela 2 apresenta a composição mais comum do vidro de acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO).

Tabela 2 - Composição do vidro.

Composição do vidro	
Material	(%)
Sílica ( $SiO_2$ )	74
Óxido de Sódio	12
Alumina ( $Al_2O_3$ )	2
Óxido de Cálcio ( $CaO$ )	9
Óxido de Magnésio ( $MgO$ )	2
Óxido de Potássio ( $K_2O$ )	1

Fonte: ABIVIDRO

A fabricação de vidro pode ser classificada como intensiva em energia, considerando-se que consome, por tonelada, cerca de 1,8 milhão de Kcal de energia térmica na fusão, e cerca de 200 kWh/t de energia elétrica em outras etapas do processo (COSENZA, 2007 p. 107).

De acordo com a ABIVIDRO, o Brasil aumentou a porcentagem de vidro reciclado de 15% no ano de 1991, para 49% no ano de 2007. Em 2005, o consumo mundial de vidro plano foi de aproximadamente 41 milhões de toneladas (cerca de 5 bilhões de m<sup>2</sup>), que correspondeu a um faturamento de US\$ 19 bilhões, com um crescimento de 4% em relação ao ano anterior. A construção civil (porta, janelas e fachadas) respondeu por 70% das vendas, a indústria automobilística (janelas e para-brisas), por 10%, e os restantes 20% foram

absorvidos para aplicações em eletrodomésticos, espelhos e no setor moveleiro. (DA ROSA, 2007 p. 117).

É fundamental a reciclagem de resíduos sólidos para a preservação, conservação e redução do consumo de recursos naturais não renováveis, deste modo não comprometendo as gerações futuras, auxiliando na preservação do meio ambiente (BENATTI, 2008 p.415 apud LODI; GAMBIN; WEIT, 2014).

## 2.4 CONCEITOS FÍSICOS

### 2.4.1 Densidade aparente

A densidade está relacionada com a unidade de massa e de volume de um material, que no sistema internacional (SI) é dada por quilograma (kg) e metros cúbicos (m<sup>3</sup>). Ambrozewicz (2012), chama esta propriedade de massa unitária, a qual é a massa da unidade de volume do material, considerando os vazios, isto é, no estado natural é também chamada massa específica aparente. O autor ainda relata que esta propriedade é de grande valor para determinar o peso próprio e também no transporte de materiais.

A massa específica pode ser absoluta ou relativa. Na determinação da massa específica absoluta, não são considerados os vazios existentes no volume do material, enquanto que na massa relativa, também chamada de massa unitária, consideram-se os vazios presentes. A massa unitária é imprescindível na dosagem das argamassas, para a conversão do traço em massa para traço em volume, que é comumente empregado na produção das argamassas em obra. (SABBATINI, 2008).

### 2.4.2 Porosidade

É a relação do volume de vazios para o volume total x 100. Pode ser representado da seguinte maneira, pela equação 2:

$$p = \frac{V - V_0}{V} \times 100 \quad (2)$$

Os materiais finamente porosos têm poros com 1 a 10 $\mu$  de diâmetro e os que têm grandes poros variam de décimos de mm até 2 mm, (AMBROZEWICZ, 2012).

### 2.4.3 Absorção

A absorção é a propriedade dos materiais de absorver e reter água. Sua determinação é feita pela diferença das massas de uma amostra de material seco e da mesma amostra saturada. Geralmente é expressa em porcentagem da massa do material seco, de acordo com a equação 3.

$$A = \frac{M_s - M_a}{M_a} \times 100 \quad (3)$$

Onde  $M_a$  é a massa seca e  $M_s$  é a massa saturada (AMBROZEWICZ, 2012).

## 2.5 TRABALHABILIDADE

Sabbatini (2008), define a trabalhabilidade como uma propriedade de avaliação qualitativa. Uma argamassa para revestimentos é considerada trabalhável quando:

- Deixa penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida;
- Mantém-se coesa ao ser transportada, mas não adere a colher ao ser lançada;
- Distribui-se facilmente e preenche todas as reentrâncias da base;
- Não endurece rapidamente quando aplicada.

A consistência é a propriedade da argamassa relacionada à trabalhabilidade, que pode ser definida através de um índice. A norma NBR 13276 (ABNT,2002) estabelece o método para a determinação do índice de consistência da argamassa.

A trabalhabilidade é a propriedade de um material recém misturado (pasta, argamassa ou concreto) que determina a facilidade com que pode ser misturado, moldado, consolidado e acabado, (NEVILLE, 1997 apud MAZZA 2010).

## 2.6 CONCEITOS MECÂNICOS

O conceito mecânico apresentado a seguir, será exposto, devido aos corpos de prova no ensaio de tração e compressão, serem submetidos a tais esforços.

### 2.6.1 Tensão

Nesta sessão, busca-se abordar o principal conceito a que são submetidos os corpos de prova no estado endurecido, sendo assim, para Hibbeler (2010), a intensidade da força, ou força por unidade de área, que age perpendicularmente à  $\Delta A$ , é definida como tensão normal,  $\sigma$  (sigma), apresentado na equação 4. Visto que  $\Delta F_z$  é normal à área, então;

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (4)$$

Se a força normal ou tensão tracionar o elemento de área  $\Delta A$ , ela será denominado tensão de tração, ao passo que, se comprimir o elemento  $\Delta A$ , ela será denominada tensão de compressão.

## 2.7 TRABALHOS RELACIONADOS

A fim de expor outros trabalhos, relacionados ao tema dos geopolímeros, os quais vem sido estudados nos últimos anos na UFSC - Joinville, elaborou-se um quadro em formato de tabela com um apanhado geral, apresentando resumidamente os temas estudados, e um breve resumo, citando do que se tratam cada uma das pesquisas. Por final, é feita uma conclusão de alguns pontos considerados importantes, e que corroboram com o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso. Na Tabela 3, pode-se citar casos experimentais dos seguintes autores; Lobo (2016), Hartmann (2016), Maccarini (2015), Leite (2016), De Araujo (2017), Rossetto (2017), Shwitzky (2017).

Tabela 3 - Trabalhos complementares realizados na UFSC-Joinville

Autor	Título do trabalho	Resumo	Conclusões
Beatriz S. Lobo (2016)	A INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO METACAULIM POR CINZA DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS	Os percentuais substituídos variaram de 0% a 25%.	Até o percentual de 12,5% de substituição de metacaulim por cinza de casca de arroz, os resultados para resistência à compressão e tração, ficam próximos dos valores da formulação de referência. Portanto sendo uma alternativa na utilização junto ao metacaulim.
Eduardo A. Hartmann (2016)	ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA UTILIZANDO PÓ DE ALUMÍNIO COMO AGENTE FORMADOR DE POROS	Adição de pó de alumínio (0,05% até 0,3% sobre a massa de metacaulim) nas formulações, para a formação de poros internos. Também utilizou cinzas de casca de arroz em substituição ao metacaulim (10% a 25%).	A redução de peso, chegou a 28%. Outro efeito relacionado foi na questão acústica, devido ao surgimento de poros ocorre maior resistência na passagem do som pelo ar contido nesses vazios. As resistências de tração e compressão, decaíram entre 2 a 5 vezes.
Helena S. Maccarini (2015)	DESENVOLVIMENTO DO GEOPOLIMERO A PARTIR DO METACAULIM	Metacaulim para desenvolvimento de pastas geopoliméricas, ativados por diferentes concentrações molares (8, 9 e 10 Molar) de NaOH (soda cáustica), variando também a relação sólido/líquido em 1,2; 1,3; 1,4 das misturas,.	Os melhores resultados para resistência a tração e compressão, foram os que utilizaram concentração molar igual a 9. Verificou-se que as menores relações sólido/líquido absorvem mais água, e apresentam as menores resistências de tração e compressão.
Juliano M. Leite (2016)	A INFLUÊNCIA DA VERMICULITA EM ARGAMASSA	Substituir a areia por vermiculita, em diferentes teores (0% a 15%). Teores constantes de dióxido de	Devido à alta absorção de água da vermiculita, quando utilizados percentuais de 15%, ocorre um

	GEOPOLIMÉRICA COM ADIÇÃO DE NANOTITÂNIA	titânia ( $TiO_2$ ) como adição, com a finalidade da redução dos níveis de $CO_2$ e outros gases contaminantes. Também utilizou-se cinzas de casca de arroz, como fonte de sílica, juntamente ao metacaulim.	aumento de 333%, na absorção. Após os 28 dias, ocorre a evaporação de grande parte desta água, gerando alta quantidade de poros, o que influencia fortemente na questão da diminuição do peso dos corpos de prova, chegando a 32%. Desta maneira, o autor sugere o uso de vermiculita, em situações onde a termo acústica é um requisito.
Lucas E. De Araujo (2017)	DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM USO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	Substituição da areia por resíduos da construção e demolição, em argamassas geopoliméricas, em percentuais de até 100%, juntamente com a substituição do metacaulim por cinzas de casca de arroz.	Aumento da absorção de água, em cerca de 40%, quando substituído 100% de resíduos, aumento da porosidade em 24% e redução da densidade em 11%. A resistência à compressão diminui aproximadamente 50%, enquanto que a de tração diminui, aproximadamente 35%. Sendo que estas comparações são em relação a amostra de referência.
Matheus Rossetto (2017)	DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM A INCORPORAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	Utilizou lodo de estação de tratamento de uma companhia de distribuição de águas. Necessário um tratamento no mesmo, para utilizá-lo. As formulações feitas por Rossetto, foram basicamente a substituição (até 30%) e a adição (até 20%) do lodo em uma amostra de referência base.	Na substituição por lodo com 20%, ocorre um aumento na absorção de aproximadamente 8%. Para a adição de lodo ocorre uma diminuição na absorção de aproximadamente 3,5%. Densidade e porosidade diminuem na substituição e adição. A resistência de compressão diminui até 50% na

			substituição e aumenta até 18% na adição. Na tração a substituição diminui até 40% a resistência, e a adição aumenta a resistência à tração em até 10%.
Vilson Schwitzky Junior (2017)	DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS POROSAS A PARTIR DO USO DE PÓ DE LÂMPADA FLUORESCENTE E PÓ DE ALUMÍNIO	Substituição de metacaulim, por pó de lâmpadas e uso do pó de alumínio para a geração de poros dentro da matriz geopolimérica, os quais atuarão em favor da redução de peso das argamassas.	Verifica-se a partir do ensaio na mesa de consistência, que o diâmetro da abertura das formulações propostas, apresentou crescimento, devido ao tamanho das partículas de pó de lâmpada fluorescente, serem maiores que as de metacaulim, e também, pela adição do agente formador de poros. A presença do pó de alumínio, em geral, aumentado a absorção de água e a porosidade, e reduzindo a densidade das argamassas. A incorporação de pó de alumínio, reduz drasticamente as resistências de tração e compressão dos corpos de prova, enquanto que o pó de lâmpada fluorescente reduz em cerca de 40% ambas as resistências, quando substituído num percentual de 20% e analisado seu efeito isolado.

Fonte: O autor (2018)

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas com substituição de materiais compósitos. Elaborou-se um plano experimental para análise das formulações propostas nos estados fresco e endurecido, apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Organograma de atividades.



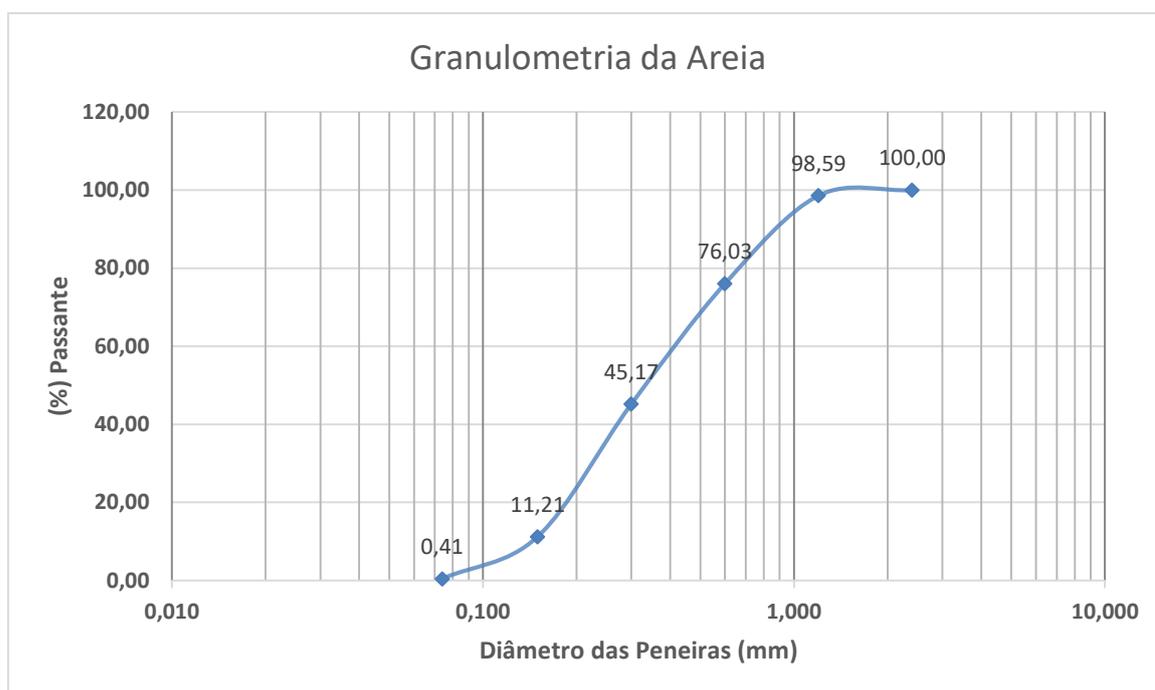
Fonte: O autor (2018)

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Areia

A areia, utilizada para a confecção dos corpos de prova, tem origem da empresa Supremo Concreto, localizada no município de Joinville. Ensaios de caracterização demonstraram que esta areia apresenta massa unitária igual a  $1,59 \text{ g/cm}^3$  e foi classificada como areia média de acordo com a NBR 7214/82, apresentando módulo de finura igual a 2,69. A curva granulométrica da mesma é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Hartmann (2016)

### 3.1.2 Metacaulim

Utilizou-se como fonte de aluminossilicatos, o metacaulim, fornecido pela empresa Metacaulim Brasil, localizada no município de Jundiaí-SP, que atende as especificações da norma NBR 15894/10. Ensaio de caracterização deste material foram realizados pelo Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC-Florianópolis. A partir destes ensaios determinou-se a densidade real do material como sendo igual a 3,17 g/cm<sup>3</sup>. O tamanho médio das partículas que compõem o metacaulim foi definido como 21 µm e o diâmetro médio (D<sub>50</sub>), ou seja, aquele em que passa 50% das partículas de metacaulim, é igual a 6,5 µm.

Ensaio de fluorescência de raios-X permitiram a avaliação da composição do metacaulim. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos através deste ensaio. Verifica-se predominância dos elementos  $Al_2O_3$  32,6% e  $SiO_2$  57,12 %, sendo eles alumina e sílica, respectivamente. A área específica do metacaulim é de 32700 m<sup>2</sup>/kg, e, a perda ao fogo de 2,62%.

Tabela 4 - Composição do metacaulim.

Óxidos	$Al_2O_3$	$CaO$	$FeO_3$	$K_2O$	$MgO$	$MnO$	$Na_2O$	$P_2O_5$	$SiO_2$	$TiO_2$
Teor %	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	<0,05	<0,05	0,06	57,12	1,51

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

Dentre as várias técnicas de caracterização de materiais, a difração de raios X é a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos. Isto é possível, porque na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si, por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Ao incidir um feixe de raio X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração (ALBERS, 2002).

### 3.1.3 Vidros

O vidro reciclado utilizado neste trabalho é classificado como vidro plano e, é proveniente da empresa Catarina Vidros, localizada em Tijucas-SC. Este resíduo é fornecido em forma de cacos e em pó. Os materiais foram utilizados na composição das argamassas nas duas formas: cacos e em pó, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Vidro em pó e em cacos utilizados nas matrizes geopoliméricas.



Fonte: O autor, 2017.

O vidro em cacos é obtido a partir da trituração, ou também se define aqui, pela moagem. Já o vidro em pó constitui-se por partículas pulverulentas, que resultam do choque entre os grãos durante a trituração.

Devido a umidade do ambiente, o pó forma grumos, que precisam ser desfeitos para se obter um material mais homogêneo, podendo-se assim ter um maior controle de sua inserção nas misturas. Foi realizada a secagem em estufa do pó em temperatura de aproximadamente 105°C para retirada da umidade. Em seguida utilizou-se o moinho de bolas para o desmonte do material, tornando-o, assim, um pó homogêneo, sendo utilizado nas misturas apenas a parcela passante na peneira de 150 mm. Os cacos também foram levados a estufa para secagem, porém estes não passaram por algum processo de refinamento. As massas unitárias de pó e vidro mediadas foram de 0,75 g/cm<sup>3</sup> e 1,42 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

Para a caracterização física do resíduo de vidro em cacos, realizou-se a análise granulométrica por peneiramento de acordo com a NBR 7217/87, o módulo de finura ficou em 4,86. O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica do vidro em cacos.

Gráfico 1 - Curva granulométrica de vidro em cacos.



Fonte: O autor, 2018.

### 3.1.4 Silicato de Sódio $Na_2SiO_3$

O silicato de sódio ( $Na_2SiO_3$ ), também chamado de “vidro líquido”, é utilizado na composição de argamassas geopoliméricas devido a sua composição alcalina forte, possibilitando a geopolimerização quando em contato com os aluminossilicatos. Este material é encontrado na forma sólida ou viscosa, sendo que, para este trabalho utilizou-se a forma viscosa, formando uma solução com o hidróxido de sódio ( $NaOH$ ).

O silicato de sódio é composto basicamente por óxido de sódio  $Na_2O$  e sílica,  $Si_2O$ , conforme demonstra a composição química fornecida pelo fabricante, na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do silicato de sódio.

Composição Química			
Óxidos	$Na_2O$ (%)	$Si_2O$ (%)	$H_2O$ (%)
Silicatos	9,11	28,50	61,18

Fonte: Departamento Técnico – Buschle & Lepper S/A, 2016

### 3.1.5 Hidróxido de Sódio $NaOH$

O hidróxido de sódio, popularmente conhecido como soda cáustica, pode ser comercializado na forma líquida ou sólida e, é utilizado juntamente com o silicato de sódio, formando uma solução alcalina, a qual tem função ativadora nas argamassas. Sua participação é dada devido ao seu baixo custo frente ao silicato de sódio. Para este trabalho utilizou-se a soda cáustica no estado sólido, apresentando formato de escamas, conforme demonstra a Figura 6.

Figura 6 - Hidróxido de Sódio.



Fonte: Leite 2016

As especificações da soda cáustica utilizada estão descritas na Tabela 6, sendo fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6 - Características da soda cáustica.

Determinação	Especificação
Concentração ( $NaOH$ ) (%)	97,0 – 100,0
<b>Carbonatos</b> ( $Na_2CO_3$ ) (%)	Máx. 0,60
Cloretos ( $NaCl$ ) (%)	Máx. 0,03

Ferro ( <i>Fe</i> ) (ppm)	Máx. 6,0
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,13 – 2,20
Aspecto Visual	Escamas

Fonte: Departamento Técnico – Buschle & Lepper S/A, 2016

## 3.2 MÉTODOS

São apresentados a seguir, os métodos utilizados durante todo o processo de produção dos corpos de prova.

### 3.2.1 Moinho de Esferas

Esta etapa foi utilizada apenas para o desmonte dos grumos formados no pó de vidro, devido sua secagem em estufa. Para realização desta atividade utilizou-se um moinho Servitech CT-12242, utilizou-se um jarro cerâmico revestido de alumínio com 30 esferas, sendo 20 esferas de 14 mm, e 10 esferas de 20 mm. A agitação do jarro ocorreu a 360 rpm, ao passo de 10 minutos, foi retirado o material e peneirado, sendo que apenas o material passante na peneira de 150 mm era estocado, o restante retornava ao moinho até o momento em que todo o material em pó passou na peneira. A Figura 7, apresenta o Moinho utilizado.

Figura 7 - Moinho de esferas.



Fonte: Rossetto (2017, p. 35)

### 3.2.1. Solução de Hidróxido de Sódio

Para elaboração da solução de hidróxido de sódio, a qual é utilizada juntamente ao silicato de sódio para formar uma solução alcalina, foi considerada uma concentração de 9 Molar, valor este arbitrado para dar sequência ao trabalho e, baseado em trabalhos citados anteriormente. O cálculo para atingir tal concentração é apresentado a seguir na Equação 5.

$$\text{Molaridade} = \frac{\text{concentração } \left(\frac{g}{l}\right)}{1 l (\text{água})} \times \frac{1 mol}{\text{Massa molar}} \quad (5)$$

Onde: Massa molar do  $NaOH$ :  $Na = 23$ ,  $O = 16$ ,  $H = 1$ .  $NaOH = 40 g$

Portanto, 1 Mol de  $NaOH$  possui 40 g, e utilizando a expressão apresentada acima, temos:

$$9 \text{ mols} = \frac{\text{concentração } \left(\frac{g}{l}\right)}{1 l (\text{água})} \times \frac{1 mol}{40}$$

$$\text{concentração } \left(\frac{g}{l}\right) = 360 \left(\frac{g}{l}\right)$$

O material não apresenta 100% de pureza, e, portanto, partiremos da menor pureza anunciada pelo fabricante, ou seja, de 97%. Desta forma, torna-se necessário um ajuste na quantidade de soda cáustica que deve ser utilizada para se obter a concentração molar requerida. O ajuste efetuado deu-se da seguinte forma:

$$360 g \rightarrow 100\%$$

$$X \rightarrow 97\%$$

$$0,97 \times X = 360$$

$$X = 371,13 \frac{g}{l}$$

Concluindo, são necessários 371,13 gramas de soda cáustica, para cada litro de água, desta forma obtém-se a molaridade desejada.

### 3.2.2 Ensaio *Flow Table*

O Ensaio de consistência de argamassas, também denominado de *flow table*, seguiu a NBR 13276-2002, fazendo uso da seguinte aparelhagem:

- Balança com resolução de 0,1 g;
- Mesa para índice de consistência;
- Molde tronco cônico;
- Soquete metálico;
- Misturador mecânico;
- Régua para medição.

Para a realização do ensaio, posicionou-se o tronco cônico no centro da mesa e, com uma colher ou espátula, acrescentou-se argamassa no interior do molde até 1/3 de sua altura. Com o soquete metálico foram aplicados 15 golpes ponderados para homogeneizar a distribuição de argamassa interna ao molde. Após este procedimento preencheu-se com mais 1/3 da altura de argamassa, chegando a 2/3 de sua altura total. Repetiu-se o passo com o soquete, aplicando-se 10 golpes. Por fim completou-se o molde com argamassa e aplicaram-se 5 golpes.

Utilizando-se uma régua metálica foi feito o nivelamento superior, deixando a argamassa moldada conforme a geometria do tronco cônico. Após este processo, retirou-se o tronco cônico, suavemente, puxando-o para cima, deixando a mistura livre. Com movimentos sincronizados de aproximadamente uma rotação por segundo foi girada a manivela da mesa de consistência por 30 vezes, sendo a abertura da argamassa, o resultado desta ação. Por fim foi medido o diâmetro da argamassa obtida com o ensaio e se fez a avaliação de consistência e plasticidade. A Figura 8 ilustra o aparelho para o ensaio de consistência e o resultado final de um ensaio de consistência.

Figura 8 - Aparelhagem para ensaio de consistência *flow table*.



Fonte: O autor, 2017

### 3.2.3 Moldagem das Argamassas

Para moldagem das argamassas foi utilizado como diretriz a NBR 13279/2005, e a NBR 13276/2002, as quais tratam de argamassas para assentamento e revestimento de paredes, e, tetos e preparo das misturas, respectivamente. De acordo com as normas, utilizou-se para confecção dos corpos de prova a aparelhagem listada a seguir e demonstrada através da Figura 9:

- Misturador mecânico
- Moldes prismáticos com paredes removíveis e dimensões 4X4X16 cm;
- Mesa de adensamento por queda;
- Nivelador de camadas;
- Régua metálica;

Figura 9 - Aparelhagem para moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Araujo (2017).

A preparação das argamassas iniciou-se com a adição da solução alcalina, composta por soda cáustica e silicato de sódio, na cuba do misturador mecânico. Na sequência ligou-se o equipamento em velocidade baixa, durante cinco minutos. Após este período, incrementou-se o metacaulim, agitando por mais cinco minutos. Realizou-se, então, uma parada para verificação e mistura manual, por um minuto e, na sequência, acionou-se novamente, por cinco minutos, o misturador. Após esta interação do metacaulim com a solução alcalina, adicionou-se a areia e novamente o misturador foi ativado por dois minutos. Desta maneira obteve-se a argamassa geopolimérica, e a partir de então, iniciou-se o ensaio *flow table*.

Para execução das argamassas foram propostas nove formulações, sendo que uma delas é a formulação de referência, com o traço padrão 1:2 entre metacaulim e areia. A partir da formulação de referência foram propostas as substituições parciais de areia por vidro em pó, e em cacos. A única alteração na formulação de referência é de fato a substituição de areia por vidro, os demais parâmetros como relação sólido/líquido, quantidade de metacaulim e molaridade da solução alcalina (9 Molar) foram mantidos constantes. A Tabela 7 apresenta a dosagem utilizada na formulação de referência.

Tabela 7 - Dosagem da amostra de referência.

Parâmetros da formulação de referência					
Traço	Metacaulim	Areia	NaOH (9 mols)	Silicato de Sódio	Razão S/L
1:2	400 g	800 g	40% (139,47 g)	60% (261,52 g)	1,5

Fonte: Autor, 2018

As modificações propostas para substituição de areia por vidros em pó e em cacos, em porcentagem, são apresentadas na Tabela 8, e ilustradas na Figura 10. Nesta tabela a formulação de referência é representada como “ (0,0) ”, indicando que não há substituição de areia nem por pó, nem por cacos de vidro. As demais combinações indicam, no primeiro item do par, a porcentagem de areia substituída por pó de vidro em cada formulação e, no segundo item do par, a porcentagem de areia substituída por cacos de vidro na formulação. Os teores variados de pó foram de 0; 7,5; e 15%. Para os cacos as substituições foram de 0; 15; e 30%.

Tabela 8 - Teores de substituição de areia por cacos e pó de vidro.

(PÓ; CACOS)	PÓ (%)		
CACOS (%)	(0;0) Ref.	(7,5;0)	(15;0)
	(0;15)	(7,5;15)	(15;15)
	(0;30)	(7,5;30)	(15;30)

Fonte: Autor, 2018

Figura 10 - Corpos de prova seccionados.



Fonte: O autor (2018).

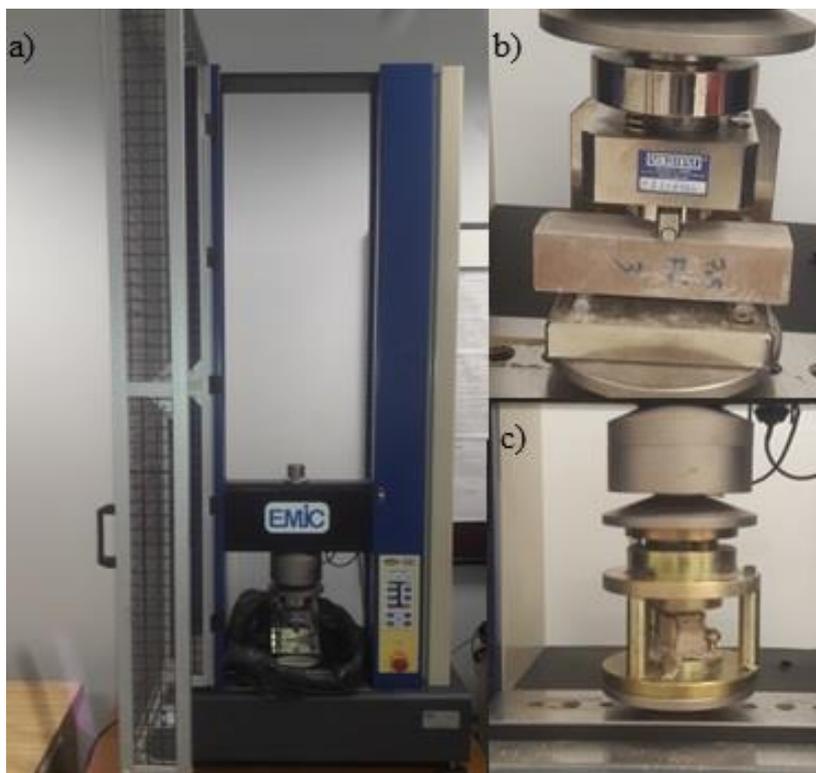
### 3.2.4 Ensaio de Tração e Compressão

Após moldagem das argamassas, conforme NBR 13279/2005, os corpos de prova prismáticos foram colocados em repouso, para cura, durante 28 dias. Decorrido este tempo, foi, então, realizado o ensaio de resistência à tração na flexão e resistência de compressão. Estes ensaios seguiram as diretrizes prescritas pela norma NBR 13279/2005.

Os ensaios foram realizados no laboratório de resistência dos materiais do centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville. Sendo os ensaios acompanhados e

guiados pelo técnico responsável pelo laboratório Robson Luiz Rosa, na máquina universal para ensaios mecânicos modelo EMIC 23-100. A Figura 11 apresenta a prensa utilizado para realização do ensaio, e as situações de flexão e compressão.

Figura 11 - a) Máquina para ensaio de compressão e flexão. b) Tração. c) Compressão.



Fonte: Autor, 2017.

A partir do ensaio realizado, obtiveram-se os valores de resistência atingidos em ambas situações ensaiadas, os quais são apresentados no capítulo de resultados.

### 3.2.5 Índices Físicos

Após romper os corpos de prova no ensaio de compressão e tração, foram realizados ensaios físicos para determinação de propriedades como absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta pelo método de imersão de Arquimedes. Este método consistiu na secagem em estufa, de pedaços já fragmentados das amostras, a aproximadamente 105 °C, com a definição do seu peso seco. Na sequência, os pedaços foram imersos em água advinda do sistema de distribuição da cidade, durante 72 horas, e novamente pesados, desta vez uma pesagem submersa e outra com a superfície seca. Desta maneira, foram obtidas três pesagens,

sendo elas: massa seca, massa imersa e massa saturada com superfície seca. Por meio de equacionamento, apresentado no capítulo de resultados, foram determinados os parâmetros requeridos. A Figura 12 ilustra as amostras em imersão, durante o período de ensaio.

Figura 12 - Amostras em imersão.



Fonte: Autor, 2017.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados nas argamassas no estado fresco e endurecido, bem como, as análises realizadas.

### 4.1 ENSAIO NO ESTADO FRESCO

Como apresentado no capítulo 3, para o estado fresco, planejou-se o ensaio de consistência, para que fosse possível realizar uma análise da argamassa logo após sua confecção, deste modo avaliando sua trabalhabilidade.

#### 4.1.1 Ensaio de consistência

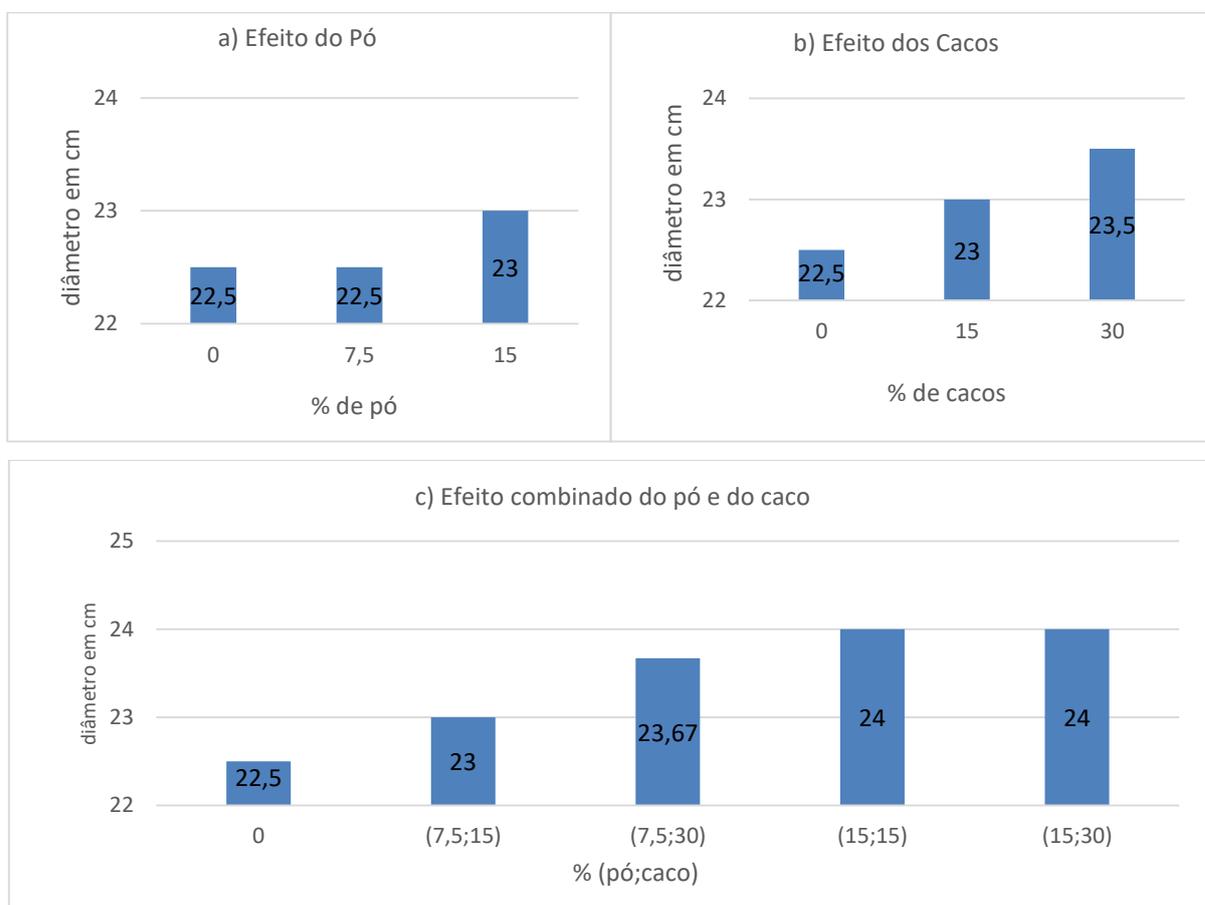
Após a confecção das argamassas, de acordo com as normas apresentadas anteriormente, foi realizado o ensaio de consistência (*flow table test*), com todas as formulações em estudo. Foram aferidos os diâmetros das aberturas, obtendo-se, de modo geral, pequena variabilidade, mantendo-se uma boa trabalhabilidade. A Figura 13 apresenta uma amostra das argamassas que foram elaboradas e o Gráfico 2, apresenta os valores obtidos para cada uma das formulações.

Figura 13 - Argamassa confeccionada.



Fonte: O autor, 2017.

Gráfico 2 - Abertura das argamassas. a) Percentuais de pó. b) Percentuais de cacos. c) Percentuais combinados de pó e cacos.



Fonte: O autor, 2018

A partir da análise dos resultados apresentados no Gráfico 2, verifica-se que, como esperado, a formulação de referência apresentou o mesmo diâmetro encontrado em trabalhos anteriores como de Rosseto (2017) e Shwitzky (2017). Constata-se um aumento gradativo na abertura das formulações com a substituição parcial da areia por pó de vidro e cacos, em relação à amostra de referência. Para o efeito da substituição isolada de areia por pó, verifica-se uma invariabilidade no diâmetro para a substituição de 7,5% em relação a amostra de referência, para a substituição de 15% é detectado um aumento de 0,5 cm no diâmetro das argamassas. Este fato evidencia que, a partir de um determinado percentual de substituição de areia por pó, a heterogeneidade das partículas começa a aparecer e a aderência das mesmas é diminuída, aumentando a abertura.

Para o efeito isolado dos cacos, observa-se um aumento do diâmetro da abertura com o aumento das porcentagens de substituição. Para o teor de substituição de 15%, o diâmetro cresceu em relação à formulação de referência e apresentou-se numericamente idêntico ao

diâmetro obtido para 15% de substituição de areia por pó, 23 cm. Já para a substituição por 30% de cacos a abertura foi maior, atingindo 23,5 cm.

Na análise do efeito combinado de substituições de areia por cacos e pó, na formulação combinada com 7,5% de pó e 15% de cacos, verifica-se a mesma abertura (23 cm) do que para a formulação com substituição parcial da areia unicamente por 15% de cacos. A partir deste fato, entende-se que a abertura devido à substituição de caco foi mantida, e que o efeito de 7,5 % de pó ainda não é percebido no diâmetro da argamassa. Na formulação combinada com 7,5% de pó e 30% de cacos, o diâmetro da abertura foi de 23,67 cm. Percebe-se um aumento de 0,17 cm em relação à formulação combinada de 7,5% de pó e 15% de cacos, que possivelmente seja consequência da maior quantidade de cacos nesta matriz. Nesta formulação, o efeito do pó é potencializado. Para a formulação composta de 15% de pó e 15% de caco, a abertura foi de 24 cm, observando os valores isolados para estes percentuais, encontra-se 23 cm, para ambos. O efeito combinado gera aumento de 1 cm, em função da maior quantidade de vidros inseridos.

O tamanho das partículas inseridas e suas formas tem influência nas aberturas, o pó isoladamente não apresenta tanto o efeito, mas pode-se perceber que no seu maior percentual de 15%, demonstra um espalhamento maior, quando comparado com a referência. O caco evidencia esta proposição relativa ao tamanho das partículas, pois apresenta um aumento gradativo no diâmetro da abertura, conforme seu percentual de substituição por areia aumenta.

Quando é feita a análise do efeito combinado dos materiais, pode-se verificar a menor aderência (aumento da abertura), indicando que, caso os percentuais de substituição fossem maiores, os diâmetros obtidos seriam maiores.

Em todos os casos, os valores encontrados para as aberturas, são satisfatórios para as questões de trabalhabilidade de argamassas, em relação a amostra de referência, pois ficaram com valores próximos da mesma, com variação máxima de 1,5 cm.

#### 4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta sessão são apresentados ensaios posteriores aos 28 dias de cura das argamassas em estudo neste trabalho, buscando-se conhecer o efeito dos materiais pesquisados dentro de uma matriz geopolimérica.

### 4.2.1 Propriedades Físicas

Para a determinação das propriedades físicas utilizou-se o ensaio de Arquimedes, podendo assim obter algumas características referentes a substituição do vidro em pó e em cacos dentro da matriz geopolimérica. É importante evidenciar que para estes testes foram utilizados 3 corpos de prova seccionados ao meio, ou seja haviam ao menos 6 resultados para cada uma das formulações, para que fossem aceitáveis os valores das propriedades físicas que serão apresentadas a seguir.

De antemão à apresentação dos resultados, são lembradas as equações utilizadas para determinação de cada uma das propriedades estudadas, de acordo com as equações 6, 7 e 8.

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_s} * 100 \quad (6)$$

$$\text{Densidade aparente} = \frac{m_s}{m_{ss} - m_i} \quad (7)$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{m_{ss} - m_s}{m_{ss} - m_i} * 100 \quad (8)$$

Onde:

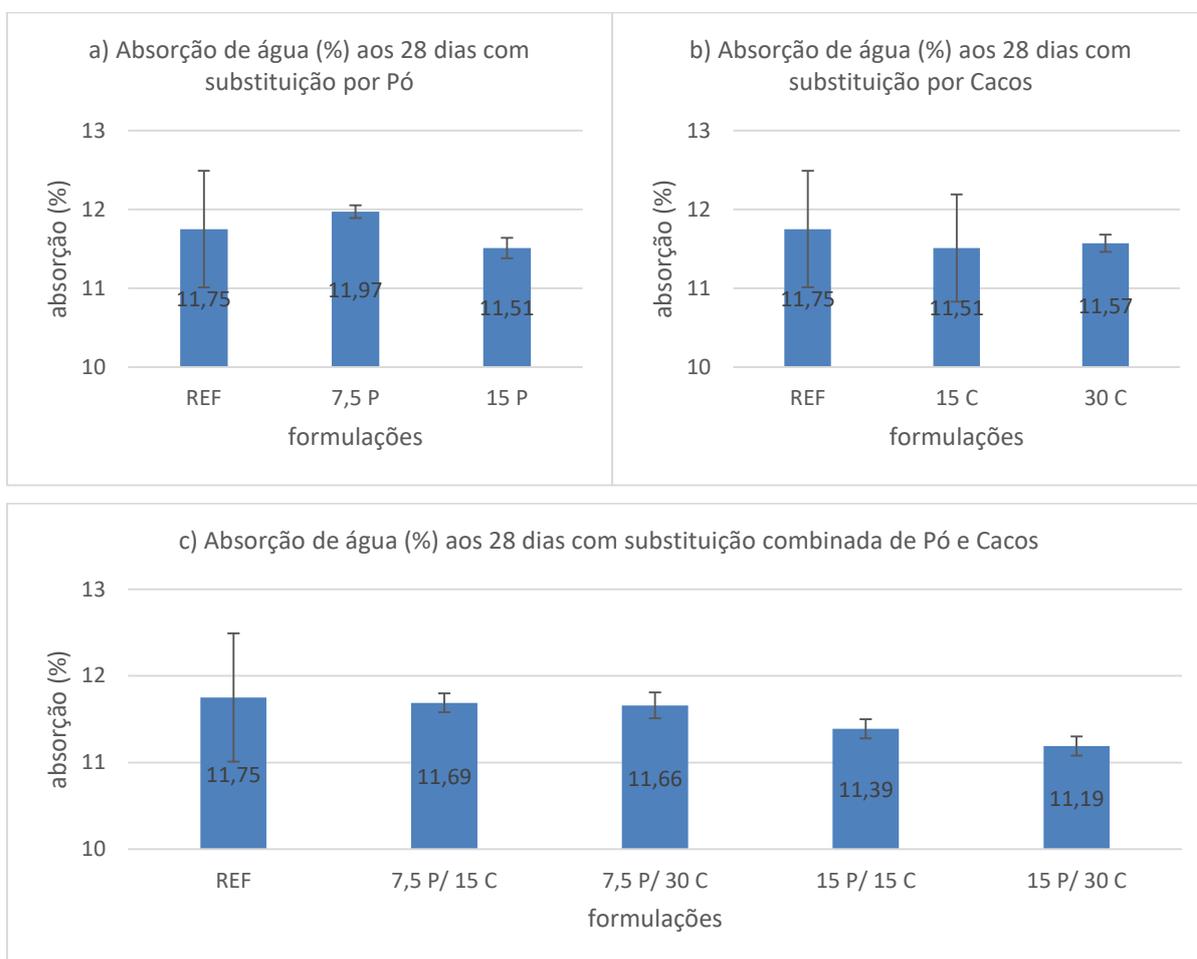
$m_{ss}$  = massa saturada com superfície seca       $m_i$  = massa imersa       $m_s$  = massa seca

#### 4.2.1.1 Absorção de Água aos 28 dias de cura

Com as substituições feitas, não houve mudanças muito significativas para a absorção de água dos corpos de prova, e também não houve uma tendência linear nos resultados. Os valores encontrados ficaram próximos aos resultados encontrados para a amostra de referência.

Com exceção ao corpo de prova com 7,5 % de substituição de areia por pó, que se afasta de forma mais expressiva em relação à composição de referência, os demais resultados de porosidade podem ser considerados iguais, com pequenas variações que podem, inclusive, ser consequência do próprio processo de moldagem dos corpos de prova. Com a aumento da substituição por pó, para 15%, os valores voltam a aproximar-se da referência. Pode ser observado no Gráfico 3, os resultados obtidos.

Gráfico 3 - Absorção de água aos 28 dias. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. c) Substituição para o efeito combinado de pó e cacos.



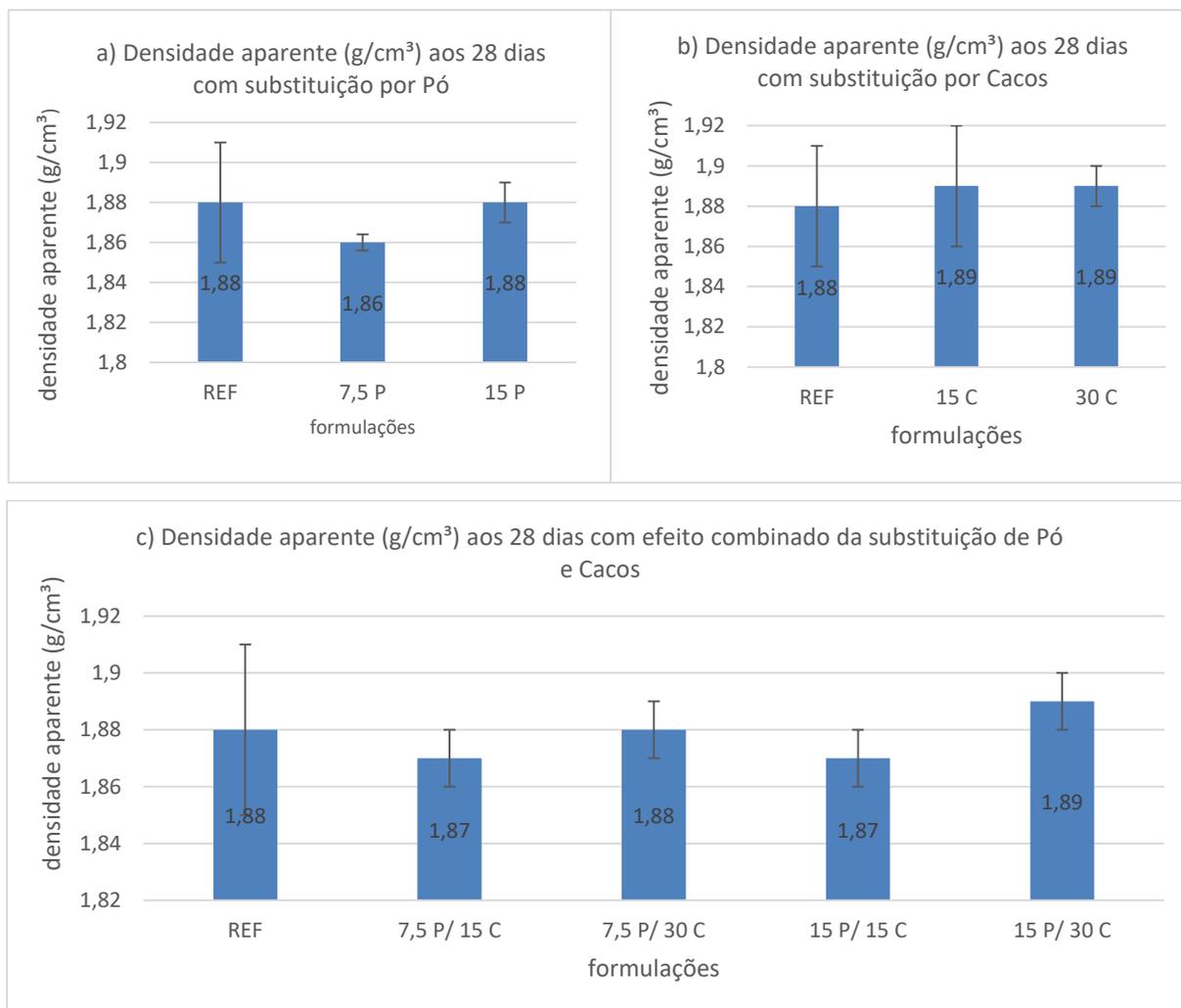
Fonte: O autor, 2017.

É importante salientar aqui que o vidro utilizado tem origem na areia, o que o torna com características muito semelhantes, deixando os resultados muito próximos ao parâmetro de referência.

#### 4.2.1.2 Densidade Aparente

Para esta caracterização, apesar da pouca variação na densidade, verifica-se que nas substituições por cacos, ocorreu o aumento da densidade em relação à formulação de referência, porém, o desvio padrão da referência é maior que os demais. Desta maneira para os cacos pode-se dizer que a densidade é mantida constante em relação à referência. Os resultados de densidade aparente são apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Densidade aparente.



Fonte: O autor, 2017.

Analogamente ao exemplo dado ao caco, remetido ao tamanho e forma da partícula, salienta-se que o pó utilizado, foi o passante na peneira de 150 milímetros, a densidade do pó é inferior à da areia, porém dentro dos desvios padrão pode-se considerar que a densidade permanece constante.

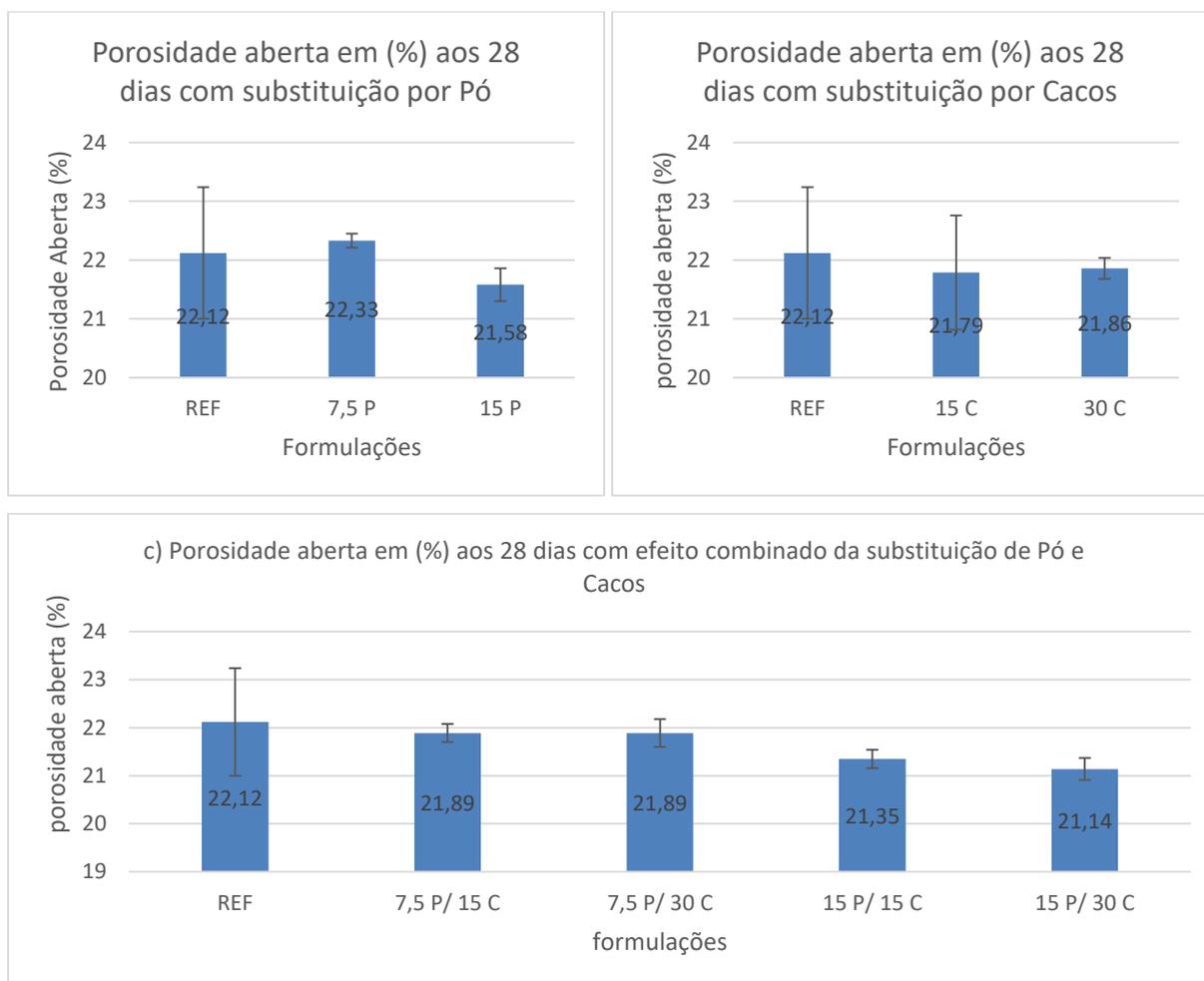
Apesar de que em alguns resultados apresentados o pó diminui a densidade enquanto o caco aumenta. Com os desvios padrões apresentados, pode-se dizer que a densidade sofre pouca variação com os teores percentuais substituídos.

#### 4.2.1.3 Porosidade Aberta

Existe a tendência de uma diminuição da porosidade, com ambos os materiais, com exceção do percentual de 7,5 de pó isolado, o qual já vem apresentando erro nas demais

propriedades, não seguindo uma linearidade. Entretanto, ao se observar as demais formulações, no Gráfico 5, percebe-se a tendência de redução da porosidade com as substituições de areia pelo pó e cacos de vidro. Este fato pode ser explicado de maneiras distintas para o efeito de substituição de pó e cacos.

Gráfico 5 - Porosidade das argamassas. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. c) Substituição combinada de pó e cacos.



Fonte: O autor, 2017.

A inserção de pó reduz os vazios presentes no corpo de prova, já a inserção de cacos, por se tratar de elementos maiores, os mesmos ocupam o mesmo volume de areia, sem produzir vazios (não permitindo a entrada de água no ensaio realizado). Verifica-se que os parâmetros ficam muito próximos um dos outros, podendo-se dizer que em média os valores chegam a ser iguais.

### 4.2.3 Resistência Mecânica

Para estes parâmetros foram realizados ensaios na máquina universal para ensaios mecânicos, conforme apresentado no capítulo 3.

#### 4.2.3.1. Resistência à Compressão

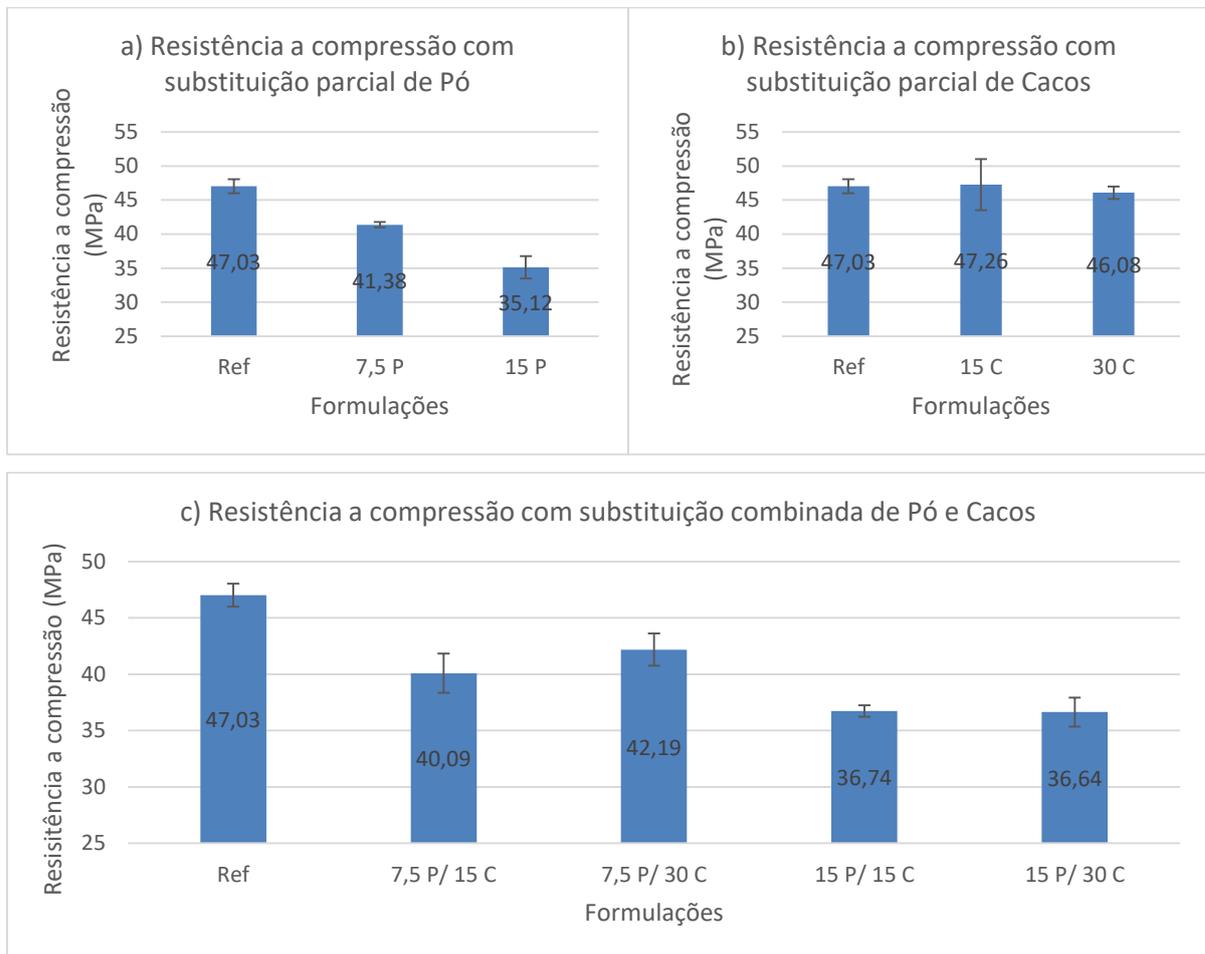
Realizados os ensaios para avaliação da resistência à compressão dos corpos de prova, verificou-se de maneira comparativa, que, para os corpos de prova com substituição de areia unicamente por cacos, a resistência de compressão manteve-se bastante próxima da obtida para a amostra de referência, com 47,03 MPa. Já para os corpos de prova com substituição de areia por pó, verificou-se uma crescente redução na resistência com o aumento da porcentagem de pó. Para a formulação com 7,5% de pó houve uma redução de aproximadamente 12% na resistência à compressão, enquanto que para a formulação de 15% de pó, a redução chegou a 25%.

Para o efeito combinado dos materiais (vidros em pó e em cacos) verifica-se uma queda na resistência, o que não garante uma boa união das partículas. Conclui-se, então, que o pó diminui a resistência a compressão, e o caco, em determinados percentuais, pode fazê-la aumentar, tornando este uma opção na produção de argamassas geopoliméricas.

Os resultados isolados da substituição por cacos têm desempenho satisfatório em relação à referência pré-estabelecida, o que viabiliza a utilização deste material em substituição a areia, diminuindo-se assim, em maiores escalas a utilização dos recursos naturais, por materiais que já se encontram no cotidiano. Para o caso do pó, a utilização deve ser mais criteriosa, haja visto, que o mesmo apresentou redução significativa de resistência à compressão, quando substituído pela areia nas misturas. De toda forma pode ser uma opção, haja visto que apesar da queda nos valores, são resultados que podem ser aplicados, dependendo das necessidades.

O Gráfico 6 a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão, obtidos por todos os corpos de provas ensaiados.

Gráfico 6 - Resistência à compressão das formulações ensaiadas. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado de pó e cacos.



Fonte: O autor, (2017).

Verifica-se que a formulação com 15% de cacos atingiu o maior valor de resistência, podendo-se afirmar que é aceitável a substituição parcial por volta de 15% de cacos em uma matriz, mantendo-se o valor de compressão no mesmo nível que uma argamassa de referência. Para a formulação com 30% de cacos, a resistência fica próxima da referência, porém ocorre uma queda, aproximadamente 2%, podendo ser explicada pela fragilidade, que é aumentada dentro da matriz, pois a capacidade de deformação diminuí, tornando o corpo de prova mais rígido, e assim o rompendo com um esforço solicitante menor. Para o pó, dependendo da aplicação, seu emprego pode ser realizado, por exemplo em blocos de alvenaria, que são utilizados em edificações como paredes de divisão de ambientes, assim exigem resistências muito abaixo das encontradas.

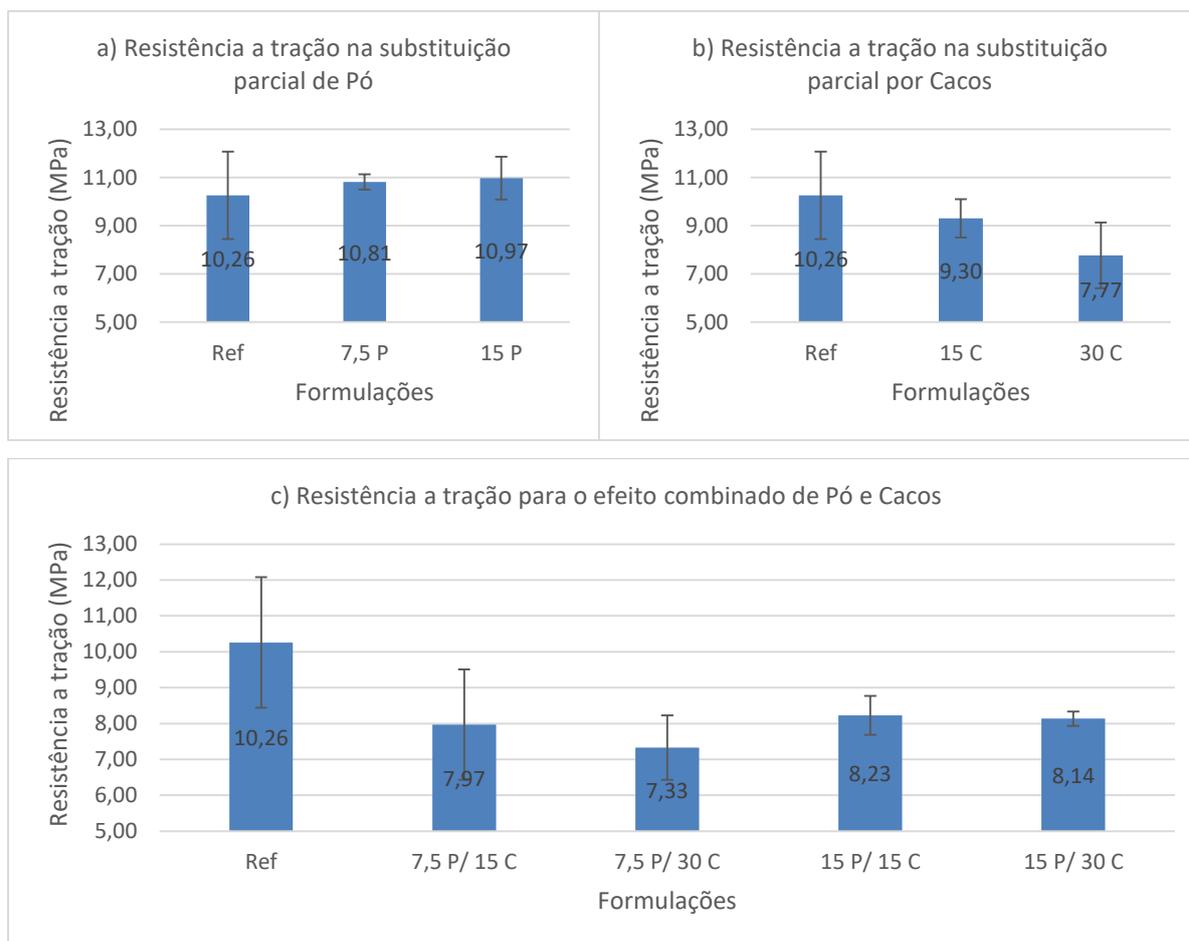
#### 4.2.3.2 Resistência à Tração na Flexão

De modo geral, as composições com substituição de areia por pó apresentaram resistências à tração bastante similares àquela obtida para a composição de referência de 10,26 MPa. Levando-se em conta os desvios pode-se dizer que a resistência à tração permanece constante.

Para as formulações com substituição de areias por cacos observou-se uma diminuição na resistência à tração, para a formulação com 15% de substituição por cacos a redução esteve em torno de 10%, enquanto que para a formulação com 30% de caco, esta redução chegou a 25%.

O Gráfico 7, apresenta os valores encontrados para tração na flexão dos corpos de prova.

Gráfico 7 - Resistência à tração. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado de pó e cacos.



Fonte: O autor, (2018)

No efeito combinado, os cacos apresentaram maior influência na redução da resistência à tração, já o pó aumenta esta resistência. Este fato pode ser verificado na análise do corpo de prova com 30% de caco isolado, no qual obteve-se uma resistência de 7,77 MPa, e quando nessa formulação substituiu-se mais 15% de areia por pó, o valor de resistência sobe para 8,14 MPa.

A partir dos ensaios realizados para resistência mecânica, conclui-se que a substituição dos materiais escolhidos para estudo, são viáveis, e que seus efeitos isolados para os cacos apresentam melhores resultados quando comparados com o efeito combinado. Desta forma é aceitável o uso dos materiais, fazendo-se uma análise prévia da aplicação da argamassa, sendo que para tração, o pó apresenta melhores resultados que a areia, e na compressão os cacos são uma boa alternativa na substituição da matéria prima.

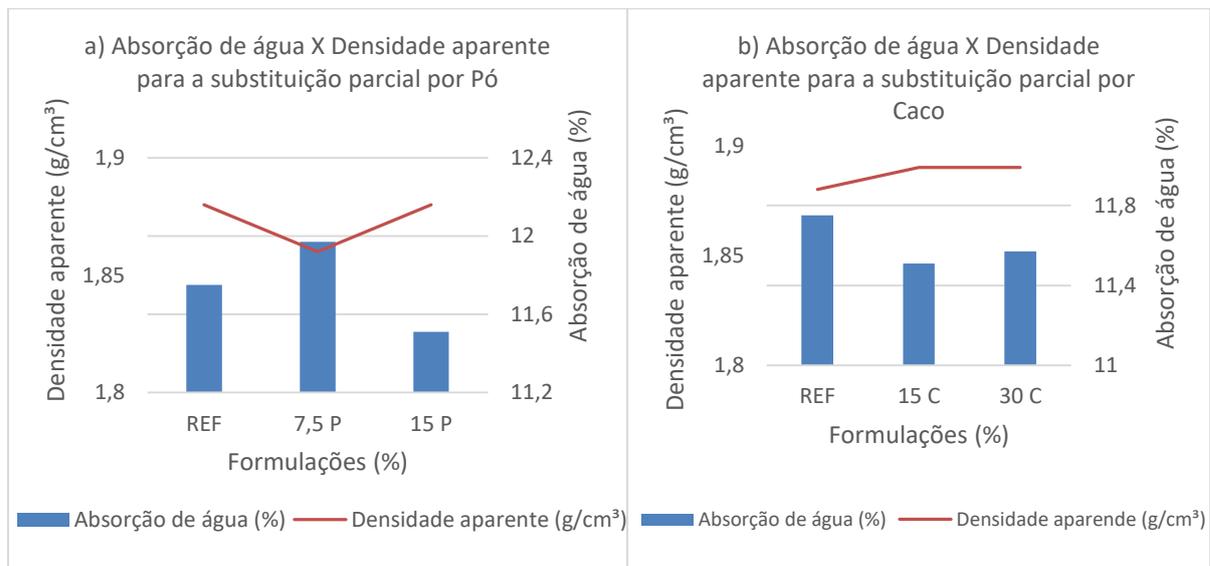
#### 4.3 RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS

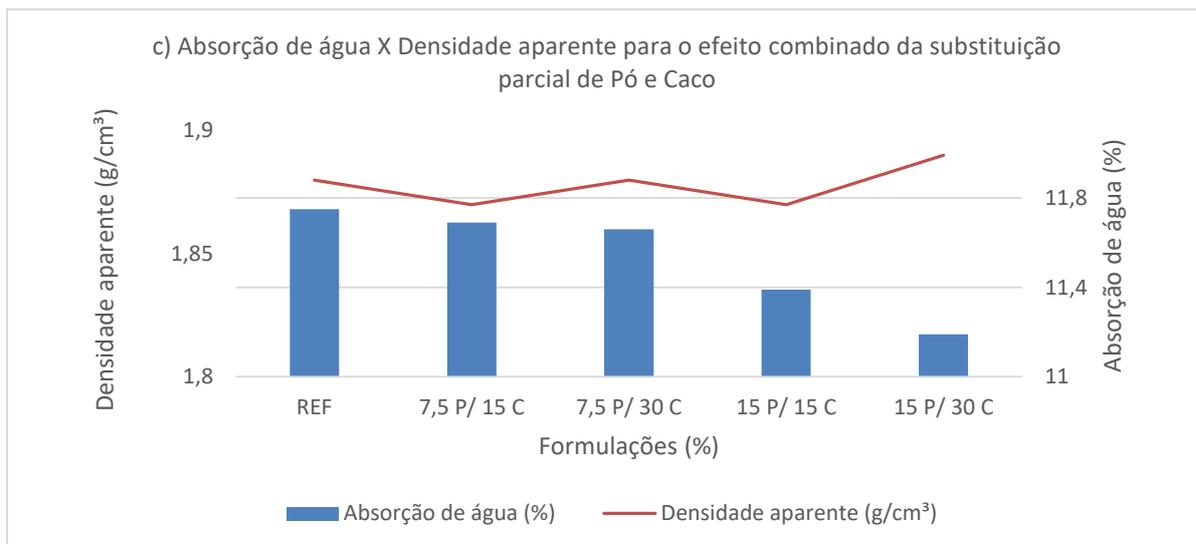
Serão analisadas nesta sessão algumas correlações entre as propriedades físicas apresentadas anteriormente.

##### 4.3.1 Absorção de água X Densidade aparente

O Gráfico 8, apresenta as correlações entre as propriedades em análise.

Gráfico 8 - Absorção de água X Densidade aparente. a) Substituição por pó.  
b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado para pó e cacos.





Fonte: O autor, 2017.

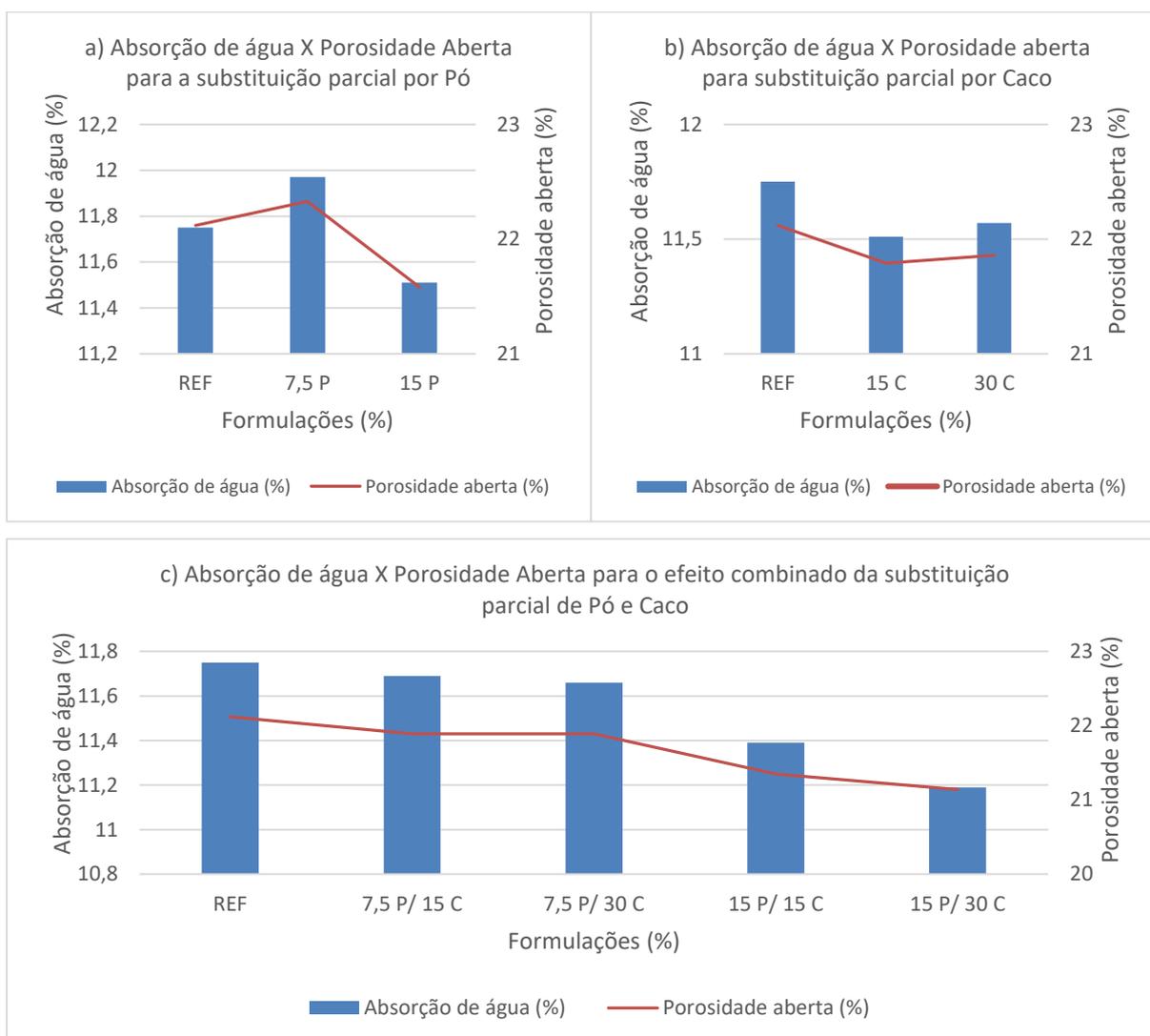
Constata-se que a absorção de água e a densidade aparente são inversamente proporcionais. De acordo com a Figura 23, pode-se verificar esta ocorrência em todas as formulações, com exceção da formulação com 7,5%, de pó, a qual já foi citada anteriormente neste trabalho, tratando-se de um possível erro.

É justificável a menor absorção de água pelo fato de que areia é retirada das matrizes, sendo substituída por cacos e o pó. No caso do pó, por se tratar de partículas menores (passantes na peneira de 150 mm), e menos densas que a areia, ocupando espaços vazios e impossibilitando a passagem de água.

#### 4.3.2 Absorção de água X Porosidade aberta

Absorção e a porosidade são diretamente proporcionais. Isto deve-se ao fato da porosidade ser determinada de acordo com a água absorvida e evaporada dentro de uma matriz, ao longo do tempo. O Gráfico 9 apresenta as relações pertinentes à sessão. Os resultados são analisados simultaneamente por serem proporcionais, quando a absorção diminui a porosidade também diminui, analisando as formulações combinadas, verifica-se que o fenômeno que ocorre é de fato a diminuição da porosidade e da absorção de água.

Gráfico 9 - Absorção de água X Porosidade aberta. a) Substituição por pó.  
b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado de pó e cacos.

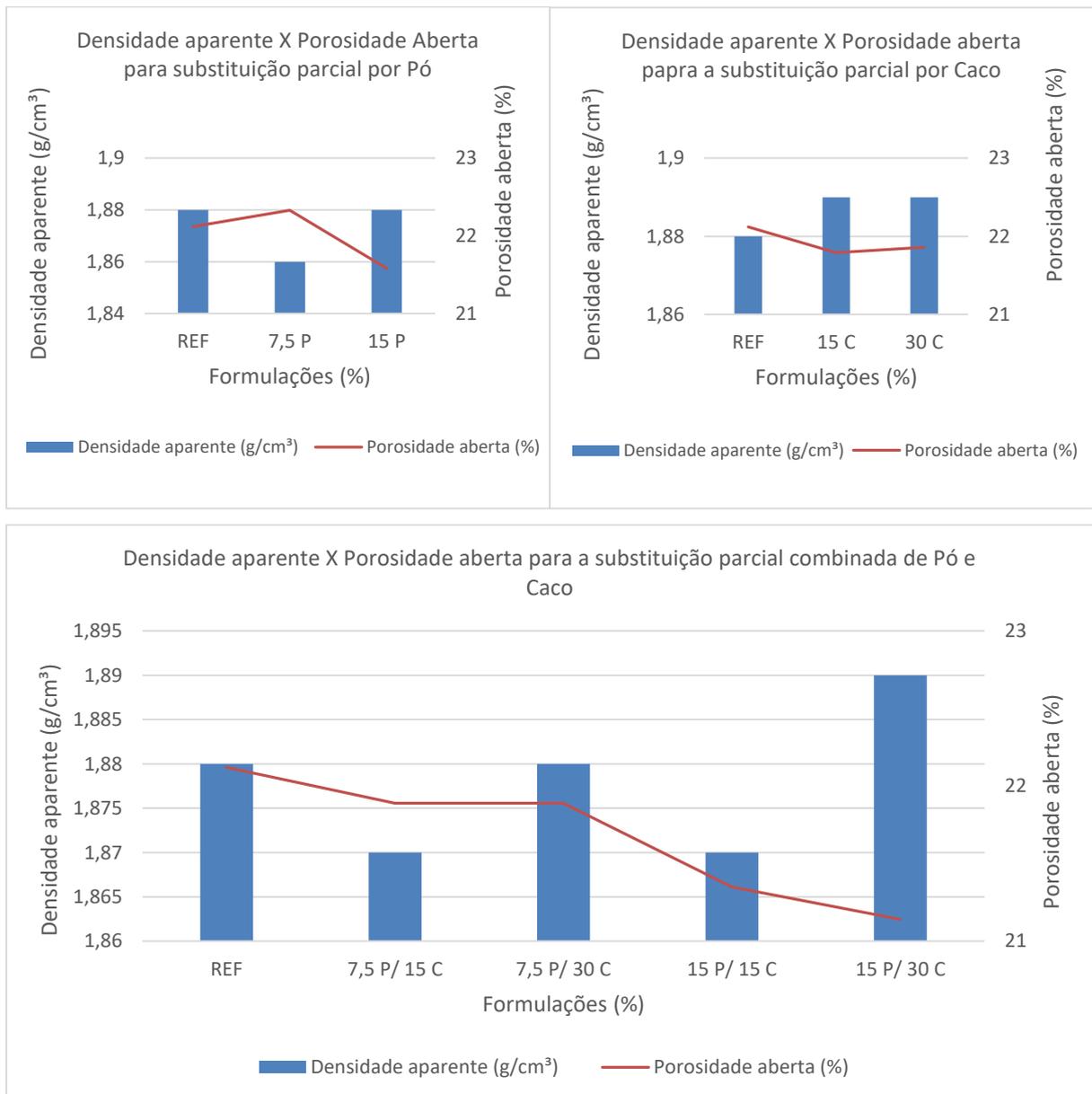


Fonte: O autor, 2017

### 4.3.3 Densidade aparente X Porosidade aberta

Densidade e a porosidade são inversamente proporcionais, partindo do conceito de que os poros são espaços ocupados apenas por ar, quando esse espaço é preenchido por algum material, esse volume se torna mais denso. Pode se dizer que o volume ocupado pelo pó é maior dentro da matriz, enquanto sua densidade é menor, quando comparado com a areia e apesar de a densidade diminuir no caso do pó, a porosidade também pode diminuir nesse caso. Para o caco, verifica-se a mesma situação na questão da diminuição da porosidade, esse fato é verificado no Gráfico 10. Os resultados combinados confirmam a hipótese da queda na porosidade.

Gráfico 10 - Densidade aparente X Porosidade aberta. a) Substituição por pó.  
b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado de pó e cacos.



Fonte: O autor, 2017.

#### 4.4 ANÁLISES DOS RESULTADOS COMBINADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS E FÍSICOS

Nesta seção são apresentados os resultados correlacionando-se as propriedades físicas com as propriedades mecânicas, a fim de compreender a influência entre as mesmas.

#### 4.4.1 Resistência à Compressão X densidade aparente

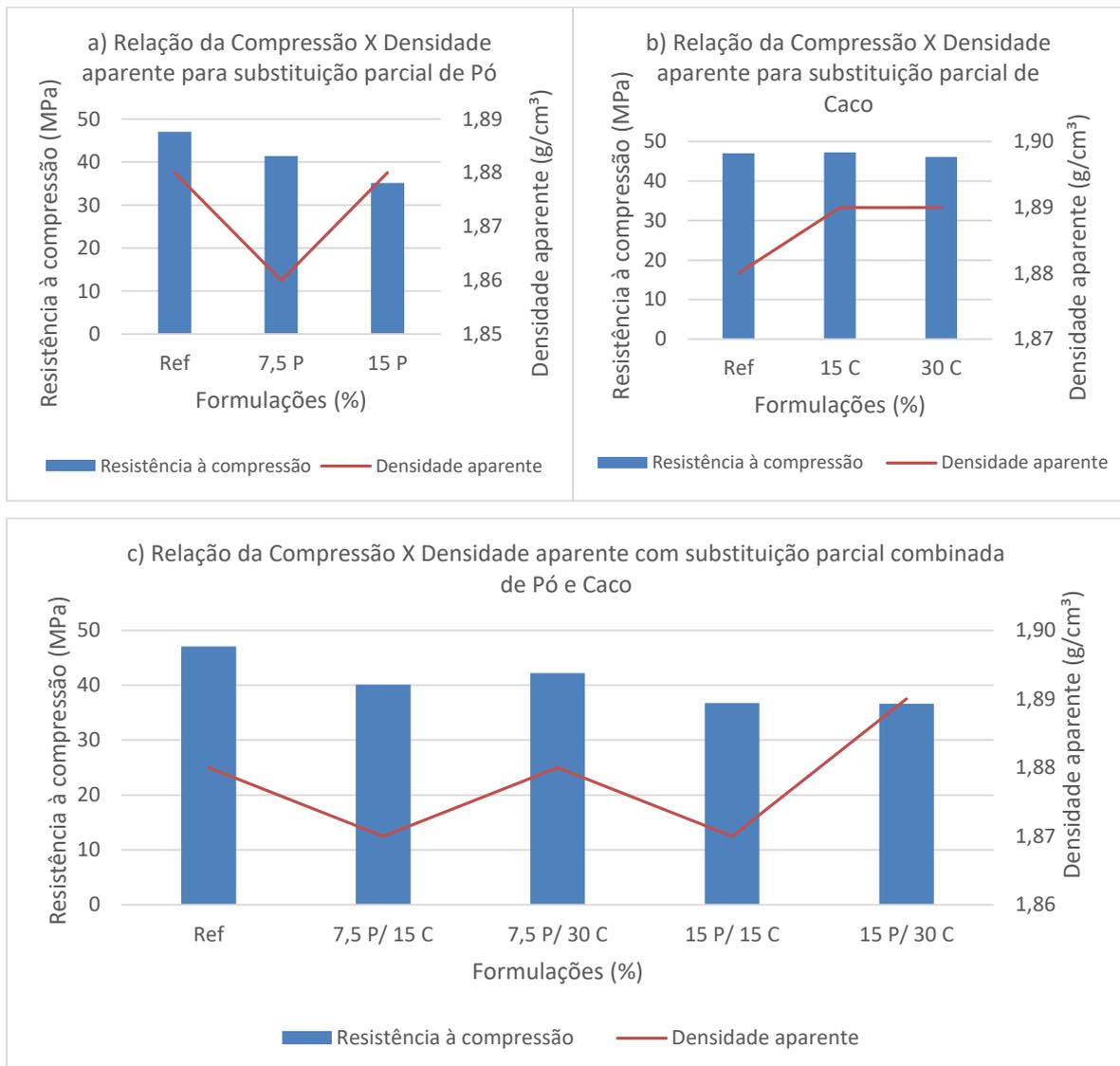
Observa-se neste caso, que conforme a densidade aparente aumenta, a resistência à compressão também aumenta. Este fato é conhecido e explicado pela ciência dos materiais, devido ao conceito de quantidade de massa contido em um determinado volume. Quando analisadas as densidades dos materiais, percebe-se que o pó possui menor densidade, em relação ao caco, ( $0,75 \text{ g/cm}^3$  e  $1,42 \text{ g/cm}^3$  respectivamente).

Fatos que podem ser explorados, são a questão de haver uma maior densidade na formulação isolada de 30% de cacos, em relação a referência, porém a resistência à compressão diminui, o que já havia sido debatido anteriormente referente a restrição na deformação devido ao aumento de materiais mais rígidos dentro da matriz, pois entende-se que o vidro em cacos por possuir grãos maiores apresenta essa característica. Para os cacos, conclui-se que em torno dos 15%, é o limite de substituição para esta matriz em relação ao ganho de resistência à compressão, a partir disso, a matriz torna-se mais rígida, diminuindo assim sua resistência de compressão.

Para o pó, o conceito de densidade pode ser melhor aplicado para justificar a queda na redução da resistência à compressão. Verifica-se que há uma redução linear ao passo que mais pó é inserido na matriz, com 15% de pó isolado já se verifica a redução de 25% na resistência à compressão.

Pode-se concluir nesta correlação, no Gráfico 11, que a resistência à compressão e a densidade são proporcionais.

Gráfico 11 - Relação da compressão X Densidade. a) Substituição por pó.  
b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado para pó e cacos.

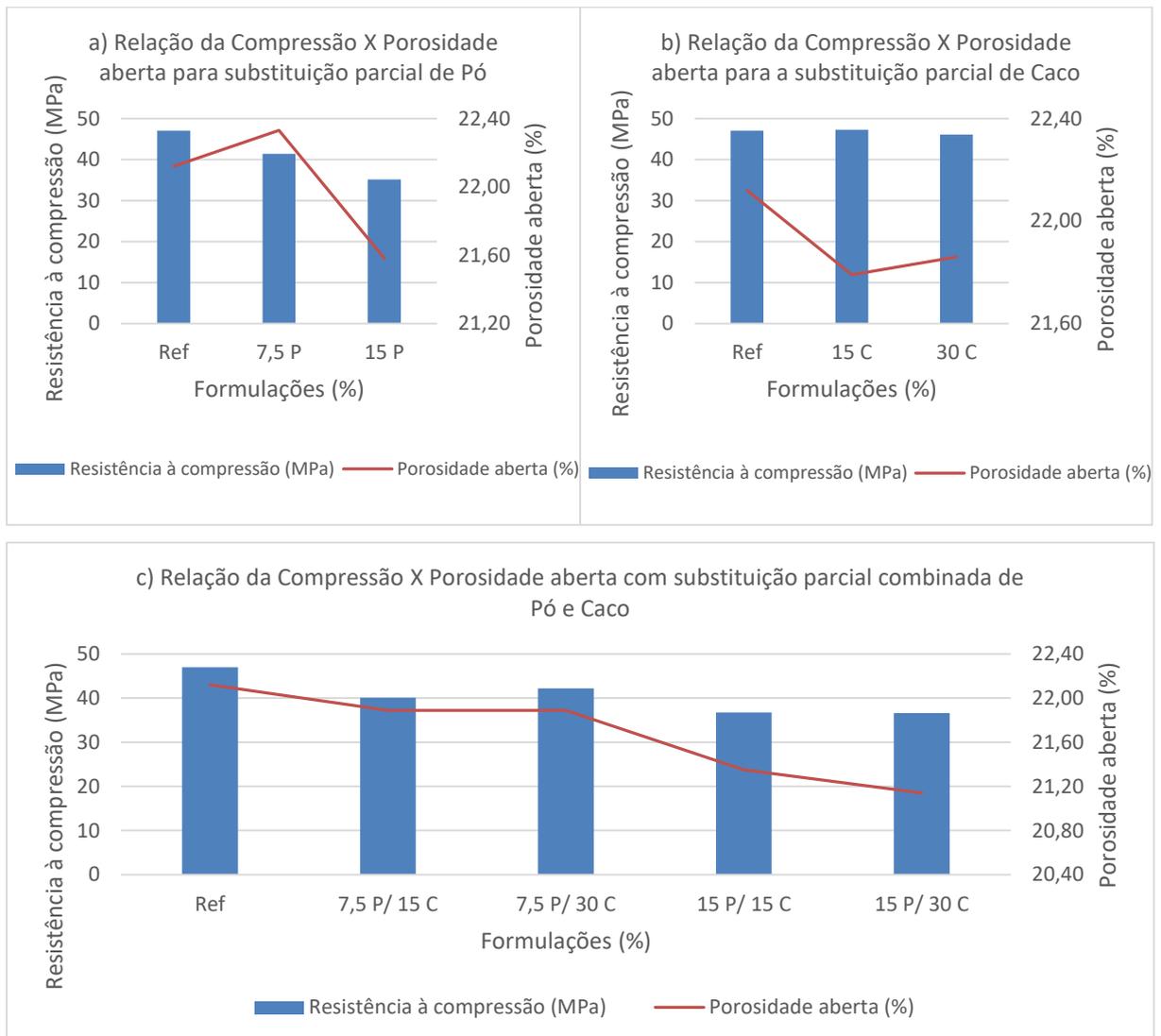


Fonte: O autor (2018)

#### 4.4.2 Compressão X Porosidade

Os resultados de resistência à compressão X porosidade são apresentados no Gráfico 12, Já mencionado anteriormente, porosidade está ligada ao conceito de volume de vazios por volume total, para estes resultados em questão, o que se mostra mais interessante avaliar, é onde há o efeito combinado de pó e cacos, com os percentuais de 15% e 30% respectivamente, verifica-se uma queda da porosidade, porém a resistência a compressão não está ligada diretamente a este fato, sendo outros fatores, como módulos de elasticidade mais bem determinadores deste parâmetro, porém os mesmos não foram abordados neste trabalho.

Gráfico 12 - Relação da compressão X Porosidade. a) Substituição por pó.  
b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado para pó e cacos.

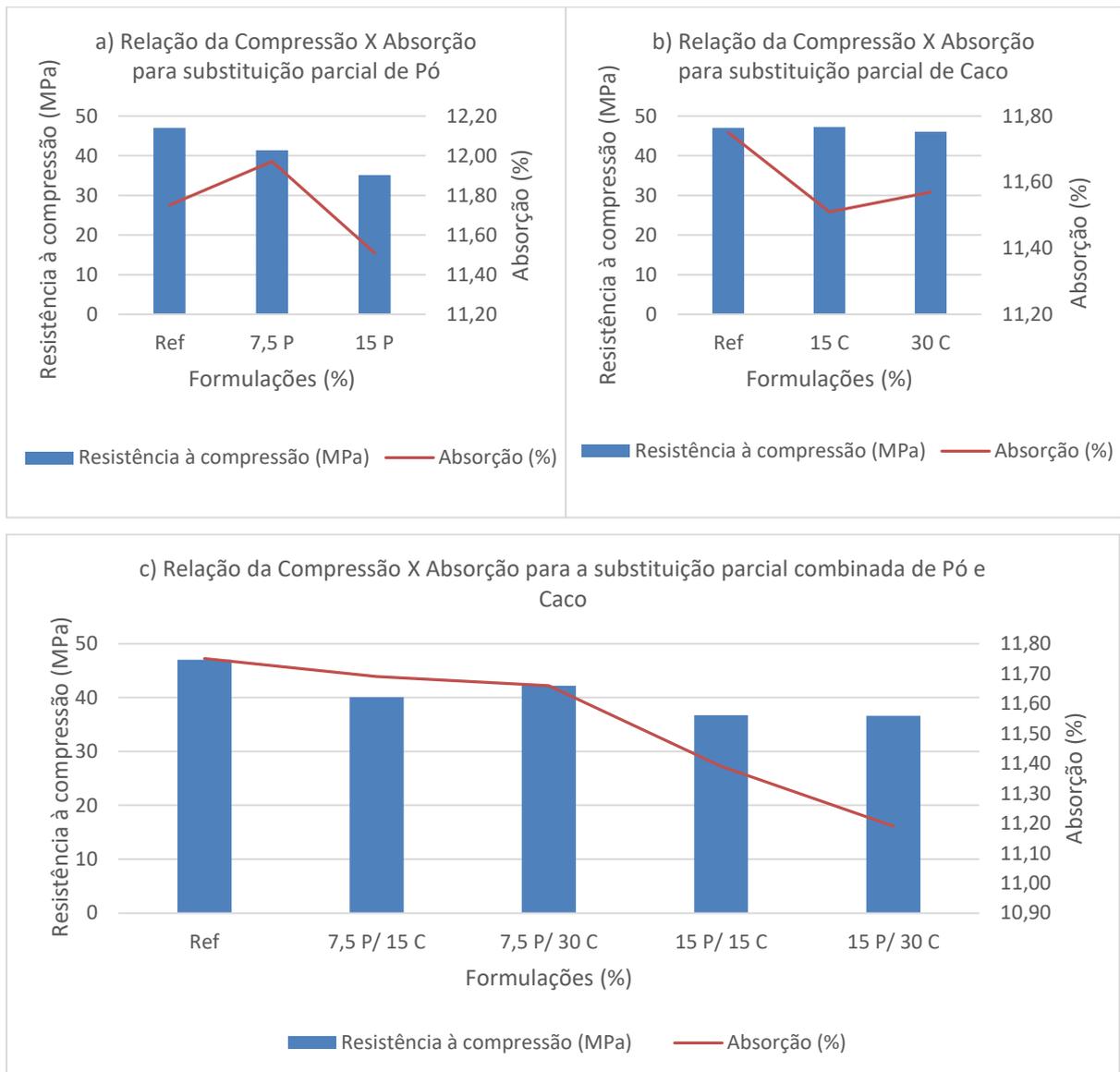


Fonte: O autor (2018)

#### 4.4.3 Resistência à Compressão X Absorção

Em geral todas as formulações absorvem menos água do que a referência. Pode-se verificar no Gráfico 13, que conforme é aumentado o percentual de pó e cacos nas formulações, a absorção diminui.

Gráfico 13- Relação da compressão X Absorção. a) Substituição por pó.  
b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado para pó e cacos.



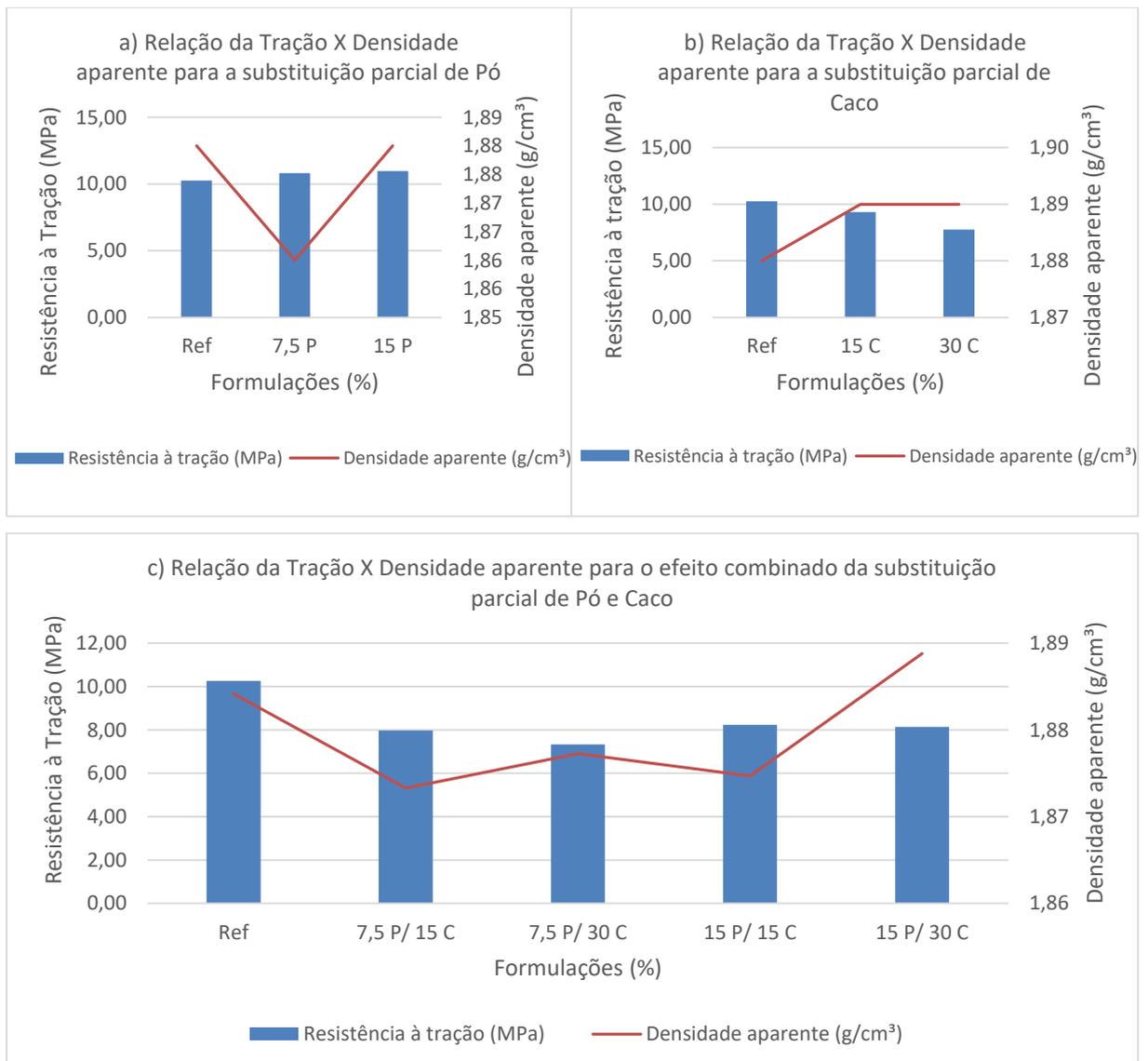
Fonte: O autor (2018)

Para o caco, a resistência a compressão aumenta ou permanece constante em relação à referência, já a absorção diminui. Entende-se que as partículas de cacos, apresentam menos poros quando comparadas a areia, e sua resistência é mais elevada. No caso do pó, a proposição de que suas partículas apresentam menos poros que a areia, permanecem, assim como para os cacos.

#### 4.4.4 Resistência à Tração X Densidade

Materiais com partículas menores, ocupam um volume maior para a mesma quantidade de massa. No Gráfico 14, verifica-se que nos corpos de prova, com efeito isolado do pó, a resistência à tração aumenta enquanto que a densidade diminui, quando comparados estes parâmetros com a formulação de referência. Para os corpos de prova com o efeito isolado dos cacos, a densidade aumenta para os percentuais de 15% e 30%, enquanto que a resistência à tração apresenta uma queda. Pode-se dizer que para a tração, os materiais mais leves, no caso o pó, apresentam desempenho mais eficiente quando comparados com os cacos.

Gráfico 14 - Relação da tração X Densidade. a) Substituição por pó. b) Substituição por caos. c) Efeito combinado para pó e cacos.



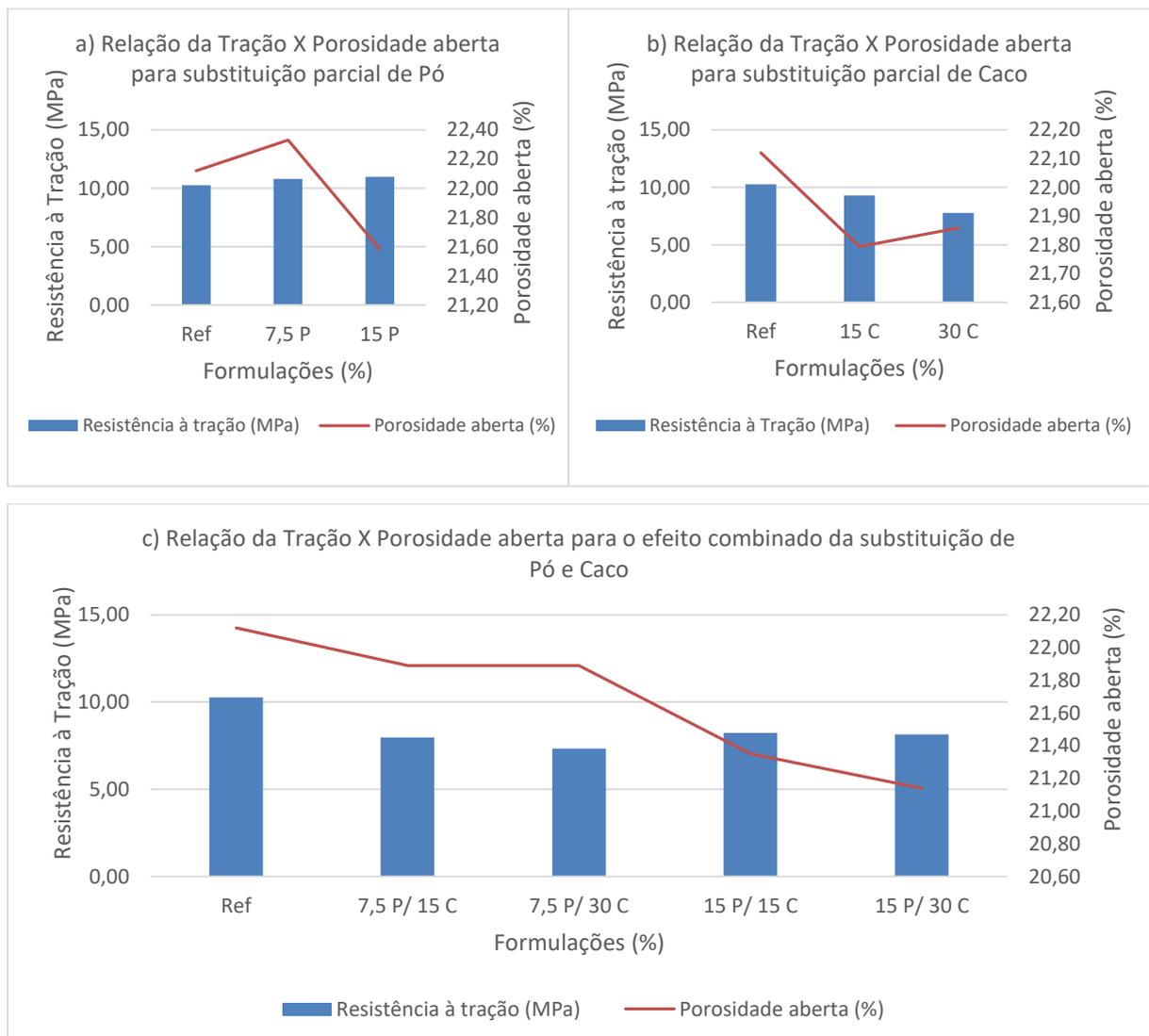
Fonte: O autor (2017).

#### 4.4.5 Resistência à Tração X Porosidade

Nesta análise pode-se verificar que quanto maior a porosidade menor será a resistência à tração, pois nos espaços vazios, chamados de poros, não há material para resistir as solicitações. O Gráfico 15, apresenta os resultados de resistência à tração correlacionada à porosidade das misturas. Verifica-se que há uma diminuição nos poros com a substituição de areia, por pó e cacos. Para o pó, no efeito isolado, entende-se que o fato de suas partículas serem menores (passantes na peneira 150 mm), permitem uma deformação maior quando solicitadas, desta maneira apresentando um aumento na resistência à tração.

Gráfico 15 - Relação da tração X Porosidade. a) Substituição por pó.

b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado para pó e cacos.

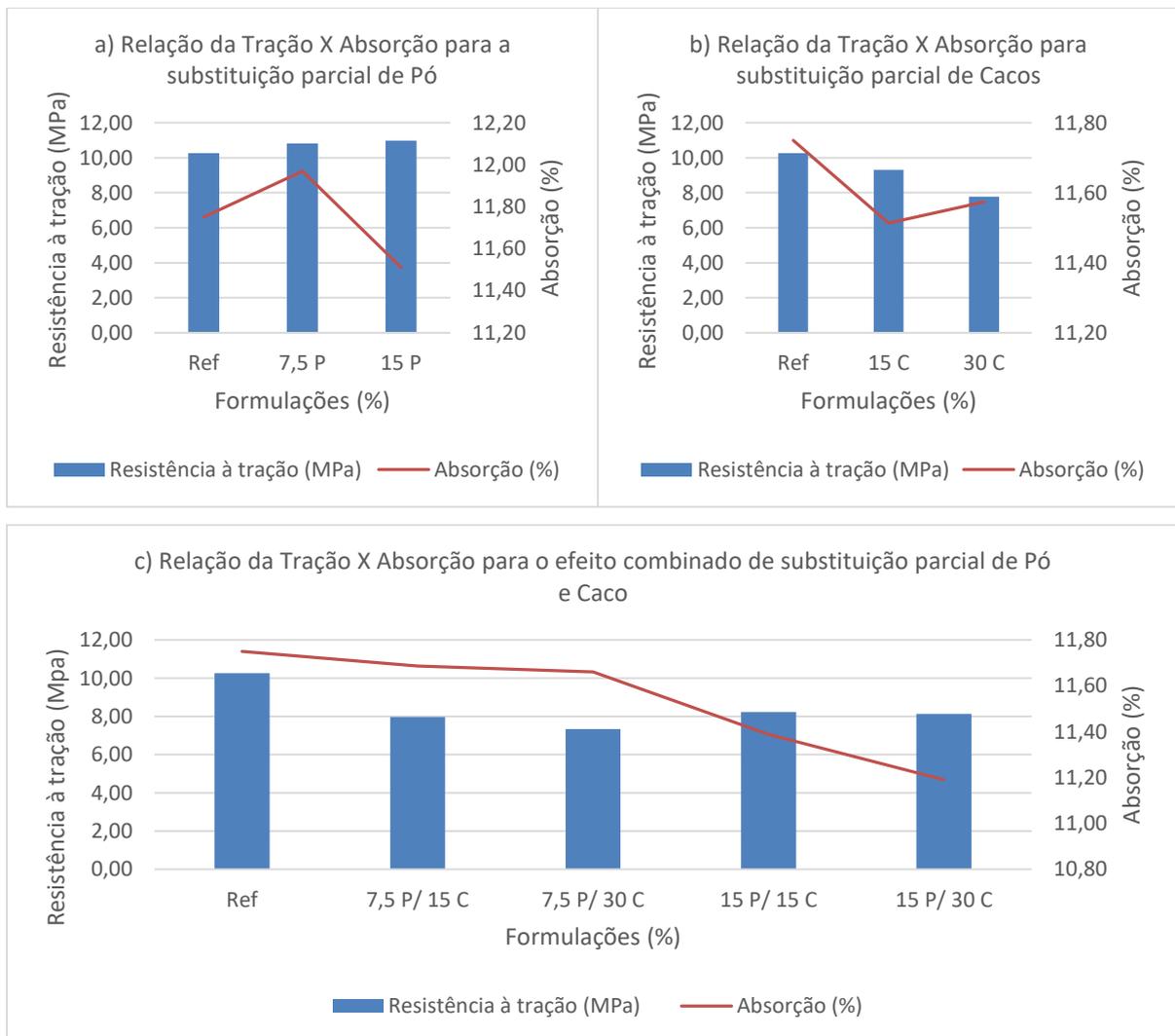


Fonte: O autor (2017)

#### 4.4.6 Resistência à Tração X Absorção

O vidro em pó apresenta resultados de resistência a tração iguais a referência, ou mesmo mais elevados, porém a diferença não é significativa. O que possibilita suas aplicações em situações onde a tração seja o esforço solicitante. Para os cacos a explicação pode ser resumida pelo tamanho das partículas, por serem maiores e mais compactas sua qualidade está na resistência a compressão, quando submetidas a tração apresentam resultados abaixo da referência, fazendo com que sua ruptura seja dada mais cedo. O Gráfico 16, apresenta as relações a seguir.

Gráfico 16 - Relação da tração X Absorção. a) Substituição por pó. b) Substituição por cacos. c) Efeito combinado para pó e cacos.



Fonte: O autor (2017).

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou conciliar o avanço tecnológico dos geopolímeros, com a sustentabilidade, de modo que propôs o estudo da substituição da areia, a qual é um recurso natural, por vidros reciclados, em pó e em cacos, em uma argamassa geopolimérica.

Os ensaios escolhidos para a o estudo, foram o ensaio da mesa de consistência (*flow table test*), para avaliação da trabalhabilidade das argamassas, o ensaio de tração e compressão, para análise da resistência mecânica, e o ensaio por imersão de Arquimedes, utilizado para obter os índices físicos, como densidade, porosidade e absorção.

No ensaio de consistência, de maneira geral, as argamassas com percentuais de vidro, apresentaram um aumento no diâmetro das aberturas, sendo que a maior diferença encontrada em relação a referência, foi de 1,5 cm, para os percentuais de substituição combinada de 30% de cacos e 15% de pó. A trabalhabilidade se manteve boa, chamando atenção por apresentar uma plasticidade maior em relação a amostra de referência.

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, os corpos de prova com substituição de pó de vidro, apresentaram valores iguais ou até mesmo levemente superiores aos da referência, os cacos isoladamente, diminuíram a resistência à tração em todos os percentuais, chegando a uma diminuição de 25% para o percentual de 30% de cacos.

No ensaio de resistência à compressão, os cacos apresentaram resultados positivos, no percentual com 15% de cacos, houve o aumento na resistência em relação a referência, o percentual de 30%, apresentou resultado um pouco abaixo da referência, fato que pode ser explicado devido ao aumento da rigidez dos corpos de prova, ou seja os corpos elevam seu estado de tensões, devido ao aumento da quantidade de cacos inseridos na matriz, diminuído assim a possibilidade de deformações, levando a ruptura mais precoce.

A respeito da densidade, foi verificado que a densidade do pó de vidro é consideravelmente menor que a da areia e dos cacos, com valor de  $0,75 \text{ g/cm}^3$ , enquanto que os cacos, ficaram com um valor de  $1,42 \text{ g/cm}^3$ . Absorção e porosidade são diretamente proporcionais, sendo que de modo geral, estes dois parâmetros foram reduzidos nas matrizes geopoliméricas.

A partir dos resultados obtidos, nos ensaios realizados, pode-se dizer que os vidros atendem de forma satisfatória, quando inseridos em geopolímeros, verificando-se que sua utilização em termos de comparação com uma referência, são de modo geral inferiores. As aplicações para tais materiais, são possíveis, porém é indispensável a utilização de critérios de

engenharia, que conheçam as solicitações a que serão empregados os materiais em estudo. No caso dos cacos, sugere-se que seja utilizado em percentuais de até 15%, em situações que as solicitações sejam esforços de compressão. Para o vidro em pó sugere-se que seu emprego seja em esforços de tração. Deste ponto de vista ambos os tipos de materiais podem ser utilizados. O efeito combinado não alcançou valores tão próximos aos da referência, quanto o efeito isolado, porém ainda assim podem ser considerados usuais, dependendo do tipo de aplicação, pois não são em todas as aplicações que são exigidos valores elevados de resistência, deste modo, reduzem de maneira considerável a utilização de recursos naturais.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise das propriedades térmicas, acústicas e microestrutural;
- Análise da composição química;
- Variação dos teores utilizados de pó e cacos;
- Variação do traço, relação sólido/líquido;
- Analisar o comportamento reológico das misturas.

## REFERÊNCIAS

ABIVIDRO. **Anuário abividro 2007**. São Paulo, 2007.

ALBERS A. P. F. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP. 2002.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. SP. Pini, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - terminologia. 3 ed. Rio de Janeiro, 2011. 12 p. Disponível em: <[https://www.passeidireto.com/arquivo/5531732/nbr-9935\\_2011-agregados](https://www.passeidireto.com/arquivo/5531732/nbr-9935_2011-agregados)>. Acesso em: 25 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento. 1982. 7 p. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/sheyqueiroz/nbr-721482-areia-para-ensaio-de-cimento>>. Acesso em: 25 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento portland em concreto, argamassa e pasta. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010. 8 p. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/19077550/nbr-15894-1-2010---metacaulim-para-uso-com-cimento-portland-em-concreto-argamass>>. Acesso em: 25 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p. Disponível em: <<http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-7.217-Determina%C3%A7%C3%A3o-da-composi%C3%A7%C3%A3o-granulom%C3%A9trica.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002. 3 p. Disponível em: <[https://mvalin.com.br/\\_files/200000130-823cd83375/NBR%2013276%20-%202002%20-%20Argamassa%20%20para%20Assentamento%20e%20Revestimen.pdf](https://mvalin.com.br/_files/200000130-823cd83375/NBR%2013276%20-%202002%20-%20Argamassa%20%20para%20Assentamento%20e%20Revestimen.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 9 p. Disponível em: <[https://mvalin.com.br/\\_files/200000133-ac61aad5ed/NBR%2013279%20Argamassa%20para%20assentamento%20e%20revestimento%20-%20Determina%C3%A7%C3%A3o%20da%20resist%C3%Aancia%20%C3%A0%20tra%C3%A7%C3%A3o%20na%20flex%C3%A3o%20e%20compress%C3%A3o%20.pdf](https://mvalin.com.br/_files/200000133-ac61aad5ed/NBR%2013279%20Argamassa%20para%20assentamento%20e%20revestimento%20-%20Determina%C3%A7%C3%A3o%20da%20resist%C3%Aancia%20%C3%A0%20tra%C3%A7%C3%A3o%20na%20flex%C3%A3o%20e%20compress%C3%A3o%20.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2018.

BARROSO, D. V.; COSENZA J. P.; DA ROSA, S.E.S. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. P. 101-138. Rio de Janeiro-RJ. 2007.

BOCA SANTA, R. **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 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2012.

BORGES P.H.R; LOURENÇO T.M.F; FOUREAUX A.F.S; PACHECO L.S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos à base de cimento Portland composto (CPII)**. 2014. P. 153-165. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG. 2014.

COSTA, D. L. **Estudo da adição de alumina em corpos geopoliméricos a base de metacaulim**. 2013. Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação de Engenharia de Materiais. Campina Grande-PB.2013.

DAVIDOVITS, J. **30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs**. Melbourne, Australia: Geopolymer Institute. 2002.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Geopolymer Institute. Alkaline Cements and concretes, Kiev, Ukraine, 1994.

DE ARAUJO, L. E. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com uso de resíduo de construção e demolição**. 2017. 49f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

DE LIMA L.C.M. **O uso do vidro reciclado como precursor de sistemas cimentantes geopoliméricos**. 2016. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2016.

DIAS N. A. A. **Geopolímeros: Contributos para a redução das eflorescências**. 2012. 84p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho Portugal 2012.

FALCÃO BAUER, L.A. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro. LTC 2013.

HARTMANN, E. A. **Argamassas geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros**. 2016. 54 f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

HIBBLER, R.C. **Resistência dos materiais**. 7 ed. SP. Pearson Prentice hall. 2010.

LEITE, J. M. **A influência da vermiculita em argamassa geopolimérica com adição de nanotitânia**. 2016. 49f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina.2016

LOBO, B. S. **A influência da substituição parcial do metacaulim por cinza de casca de arroz em argamassas geopoliméricas**. 2017. 45f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

LODI, A.L.G; GAMBIN G.R.; WEIT M.L. **Incorporação de resíduos vítreos na fabricação de blocos de concreto para a pavimentação intertravada.** 2014. 54f. Trabalho de conclusão de curso de Tecnólogo em gestão Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira-PR. 2014.

MACCARINI, H. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir do uso de metacaulim.** 2015. 59 f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA.**2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 128p. 2006.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H.. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete.** Conference on Constitution and Building Technol International, 2008.

PINTO, A.M. **Introdução ao estudo dos geopolímeros.** 2006. 88p. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 2006.

ROSSETTO, M. **Desenvolvimento de geopolímeros com a incorporação do lodo de estação de tratamento de água.** 2017. 65f.Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** 4 ed. SP. O nome da rosa.2008.

SKAF, T. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos.** 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

SHWITZKY, V. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas porosas a partir do uso de pó de lâmpada fluorescente e pó de alumínio.** 2017. 63f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes geopoliméricos. Uma alternativa ao cimento Portland?.** 2009. 3 p. Universidade do Minho, Portugal 2009.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. **Ligantes obtidos por activação alcalina.** 2009. 153 p. Universidade do Minho, Portugal, 2009.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado.** 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.